

Министерство образования и науки Российской Федерации
Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга

Институт вулканологии и сейсмологии
Дальневосточного отделения Российской академии наук

А. В. Викулин

СЕЙСМИЧНОСТЬ.

ВУЛКАНИЗМ.

ГЕОДИНАМИКА

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

Петропавловск-Камчатский
2011

УДК 550.34+551.21
ББК 26.891
В43

Рецензенты:

Н. И. Селиверстов,

доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой географии, геологии и геофизики КамГУ им. Витуса Беринга, заместитель директора по научной работе Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН;

И. В. Мелекесцев,

доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Викулин А. В.

В43 Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика: избранные труды / А. В. Викулин. — Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2011. — 407 с.

ISBN 978-5-7968-0411-7

В сборнике представлены основные работы, отражающие более чем 30-летнюю научную и 8-летнюю преподавательскую деятельность автора. В пяти частях приведена 41 публикация за 1980–2009 гг. Введение содержит описание основных этапов научной деятельности автора. В части I приведено 13 работ по исследованию сейсмического процесса в островных дугах и на окраине Тихого океана в целом. Рассмотрена волновая феноменологическая модель сейсмического процесса. В части II девять работ посвящены сейсмическому прогнозу, риску и проблеме максимального цунами. Исследования по долгосрочному сейсмическому прогнозу существенным образом дополняют методику С. А. Федотова путем введения в нее времени. Часть III включает статьи по вулканическому процессу на отдельном вулкане и в пределах дуги. В части IV объединены работы по геодинамике: по связи сейсмичности, вулканизма и тектоники, по чандлеровским колебаниям полюса планеты, по нелинейным волнам деформации. Рассмотрены вопросы энергетики геодинамического процесса и проблема вихревых структур в геологии. В части V приведены четыре работы по истории развития науки на Дальнем Востоке России. В заключении перечислены основные результаты, полученные автором в 1975–2009 гг., обозначены перспективные научные задачи, приведен полный список публикаций автора до 2009 г.

Сборник будет полезен студентам, аспирантам, преподавателям и специалистам-сейсмологам данного научного направления.

УДК 550.34+551.21
ББК 26.891

Фото на форзацах книги предоставлены
А. В. Сокоренко (ИВиС ДВО РАН)

ISBN 978-5-7968-0411-7

© Викулин А. В., 2011
© КамГУ им. Витуса Беринга, 2011
© Сокоренко А. В., 2011, фото

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| Предисловие | 7 |
| Введение | 8 |
| Часть I | |
| СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС | 13 |
| 1 (6*) <i>Викулин А. В.</i> Зоны молчания камчатских землетрясений (1982**) | 14 |
| 2 (13) <i>Викулин А. В., Ким Ч. У.</i> О магнитудной классификации землетрясений Камчатки, Курил и северо-восточной части Японии в 1911–1961 гг. (1983) | 28 |
| 3 (32) <i>Викулин А. В., Чернобай И. П.</i> О некоторых особенностях двух сильнейших куруло-камчатских землетрясений (1986) | 34 |
| 4 (43) <i>Баранов В. Б., Викулин А. В., Лобковский Л. И.</i> Мелкофокусная сейсмичность в тылу Курило-Камчатской островной дуги и ее связь с сильнейшими землетрясениями в зоне поддвига (1989)..... | 43 |
| 5 (55) <i>Викулин А. В.</i> Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса (1990) | 53 |
| 6 (67) <i>Викулин А. В.</i> Миграция очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений и их повторяемость (1992) | 57 |
| 7 (77) <i>Викулин А. В.</i> О природе австралийских землетрясений (1994) | 70 |
| 8 (110) <i>Викулин А. В., Сеньюков С. Л.</i> Миграция форшоков и афтершоков в очаге Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. с $M = 7,5-7,7$ (1998) | 79 |
| 9 (113) <i>Викулин А. В., Иванчин А. Г.</i> Ротационная модель сейсмического процесса (1998) | 85 |
| 10 (223) <i>Викулин А. В., Викулина С. А., Аргас Л.</i> Новые данные о Лиссабонском землетрясении 01.11.1755 г. (2007) | 96 |
| 11 (225) <i>Викулин А. В., Викулина С. А.</i> Афтершоки и эффект Доплера (2007)..... | 109 |
| 12 (230) <i>Викулин А. В., Викулина С. А., Водинчар Г. М.</i> Землетрясения-дуплеты и пары землетрясений — закономерность сейсмического процесса (2008)..... | 119 |
| 13 (233) <i>Викулин А. В.</i> Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды (2008)..... | 124 |

* Порядковый номер статьи в общем списке работ, приведенном в прил. 2.

** Год публикации статьи.

| | | |
|--|--|-----|
| Часть II | | |
| СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ, РИСК, ЦУНАМИ | | 137 |
| 14 | (34) <i>Викулин А. В.</i> Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова (1986) | 138 |
| 15 | (66) <i>Викулин А. В., Гусяков В. К., Титов В. В.</i> О природе максимального цунами (1992) | 150 |
| 16 | (68) <i>Викулин А. В.</i> Прогноз времени сильнейших землетрясений у берегов Камчатки и Северных Курил (1992) | 153 |
| 17 | (72) <i>Викулин А. В., Соломатин А. В., Семенец Н. В.</i> Сейсмический риск и вопросы страхования (1993) | 160 |
| 18 | (92) <i>Викулин А. В.</i> Южно-курильское землетрясение 4 октября 1994 г. как предвестник сильнейшего землетрясения на юге Камчатки (1996)..... | 166 |
| 19 | (111) <i>Викулин А. В.</i> Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. с $M = 7,5-7,7$ (Камчатка) в схеме долгосрочного сейсмического прогноза (1998) | 172 |
| 20 | (112) <i>Викулин А. В.</i> Природный риск Северной Камчатки (1998) | 178 |
| 21 | (138) <i>Викулин А. В.</i> Роль и значение долгосрочного прогноза (1999) | 189 |
| 22 | (206) <i>Викулин А. В., Мелекесцев И. В.</i> Уроки Хаилинского землетрясения 1991 г. ($M = 7,0$) и Олюторского 2006 г. ($M = 7,8$) землетрясений (2006)..... | 195 |
| Часть III | | |
| ВУЛКАНИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС | | 213 |
| 23 | (1) <i>Викулин А. В., Викулина С. А., Гордеев Е. И.</i> Исследование источника вулканического дрожания на заключительной стадии Южного прорыва Толбачинского извержения (1980) | 214 |
| 24 | (20) <i>Викулин А. В., Смирнов В. С.</i> Об электромагнитных эффектах и вулканическом дрожании на заключительной стадии Северного прорыва Толбачинского извержения 1975 г. (1984) | 217 |
| 25 | (21) <i>Викулин А. В.</i> О длине приповерхностной трещины, через которую осуществляется питание конусов Северного прорыва (1984) | 220 |
| 26 | (245) <i>Викулин А. В., Акманова Д. Р., Осипова Н. А.</i> Вулканизм как индикатор геодинамических процессов (2009)..... | 227 |

| | | | |
|--|------------|---|-----|
| Часть IV | | | |
| ГЕОДИНАМИКА | | | 231 |
| 27 | (108) | <i>Викулин А. В., Мелекесцев И. В.</i> Сейсмичность, вулканизм Тихого океана и вращение планеты (1997)..... | 232 |
| 28 | (146) | <i>Викулин А. В., Быков В. Г., Лунева М. Н.</i> Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса (2000) | 237 |
| 29 | (151) | <i>Викулин А. В., Кролевец А. Н.</i> Чандлеровское колебание полюса и сейсмотектонический процесс (2001)..... | 244 |
| 30 | (152) | <i>Викулин А. В., Дуда С.</i> Длиннопериодные движения при землетрясениях (2001) | 259 |
| 31 | (164) | <i>Викулин А. В.</i> Уединенные тектонические волны поворотной деформации как результат вращения планеты (2002) | 261 |
| 32 | (183) | <i>Викулин А. В.</i> Ротация и прогноз напряженного состояния недр Земли (2004)..... | 275 |
| 33 | (193) | <i>Тверитинова Т. Ю., Викулин А. В.</i> Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде (2005)..... | 281 |
| 34 | (199) | <i>Викулин А. В.</i> Ротационные упругие поля в твердых телах и вихревые решения проблемы Дирихле: тождественные системы? (2005) | 301 |
| 35 | (212) | <i>Викулин А. В., Тверитинова Т. Ю.</i> Энергия тектонического процесса и вихревые геологические структуры (2007)..... | 313 |
| 36 | (237) | <i>Викулин А. В., Тверитинова Т. Ю.</i> Моментная волновая природа геологической среды (2008)..... | 317 |
| 37 | (239) | <i>Викулин А. В.</i> Вихревые движения и структуры: физический и геологический аспекты проблемы (2008)..... | 323 |
| Часть V | | | |
| СЕЙСМОЛОГИЯ И НАУКА НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ РОССИИ..... | | | 333 |
| 38 | (22) | <i>Викулин А. В., Синельникова Л. Г.</i> Начало сейсмологических наблюдений на Камчатке (к70-летию сейсмостанции «Петропавловск») (1985)..... | 334 |
| 39 | (144, 234) | <i>Викулин А. В.</i> Сейсмические вехи (2000, 2008)..... | 340 |

| | | | |
|--|-------|---|-----|
| 40 | (238) | <i>Викулин А. В., Надольская Н. И.</i> История развития образования и науки в мире, России и на Камчатке (2008) | 356 |
| 41 | (242) | <i>Викулин А. В., Викулина С. А.</i> Экспедиция Рябушинского и становление сейсмологии и демократии на Камчатке (2009)..... | 365 |
| Заключение | | | |
| РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ЗАДАЧИ, ПРИЛОЖЕНИЯ | | | 373 |
| Результаты, полученные автором. Актуальные задачи и проблемы геодинамики | | | 374 |
| Приложение 1 | | | |
| <i>Викулин А. В.</i> Моментная геодинамика, гравитационные волны и сверхтекучесть геосреды | | | 384 |
| Приложение 2 | | | |
| Список опубликованных работ автора (1980–2009 гг.) | | | 395 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

Подготовленный к публикации сборник избранных трудов А. В. Викулина по сейсмологии, вулканизму и геодинамике окраины Тихого океана является как бы промежуточным итогом научной, научно-организаторской и преподавательской деятельности его автора в 1975–2009 гг., т. е. практически за три с половиной десятилетия. Однако сразу же следует отметить, что это лишь меньшая часть трудов А. В. Викулина, поскольку сюда не вошли его монографии «Физика волнового сейсмического процесса» и «Мир вихревых движений», учебные пособия для вузов «Введение в физику Земли», «Физика Земли и геодинамика», написанные им в соавторстве научно-популярные книги «Землетрясение будет завтра» и «К землетрясению без риска», а также многочисленные сборники научных трудов, изданные по инициативе и при активном участии автора.

Но даже без перечисленных публикаций видно, насколько велик вклад А. В. Викулина в исследованные им проблемы, а они весьма многочисленны и интересны — от фундаментальных до практических. Это четко отражено и в содержании основной части сборника, состоящей из пяти самостоятельных разделов: «Сейсмический процесс», «Сейсмический прогноз, риск, цунами», «Вулканический процесс», «Геодинамика», «Сейсмология и наука на Дальнем Востоке России». Причем многие материалы получены А. В. Викулиным не в кабинете, а в результате полевых исследований, которыми он не только руководил, но и сам непосредственно в них участвовал.

Так, в 1992–1995 гг. А. В. Викулин был участником и осуществлял руководство пионерными масштабными работами по исследованию сейсмичности Северной Камчатки, входившей тогда в состав Корякского автономного округа (КАО) РФ. Так, исследовались многие аспекты природной опасности на территории КАО: сейсмичность, цунами и палеоцунами, сейсмотектонические обвалы, динамика размыва береговой линии и др. Кроме того, была затронута проблема термальных источников. Там впервые были получены новые интересные научные результаты по многим проблемным вопросам, положено начало формированию «сейсмической инфраструктуры» на севере Камчатского края. В ходе работ в КАО была предложена и апробирована карта сейсмического районирования. Впоследствии она использовалась при составлении карты общего сейсмического районирования ОСР-1997 всей России, авторы которой в 2003 г. были удостоены Государственной премии РФ.

И. В. Мелекесцев,
доктор геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией
ИВиС ДВО РАН

Н. И. Селиверстов,
доктор геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе
ИВиС ДВО РАН

ВВЕДЕНИЕ

Научная деятельность автора началась в 1975 г., в должности младшего научного сотрудника Тихоокеанской сейсмологической экспедиции (ТСЭ) Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР, или лаборатории 106 ИФЗ АН СССР «Сейсмичность тихоокеанского пояса», базировавшейся в Петропавловске-Камчатском. Задача, поставленная перед автором научным руководителем С. А. Федотовым, была сформулирована широко, практически без ограничений: «Поиск и изучение закономерностей сейсмического режима с целью прогноза сейсмических событий». Решение этой задачи, а затем и проблемы роли и места сейсмического процесса в геодинамике стало для автора, по сути, стержнем его жизни — этой проблемой он активно занимается и в настоящее время. Можно сказать, что 1975 г. был в его жизни таким годом, который, выражаясь на языке физики, близок «резонансу в системе со многими степенями свободы».

К числу таких «степеней свободы» можно отнести изначально масштабную постановку научной задачи, допускающей импровизацию и даже «изобретение велосипеда»; возможность широкого и всестороннего обсуждения задачи на частых семинарах (ТСЭ + ИФЗ, Институт вулканологии) и многочисленных конференциях, проходивших в городах Дальнего Востока и других научных центрах СССР; оптимальные условия работы в ТСЭ, допускавшие работу и проживание «без выхода на улицу»; встречу с будущей женой и создание счастливой семьи; дружный коллектив ТСЭ, готовый в любую минуту оказать посильную помощь; конечно, Толбачинское извержение 1975–1976 гг., изучение которого, по сути, предопределило *геодинамическую* направленность всей последующей научной работы автора. Эти и другие обстоятельства позволили автору спокойно, без оглядки на различные обстоятельства, интуитивно определить правильное направление научной работы и успешно реализовывать его на протяжении уже более трех десятков лет.

К середине 1970-х гг. в сейсмологии были достаточно детально исследованы эпицентральные и афтершоковые области землетрясений в широком диапазоне магнитуд и энергетических классов в различных сейсмически активных регионах планеты. Было установлено существование двух типов эпицентральных областей землетрясений – областей высокой афтершоковой и зон молчания низкой сейсмичности [Моги, 1988; Соболев, 1993; Федотов, 2005; I.1, 6; 17; 19; 26; 27; II.14, 34; 35; 38; I.5, 55; 170]*. Такие минимаксные особенности в сейсмически активных регионах планеты использовались для прогноза мест расположения очагов будущих землетрясений, а в ряде случаев – и их времен в очагах. Высокая, до 70–90% [Соболев, 1993; Федотов, 2005; 2; 170], почти «детерминированная» оправдываемость таких прогнозов позволила автору предположить, что лежащие в их основе закономерности являются главными (фундаментальными) свойствами сейсмического режима [I.1, 6] и их можно использовать в том числе «для независимой проверки механических моделей очага землетрясений, основанных на представлениях физики разрушения» [I.5, 55].

Именно исходная постановка задачи поиска и исследования закономерностей сейсмического режима в такой плоскости и привела впоследствии автора к получению новых важных результатов. Использование представлений Ч. Цубои [1961], А. В. Пейве [1961] и М. А. Садовского [2004] об «элементарных сейсмических» объемах геофизической среды [2; I.1, 6; 16; 17; 26; 142, 149; IV.29, 151] и идеи С. А. Федотова [2005] о цикличности сейсмического режима в качестве фундаментальных концепций сейсмического режима оказалось весьма перспективным и привело автора к построению феноменологической волновой модели сейсмического процесса [I.5, 55].

Установленные автором закономерности сейсмического процесса рассматриваются в части I данного сборника.

* Римско-арабская и арабская цифры обозначают части настоящего сборника — соответственно порядковый номер работы согласно содержанию и порядковый номер статьи в общем списке статей автора в прил. 2 заключительной части сборника.

Прямым следствием феноменологической модели является волновой закон миграции сейсмических очагов — их вполне определенное размещение в пространстве сейсмического пояса и во времени. Исследование закономерностей миграции очагов землетрясений [35; 51; 52; I.5, 55; I.6, 67] позволило автору существенным образом дополнить методику долгосрочного прогноза С. А. Федотова [2005] — ввести в нее прогноз *времени* будущего землетрясения [2; 19; 29; 31; I.3, 32; 33; II.14, 34; 35; II.16, 68; II.18, 92; II.19, 111]. Параллельно прогнозным исследованиям автор совместно с коллегами рассмотрели некоторые вопросы сейсмического риска [II.17, 72; II.20, 112] и проблему максимальных цунами [II.15, 66]. Все эти работы составили содержание части II настоящего сборника.

Основные результаты частей I, II легли в основу кандидатской диссертации автора «Пространственные, временные и энергетические особенности сейсмического режима северо-западной части Тихого океана», защищенной им в 1988 г. [38].

В 1975 г. началось Толбачинское извержение; оно продолжалось в течение полутора лет и было вполне доступным для изучения, чем не мог не воспользоваться автор. В течение двух полевых сезонов 1975–1976 гг. им достаточно детально был обследован район извержения, включающий всю зону шлаковых конусов на юго-восточном склоне вулкана Плоский Толбачик. Результатом явилось написание нескольких работ [III.1, 1; III.2, 20; III.3, 21], в которых автором фактически была заложена основа оригинальной модели интенсивного эксплозивного извержения. Кратко, в тезисном виде, эта модель рассмотрена в работе [III.3, 21]; она неоднократно представлялась на семинарах и конференциях [10], но, к сожалению, так и не была доведена до «полновесной» публикации. Возможно, к этому вопросу автор вернется впоследствии. Работы вулканического направления являются содержанием части III настоящего сборника.

Полевые работы 1975–1976 гг., проведенные автором на Карымском вулкане и Толбачинском извержении, убедили автора в следующей мысли. Такие мощнейшие природные явления, как землетрясения и извержения вулканов, в течение миллионов лет происходящие вдоль Тихоокеанской окраины в пределах «параллельных» друг другу сейсмического и огненного колец, отстоящих друг от друга на несколько десятков километров, *не могут не быть взаимосвязанными*. Уже первые данные статистического анализа и моделирования мелкофокусной сейсмичности в тылу Курило-Камчатской дуги [I.4, 43] подтвердили такой вывод. Детальное исследование сейсмичности Австралии показало, что по сути весь австралийский материк — это плита, по своим сейсмическим свойствам близкая большому по размерам очагу землетрясения [I.7, 77]. Впоследствии эти и другие данные с неизбежностью привели автора к необходимости исследования сейсмического, вулканического и тектонического процессов «под одной крышей» волнового геодинамического планетарного процесса [IV.27, 108; 170; IV.33, 193; IV.35, 212; III.26, 245] и, как следствие, к защите в 2002 г. докторской диссертации «Физика волнового сейсмического процесса» [160], в которой были заложены основы нового направления «Волновая геодинамика».

Установление волновой природы сейсмического процесса, являющейся следствием взаимодействия сейсмофокальных *блоков*, поставило большое количество вопросов, получить ответы на которые в рамках существующих представлений о «*плоской*» физике очага, основанной на пяти «*трещинных*» принципах Ф. Рейда (см., например, [Соболев, 1993, с. 10]), оказалось невозможно. Главный из таких вопросов заключается в том, что в принципе невозможно в рамках представлений Ф. Рейда описать миграцию очагов землетрясений, которая, как показал еще в 1968 г. К. Моги [1988], распространяется на планетарные расстояния — на всю окраину Тихого океана, простирающуюся почти на 50 тыс. км, и на Альпийско-Гималайский пояс [I.9, 113]. В рамках общепринятых рейдовых представлений об очагах землетрясений в принципе невозможно также объяснить эффекты землетрясений-дуплетов [I.3, 32], удаленных форшоков и афтершоков [Прозоров, 1978; Кейлис-Борок, Кособоков, 1986], взаимосвязь сейсмического процесса с нутацией полюса и с собственными колебаниями Земли [IV.29, 151] и др.

Для объяснения такого рода «дальнодействующих» эффектов автором совместно с А. Г. Ивановичным была предложена принципиально новая модель процессов накопления напряжений в очагах землетрясений [I.9, 113]. В основу модели заложены представления о блоково-ротационной

среде А. В. Пейве [1961], Л. И. Седова [1973], М. А. Садовского [2004], В. Е. Панина [1998]. Блоки такой геосреды, по сути *объемы* земной коры и литосферы, не просто поворачиваются. Полагается, что они имеют собственный момент — *спин*. Вращение Земли вокруг своей оси приводит к момент-моментному взаимодействию упругих полей, образующихся вокруг поворачивающихся блоков, и, как следствие, к генерации в литосфере и мантии *дальнодействующих* полей напряжений с моментом силы [IV.37, 239]. Такие поля напряжений, несомненно, являются «отражением» и / или «генератором» *геодинамической жизни всей планеты*.

Возраст Земли соизмерим с жизнью Вселенной. Наша планета в составе Солнечной системы и всей Галактики побывала в пределах значительной части Метагалактики, подвергаясь при этом интенсивным кометным бомбардировкам, различным облучениям в результате взрывов и коллапсов звезд и звездных скоплений, воздействию переменных гравитационных полей. И такие воздействия на Землю, в том числе неоднократно приводящие к практически полному уничтожению всего живого на планете, в соответствии с данными работы [Фэйрстоун, Уэст, Уэрвик-Смит, 2008] неоднократно осуществлялись в прошлом и ожидаются в будущем. «Бурная» и заведомо «остросюжетная» жизнь Земли в течение всего гигантского по продолжительности отрезка времени отражена в геологических процессах, содержащих убедительные факты, необходимые для понимания всех протекающих на Земле процессов [208], описанием которых занимается *геодинамика* [Артюшков, 1979; Хаин, Ломизе, 2005].

Наиболее мощными процессами, которые рассматриваются в совокупности и в течение всего геологического периода могут в наиболее общем виде отражать *геодинамическое* состояние Земли, являются сейсмичность, вулканизм и тектоника. Автору совместно с И. В. Мелекесцевым, Т. Ю. Тверитиновой, Г. М. Водинчаром, Д. Р. Акмановой и Н. А. Осиповой впервые удалось, по-видимому, показать существование взаимосвязей между этими процессами [IV.27, 108; IV.33, 193; III.26, 245] и увязать их с вихревыми геологическими структурами и геофизическими движениями [IV.34, 199; IV.36, 237; IV.37, 239].

Следует отметить, что построение геодинамической концепции, в рамках которой удастся описать и объяснить основные свойства планетарной сейсмичности, вулканизма и тектоники, связано именно с использованием представлений о геосреде как блоковой и вращающейся. В настоящее время это направление автор совместно с коллегами интенсивно развивает. Поэтому при подготовке сборника к печати две работы этой части [IV.30, 152; IV.37, 239] автор сопроводил краткими приложениями, дополняющими ранее опубликованные работы последними данными. Важный вывод, имеющий *геодинамическое* значение, был сформулирован автором также в результате его преподавательской работы на кафедре географии, геологии и геофизики КамГУ им. Витуса Беринга в 2002–2009 гг.

Начало преподавательской деятельности происходило практически при полном отсутствии учебных пособий. Поэтому первый вариант учебного пособия «Физика Земли», изданного в 2004 г. [185], представлял собой компиляцию наиболее известных учебников за 1960–1970 гг., в которую автор включил некоторые новые результаты из российских учебных пособий последних лет и своих научных разработок. Надо отметить, что такое «включение» вызвало определенную критику и непонимание. Да и самому автору это удалось осуществить с большим трудом, поскольку новые данные и идеи плохо состыковывались с уже устоявшимися физическими представлениями о предмете, базирующимися в основном на классических книгах Г. Джеффриса [1960], Б. Гутенберга [1963], В. А. Магницкого [1965; 2006], Ф. Стейси [1972], М. Бота [1974], К. Е. Буллена [1978] и др.

Многолетняя научно-преподавательская работа автора над новым вариантом учебного пособия, опубликованного в 2009 г. [240], показала, что увязать полученные в последние десятилетия данные с классической схемой построения предмета Джеффриса — Гутенберга — Магницкого — Стейси вряд ли удастся. Например, в такую физическую схему никак не вписываются ни вихревые геологические структуры, впервые описанные Ли Сыгуаном, ни «непрямолинейные поворотные» геофизические движения, подробные и обстоятельные обзоры которых приведены в коллективных монографиях, изданных по инициативе и при активном участии

автора. Такой «педагогический» вывод в совокупности с научными результатами последних лет [Вихри, 2004; Ротационные, 2007; IV.32, 183; IV.34, 199; IV.37, 239] послужил для автора веским основанием для разработки нового *геодинамического*, по сути «метафизического», подхода к изучению планетарных процессов [IV.27, 108; 142; 143; 149; 160; 178; 179; 186; 187; 190; IV.33, 193; 201; 205; IV.35, 212; 213; V.39, 234; IV.36, 237; 240; 243; 244; 246; 247; 250; 251].

Работы геодинамического направления являются содержанием части IV настоящего сборника. Здесь же приведены и работы автора по тектоническим (геодинамическим) волнам [IV.31, 183; IV.37, 239], в том числе написанная совместно с В. Г. Быковым и М. Н. Луновой [IV.28, 146], а также совместно с С. Дудой (S. Duda) — по длиннопериодным движениям [IV.30, 152].

В части V приведены статьи автора, которые посвящены истории развития сейсмологии и науки на Дальнем Востоке России. Написание этих работ в определенной степени было стимулировано преподаванием автором предметов «Основы научных исследований» и «Концепции современного естествознания» в 2006–2009 гг. на кафедре физики в Камчатском государственном техническом университете. Много интересных данных об истории становления и развития естественнонаучных представлений можно также найти в учебном пособии [240] и в книге «Мир вихревых движений» [234], получившей на втором региональном Дальневосточном конкурсе в 2009 г. диплом «Лучшее научное издание в номинации „Естественные науки“».

В заключении перечисляются полученные автором основные научные результаты, формулируются вытекающие из них перспективные задачи и проблемы геодинамики, приводится полный список всех опубликованных работ автора за 1980–2009 гг., включающий 258 наименований.

Автор выражает благодарность КамГУ им. Витуса Беринга в лице ректора Н. Г. Ильинской и проректора по научной, инновационной и международной деятельности Ю. О. Новик за издание настоящего сборника. Глубокую признательность автор выражает С. А. Федотову за приглашение на Камчатку, постановку научной задачи и создание благоприятных условий для работы; рецензентам Н. И. Селиверстову и И. В. Мелекесцеву за прочтение сборника, многочисленные дискуссии и обсуждения, иногда достаточно «острые», геодинамической «составляющей» представленной концепции; И. Л. Беловой, С. А. Викулиной и В. М. Нановскому, оказавшим неоценимую помощь при составлении макета настоящего сборника. Автор глубоко благодарен всем соавторам статей за совместную творческую деятельность в разные годы — без такой содержательной работы не было бы и самого сборника.

А. В. Викулин

доктор физико-математических наук,
профессор КамГУ им. Витуса Беринга,
ведущий научный сотрудник ИВиС ДВО РАН

Литература

1. *Артюшков Е. В.* Геодинамика. — М.: Наука, 1979. — 328 с.
2. *Бот М.* Внутреннее строение Земли. — М.: Мир, 1974. — 376 с.
3. *Буллен К. Е.* Плотность Земли. — М.: Мир, 1978. — 442 с.
4. *Вихри в геологических процессах* / ред. А. В. Викулин. — Петропавловск-Камчатский: КГПИ, 2004. — 297 с.
5. *Владимиров Ю. С.* Метафизика. — М.: Бином: Лаборатория знаний, 2009. — 568 с.
6. *Гутенберг Б.* Физика земных недр. — М.: Иностран. лит., 1963. — 263 с.
7. *Джеффрис Г.* Земля, ее происхождение, история и развитие. — М.: Иностран. лит., 1960. — 485 с.
8. *Кейлис-Борок В. И., Кособоков В. Г.* Периоды повышенной вероятности возникновения для сильнейших землетрясений мира // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. — М.: Наука, 1986. — С. 48–57.
9. *Магницкий В. А.* Внутреннее строение и физика Земли. — М.: Недра, 1965. — 380 с.
10. *Магницкий В. А.* Внутреннее строение и физика Земли / ред. А. О. Глико. — М.: Наука, 2006. — 390 с.
11. *Мози К.* Предсказание землетрясений. — М.: Мир, 1988. — 382 с.
12. *Панин В. Е.* Основы физической мезомеханики // Физ. мезомеханика. — 1998. — № 1. — С. 5–22.
13. *Пейве А. В.* Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. Геологическая. — 1961. — № 3. — С. 36–54.
14. *Прозоров А. Г.* О пониженной вероятности сильных толчков в некоторой пространственно-временной окрестности сильных землетрясений мира // Вопр. прогноза землетрясений и строения Земли. Вычислительная сейсмология. — Вып. 11. — М.: Наука, 1978. — С. 35–47.
15. *Ризниченко Ю. В.* Проблемы сейсмичности: избр. тр. — М.: Наука, 1985. — 408 с.
16. *Ротационные процессы в геологии и физике* / ред. Е. Е. Милановский. — М.: КомКнига, 2007. — 528 с.
17. *Садовский М. А.* Геофизика и физика взрыва: избр. тр. — М.: Наука, 2004. — 440 с.
18. *Соболев Г. А.* Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука, 1993. — 313 с.
19. *Стейси Ф.* Физика Земли. — М.: Мир, 1972. — 344 с.
20. *Федотов С. А.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. — М.: Наука, 2005. — 302 с.
21. *Фэйрстоун Р., Уэст А., Уэрвик-Смит С.* Цикл космических катастроф. Катаклизмы в истории цивилизации. — М.: Вече, 2008. — 480 с.
22. *Хаин В. Е., Ломизе М. Г.* Геотектоника с основами геодинамики: учеб. — М.: КДУ, 2005. — 560 с.
23. *Цубои Ч.* Энергия землетрясений, объем гипоцентральной области, площадь афтершоков и прочность земной коры // Слабые землетрясения / ред. Ю. В. Ризниченко. — М.: Иностран. лит., 1961. — С. 160–164.
24. *Bullen K. E.* The Earth's density. — London: Chapman and Hall, 1975.
25. *Gutenberg B.* Physics of the Earth's interior. — New York, London: Academic Press, 1959.
26. *Stacey F. D.* Physics of the Earth. — New York; London; Sydney; Toronto: J. Wiley&Sons, Inc., 1969.
27. *Tsuboi C.* J. of Physics of the Earth. — 1956. — Vol. 4. — № 2. — P. 63.

ЧАСТЬ I

**СЕЙСМИЧЕСКИЙ
ПРОЦЕСС**

А. В. Викулин**ЗОНЫ МОЛЧАНИЯ КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ****Публикуется в порядке дискуссии***Постановка задачи**

В настоящее время существует несколько замкнутых отработанных методик изучения эпицентральных областей достаточно сильных землетрясений. Конечная цель во всех случаях одна — физически обоснованное решение проблемы прогноза землетрясений. Однако пути достижения этой цели различны.

Так, для решения задачи прогноза катастрофических курило-камчатских землетрясений С. А. Федотову [1] достаточно было выделить класс катастрофических землетрясений путем доказательств их неслучайного распределения: каждому землетрясению из выделенного класса поставить по известному правилу очаг — область максимальной сейсмичности; определить закон взаимодействия очагов — тенденцию к непересечению друг с другом; в заключение показать, что общепринятые представления о процессе землетрясения как накоплении и последующем сбросе упругих напряжений не противоречат чисто сейсмической схеме прогноза.

По-другому решалась задача прогноза сильных Гармских землетрясений. Во-первых, землетрясения, «возможно, во всем диапазоне их энергий» [2], были поставлены в соответствие области сейсмического затишья, которые согласно теоретическим и лабораторным представлениям, с одной стороны, сами по себе уже являются фактом динамического взаимодействия очаговых областей друг с другом [2, 3], а с другой — представляют весьма общую особенность процесса разрушения [2]. Во-вторых, было показано, что эпицентральные зоны сильных землетрясений тяготеют к зонам с переходным сейсмическим фоном [4], но простирание осевых линий сейсмического фона контролируется положением и простиранием разломов [5].

Иначе решалась задача прогноза сильных землетрясений Байкальского рифта. Во-первых, было показано, что афтершоковые последовательности суть не случайные события [6, 7]. Отсюда следует, что их параметры: линейные размеры, характерное время, сила — определяются главным событием [8]; теоретическое и лабораторное изучение процесса разрушения может дать представление о физике реального землетрясения [7]. Затем было установлено, что афтершоковые области формируются в соответствии с полем напряжений в земной коре [9] и большей своей осью ориентированы параллельно основным элементам рельефа [10]. В заключение выделялись зоны затишья — области подготовки, параметры которых также определяются главным толчком, причем афтершоковая область является частью области подготовки [8].

Общей чертой всех рассмотренных схем является способ решения: изучение распределения слабых событий в эпицентральной области достаточно сильных землетрясений. Пути же решения в аспекте изучения физики явления и свойств среды принципиально различны.

Схема С. А. Федотова дает чисто сейсмологическое решение проблемы прогноза. Для ее обоснования не требуется физических соображений относительно как самого процесса землетрясения, так и строения среды. Поэтому успехи прогноза [11, 12] необходимо рассматривать не как подтверждение верности существующих в настоящее время физических представлений, но как экспериментально обоснованный фундамент для построения физической теории землетрясений и строения среды.

Две другие схемы решения аналогичной проблемы, наоборот, различаясь в деталях, едины в основном: они существенным образом опираются на имеющиеся представления как о процессе землетрясения, так и о строении среды. Необходимость выбора именно такого пути решения объясняется тем, что авторам не удалось в чистом виде (исключительно на сейсмологическом материале) показать неслучайность распределения землетрясений внутри определенного класса и определить закон взаимодействия областей, соответствующих этим землетрясениям. Преимущества схемы С. А. Федотова очевидны.

* 1 (6). Физика очага и предвестники землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1982. С. 255–281.

Плотность событий, содержащихся в Камчатском каталоге, довольно высока, что позволяет нам, используя схему С. А. Федотова, достаточно детально исследовать эпицентральные области сильных землетрясений. Размеры их, согласно данным, полученным на Гармском и Байкальском полигонах, существенно превосходят точность, которую может обеспечить наш каталог.

Следует заметить, что область подготовки, или область затишья [8], и область запрета [2] есть области, в которых отсутствуют землетрясения определенных энергетических классов. Не внося изменений в методику работы, такие же, по сути, области мы будем искать и исследовать в эпицентральных областях сильных камчатских землетрясений. Однако поскольку по линейным размерам, форме, характеру молчания наши области будут существенно отличаться и от областей запрета, и от областей затишья (в меньшей степени), мы решили ввести новый термин.

Под зоной молчания мы будем понимать расположенный в эпицентральной области исследуемого землетрясения объем, внутри которого в течение определенного времени нет ни одного события определенных энергетических классов, причем эпицентр исследуемого землетрясения может находиться либо внутри объема, либо на его границе, но не снаружи объема. Зоны молчания, внутри которых будут отсутствовать землетрясения всех энергетических классов, даваемых каталогом, будем называть сейсмическими дырами, или просто дырами.

Исходный материал

Свойства каталога. В настоящей работе использовался каталог детальных наблюдений за 1964–1976 гг. Энергетическая классификация землетрясений осуществлялась по шкале $K_{S1,2}^{\Phi 68}$. Индексы для сокращения записи в дальнейшем опускаются. Значения K приводятся в каталоге с шагом $\Delta K = 0,1$. Координаты эпицентров в пределах региональной сети определены с ошибкой в среднем около 10 км и максимально 20–25 км за периметром сети камчатских станций. Однако, как показывает анализ серий землетрясений с близкими координатами, среднеквадратичное отклонение координат эпицентров от центра роя не превышает 5 км [14].

Камчатский региональный каталог в течение 1964–1976 гг. составлялся по неизменной методике и на основе данных постоянной, практически не изменяющейся во времени сети станций. Это позволяет считать относительную ошибку Δ в определении координат эпицентров на небольших площадках в течение не очень больших времен также не превышающей 5 км. Другими словами, каталог позволяет детально исследовать небольшие пространственно-временные объемы, линейные размеры которых превышают относительную ошибку определения координат эпицентров $\Delta = 5$ км.

В каталоге координаты эпицентров даются с шагом $0,01^\circ$, что соответствует линейному расстоянию в 1 км. С другой стороны, при графических построениях «от руки» можно надежно обеспечить точность ≈ 1 мм. Из этих соображений представляется разумным выбор рабочего масштаба — 1 мм: 1 км = 1 : 1 000 000. В этом масштабе проводились все графические построения настоящей работы, которые осуществлялись вручную.

Характеристика сейсмоактивного объема. Этот термин введен А. А. Гусевым и Л. С. Шуминой [15]. Ими же вслед за П. И. Токаревым [16], на основе данных детальных наблюдений, были исследованы свойства сейсмоактивного объема Камчатки, которые мы кратко перечислим далее.

Гипоцентры практически всех землетрясений Камчатки расположены в слое толщиной 70–100 км. Западная, прибрежная граница слоя (рис. 1) четко фиксируется и расположена примерно одинаковым образом по отношению к оси вулканов. Восточная, океаническая граница сейсмоактивного слоя нерезкая и проходит в районе глубоководного желоба. На глубинах больше 100 км сейсмоактивный объем имеет вид относительно тонкого слоя (≈ 20 км), который под углом уходит под материк. Граница сейсмоактивного объема во времени устойчива.

Основная масса ($\sim 90\%$) гипоцентров землетрясений расположена на глубинах до 70 км [24]. Поэтому будем рассматривать только землетрясения с $H < 70$.

Уровень надежной регистрации. В целом по Камчатке неглубокие землетрясения энергетических классов $K \geq 10$ регистрируются без пропусков. Уровни надежной регистрации землетрясений с $K = 8$ и $K = 9$, взятые из работы [17], изображены на рис. 1. В районе п-ова Шипунский (географические названия см. на рис. 4) без пропуска регистрируются землетрясения с $K \geq 7,5$.

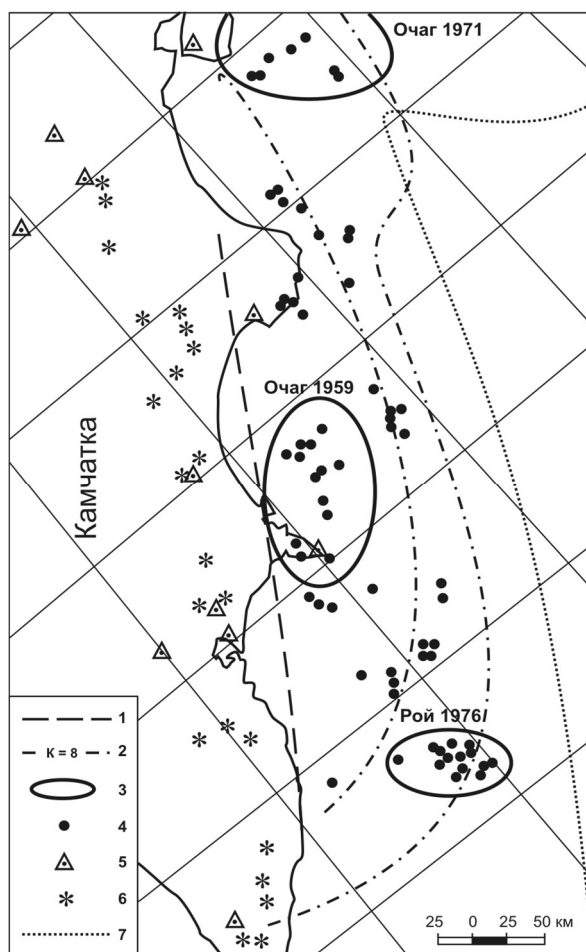


Рис. 1. Карта Камчатского региона:

1 — западная граница сейсмоактивного объема; 2 — граница уверенной регистрации землетрясений с $K \geq 8$; 3 — область очага, роя; 4 — эпицентры землетрясений с $K \geq 12,5$, $H \leq 70$; 5 — сейсмостанции; 6 — вулканы; 7 — ось глубоководного желоба

Сейсмичность Камчатки подробно описывается в ежегодных сборниках «Землетрясения в СССР» и других статьях, помещенных в многочисленных тематических сборниках. Кратко остановимся на наиболее характерных ее чертах за период исследования (1964–1976 гг.).

Наиболее активными были районы, прилегающие к полуостровам. В районе п-ова Шипунский (область очага 1959 г.) сейсмическая активность $A_{10} \equiv A$ на протяжении всего интервала исследования лежала в пределах $1 \leq A_{\max} \leq 5$, равняясь в среднем за весь период исследования $A_{\text{ср}} \approx 1,5$. В районе п-ова Кроноцкий $A_{\text{ср}} \approx 1,5$, $1 \leq A_{\max} \leq 10$.

В части сейсмоактивного слоя $52^\circ < \varphi$ [с. ш.] $< 54^\circ$, расположенной между уровнями уверенной регистрации $K = 8$ и $K = 9$, сейсмическая активность на протяжении всего времени оставалась на более низком уровне: $A_{\text{ср}} \approx 0,5$, $0,25 \leq A_{\max} \leq 2$.

Для Южной Камчатки ($\varphi < 52^\circ$) характерны такие значения: $A_{\text{ср}} \approx 1$, $0,5 \leq A_{\max} \leq 10$.

Камчатский регион неоднороден и по характеру сейсмичности. В период исследования в области очага 1959 г. сильные и слабые землетрясения не были связаны роевыми последовательностями; в области п-ова Кроноцкого уже некоторым отдельным землетрясениям сопутствовали слабые рои. Напротив, в районе между изолиниями уверенной регистрации $K = 8$ и $K = 9$ практически все сильные землетрясения сопровождалось интенсивными роями, причем в рое происходило несколько ($N = 4$) сильных землетрясений. Еще более интенсивные рои имели место в Южной Камчатке. Так, в рое 1976 г. произошло $N = 14$ сильных событий [19].

Плотность регистрируемых событий, очевидно, также неодинакова по всей Камчатке. Число землетрясений n энергетического класса $K \geq K_{\min}$ (K_{\min} регистрируются без пропусков), попадающих в площадку ΔS [км²] за время Δt [год], определится из равенства

$$n = A \frac{10^{-\gamma(K_{\min} - \kappa 10)}}{1 - 10^{-\gamma}} \cdot \frac{\Delta S \cdot \Delta \tau}{1000 \text{ км}^2 \cdot 1 \text{ год}},$$

где $K_{10} = 10$; γ — угол наклона графика повторяемости. При среднем для Камчатки $\gamma \approx 0,43$ [1], $\Delta S \approx 100 \text{ км}^2$, $\Delta \tau \approx 2$ года (параметры зоны молчания и дыры сильного землетрясения), $7,5 \leq K_{\min} \leq 9$, $0,5 \leq A_{\text{ср}} \leq 1,5$ значения n определяются из табл. 1.

Таблица 1

Зависимость количества землетрясений, попадающих в площадку 100 км^2 в течение двух лет, от $A_{\text{ср}}$ и K_{\min}

| $A_{\text{ср}}$ | K_{\min} | | | |
|-----------------|--------------------------|---|-----|-----|
| | 7,5 | 8 | 8–9 | 9 |
| | Количество землетрясений | | | |
| 0,5 | 2 | 1 | 0,7 | 0,5 |
| 1,0 | 4 | 2 | 1 | 0,8 |
| 1,5 | 6 | 4 | 2 | 1 |

Прямой подсчет землетрясений всех энергетических классов, эпицентры которых попадают в область очага 1959 г., за интервал времени 1964–1976 гг. показывает, что минимальное, среднее и максимальное число землетрясений, попадающих внутрь площадки $\Delta S \approx 100 \text{ км}^2$ в течение $\Delta \tau \approx 2$ года, равно соответственно 2, 4 и 6.

С наибольшей плотностью камчатские землетрясения регистрируются в районе п-ова Шипунский (в области очага 1959 г.). Поэтому изучение эпицентральных областей землетрясений естественно начать именно с этого района.

Свойства сейсмических дыр землетрясений с $K \approx 10,5$

Для удобства район исследования был ограничен областью очага катастрофического землетрясения 1959 г. с $M = 7,6$.

Техническая сторона исследования эпицентральных областей заключалась в следующем. В окрестности эпицентра исследуемого землетрясения радиусом ~ 1 наносились события всех энергетических классов, содержащихся в каталоге детальных наблюдений. Оказалось, что в эпицентральной зоне в широком диапазоне энергетических классов существует область, содержащая эпицентр исследуемого землетрясения внутри или на своей границе, в которую в течение определенного времени как до, так и после главного землетрясения не попадает ни одно событие каталога. Такие области уже были названы дырами. Время, в течение которого существует дыра, будем называть временем жизни дыры. При расширении временной окрестности исследуемого землетрясения в любую сторону дыра постепенно заполняется событиями.

Число землетрясений быстро возрастает в сторону уменьшения энергетического класса. Поэтому исследовались эпицентральные зоны всех землетрясений с $K \geq 12$ и выборочно (случайным образом) землетрясений с $10,5 \leq K \leq 11,5$. Данные о количестве исследуемых землетрясений в зависимости от энергетического класса представлены в табл. 2, где N_1 — число всех землетрясений данного энергетического интервала, попадающих в область очага 1959 г.; N_2 — число землетрясений, эпицентральные области которых исследовались.

Таблица 2

Зависимость количества исследуемых землетрясений от K

| Энергетический класс | K | 10,5 10,3–10,7 | 11,0 10,8–11,2 | 11,5 11,3–11,7 | 12,0 11,8–12,3 | 13,2 12,4–14,0 |
|--------------------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Количество землетрясений | N_1 | 67 | 26 | 18 | 17 | 16 |
| | N_2 | 15 | 6 | 9 | 17 | 16 |
| $N_2/N_1, \%$ | | 25 | 25 | 50 | 100 | 100 |

Эпицентральные области по характеру распределения в них событий каталога можно классифицировать по четырем типам (рис. 2).

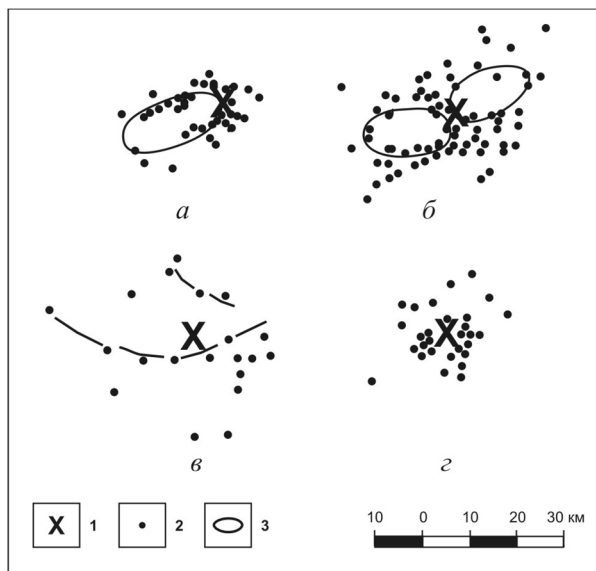


Рис. 2. Классификация сейсмических дыр на примере землетрясений в области очага 1959 г.:

a — однозначные дыры, $n = 1$, $K = 13,0$, $H = 30$ (28.06.1970 г.); *б* — неоднозначные дыры, $n > 1$; $K = 12,5$, $H = 30$ (02.01.1969 г.), $n = 2$; *в* — дважды неоднозначные дыры, $n \rightarrow \infty$, $K = 12,5$, $H = 40$ (08.06.1969 г.); *з* — нулевые дыры, $n = 0$, $K = 10,7$, $H = 30$ (09.06.1973 г.)

К первому типу отнесены эпицентральные области, в которых дыра выделяется однозначным образом (рис. 2, *a*). Однозначные дыры содержатся только в эпицентральных областях землетрясений с $K \geq 12,4$. В области очага 1959 г. расположено 5 однозначных дыр, всего их по Камчатке — 8. Все однозначные дыры по форме являются эллипсами с отношением длин осей $\zeta = l/d \approx 2$, причем эпицентр главного толчка располагается на пересечении границ дыры с большой осью (лишь в одном случае — с меньшей).

Ко второму типу принадлежат эпицентральные области, эллиптические дыры в которых выделяются неоднозначным образом (рис. 2, *б*). Число способов, с помощью которых можно построить эллиптическую дыру, будем называть параметром неоднозначности и обозначать через n . Дыры, у которых наибольший размер превышает среднюю длину для данного энергетического диапазона на величину $2\sigma_l$, назовем незамкнутыми (здесь и везде в дальнейшем σ обозначает среднеквадратическое отклонение). В случае, когда и меньший размер дыры больше среднего на величину $2\sigma_d$, дыру назовем дважды незамкнутой ($n \rightarrow \infty$), а соответствующую эпицентральную область отнесем к третьему типу (рис. 2, *в*).

Четвертый тип включает нулевые дыры в том случае, когда в эпицентральной области во временной окрестности исследуемого землетрясения, меньшей среднего времени жизни дыры, в данном энергетическом диапазоне нельзя выделить область, линейные размеры которой больше $\Delta = 5$ км (рис. 2, *з*). Ни одну эпицентральную область землетрясений с $K \geq 12,4$ ($N = 16$) нельзя отнести к этому типу, в то время как $\approx 50\%$ более слабых землетрясений каждого энергетического диапазона (класса) имеют эпицентральные области с нулевыми дырами (зависимость $n_0(K)$ см. на рис. 3, *з*). Рассмотрим параметры дыр как функции энергетического класса (рис. 3):

I. Зависимость $\zeta(K)$ (рис. 3, *a*). Параметр $\zeta = l/d$, равный отношению длин осей эллипса, характеризует форму дыры (только для замкнутых дыр). Из графика видно, что параметр $\zeta = 2$ не зависит от величины энергетического класса K . Среднеквадратичное отклонение несколько увеличивается в сторону уменьшения K .

II. Зависимости $l(K)$ и $\sigma_l(K)$ (рис. 3, *б*). Как и в предыдущем случае, учитывались данные только замкнутых дыр. Считалось, что для нулевой дыры $l = 0$.

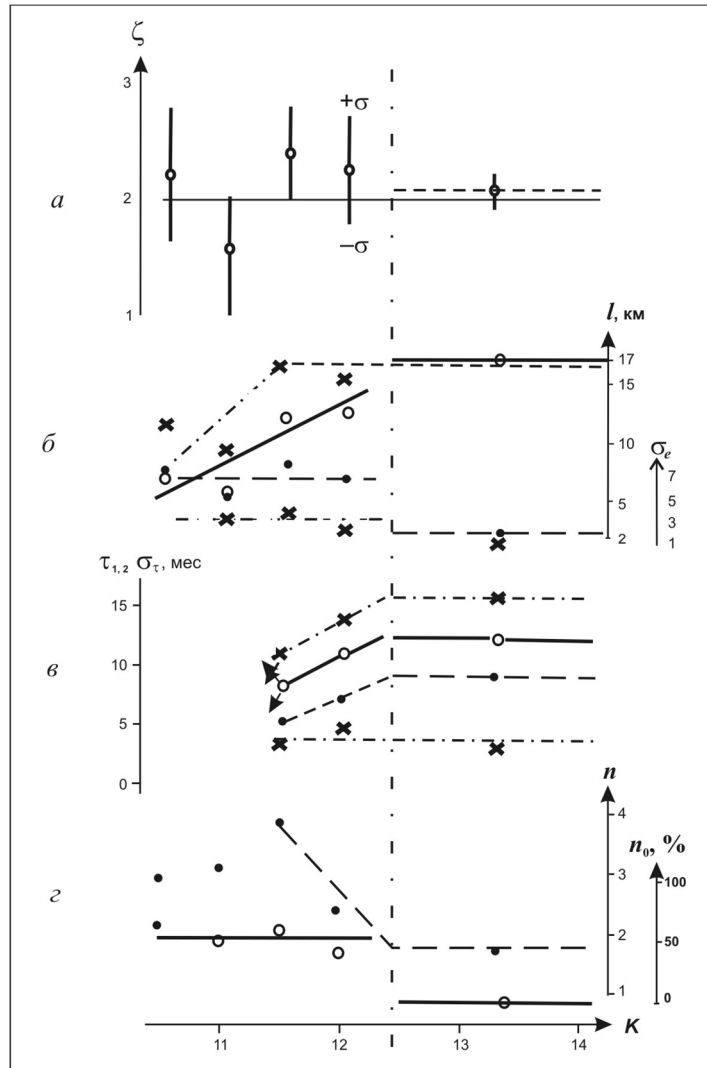


Рис. 3. Свойства сейсмических дыр внутри очага 1959 г.:

a — зависимость $\zeta(K)$; $б$ — зависимость $l(K)$ и $\sigma_l(K)$; $в$ — зависимость $\tau_1(K)$ и $\sigma_\tau(K)$; $г$ — зависимость $n(K)$ и $n_0(K)$

Зависимость $l(K)$ практически постоянна в диапазоне $K \geq 12,4$ и заметно убывает в сторону уменьшения энергетического класса в диапазоне $10,5 \leq K < 12,4$ (сплошная линия).

Зависимость $\sigma_l(K)$, представленная пунктирной линией, слабо меняется в диапазонах $10,5 \leq K < 12,4$ и $12,4 \leq K \leq 14,0$, изменяясь скачком в точке $K = 12,4$. Для слабых землетрясений она примерно в четыре раза больше, чем для сильных.

Следует отметить, что в точке $K \approx 10,5$ длина большей оси дыры сравнивается с ошибкой каталога $\Delta = 5$ км, т. е. фактически становится нулевой. По этой причине не исследовались эпицентральные зоны более слабых землетрясений. Примерно при том же значении энергетического класса ($K \approx 10,8$) длина большей оси дыры сравнивается со своим среднеквадратичным уклонением.

Если в расчетах не учитывать нулевые дыры, то вид зависимостей $l(K)$ и $\sigma_l(K)$ в диапазоне $10,5 \leq K < 12,4$ изменится. Новые значения обозначены крестами, а соответствующие графики — штрихпунктирной линией. Параметр l в этом случае остается практически постоянным до $K \approx 11,5$, затем круто падает до прежнего значения в точке $K \approx 10,5$; среднеквадратичное уклонение $\sigma_l(K)$ практически постоянно во всем диапазоне K .

III. Зависимости $\tau_1(K)$ и $\sigma_\tau(K)$ (рис. 3, в). Дыра существует как до момента времени (τ_1), так и после (τ_2), когда происходит главное событие, т. е. время жизни дыры $\Delta\tau = \tau_1 + \tau_2$.

Оказывается, независимо от энергетического класса выполняется соотношение $\tau_1 \approx \tau_2$, т. е. главное событие происходит примерно в середине интервала $\Delta\tau$.

С учетом нулевых дыр ($\tau_1 = 0$) зависимость $\tau_1(K)$ представлена сплошной линией. В интервале $11,5 \leq K \leq 14,0$ зависимость $\tau_1(K)$ постепенно уменьшается в сторону меньших K . В отличие от зависимости $l(K)$ здесь говорить о постоянстве $\tau_1(K)$ в интервале $12,4 \leq K \leq 14,0$ приходится более осторожно из-за гораздо больших среднеквадратичных отклонений σ_τ . В левой окрестности точки $K \approx 11,5$ зависимость $\tau_1(K)$ перестает быть однозначной: для дыр характерно либо очень малое (нулевое), либо очень большое время жизни, гораздо больше времени жизни однозначной дыры. Схематично неоднозначность показана двумя расходящимися вверх и вниз стрелочками. В этой связи заметим, что тенденция к неоднозначности зависимости $l(K)$ тоже имеется, но выражена более слабо.

На рис. 3 крестами отмечены значения $\tau_1(K)$ и $\sigma_\tau(K)$ в интервале $K < 12,4$ без учета нулевых дыр, а в интервале $K \geq 12,4$ для однозначных дыр. Видно, что зависимость $\tau_1(K)$ в этом случае изменилась только по уровню; значительно уменьшилось и стало практически постоянным в пределах всего интервала среднеквадратичное отклонение. Зависимость $\tau_1(K)$ без учета нулевых дыр близка к зависимости временного предвестника [20], и в промежуточной точке интервала $13 \leq K \leq 14$ обе зависимости имеют значение $\tau_1 \approx 1$ год.

IV. Зависимости $n(K)$ и $n_0(K)$ (рис. 3, з). Параметр n_0 (сплошная линия) характеризует долю нулевых дыр: $n_0 = N_0/N_2 \cdot 100\%$, где N_0 — число землетрясений данного энергетического диапазона, в областях которых содержатся нулевые дыры (значение N_2 см. в табл. 2). В диапазоне $10,5 \leq K \leq 12,4$ примерно 50% землетрясений каждого энергетического класса имеют нулевую дыру, в то время как в диапазоне $K \geq 12,4$ нет ни одного события с нулевой дырой.

Параметр неоднозначности n увеличивается в сторону слабых событий. В диапазоне энергетических классов $10,5 \leq K \leq 12,4$ из 47 исследованных эпицентральных областей (см. табл. 2) лишь одно землетрясение с $K = 11,9$ (22.04.1974 г.) имеет однозначную дыру, причем в этом случае эпицентр расположен существенно внутри дыры, а не на ее границе. В диапазоне $12,4 \leq K \leq 14,0$ из 16 землетрясений 5 имеют однозначную дыру (рис. 6). При подсчете значений n не принимались во внимание дважды незамкнутые дыры, которые, будучи исключением для более сильных землетрясений, с уменьшением K становятся, как уже было замечено, все более закономерными. Как следствие, для землетрясений с $K < 11,5$ наблюдается уменьшение параметра неоднозначности n .

Обращает на себя внимание общая закономерность рассмотренных здесь зависимостей: оставаясь практически постоянными в диапазоне $12,4 \leq K \leq 14,0$, параметры заметно изменяются в сторону уменьшения энергетического класса, а два из них, n_0 и σ_l , в точке $K = 12,4$ меняются скачком.

Скачкообразное изменение параметра n_0 есть следствие качественного изменения эпицентральной области, что позволяет предположить наличие принципиально различных динамических свойств у землетрясений из диапазонов $12,4 \leq K$, которые будем называть в дальнейшем сильными, а землетрясения с $K < 12,4$ — слабыми.

Существование точки ветвления на графике $\tau_1(K)$ указывает, по-видимому, на неустойчивость, непредсказуемость развития во времени дыры слабых землетрясений с $K \leq 11,5$, причем непредсказуемость носит абсолютный характер и прямо связана с уменьшением размеров дыр.

Вероятность образования дыры

С максимальной плотностью, как уже отмечалось, землетрясения регистрируются в районе п-ова Шипунский, где внутри дыры сильного землетрясения площадью

$$S = \pi/4 \cdot l \cdot d = \pi/4 \cdot l^2 \approx 100 \text{ [км}^2\text{]}$$

за время ее жизни $\Delta\tau \approx 2$ года при среднем уровне сейсмичности должно попадать четыре события, минимум — два (см. табл. 1). Однако в исследуемом районе (область очага 1959 г.) в течение 1964–1976 гг. в эпицентральной зоне многих землетрясений существуют пустые объемы. Кроме того, как было показано в предыдущем параграфе, существует класс землетрясений, в эпицент-

ральных областях которых не зарегистрировано ни одной нулевой дыры. Вероятность столь закономерного отсутствия нулевых дыр в достаточно плотном поле событий должна быть малой. Докажем это на примере однозначных дыр.

При построении математической модели учтем две особенности сейсмического процесса. Во-первых, вероятность образования пустой площадки P зависит от ее величины. Действительно, вероятность существования очень большой пустой площадки всегда будет малой ($P \rightarrow 0$), и наоборот, в сейсмическом поле Камчатки заведомо существуют достаточно малые площадки, внутри которых содержатся пустоты ($P \rightarrow 1$). Другими словами, нормировочная площадь не должна быть ни слишком большой, ни слишком малой.

Во-вторых, распределение эпицентров слабых землетрясений в эпицентральной области сильного события часто носит радиальный характер: плотность максимальна в окрестности эпицентра сильного события и быстро убывает к его периферии (см. рис. 2, а).

Исходя из таких соображений представляется разумным выбрать нормировочную площадку в виде круга с радиусом, равным длине большей оси дыры: $l \approx 17$ км. Однако модель-круг не слишком удобна для подсчета вероятности случайного появления «пустой» флуктуации-дыры.

Все однозначные дыры с точностью наших построений $1 \text{ мм} = 1 \text{ км}$ являются эллипсами с $\zeta = 2$. Это означает, что эффекты, вызывающие изменение формы дыры, малы и ими можно пренебречь. Поэтому для характеристики дыры достаточно выбрать величину ее площади S_0 и параметр ζ . Другими словами, деформация эллиптической дыры, скажем, в прямоугольную с площадью $S_0 = 100 \text{ км}^2$ и отношением длин сторон $\zeta = 2$, т. е. состоящую из двух квадратиков со стороной $a = \sqrt{50}$ км, не должна существенно повлиять на величину численного значения вероятности P . Отметим, что при такой деформации точке пересечения границы эллиптической дыры с ее большей осью, где расположен эпицентр сильного землетрясения, соответствует сторона квадрата.

При случайном (а значит, в случае большого числа событий, и равномерном) распределении эпицентров землетрясений в плоскость площадки $S_0 = 100 \text{ км}^2$ в течение $\Delta \tau = 2$ года должно попадать как минимум два события, или в каждый квадратик со стороной $a = \sqrt{50}$ км должно попадать по одному событию.

Деформируем модель-круг в модель-квадрат со стороной $4a$, в которой эллиптической дыре с параметрами l и ζ будут соответствовать два квадратика, которые, вообще говоря, могут иметь либо общую вершину, либо общую сторону. Получающаяся неоднозначность «либо — либо» есть следствие «деформации», при которой одной точке — пересечению большей оси с границей дыры, т. е. эпицентру — ставится в соответствие сторона квадрата, имеющая две граничные точки. Это приводит к некоторой неопределенности при вычислении вероятности существования дыры в модели-квадрате. По-видимому, значение вероятности при условии, что два квадратика должны иметь и общую вершину, и общую сторону, является максимальным. Минимальное значение вероятности определяется наименьшим числом способов при двух возможных вариантах подсчета: или общая сторона, или общая вершина.

Число способов N_j , которыми из большого квадрата со стороной $4a$ можно вынуть два маленьких квадратика со стороной a при условии, что они имеют общую вершину ($j = 1$) или общую сторону ($j = 2$), можно записать в виде

$$N_j = \sum_{i=1}^3 n_{ij},$$

где n_{ij} — число способов, которыми можно вынуть второй квадратик при условии, что первый находится в углу ($i = 1$), на ребре ($i = 2$) или внутри ($i = 3$) большого квадрата. Значения чисел n_{ij} и N_j приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения чисел n_{ij} и N_j

| n_{ij} | $i = 1$ | $i = 2$ | $i = 3$ | N_j |
|----------|---------|---------|---------|-------|
| $j = 1$ | 4 | 16 | 16 | 36 |
| $j = 2$ | 8 | 24 | 16 | 48 |

Из данных, приведенных в табл. 3, видно, что максимальное (P_{\max}) и минимальное (P_{\min}) значения вероятности случайного появления дыры можно оценить из следующих соотношений:

$$P_{\min} = \frac{N_{j=1}}{N_0}, P_{\max} = \frac{\sum_1^2 N_j}{N_0},$$

где $N_0 = C_{16}^2 = 120$ — число способов, которыми из квадрата со стороной $4a$ можно вынуть два квадрата, каждый со стороной a . Окончательно получаем, что вероятность P случайного образования однозначной дыры в эпицентральной зоне сильного землетрясения в пределах очага 1959 г. лежит в пределах $0,35 \leq P \leq 0,7$.

Отметим, что доля ненулевых дыр у слабых землетрясений, в том числе у землетрясений с $K \approx 12$, пространственно-временные параметры дыр которых несильно отличаются от таких же параметров дыр сильных землетрясений, согласно зависимости $n_0(K)$ равна примерно 0,5 (см. рис. 3), что хорошо согласуется с полученной оценкой для вероятности P .

Тем самым мы доказали, что параметр n_0 по сути своей есть вероятность случайного появления в эпицентральной области нулевой дыры, а само значение вероятности определяется плотностью сейсмического поля. Отсюда, в частности, следует, что отсутствие нулевой дыры, т. е. существование дыры в эпицентральной области сильного землетрясения, есть процесс закономерный.

Отметим принципиальное отличие параметра формы дыры от других характеристик: зависимость $\zeta(K)$ не коррелирует с ходом графика $n_0(K)$, т. е. параметр формы ζ является своеобразным инвариантом сейсмического поля. Корреляция между $\sigma_\zeta(K)$ и $n_0(K)$ весьма слабая.

Свойства зон молчания сильных землетрясений

Сейсмическая активность в области очага катастрофического землетрясения во времени изменяется по определенному закону [1]. Следовательно, сильные землетрясения в области очага 1959 г., как главные события сейсмического режима в период исследования, находятся во вполне определенном отношении друг к другу, а значит, и соответствующие дыры должны определенным образом взаимодействовать друг с другом.

Оказывается возможным построить из дыр сильных землетрясений непересекающуюся комбинацию. Причем такая возможность для группы из 6 землетрясений, расположенных в северо-восточной части очага 1959 г., реализуется единственным образом (рис. 6). Построить непересекающуюся систему дыр в энергетическом диапазоне $K_0 \leq K$ при $K_0 < 12,4$ невозможно, т. е. свойство непересечения дыр является отличительной особенностью класса сильных землетрясений.

Исследуем эпицентральные области других сильных землетрясений Камчатки.

На рис. 1 изображены эпицентры всех ($N = 69$) камчатских землетрясений с $H < 70$ км, и $K \geq 12,5$, попадающих в интервал $51^\circ < \varphi < 56^\circ$. Не исследовались землетрясения, эпицентры которых попадают в области роя 1976 г. ($N = 14$) и очага катастрофического землетрясения в 1971 г. с $M = 7,8$ и $N = 7$ [12].

В эпицентральных областях из оставшихся 34 землетрясений у 26 выделяются дыры со свойствами, близкими свойствам дыр сильных землетрясений в области очага 1959 г. (размеры, форма, непересечение, три однозначных дыры). Однако имеется отличие: у некоторых сильных землетрясений, сопровождающихся роями, время жизни соответствующей дыры, в которую не попадает ни одно событие роя, несколько больше двух лет. При этом области роя и дыры не пересекаются (рис. 4, Кроноцкий п-ов).

Оставшиеся сильные землетрясения ($N = 8$) произошли в двух интенсивных роях по четыре в каждом (рис. 4, Кроноцкий и Авачинский заливы). Эпицентральные области землетрясений в обоих случаях перекрываются областями роя; дыры как области, не содержащие ни одного события каталога, отсутствуют, т. е. являются нулевыми. Однако в эпицентральных областях в том и другом случае можно выделить области, которые не содержат событий определенных энергетических классов — зоны молчания. При этом у 7 землетрясений оказывается возможным так построить зоны молчания, что они не пересекаются как друг с другом (рис. 4, Кроноцкий и Авачинский заливы), так и с дырами нероевых землетрясений (рис. 4, Кроноцкий

залив). Размеры и форма непересекающихся зон молчания с точностью до σ_ξ равны соответствующим параметрам дыр. Это позволяет поставить зоны молчания в один ряд с дырами. Время жизни зон молчания составляет порядка 3–7 и более лет.

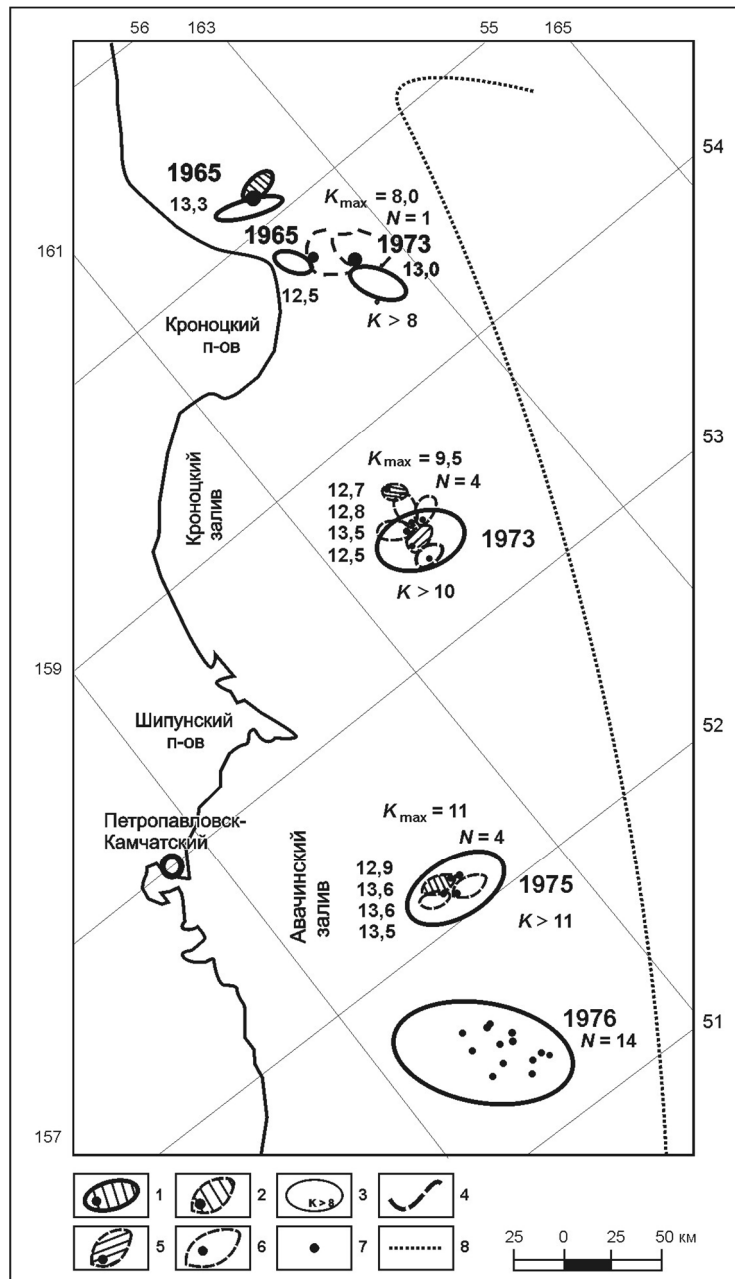


Рис. 4. Зоны молчания и рои:

1, 2 — соответственно однозначные дыры и зона молчания; 3 — граница роя по $K \geq 8$ (N — число сильных событий в рое, K_{max} — энергетический класс землетрясений, не попадающих в зону молчания); 4 — возможная область дыры; 5 — непересекающийся вариант дыры; 6 — непересекающийся вариант зон молчания в рое; 7 — эпицентры сильных землетрясений; 8 — ось глубоководного желоба

Обращает на себя внимание ряд закономерностей. По мере продвижения от Кроноцкого п-ова к юго-западу вдоль фокальной зоны Камчатки происходит постепенное нарастание интенсивности роя — расширение области и увеличение энергии сильных землетрясений, а также и его силы — увеличение числа сильных землетрясений в рое (от 1 до 14). Параллельно происходит уменьшение уровня зоны молчания: диапазон между энергией сильного землетрясения и слабого, еще попадающего внутрь зоны молчания — от $\Delta K \leq 5 \div 6$ до $\Delta K \approx 2,5$. Наблюдается

все большее «втягивание» зон молчания внутрь области роя, что, вероятно, приводит к перемещению границы класса сильных землетрясений в сторону увеличения энергетического класса; у одного землетрясения с $K = 12,9$ непересекающаяся зона молчания так и не выделена (рис. 4, Авачинский залив).

Чем сильнее землетрясение, тем с большей вероятностью оно сопровождается более интенсивной афтершоковой последовательностью, тем все сильнее отмеченные закономерности проявляются в его эпицентральной области. Следовательно, с одной стороны, эпицентральные области землетрясений с $K > 14$ должны содержать не дыры, но зоны молчания, уровень которых уменьшается в сторону больших K ; с другой — в афтершоковую область главного, наиболее сильного события тем сильнее должны «втягиваться» непересекающиеся дыры и зоны молчания класса сильных для данного района землетрясений, чем больше энергия самого главного события.

Были исследованы эпицентральные области всех катастрофических курило-камчатских землетрясений 1958–1978 гг. Параметры зон молчания приведены в табл. 4, из которой следует, что во всем диапазоне класса катастрофических землетрясений значение длины большей оси зоны молчания остается практически неизменным. Поэтому можно полагать, что согласно формулам перехода в работе [13] размер большей оси зоны молчания катастрофического землетрясения 1959 г. с $M = 7,6$ (или $K \approx 16$) $l_{\max} = 41$ км (детальные данные для Камчатки имеются с 1961 г.).

Таблица 4

Параметры зон молчания всех Курило-Камчатских катастрофических землетрясений 1958–1978 гг.

| Номер землетрясения | Год | M | l_{\max} , км | d_{\max} , км | ζ | ΔM |
|----------------------------------|------|-----|-----------------|-----------------|---------|------------|
| 1 | 1958 | 8,2 | 40 | 25 | 1,6 | 3 |
| 2 | 1963 | 8,1 | 40 | 24 | 1,7 | 2,6 |
| 3 | 1969 | 7,8 | 42 | 23 | 1,8 | 1,8 |
| 4 | 1969 | 7,7 | ∞ | ∞ | — | 4,1 |
| 5 | 1971 | 7,8 | 40 | 26 | 1,5 | 3,5 |
| 6 | 1973 | 7,9 | 42 | 25 | 1,7 | 2,7 |
| 7 | 1978 | 8,0 | 40 | 26 | 1,5 | 2,5 |
| Среднеарифметическое ($N = 6$) | | 8,0 | 41 | 25 | 1,6 | 2,7 |
| Среднеквадратичное ($N = 6$) | | 0,1 | 0,9 | 1,1 | 0,1 | 0,5 |

На рис. 5 точками показаны численные значения $l(K)$ с учетом нулевых дыр, вертикальным отрезком обозначена удвоенная величина среднеквадратичного уклонения. Уравнение прямолинейной зависимости, не выходящей за пределы среднеквадратичных уклонений в интервале $11,5 \leq K \leq K_{\max} = 16$, имеет вид

$$l = \frac{l_{\max}}{K_{\max} - K_i} (K - K_i) \approx 7,88 \cdot (K - 10,8) \text{ [км]}. \quad (1)$$

Заметим, что зависимость числа землетрясений от K в пределах очага 1959 г., по данным 1964–1976 гг., в точке $K = 10,8$ имеет локальный минимум: $N = 11, 8, 1, 7, 7$ соответственно в точках $K = 10,6; 10,7; 10,8; 10,9; 11,0$. Пунктиром проведена зависимость длины разрыва от K , полученная Ю. В. Ризниченко [21].

Вернемся к рассмотрению области очага катастрофического события 1959 г. с $M = 7,6$.

На территории Камчатки землетрясения с $K \geq 12,4$ или $M \geq 5\frac{1}{4}$ регистрируются без пропусков с 1952 г. [22]. Координаты их эпицентров, взятые из бюллетеней ЕССН, представлены на рис. 6. Будем считать, что l — размер дыр и зон молчания землетрясений с $5\frac{1}{4} (K = 12,4) \leq M < 7$ — равно 17 км; у землетрясений с $M \approx 7 (K \approx 15)$ и $M = 7,6 (K \approx 16)$ в соответствии с формулой (1) l равно соответственно 30 и 41 км; параметр ζ во всех случаях будем считать одинаковым: $\zeta = 2$. Тогда можно построить непересекающуюся и не выходящую за пределы очага систему дыр и зон молчания совокупности всех землетрясений с $K \geq 12,4 (M > 5\frac{1}{4})$ за 1952–1976 гг. (см. рис. 6).

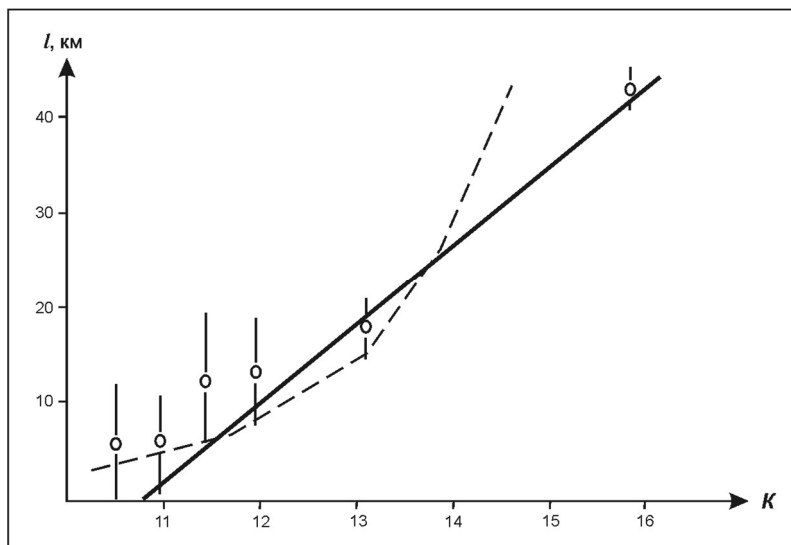


Рис. 5. Зависимость $l(K)$ во всем диапазоне энергетических классов

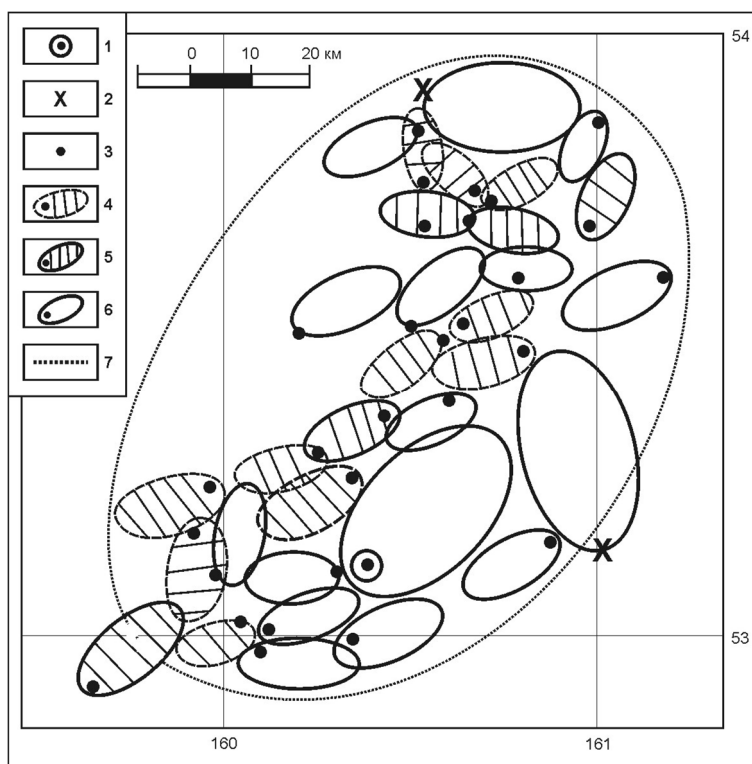


Рис. 6. Взаимодействие дыр и зон молчания друг с другом и с очагом катастрофического землетрясения:

1–3 — эпицентры землетрясений соответственно с $M = 7,6$; $M = 7,0$; $5,25 (K = 12,4) \leq M < 7$;
 4 — непересекающаяся система дыр (1964–1976 гг.); 5 — однозначные дыры; 6 — предполагаемые дыры и зоны молчания (1952–1963 гг.); 7 — граница очага 1959 г.

Наиболее активный период в очаге катастрофического землетрясения продолжается примерно 30 лет: по 15 лет — фор- и афтершоковый периоды [1]. К настоящему времени (31.12.1979 г.) уже более 5 лет на территории очага 1959 г. не произошло ни одного сильного землетрясения (последнее землетрясение с $K = 12,9$ произошло 21.10.1974 г.). Таких длинных пауз за время наблюдения 1952–1974 гг. не наблюдалось. Поэтому с определенной степенью вероятности можно предположить, что афтершоковый процесс катастрофического землетрясения 1959 г. окончился и в последующем вероятность сильного землетрясения в пределах очага мала.

В течение первых семи лет форшокового периода (1944–1951 гг.), когда отсутствуют данные о землетрясениях с $M \leq 5,5$ ($K \leq 13$), при среднем периоде повторяемости сильных землетрясений $N/t = 31/(30 - 7) = 1/2$ год⁻¹ должно было произойти не более 9–10 сильных событий. Считая параметры дыр и зон молчания, соответствующих этим сильным событиям, как $l = 17$ км и $\zeta = 2$, получим, что они могут заполнить, не перекрываясь, оставшуюся пока незанятой площадь очага 1959 г., но не более.

Тем самым мы показали, что непересечение дыр и зон молчания есть правило, которому те и другие подчиняются при своем движении в пределах очага катастрофического землетрясения в течение цикла.

Заключение

Открытый С. А. Федотовым [1] закон непересечения очаговых областей катастрофических курило-камчатских землетрясений можно сформулировать следующим образом: очаги катастрофических землетрясений распределяются таким образом, что в течение цикла, не перекрываясь, они заполняют собой весь верхний слой сейсмоактивного объема Курило-Камчатской дуги. Мы уже показали, что, в свою очередь, зоны молчания (и дыры), не пересекаясь, застилают собою область очага катастрофического землетрясения. Таким образом, на отрезке времени, равном циклу (для Курило-Камчатского региона порядка 140 лет), всему пространству слоя сейсмоактивного объема Курило-Камчатской дуги однозначным образом ставится в соответствие класс сильных землетрясений. При построении правила соответствия — формализма зон молчания и очагов — использовались только данные каталога и совершенно не применялись никакие допущения физического характера.

В теоретической физике известно, что основные интегралы движения — законы сохранения энергии, импульса и момента импульса — однозначным образом связаны со свойствами симметрии пространства — времени, в котором происходит изучаемое явление [23]. Построенный нами формализм зон молчания и очагов — этот мост между сейсмоактивным пространством и классом сильных землетрясений, которые происходят в том же сейсмоактивном объеме — может быть использован как инструмент для понимания физики процессов, происходящих при сильных землетрясениях.

В заключение считаю приятным долгом выразить искреннюю признательность научному руководителю работы С. А. Федотову, а также Г. А. Соболеву, Е. И. Гордееву, С. В. Мишину, В. С. Пономареву, Ю. М. Тейтельбауму, В. А. Широкову, И. П. Чернобай, плодотворные дискуссии с которыми во многом способствовали написанию работы.

Литература

1. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 121–148.
2. Нерсесов И. Л., Пономарев В. С., Тейтельбаум Ю. М. Эффект сейсмического затихья при больших землетрясениях // Исслед. по физике землетрясений. — М.: Наука, 1976. — С. 149–169.
3. Пономарев В. С., Тейтельбаум Ю. М. Динамические взаимодействия между очагами землетрясений // Региональные исслед. сейсмического режима. — Кишинев: Штиница, 1974. — С. 79–92.
4. Нерсесов И. Л., Пономарев В. С., Кучай В. К. Особенности пространственного распределения сейсмического фона // Поиски предвестников землетрясений на прогностических полигонах. — М.: Наука, 1974. — С. 119–131.
5. Пономарев В. С., Тейтельбаум Ю. М., Третьякова Н. В. Особенности пространственного распределения сейсмичности в местах возникновения больших землетрясений // Исслед. по физике землетрясений. — М.: Наука, 1976. — С. 169–184.
6. Пшенников К. В., Боровик Н. С. Некоторые особенности формирования эпицентральной зоны афтершоков // Геология и геофизика. — 1965. — № 3. — С. 128–131.

7. *Пиенников К. В.* Об энергетическом балансе в области очага сильного землетрясения // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1965. — № 10. — С. 17–24.
8. *Боровик Н. С.* О некоторых характеристиках областей очагов землетрясений Прибайкалья // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1970. — № 12. — С. 3–9.
9. *Боровик Н. С., Мишарина Л. А., Тресков А. А.* О возможности будущих сильных землетрясений в Прибайкалье // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1971. — № 1. — С. 21–26.
10. *Боровик Н. С.* Некоторые особенности проявления афтершоков // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири. — Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1971. — С. 91–92.
11. *Федотов С. А.* Реализация долгосрочного сейсмического прогноза для Тихоокеанской фокальной зоны у берегов Курило-Камчатской дуги на 1965–1970 гг. и уточненный прогноз на 1971–1975 гг. // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. — Новосибирск: Наука, 1974. — С. 101–108.
12. *Федотов С. А., Чернышов С. Д., Чернышова Г. В., Викулин А. В.* Уточнение границ очагов землетрясений с $M \geq 7\frac{3}{4}$, свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги // Вулканология и сейсмология. — 1980. — № 6. — С. 52–67.
13. *Федотов С. А.* Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. — М.: Наука, 1972. — 88 с.
14. *Гусев А. А.* Ошибки определения параметров очага землетрясений Камчатки // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. — Новосибирск: Наука, 1974. — С. 66–81.
15. *Гусев А. А., Шумилина Л. С.* Геометрия сейсмоактивного объема коры и мантии в районе Камчатки и Командорских островов // Исслед. по физике землетрясений. — М.: Наука, 1976. — С. 194–200.
16. *Токарев П. И.* О фокальном слое, сейсмичности и вулканизме Курило-Камчатской зоны // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1970. — № 3. — С. 15–30.
17. *Землетрясения Камчатки и Командорских островов / С. А. Федотов, П. И. Токарев, В. М. Зобин, А. М. Кондратенко // Землетрясения в СССР в 1969 г. — М.: Наука, 1973. — С. 180–194.*
18. *Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. — М.: Наука, 1977. — 536 с.*
19. *Федотов С. А., Симбирева И. Г., Феофилактов В. Д., Матвиенко Ю. Д.* Землетрясения Камчатки // Землетрясения в СССР в 1976 г. — М.: Наука, 1980. — С. 83–87.
20. *Мячкин В. И., Зубков С. И.* Сводный график предвестников землетрясений // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1973. — № 6. — С. 28–32.
21. *Ризниченко Ю. В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исслед. по физике землетрясений. — М.: Наука, 1976. — С. 9–27.
22. *Федотов С. А., Багдасарова А. М.* Сейсмичность Камчатки и Командорских островов в 1897–1961 гг. по данным инструментальных наблюдений // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. — Новосибирск: Наука, 1974. — С. 7–34.
23. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. Т. 1. Механика. — М.: Наука, 1973. — 208 с.
24. *Шумилина Л. С., Сейдузова С. С., Потапова О. В.* Сейсмическая сотрясаемость территории СССР (Камчатка). — М.: Наука, 1979. — С. 155–172.

А. В. Викулин¹, Ч. У. Ким²¹ *Институт физики Земли АН СССР*² *Сахалинский комплексный научно-исследовательский институт ДВНЦ АН СССР*

О МАГНИТУДНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ, КУРИЛ И СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЯПОНИИ в 1911–1961 гг.*

При подготовке списка курило-камчатских землетрясений в «Новом каталоге...» [6] были подняты все имеющиеся архивные материалы. Выяснилось, что есть достаточно большое количество землетрясений с $M < 6$, а в ряде случаев с $M \geq 6$, магнитуды которых по ряду причин не определялись или были определены при помощи различных магнитудных классификаций. Тем не менее для Курило-Камчатского региона удалось единообразно классифицировать сильные землетрясения по магнитудной шкале начиная с $M = 6$ [6].

Детальные сейсмологические наблюдения в Курило-Камчатском регионе ведутся непрерывно уже более 20 лет: на Курилах с 1958 г. [13], на Камчатке с 1961 г. [12]. Однако длительность сейсмического цикла составляет 140 ± 60 лет [9]. Поэтому для решения целого ряда важных задач необходимо использовать все имеющиеся данные о землетрясениях предшествующих лет.

Просмотр наиболее полных международных сейсмологических бюллетеней, таких как «International Seismological Summary» (ISS) [17] и «Bureau Central International Seismologique» (BCIS) [15], показал, что в них содержатся данные о землетрясениях с $M < 6$, которые отсутствуют в известных списках и каталогах курило-камчатских землетрясений. Поэтому была сделана попытка составить наиболее полный список этих землетрясений на Южных Курилах до 1958 г. и на Северных Курилах и Камчатке до 1961 г. при помощи детального рассмотрения всех бюллетеней и каталогов землетрясений. При этом оказалось, что можно составить достаточно однородный каталог по координатам эпицентров. Однако каталог получается существенно неоднородным по энергетическим классификациям. Сложность проблемы при составлении достаточно однородного каталога по энергетическим классификациям заключается в том, что в настоящее время для расчета магнитуды слабых землетрясений за прошлые годы почти нет возможности использовать волны одного типа, зарегистрированные на однотипной аппаратуре.

Для определения приближенной магнитуды землетрясения был использован метод, приведенный ранее в работе [13]. Он основан на существовании зависимости магнитуды M от числа станций N , данные о которых помещаются в международных бюллетенях. Эта методика была апробирована при составлении каталога сильных землетрясений западной части Тихого океана [8].

При составлении «Нового каталога...» была выполнена большая работа по переопределению магнитуд всех землетрясений на территории СССР с привлечением практически всех данных, известных к настоящему времени. Поэтому, на наш взгляд, магнитуда «Нового каталога...» $M_{НК}$ является наиболее обоснованной и однородной. По этой причине данная магнитуда была выбрана в качестве опорной при построении зависимостей $M(N)$. С целью уменьшения возможных случайных ошибок проводилось определение двух зависимостей $M(N)$ — по данным бюллетеней ISS и BCIS.

Вблизи Курило-Камчатского региона сейсмические станции распределены крайне неравномерно. Так, на территории Японии находится большое число региональных опорных сейсмических станций. В результате значения N для южно-курильских землетрясений, как правило, существенно выше, чем значения N для таких же по силе камчатских землетрясений. Длина Курило-Камчатской дуги составляет $\sim 20^\circ$. Поэтому при определении зависимостей $M(N)$ целесообразно, видимо, не принимать в расчет японские станции на эпицентральных расстояниях меньше 20° .

Выбор временных интервалов осреднения диктовался следующими противоречивыми требованиями. С одной стороны, число данных, используемых при построении зависимостей $M(N)$, в каждом интервале осреднения должно быть достаточно большим. С другой стороны, число интервалов осреднения также должно быть достаточно большим, так как число станций с годами не остается неизменным и в основном увеличивается.

* 2 (13). Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 96–102.

В различные интервалы времени в регионе происходит неодинаковое число землетрясений, периоды затиший перед сильными толчками сменяются периодами интенсивной афтершоковой активности. Кроме того, число сейсмических станций увеличивалось неравномерно, а в некоторые периоды (военные годы) и вовсе уменьшалось [8]. По этим причинам длительность временных интервалов осреднения и число данных, содержащихся в них, оказались различными.

Зависимости $M(N)$ для глубоких землетрясений, по-видимому, должны отличаться от аналогичных соотношений для поверхностных событий, а именно: для одинаковых по силе землетрясений число станций для глубоких событий должно быть несколько меньшим. Однако в силу того, что глубоких землетрясений в регионе происходит существенно меньше поверхностных, выявить эту особенность статистически значимо для всех интервалов осреднения не представляется возможным. Поэтому зависимости $M(N)$ строились для всех глубин, что, вероятно, в некоторых случаях приводило к завышению значений магнитуд глубоких землетрясений.

Бюллетень ISS издается с 1913 г., и с этого же периода он содержит данные о курило-камчатских землетрясениях, которые отсутствуют в уже вышедших каталогах и известных нам неопубликованных списках землетрясений. Поэтому построение зависимостей $M_I(N)$, по данным ISS, проводилось с 1913 г. Бюллетень BCIS издается с 1922 г. Однако лишь с конца 20-х гг. в нем содержатся достаточно представительные данные, за исключением данных за военные годы, которых, по-видимому, нет. Поэтому определение зависимостей $M_B(N)$ по данным BCIS проводилось начиная с 1929 г.

Значения магнитуд и числа станций подвержены случайным ошибкам. Ошибка определения магнитуд курило-камчатских землетрясений в «Новом каталоге...» для большей части толчков 1913–1951 гг. не хуже 0,5, а с 1952 г. не превышает 0,2–0,3 ед. Вероятно, величина случайной ошибки δ_M также не выходит за эти пределы. Следовательно, для землетрясений с $M > 5$ в 1913–1951 гг. и для землетрясений с $M > 4$ в более позднее время справедливо неравенство $\delta_M \leq 0,1$.

На рис. 1 в качестве примера изображены поля точек в случае зависимостей $M(N_I)$ в 1952–1956 гг. и $M(N_B)$ в 1952–1955 гг. Видно, что для большей части значений, когда $M \approx 6-7$, величина отношения $\delta_M/N \approx 1$. Это справедливо и для всех других интервалов осреднения. Следовательно, справедливо неравенство $\delta_M/M \ll \delta_N/N$. Поэтому для расчета зависимостей $M_{I,B}/(N)$ достаточно воспользоваться методом линейной регрессии [1].

В табл. 1 приведены формулы линейной регрессии $M_{I,B}/(N)$, значения коэффициентов корреляции R и среднеквадратических отклонений δ_M . Графически зависимости $M_I(N)$ и $M_B(N)$ изображены на рис. 2, из которого видно, что наклон прямых достаточно плавно изменяется с течением времени. Поэтому значения магнитуд, определенные с их помощью, можно считать, видимо, достаточно однородными во всем интервале 1911–1963 гг.

Уточнять список курило-камчатских землетрясений с помощью построенных зависимостей имеет, видимо, смысл до 1961 г., когда в основном было завершено создание региональных сетей станций в Курило-Камчатском регионе. Однако полученные зависимости могут быть использованы для уточнения каталогов землетрясений других регионов. С 1964 г. достаточно детальные списки землетрясений по всем регионам Земли приводятся в «Regional Catalogue of Earthquakes», издаваемом в Эдинбурге. Поэтому зависимости $M_{I,B}/(N)$ были построены до 1963 г. включительно.

«Новый каталог...» содержит данные о курило-камчатских землетрясениях с $M \geq 6$. В связи с этим для определения значений магнитуд более слабых землетрясений построенные зависимости $M(N)$ для сильных толчков экстраполировались в область меньших значений магнитуд. Для проверки корректности такой экстраполяции было проведено сравнение значений магнитуд, найденных по зависимостям $M(N)$, с известными магнитудами для слабых ($M < 6$) курило-камчатских землетрясений.

В 1911–1961 гг. для классификации курило-камчатских землетрясений использовались следующие магнитуды: $M_{Сак}$ [7], M_i [13]; до 1955 г. $M_{Атл}$ [2]; в 1956–1961 гг. M_{LH} [3]; в 1958–1964 гг. энергетический класс $K^{\Phi 63}$ [13], который (как следует из работы [4]) связан с магнитудой M_{LH} соотношением $M_{LH} = 0,65 K^{\Phi 63} - 3,42$. Значение магнитуды, пересчитанное из $K^{\Phi 63}$ по приведенной формуле, обозначим через M_K . Для каждого землетрясения взаимные отличия всех перечисленных магнитуд, включая M_K , составляют, как правило, не более чем первые десятые доли

единицы. Эмпирические среднеквадратические ошибки оценок магнитуд из различных зависимостей $M(N)$, как следует из табл. 1, не выходят за пределы интервала $[0,32-0,61]$, равняясь в среднем $\delta_0 \approx 0,51$. Экстраполяцию зависимостей $M(N)$ в область $M < 6$ будем считать оправданной, если модуль разности $|\Delta M_i| = M_{I,B} - M_i$, где M_i суть $M_{LH(Atл)}$, $M_{Сак}$, M_j , M_K меньше $\delta_0/2$.

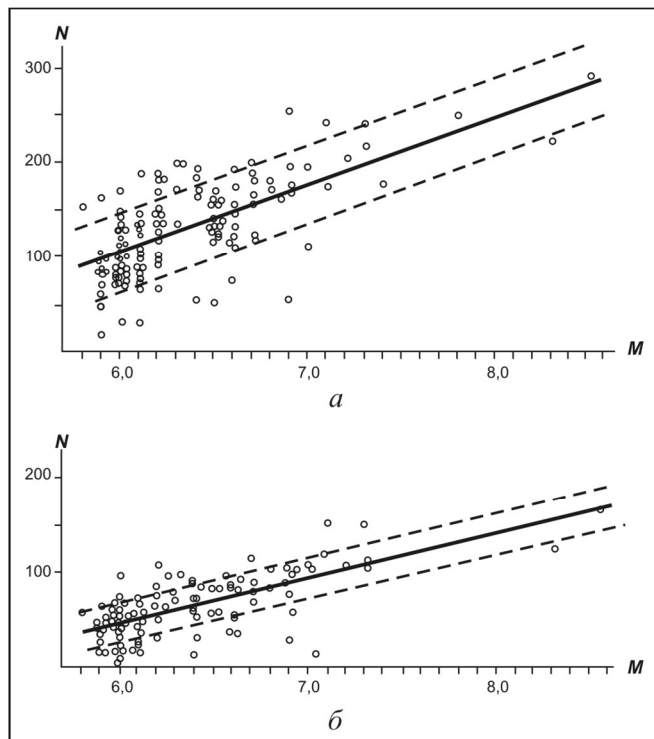


Рис. 1. Исходные данные и корреляционные зависимости $M(N)$ (значения магнитуд взяты из работы [6]):
 а — для землетрясений 1952–1956 гг. по данным ISS;
 б — для землетрясений 1952–1955 гг. по данным BCIS

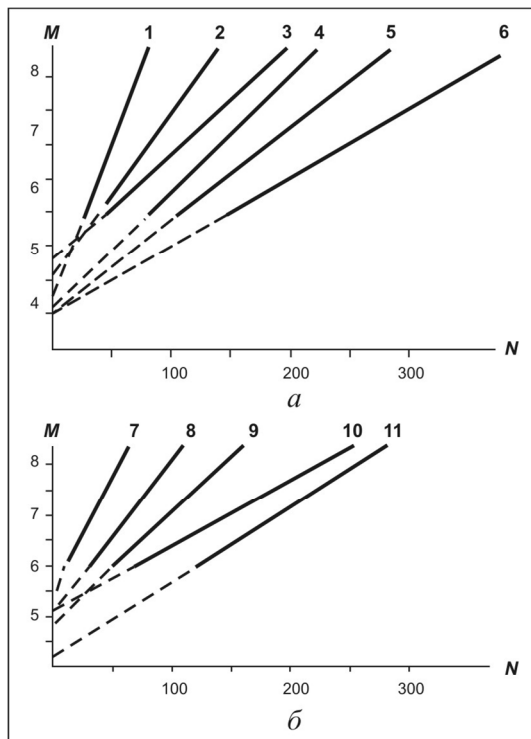


Рис. 2. Корреляционные зависимости $M(N)$ по данным ISS (а) и BCIS (б) за 1911–1963 гг. Номер прямой соответствует номеру формулы в табл. 1

Зависимости $M_I(N)$ и $M_B(N)$ по данным за 1911–1963 гг.

Таблица 1

| Номер формулы | Интервалы по годам | $M(N)$ | n | P | δ_M |
|---------------|--------------------|----------------------|-----|------|------------|
| 1 | 1913–1920 | $M = 0,0485N + 4,73$ | 39 | 0,76 | 0,59 |
| 2 | 1921–1929 | $M = 0,0256N + 5,04$ | 68 | 0,66 | 0,61 |
| 3 | 1930–1948 | $M = 0,0162N + 5,30$ | 177 | 0,75 | 0,42 |
| 4 | 1949–1951 | $M = 0,0177N + 4,58$ | 22 | 0,73 | 0,53 |
| 5 | 1952–1956 | $M = 0,0144N + 4,51$ | 147 | 0,60 | 0,59 |
| 6 | 1957–1963 | $M = 0,0103N + 4,51$ | 131 | 0,69 | 0,50 |
| 7 | 1929–1947 | $M = 0,4550N + 5,50$ | 91 | 0,77 | 0,42 |
| 8 | 1948–1951 | $M = 0,0299N + 5,13$ | 22 | 0,86 | 0,32 |
| 9 | 1952–1955 | $M = 0,0224N + 4,86$ | 134 | 0,67 | 0,49 |
| 10 | 1956–1957 | $M = 0,0130N + 5,12$ | 30 | 0,74 | 0,42 |
| 11 | 1958–1963 | $M = 0,0147N + 4,22$ | 121 | 0,64 | 0,58 |

Примечание. В № 1–6 M суть M_I , в № 7–11 M суть M_B ; n — число данных.

В табл. 2 приведены параметры распределений величин ΔM_i по данным за 1911–1961 гг. Значение $M_{I,B}$ определялось из соотношения $M_{I,B} = \frac{1}{2}(M_I + M_B)$, причем когда известна одна из магнитуд, принималось $M_{I,B} = M_I$ или M_B соответственно. Как следует из данных табл. 2, для всех ΔM_i выполняется условие $|\Delta M_i| = \delta_0/2$. Поэтому экстраполяцию зависимостей $M(N)$ в область $M < 6$ можно считать оправданной.

Таблица 2

**Параметры распределений ΔM_i для землетрясений с $M < 6$
(контроль допустимости экстраполяции)**

| ΔM_i | n | $\Delta \bar{M}_i$ | σ | $\Delta \bar{M}_i \pm \sigma$ | ΔM_i | | $P_{\delta_0}, \%$ |
|-------------------------|-----|--------------------|----------|-------------------------------|--------------|-----|--------------------|
| | | | | | min | max | |
| ΔM_{LN} | 937 | 0,19 | 0,43 | $-0,24 \pm 0,62$ | -1,2 | 1,4 | 78 |
| $\Delta M_{\text{Сax}}$ | 252 | 0,09 | 0,45 | $-0,36 \pm 0,54$ | -1,3 | 1,7 | 81 |
| ΔM_K | 192 | -0,22 | 0,32 | $-0,54 \pm 0,10$ | -1,1 | 1,0 | 86 |
| ΔM_j | 322 | 0,15 | 0,36 | $-0,21 \pm 0,51$ | -0,7 | 1,3 | 87 |

Примечание. Символ n — число данных; $\Delta \bar{M}_i$ — среднearифметическое; σ — среднеквадратичное отклонение; $\Delta \bar{M}_i \pm \sigma$ — теоретический диапазон ошибок; $\Delta M_{i, \text{min}, \text{max}}$ — наибольшие отклонения величины ΔM_i ; P_{δ_0} — число данных, попадающих в эмпирический диапазон ошибок $[-\delta_0, \delta_0]$.

Для всех ΔM_i теоретический диапазон $\pm \delta$, как видно из табл. 2, почти полностью заключен внутри эмпирического диапазона ошибок. Кроме того, внутри теоретического диапазона попадает $\approx 80\%$ всех данных. Это позволяет предложить достаточно простое правило для определения окончательного значения магнитуды M_{OK} по известным значениям магнитуд:

$$M_{OK} = (1/n) \sum^n M_i.$$

В случае землетрясений, для которых известны M_{HK} , следует, очевидно, принять $M_{OK} = M_{HK}$, так как зависимости $M(N)$ нормировались на M_{HK} , а значения $M_{LH(Atл)}$, $M_{\text{Сax}}$, M_j , M_K , как правило, отличаются от M_{HK} на величину, не превышающую первые десятые доли единицы.

Для проверки предложенного правила определения окончательной магнитуды, по данным за 1911–1961 гг., значения M_{OK} во всем магнитудном диапазоне сравнивались с другими известными магнитудами. Для магнитуд M_j , которая суть $M_{LH(Atл)}$, $M(N)$, $M_{\text{Сax}}$, M_K и M_j , определялась разность $\Delta M_j = M_{OK} - M_j$. Параметры распределений величин ΔM_j свидетельствуют, что для всех M_j ожидаемый диапазон ошибок практически полностью расположен внутри эмпирического диапазона, в пределы которого попадает $\approx 90\%$ всех данных. Это указывает на то, что предложенное правило для определения окончательного значения магнитуды достаточно оправданно. Более того, при увеличении числа известных магнитуд ошибка в определении магнитуды M_{OK} уменьшается и становится равной 0,2–0,3 если известны все магнитуды M_j . Поэтому значение эмпирической ошибки $\delta = 0,5-0,6$ на уровне 0,7 можно считать, по-видимому, наибольшим.

Используя полученные зависимости $M(N)$ и правило определения значений M_{OK} , оказалось возможным в духе магнитуды «Нового каталога...» M_{HK} дать единую магнитудную классификацию 3 006 курило-камчатским землетрясениям 1911–1961 гг. Число содержащихся в каталоге землетрясений по годам представлено на рис. 3, откуда видно, что можно выделить следующие однородные по числу событий интервалы: 1911–1922, 1923–1937, 1938–1946, 1947–1951, 1952–1957, 1958–1961 гг.

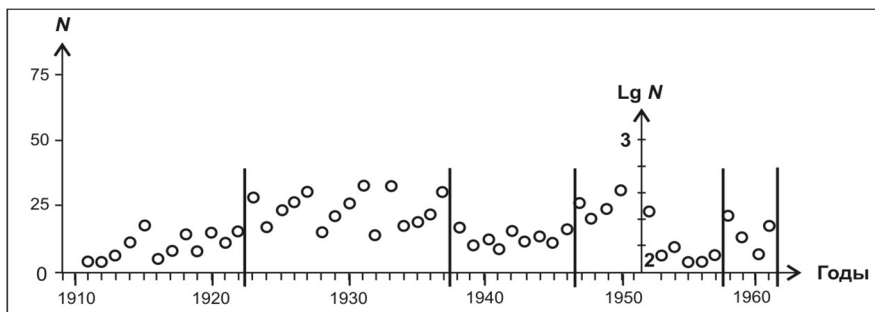


Рис. 3. Распределение числа курило-камчатских землетрясений по годам

Изменение со временем числа землетрясений, содержащихся в каталогах, определяется в основном двумя обстоятельствами: изменением числа сейсмических станций мировой сети и уровнем сейсмической активности региона.

Быстрый рост станций мировой сети имел место в начале 50-х гг., причем в предыдущие годы число станций увеличивалось гораздо меньшими темпами и даже уменьшалось в годы Первой и Второй мировых войн [8]. Сеть советских сейсмических станций начала восстанавливаться с 1924 г. В 1958 г. была создана Южно-Курильская региональная сеть сейсмических станций.

По уровню сейсмической активности интервал 1911–1961 гг. был также неоднородным. Сейсмически активные периоды 1911–1923 гг. и 1952–1978 гг. разделены достаточно спокойным интервалом, когда в пределах всего региона не произошло ни одного землетрясения с $M \geq 7\frac{3}{4}$. Видимо, комбинацией этих двух обстоятельств можно объяснить выделенные ранее однородные по числу событий временные интервалы.

Графики повторяемости, построенные по выделенным интервалам, представлены на рис. 4. В пределах всех периодов наблюдения построения проводились для землетрясений с глубиной очага $H < 100$ км при интервале осреднения магнитуд $\Delta M = 0,5$, а за весь период 1911–1961 гг. интервал осреднения брался несколько меньшим ($\Delta M = 0,3$). При этом за начало отсчета принималось такое значение магнитуд, которое расположено в центре выборки с максимальным числом землетрясений. Полученные из графиков уровни надежной регистрации M_0 и углы наклона графиков повторяемости γ приведены в табл. 3. Там же приведены значения M'_0, γ' и M''_0 , взятые из работ [5, 11]. Как видно из данных табл. 3, составленный нами каталог [18] является более полным, чем известные списки и каталоги курило-камчатских землетрясений.

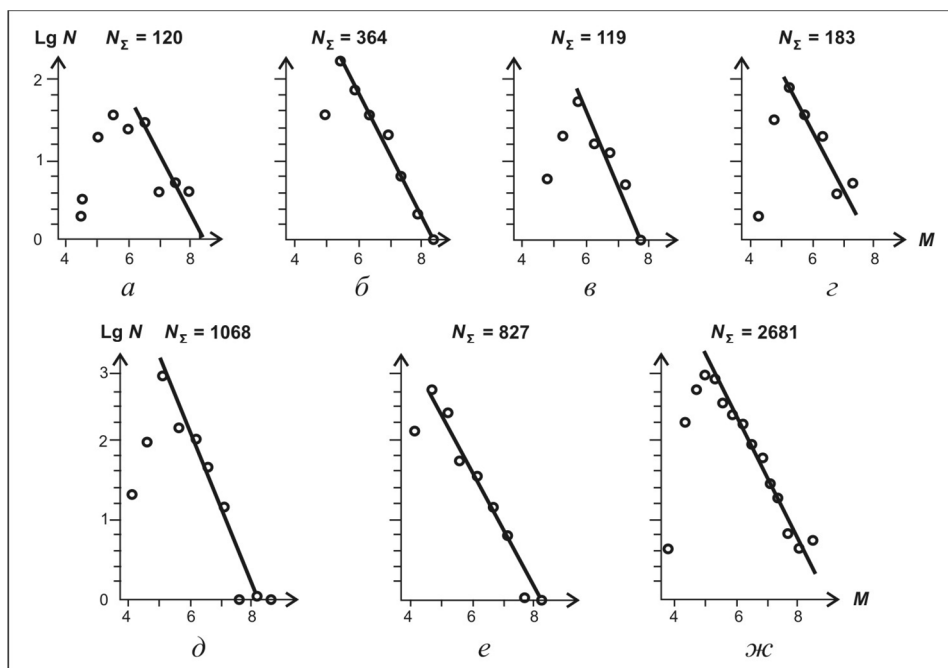


Рис. 4. Графики повторяемости курило-камчатских землетрясений по временным интервалам: 1911–1922 (а), 1923–1937 (б), 1938–1946 (в), 1947–1951 (г), 1952–1957 (д), 1958–1961 (е), 1911–1961 (ж)

Таблица 3

Уровни уверенной регистрации и углы наклона графиков повторяемости для курило-камчатских землетрясений за 1911–1961 гг.

| Интервал по годам | γ | M_0 | M'_0 | γ' | M''_0 |
|-------------------|----------|----------------|--------|-----------|---------|
| 1911–1932 | 0,72 | 6,5 | 7,0 | — | 6,5 |
| 1923–1937 | 0,77 | 5,5 | 6,0 | — | 6,5 |
| 1938–1946 | 0,94 | $5\frac{3}{4}$ | 6,0 | — | 6,5 |
| 1947–1951 | 0,72 | $5\frac{1}{4}$ | 6,0 | — | 6,5 |
| 1952–1957 | 0,97 | 5,0 | 5,0 | — | — |
| 1957–1961 | 0,74 | $4\frac{3}{4}$ | 5,0 | — | — |
| 1911–1961 | 0,76 | 6–6,5 | — | 0,70 | — |

Всего в составленном нами каталоге содержатся сведения о 3137 курило-камчатских землетрясениях 1911–1961 гг. Из них удалось определить магнитуды для 3006 землетрясений, причем магнитуды 1281 (~40%) события, используя зависимости $M(N)$, удалось определить впервые, а 120 южно-курильских землетрясений имеют магнитуду только M_j . Таким образом, в список курило-камчатских землетрясений за 1911–1961 гг. вошло 1401 (48%) событие, данные о которых отсутствовали в предыдущих списках и каталогах курило-камчатских землетрясений. У 194 землетрясений неизвестны точные координаты эпицентров.

При составлении каталога использовались сведения наиболее полных международных бюллетеней — ISS, BCIS и JMA [15], поэтому он включает практически все известные данные о курило-камчатских землетрясениях 1911–1957 гг., а также о северокурильских и камчатских землетрясениях до 1961 г. включительно.

Литература

1. Антикаев Ф. Ф. Сейсмические колебания при землетрясениях и взрывах. — М.: Наука, 1969.
2. Атлас землетрясений в СССР. Результаты наблюдений сети сейсмических станций СССР (1911–1957 гг.). — М.: АН СССР, 1962. — 338 с.
3. Бюллетень сети сейсмических станций СССР (1956–1961). — М.: АН СССР, 1959–1964.
4. Викулин А. В. О соотношении между энергетическими и магнитудными классификациями землетрясений Камчатки, Курил и Японии // Вулканология и сейсмология. — 1983. — № 4. — С. 90–98.
5. Кондорская Н. В., Тараканов Р. З. Курило-камчатские землетрясения // Землетрясения в СССР. — М.: АН СССР, 1961.
6. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / ред. Н. В. Кондорская, Н. В. Шебалин. — М.: Наука, 1977. — С. 374–447.
7. Соловьев С. Л., Соловьева О. Н. Скорость колебания земной поверхности в объемных волнах неглубокофокусных курило-камчатских землетрясений на расстояниях до 17° // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1967. — № 2.
8. Филиппас С. Ф. Современная сейсмическая активность западной части Тихого океана. — Владивосток: ТИГ ДВНЦ АН СССР, 1979. — 256 с. — Деп. в ВИНТИ 02.01.1980, № 28-80.
9. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 121–150.
10. Федотов С. А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. — М.: Наука, 2005. — С. 63–99.
11. Федотов С. А., Багдасарова А. М. Сейсмичность Камчатки, Командорских островов в 1897–1961 гг. по данным инструментальных наблюдений // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. — Новосибирск: Наука, 1974. — С. 7–34.
12. Федотов С. А., Багдасарова А. М., Бобков М. Ф., Кузин И. П. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных сейсмологических исследований 1961–1963 гг. // Землетрясения в СССР в 1963 г. — М.: Наука, 1966.
13. Федотов С. А., Багдасарова А. М., Кузин И. П., Тараканов Р. З. Землетрясения и глубинное строение юга Курильской островной дуги. — М.: Наука, 1969. — 210 с.
14. Цубои Ч. Соотношение между магнитудой и повторяемостью землетрясений в Японии и вблизи нее // Слабые землетрясения. — М.: Иностран. лит., 1961. — С. 334–342.
15. Bureau Central International Seismologique // Bull. Mensuel. — Strasbourg, 1929–1963.
16. Catalogue of Major Earthquakes which Occurred in and near Japan (1926–1956) // Seismology Bulletin of Japan Meteorology Agency. Suppl. 1. — Tokyo, 1958.
17. The International Seismological Summary, 1913–1963.
18. Викулин А. В., Ким Ч. У. Курило-камчатские землетрясения. Данные наблюдений 1911–1952, 1953–1961 гг. — М.: ММЦД Б, 1983. — С. 82–84.

А. В. Викулин¹, И. П. Чернобай²

¹ Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия, Петропавловск-Камчатский

² Опытно-методическая экспедиция, Обнинск

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ДВУХ СИЛЬНЕЙШИХ КУРИЛО-КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ*

Урупское землетрясение 13.10.1963 г. с $M = 8,0$ произошло на Южных Курильских островах в районе о. Уруп. Оно сопровождалось сотрясениями до 7–8 баллов и весьма интенсивным цунами с высотой волны до 4,5 м. Достаточно подробно это землетрясение описано в монографии С. Л. Соловьева [11].

Первые определения размеров очага, источника цунами и длины разрыва (350–450 км) [12–14] противоречат как более поздним определениям — 250 м [21–23, 26, 30], так и долгосрочному сейсмическому прогнозу С. А. Федотова [17, 21] — очаг землетрясения 07.09.1918 г. с $M = 8,2$ оказывается расположенным внутри очага Урупского землетрясения. Кроме того, полученные данные о том, что Урупское землетрясение представляло собою двойной толчок [1], а его очаг — двусвязную область [4], в которой располагался не один источник цунами [30], возможно, указывают на более тонкую структуру очага этого землетрясения.

Аналогичное предположение можно высказать относительно структуры Большого Камчатского землетрясения 04.11.1952 г. с $M = 8,5$, которое сопровождалось сотрясениями свыше 7 баллов [10, 16], высотой волн цунами до 20 м [12]. Это землетрясение также представляло собой два толчка [1], при этом сотрясения достигали наибольшей силы в двух областях, отстоящих друг от друга на 100–200 км: на побережье Авачинского залива и на о. Парамушир [18], где подвижки произошли по двум разломам, расположенным против г. Петропавловска-Камчатского и о. Парамушир.

Настоящая статья посвящена исследованию тонкой структуры очагов этих сильнейших курило-камчатских землетрясений.

Урупское землетрясение. Его длина разрыва L по поверхностным волнам определялось по данным мировой сети станций: 200–300 км [26] и 250 км [22, 23]. Значение 350–450 км [14], вероятно, ошибочно, так как определения проводились только по данным одной сеймостанции «Москва», на которую направление волн из эпицентра по отношению к простиранию разрыва составило почти прямой угол (75–80°). Наиболее достоверная длина разрыва — 250 км. Это значение получено по телесеismicким данным, т. е. по наблюдениям в дальней зоне. Поэтому его следует рассматривать как некую интегральную характеристику очага Урупского землетрясения.

Урупское землетрясение — цунамигенное. Естественно ожидать, что размеры источника цунами не превышают длину разрыва (250 км), а максимальное цунами в ближней зоне будет наблюдаться против очага на участке, не превышающем по простиранию L . Максимальная высота цунами выдерживалась от пос. Сентябрьского (о. Итуруп) до мыса Кастрикум (о. Уруп), т. е. на протяжении 200–250 км [11]. Вне этой области интенсивность цунами быстро уменьшалась. Как видим, размеры области интенсивного цунами близки длине разрыва. Поэтому можно ожидать, что размеры источника цунами $L_{ц}$ также не превышают 250 км.

Положение источника цунами Урупского землетрясения ранее определено в работах [11, 13] путем построения семейства изохрон прихода первой волны цунами (рис. 1). Построенная нами [4] юго-западная граница очага практически совпадает с положением юго-западного конца источника цунами по данным работ [11, 13]. Рассмотрим северо-восточный конец источника цунами.

При определении длины источника цунами рассчитаны два семейства изохрон: Матуа I, Шумшу, Петропавловск; Матуа II, ГСМ Уруп, Скалистый [11, 13]. Возможна неоднозначная интерпретация мареограммы Матуа. Запись начинается с интенсивного и продолжительного подъема уровня океана, после чего уже следуют обычные периодические колебания. В зависимости от того, что принять за момент прихода цунами на о. Матуа — начало возмущения уровня моря или же начало периодических колебаний, — время пробега цунами может примерно составлять 18 или 42 мин, что соответствует изохронам Матуа I и Матуа II [11].

* 3 (32). Физические поля и свойства горных пород Северо-Востока СССР. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1986. С. 44–59.

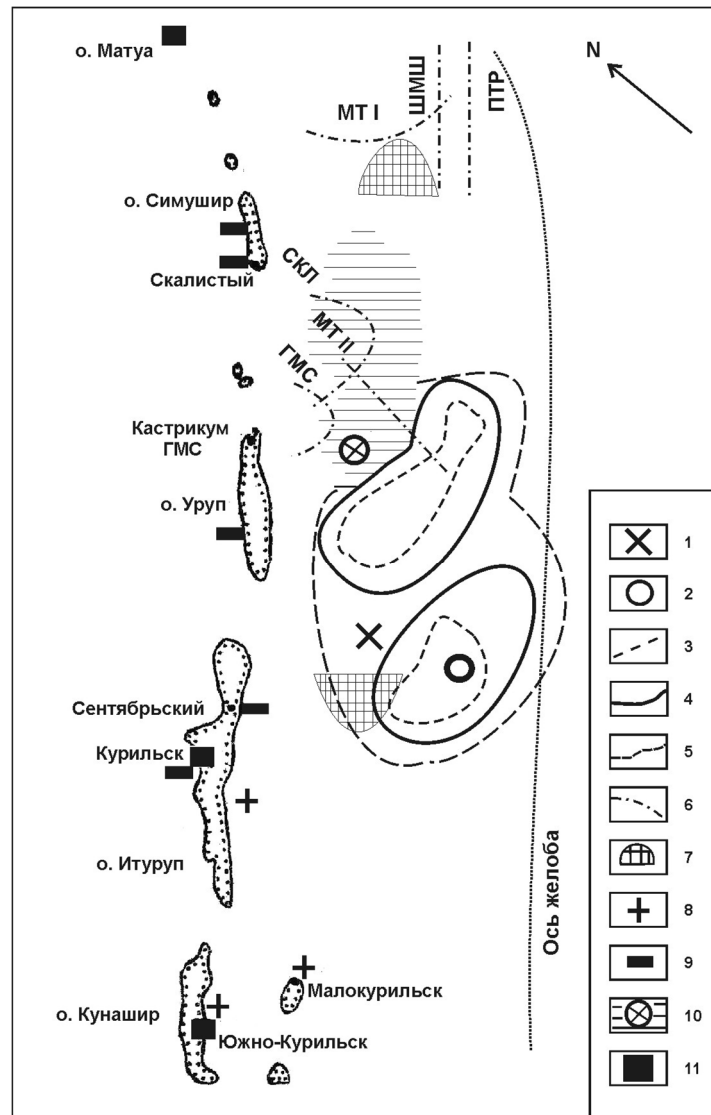


Рис. 1. Очаги и источники цунами Урупского землетрясения:

1 — инструментальный эпицентр первого толчка [24]; 2 — эпицентр второго толчка по нашим определениям; 3–5 — изолинии сейсмической активности по афтершокам 1-го го-да на уровне $A = 10, 20, 30$ соответственно; 6 — изохроны [11]; 7 — концы источника цунами [11]; 8 — характеристика первой волны цунами: прилив [11]; 9 — то же, отлив [11]; 10 — эпицентр и очаг землетрясения 07.09.1918 г. с $M = 8,2$ [21]; 11 — мареографы. Пункты наблюдений: Петропавловск-Камчатский — ПТР, Шумшу — ШМШ, Матуа — МТ, Скалистый — СКЛ, Кастрикум (ГМС Уруп) — ГМС

В первом случае положение конца источника определяется также по данным мареографов Шумшу и Петропавловск. Эпицентральные расстояния для этих пунктов составляют соответственно 850 и 1150 км. Длина волны цунами λ с эффективным радиусом источника R связана обычным соотношением $\lambda = 3,5R$ [12]. При $R = L/2 \approx 120$ км расстояния до мареографов Шумшу и Петропавловск приблизительно равны 2λ и 3λ соответственно. Как видим, мареографы Шумшу и Петропавловск расположены не в ближней зоне. Для того чтобы цунами достигло этих пунктов, оно должно пройти вдоль Средних, Северных Курил и Камчатки, береговая линия которых достаточно сильно изрезана. Кроме того, этот район имеет довольно сложную батиметрию с приблизительным перепадом глубин от 0 до 2000 м (пролив Буссоль). Поэтому, несмотря на достаточно высокую точность определения момента прихода первой волны, теоретический расчет положения изохрон Шумшу и Петропавловск должен сопровождаться большой ошибкой. Следовательно, совпадение изохрон Шумшу и Петропавловск с изохроной Матуа I могло оказаться чисто случайным, а полученное значение $L_{ц} = 450$ км [11, 13] — ошибочным.

Во втором случае $L_{ц} = 250$ км, что вполне согласуется с длиной разрыва. При этом положение всех изохрон определяется по данным в ближней зоне. И хотя моменты прихода первых волн известны с меньшей точностью, погрешность их теоретического определения довольно мала. Поэтому, на наш взгляд, более обоснованно считать, что длина источника цунами Урупского землетрясения $L_{ц} = L = 250$ км.

На записях Урупского землетрясения (рис. 2) отчетливо выделяются два вступления P -волн с интервалом $\Delta t = 4 \div 6$ с, в среднем $\Delta \bar{t} = 4,3$ с при среднеквадратичном отклонении 0,6 с. При этом амплитуда второго вступления, зарегистрированная на всех станциях, на порядок больше амплитуды первого. Лучи из очага землетрясения на сейсмические станции СССР располагаются по азимуту внутри угла $\theta = 110^\circ$. Были проанализированы сейсмограммы станций, расположенных на расстоянии 1600–8300 км от эпицентра. На большинстве станций получены хорошие записи первых вступлений каналами СК. Зависимость $\Delta t(\theta)$ не выявлена. Поэтому второе вступление нельзя считать стопинг-фазой. Согласно стандартному годографу на таких эпицентральных расстояниях при одном толчке фаза, следующая за P -волной, должна запаздывать на $\tau = 15 \div 100$ с, т. е. справедливо $\Delta t \ll \tau$. Если второе вступление относится к глубинной фазе, то его амплитуда не может быть больше амплитуды первого вступления. Поэтому эти два вступления расцениваются нами как два толчка.

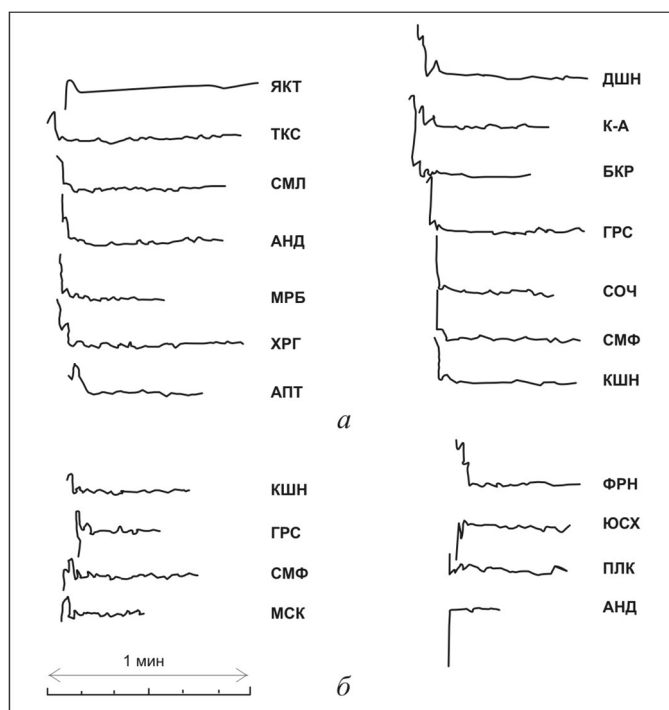


Рис. 2. Первые вступления сейсмических волн Урупского (а) и Большого Камчатского (б) землетрясений

С использованием стандартной методики по моментам вступлений P -волн были определены координаты первого и второго, более сильного, толчков. Так как вероятность принять за второе вступление одну из следующих за P -волной фаз от первого толчка в данном случае мала, то при расчетах координат второго толчка были также учтены данные близких станций. Расчеты проводились при различных комбинациях станционных данных. По полученным значениям координат гипоцентры оказались внутри достаточно большого района, включающего о-ва Итуруп, Уруп и Симушир.

Была предпринята попытка оценить координаты и время второго толчка по невязкам вторых вступлений, зарегистрированных 19 станциями СССР. Если задать для второго толчка то же время в очаге и варьировать координаты, то можно построить трехмерное поле дисперсии невязок:

$$\sigma = n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta t_i^2 - \Delta \bar{t}^2).$$

Минимум дисперсии невязок должен достигаться в эпицентре. Средняя невязка может служить оценкой запаздывания второго толчка относительно первого. Наиболее вероятное положение гипоцентров следующее: $\varphi_1 = 44,9^\circ \text{ N}$, $\lambda_1 = 149,6^\circ \text{ E}$, $H_1 = 20 \text{ км}$; $\varphi_2 = 44,3^\circ \text{ N}$, $\lambda_2 = 149,8^\circ \text{ E}$, $H_2 = 33 \text{ км}$. Время $t_1 = 0,5 — 17 — 51,6$, время $t_2 = 0,5 — 17 — 56$. Определение координат второго толчка по данным близких станций Северо-Курильск, Углегорск, Оха и Петропавловск для глубин 20–40 км и по телесеismicким данным дает практически те же результаты. Полученные нами координаты гипоцентра и время в очаге для первого толчка совпадают с данными Международного сейсмологического центра [24].

В 1965 г. С. А. Федотовым [17] была высказана гипотеза о непересечении очагов сильнейших курило-камчатских землетрясений в течение сейсмического цикла. Эта гипотеза легла в основу долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской островной дуги, который, как показали последующие наблюдения, оправдался [17, 19, 20]. В дальнейшем оказалось, что правило непересечения справедливо для многих островных дуг и краев тектонических плит [26–29], поэтому границы очагов сильнейших землетрясений можно выбрать из условия их наименьшего взаимного перекрытия [3].

В целях исследования эпицентральных областей курило-камчатских землетрясений 1952–1978 гг. с $M > 7,5$ проводилось семейство изолиний сейсмической активности $A_{10} = A$ по афтершокам 1-го года [21]. При выборе границы очага на уровне $A = 10, 20, 30$ отношение площади перекрытия S_n к суммарной площади S_Σ , занятой очагами, соответственно составляет в среднем 20(0–43), 15(0–26), 10% (в скобках указаны предельные значения, вероятно, заниженные вследствие малого по сравнению с сейсмическим циклом интервала исследований). При этом очаги Озерновского (п-ов Камчатка) 22.11.1969 г. (с $M = 7,7$) и Малокурильского 17.06.1973 г. (с $M = 7,9$) землетрясений на уровне $A = 30$ практически вырождаются в точку. Поэтому для большей эффективности долгосрочного прогноза С. А. Федотова представляется разумным выбрать в качестве границы очага изолинию в диапазоне $10 \leq A \leq 20$. При $A = 17$ эффективность прогноза С. А. Федотова в классе землетрясений с $M > 7,6$ будет достаточно высокой: $1 - S_n / S_\Sigma = 85\%$ [3]. Полученное значение эффективности прогноза близко к ожидаемому: $\approx 80\%$ [21].

Очаг Урупского землетрясения на уровне $A = 17$ вытянут вдоль региона на 250 км и представлен двумя примерно одинаковыми ($150 \times 70 \text{ км}^2$) односвязными областями (см. рис. 1). Каждой области может соответствовать свой толчок. Расстояние между очагами и эпицентрами толчков невелико. Поэтому относительно наблюдений в дальней зоне очаг Урупского землетрясения можно представить в виде площадки $250 \times 150 \text{ км}^2$, вытянутой вдоль Курило-Камчатской дуги.

На возможность не единственного источника цунами при Урупском землетрясении указал Вард [30]. Он отметил, что все читаемые мареограммы мировой сети, записавшие цунами Урупского землетрясения в дальней зоне, не противоречат гипотезе одного или трех близко расположенных коллинеарных источников цунами при длине каждого не менее 150 км и общей протяженности очага 250 км.

Вывод Варда о возможном существовании одного или трех источников цунами при Урупском землетрясении можно рассматривать в качестве подтверждения гипотезы многосвязности очага этого землетрясения. Однако сравнение теоретических мареограмм, рассчитанных Вардом, с записями мареографов в ближней зоне позволяет сделать более определенное заключение о неединственном источнике цунами при Урупском землетрясении.

Очевидно, для исследования тонкой структуры источников предпочтительнее использовать мареограммы, полученные в ближней зоне. Поэтому надо сначала показать, что основные результаты, полученные Вардом для глубокой воды в дальней зоне, применимы для ближней зоны. Если учесть зависимость высоты волн цунами в ближней зоне от батиметрии в месте регистрации, то будет естественно ограничиться выводами, касающимися частотного состава волн цунами.

Отличительная особенность теоретических мареограмм Варда (рис. 3, а, б) — излучение в направлении разрыва существенно более низкочастотно, чем в перпендикулярном направлении. Это подтверждается записями мареографов Южно-Курильска и Матуа (рис. 3, в, г), расположенных в ближней зоне параллельно и перпендикулярно очагу Урупского землетрясения. Следовательно, полученные Вардом результаты относительно частотного состава волн цунами для глубокой воды в дальней зоне могут применяться при анализе волновой картины в ближней зоне.

В случае одного источника цунами (см. рис. 3, *а*) в направлении, перпендикулярном простиранию очага, наблюдается плавный переход от низкочастотных колебаний к более высокочастотным.

Отличительной особенностью модели трех источников цунами (см. рис. 3, *б*) является четкое разграничение высокочастотной (отчетливо выделенный пук колебаний) и низкочастотной частей записи. При этом отношение частот на теоретической мареограмме примерно равно 4. Разграничение низкочастотных и высокочастотных колебаний в модели трех источников, по мнению Варда, вызвано появлением двух определяющих размеров — длины и ширины очага, и оно обязательно, когда число источников цунами больше одного.

На мареограмме Матуга (см. рис. 3, *з*) видна смена интенсивных низкочастотных колебаний пугом высокочастотных колебаний, причем отношение частот примерно равно 4,5. Эмпирически результаты хорошо согласуются с теоретическими выводами. Таким образом, частотный анализ мареограмм Матуга служит подтверждением того, что число источников цунами при Урупском землетрясении было больше одного.

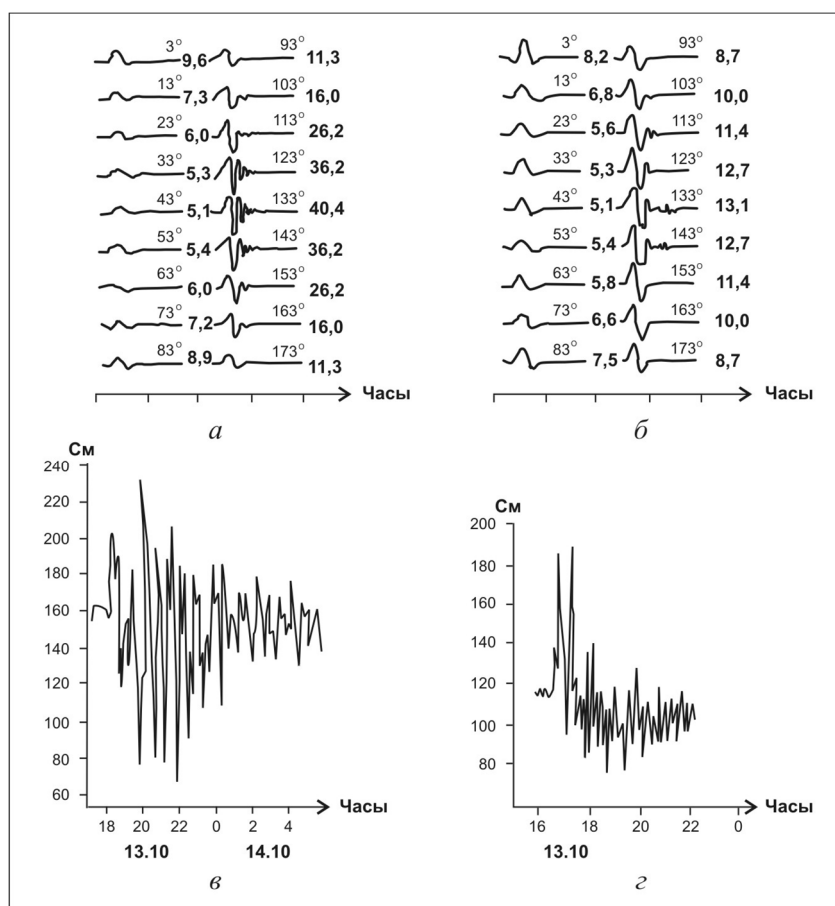


Рис. 3. Теоретические (*а, б*) и эмпирические (*в, з*) мареограммы Урупского землетрясения:

а, б — глубокая вода, расстояние 3000 км для различных азимутов с шагом 10°, нодальная плоскость простирается в направлении N 43° E [30]; *в, з* — время сахалинское, амплитуда смещений в см [11]

В случае двух очагов естественно предположить существование двух источников цунами. О характере движений в источниках цунами будем судить по механизму очага.

Механизм очага Урупского землетрясения определялся многими исследователями. Проанализировав все определения [30], Вард показал, что первая нодальная плоскость должна простирается между N 40° E и N 55° E и иметь угол падения между 65 и 90° на юго-восток. Угол падения второй нодальной плоскости достаточно точно определен (< 25°), но относительно координат простирания нет единого мнения. Такому расположению первой нодальной плоскости не

противоречит следующее определение механизма очага: основное перемещение, наиболее вероятно, происходило по крутым, практически вертикальным разломам, ориентированным вдоль дуги. Основная система разломов имела Г-образную или Т-образную форму. «Океанические» крылья смещались вверх, а «континентальные» — вниз [13].

С позиции существования двух источников вывод о подъеме привпадинной и опускании приконтинентальной поверхностей равносильно предположению о том, что в ближнем к о. Уруп источнике цунами, который может быть аналогом «континентального крыла», произошло опускание морского дна, а в дальнем от о. Уруп источнике цунами — поднятие (см. рис. 1). Очевидно, при таком характере движений в источниках цунами где-то в область северо-восточной оконечности о. Итуруп должна приходиться волна цунами поднятия, на северо-восток — волна опускания, причем существование такой точки никак не объяснить, если источник цунами один.

Наблюдателями на Курильских островах [11] была отмечена первой от пос. Сентябрьский (о. Итуруп) до о. Симушир волна опускания, а на юго-запад от пос. Сентябрьский — приливная волна (см. рис. 1). Данные наблюдений за характером первой волны цунами в ближней зоне хорошо согласуются с моделью двух источников цунами, расположение которых совпадает с расположением очагов.

Таким образом, совместный анализ сейсмограмм, данных по длине разрыва, механизму очага и особенностям цунами указывает на то, что Урупское землетрясение 13.10.1963 г. с $M = 8$ было представлено двумя толчками, каждому из которых соответствовал свой очаг и свой источник цунами.

Анализ спектров землетрясений позволил обнаружить в районе о-вов Итуруп и Уруп (очаг Урупского землетрясения) области, землетрясения в которых значительно различаются спектрами колебаний [2]. При Урупском землетрясении были выделены две группы сейсмических колебаний с периодами 1–10 и 15–20 с. Каждая из них, по-видимому, может характеризовать процессы в одном из двух очагов. Тогда при одинаковой интенсивности толчков на записях СК, полоса пропускания которых составляет 1–10 с, видимая амплитуда колебаний, соответствующих низкочастотному очагу, будет существенно меньше видимой амплитуды колебаний, соответствующих высокочастотному очагу. Интенсивность первого толчка, определенная по видимой амплитуде записи на сейсмостанциях СССР (см. рис. 2, а), примерно составляет 6–6,5 балла. Если считать, что первый толчок отвечает низкочастотному очагу, то его магнитуда может достигать 7–7,5 и выше.

Большое Камчатское землетрясение. На сейсмограммах Большого Камчатского землетрясения 04.11.1952 г. с $M = 8,5$, полученных на сейсмостанциях СССР (см. рис. 2, б), отчетливо выделяются два вступления с $\Delta t = 4,2$ с ($\pm 0,8$ с). На существование двух толчков при этом землетрясении, по данным мировой сети, указывалось в работе [1]. Очаг Большого Камчатского землетрясения (рис. 4) тоже представлен двумя односвязными областями на расстоянии 140 км друг от друга, причем одна расположена против г. Петропавловска-Камчатского, другая — против о. Парамушир. Существует гипотеза [7], согласно которой при Большом Камчатском землетрясении произошли подвижки по двум разломам, также расположенным против г. Петропавловска-Камчатского и о. Парамушир. Таким образом, каждому толчку Большого Камчатского землетрясения, возможно, соответствовал свой очаг.

Исходя из сравнения теоретически вычисленных и фактических высот волн цунами было найдено, что протяженность очага землетрясения должна быть равной 200 км [6].

Как следует из имеющихся данных [8, 9], вдоль береговой линии Северных Курил и Камчатки выделяются две области, каждая протяженностью по 200 км. В пределах этих областей встречаются наиболее интенсивные цунами с высотой волны ≥ 10 м. Первая область протянулась вдоль Северных Курил от о. Онекотан до г. Северо-Курильска (о. Парамушир), вторая — вдоль Камчатки от бухты Ходутка до мыса Шипунский. Изохронны прихода первых волн на побережье Курил и Камчатки (см. рис. 4) взяты из работы [16]. Протяженность каждого источника цунами составляет 200 км, и их положение совпадает с очагами, построенными по афтершокам первого года [3]. Таким образом, данные о цунами можно рассматривать как подтверждение гипотезы о двух толчках при Большом Камчатском землетрясении 04.11.1952 г. с $M = 8,5$, каждому из которых соответствовал свой очаг.

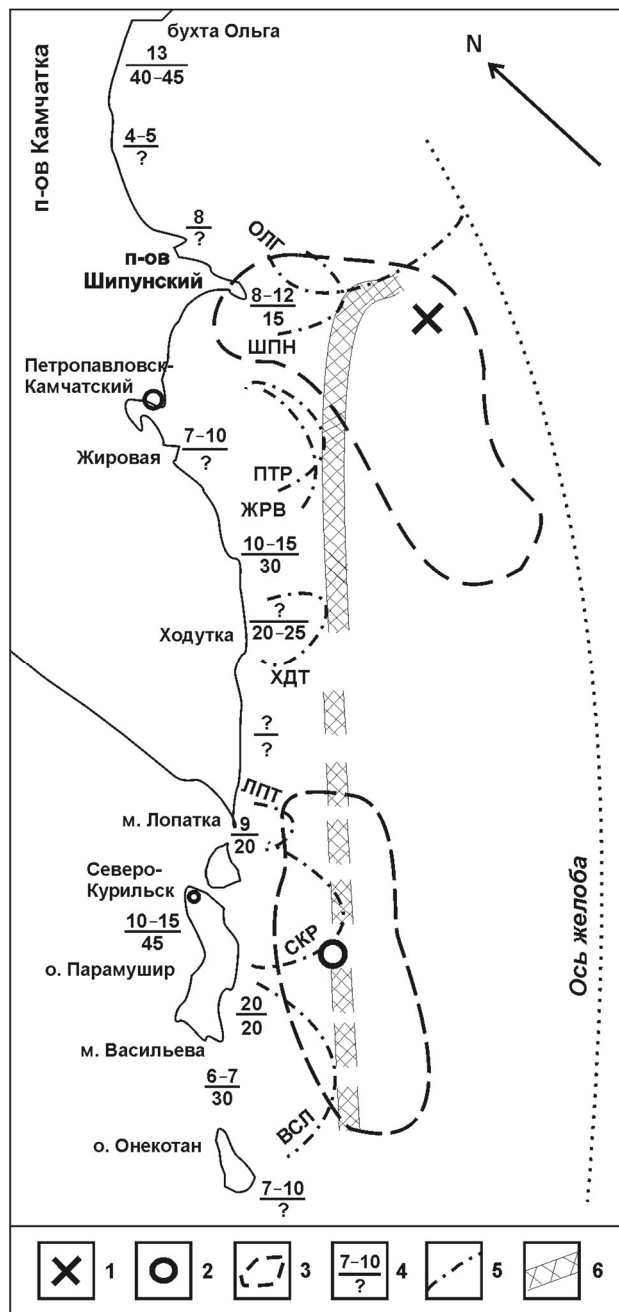


Рис. 4. Очаги и источники цунами Большого Камчатского землетрясения:

1 — инструментальный эпицентр первого толчка [5]; 2 — предполагаемый эпицентр второго толчка; 3 — изолинии сейсмической активности $A = 10$ по афтершокам 1-го года; 4 — в числителе — максимальная высота цунами, м; в знаменателе — время пробега первой волны цунами, мин [9, 11, 16]; 5 — изохроны [16]; 6 — западная граница источника цунами. Пункты наблюдений: бухта Ольга — ОЛГ, мыс Шипунский — ШПН, Петропавловск — ПТР, бухта Жировая — ЖРВ, бухта Ходутка — ХДТ, мыс Лопатка — ЛПТ, Северо-Курильск — СКР, мыс Васильева — ВСЛ

Из всех 10 курило-камчатских землетрясений 1952–1978 гг. с $M > 7,5$, очаги которых построены по афтершокам достаточно точно, только у двух — Большого Камчатского и Урупского землетрясений очаги представлены двумвязными областями. Как было показано в этой работе, каждой области может соответствовать толчок. Очаги остальных 8 землетрясений представлены односвязными областями [4, 21]. Следовательно, в классе курило-камчатских землетрясений с $M > 7,5$ для каждой односвязной области, ограниченной афтершоками 1-го года на уровне $A = 17$, предполагается свой толчок.

Таким образом, анализ длин разрыва, особенностей первых вступлений, особенностей цунами, расположения и механизма очагов курило-камчатских землетрясений с $M > 7,5$ позволяет предположить следующее. Во-первых, возможно уточнение долгосрочного сейсмического прогноза С. А. Федотова для Курило-Камчатской дуги: очаги будущих землетрясений с $M > 7,5$ могут располагаться в районах между односвязными областями толчков Урупского (13.10.1963 г.) с $M = 8$ и Большого Камчатского (04.11.1952 г.) с $M = 8,5$ землетрясений. Во-вторых, при временном интервале между толчками Урупского землетрясения $\Delta \bar{t} = 4,3$ с и эпицентральной дистанции между ними $\delta = 65$ км скорость упругих волн внутри очага и в прилегающих областях должна быть $\delta / \Delta \bar{t} = 13$ км/с при условии, что второй толчок вызван перераспределением напряжений после первого толчка. Однако максимальное значение продольных скоростей в пределах коры в районе Южных Курил не превышает 8,3–8,4 км/с [15, 20]. Следовательно, второй толчок Урупского землетрясения не мог быть вызван перераспределением напряжений после первого толчка. Для Большого Камчатского землетрясения этот вывод еще более очевиден.

Вероятность двух сильных землетрясений, случайно распределенных в регионе, с временным интервалом в несколько секунд практически равен нулю. Однако из 10 курило-камчатских землетрясений 1952–1978 гг. с $M > 7,5$ минимум два представляли собой двойной толчок (вероятность $\geq 0,2$). Это указывает на существование закономерностей во временном распределении землетрясений с $M > 7,5$, не связанных с перераспределением напряжений в очагах. Для Шикотанского землетрясения 11.06.1969 г. с $M = 8,2$ и его афтершока с $M = 7,8$ это почти очевидно. Действительно, согласно данным Нового каталога [5] афтершок произошел через $\Delta t = 5,4$ с на эпицентральной дистанции $\delta = 64$ км, что соответствует скорости передачи возмущений 12 км/с.

Литература

1. *Аверьянова В. Н.* Детальная характеристика сейсмических очагов Дальнего Востока. — М.: Наука, 1968. — 192 с.
2. *Болдырев С. А.* Спектры близких курильских землетрясений и их изменения во времени // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. — Новосибирск: Наука, 1974. — С. 119–133.
3. *Викулин А. В.* О взаимодействии эпицентральных областей курило-камчатских землетрясений // Сейсмичность и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1982. — С. 11–12.
4. *Викулин А. В., Чернобай И. П.* О двух толчках Урупского землетрясения 13 октября 1963 г. // Сейсмичность и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1982. — С. 13–15.
5. *Новый каталог сильнейших землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г.* — М.: Наука, 1977. — 536 с.
6. *Объяснительная записка к карте-схеме районирования разрушительного действия цунами на Курило-Камчатском побережье.* — М.: АН СССР, 1959. — 310 с.
7. *Попов Г. И.* Об условиях образования цунами // Бюллетень Совета по сейсмологии. Проблемы цунами. — 1961. — № 9. — С. 7–22.
8. *Саваренский Е. Ф.* [и др.]. Цунами 4–5 ноября 1952 г. // Бюллетень Совета по сейсмологии. — 1958. — № 4. — С. 11–23.
9. *Святловский А. Е.* Цунами. — М.: АН СССР, 1957. — 69 с.
10. *Сейсмическое районирование территории СССР.* — М.: Наука, 1980. — 308 с.
11. *Соловьев С. Л.* Землетрясения и цунами 13 и 20 октября 1963 года на Курильских островах. — Южно-Сахалинск, 1965. — 103 с.
12. *Соловьев С. Л.* Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов // Проблема цунами. — М.: Наука, 1968. — С. 7–50.
13. *Соловьев С. Л.* [и др.]. Землетрясения Дальнего Востока // Землетрясения в СССР в 1963 г. — М.: Наука, 1966. — С. 131–166.

14. *Старовойт О. Е.* Об определении некоторых параметров очага цунамигенного землетрясения 13 октября 1963 г. по длиннопериодным волнам // Проблема цунами. — М.: Наука, 1968. — С. 133–140.
15. *Тараканов Р. З., Ким Ч. У., Бобков А. О.* Районирование курильской зоны по сейсмогенности // Сейсмичность и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1982. — С. 51–53.
16. *Федотов С. А.* Определения областей возникновения волн цунами при Камчатском землетрясении 4 ноября 1952 г. и Итурупском землетрясении 6 ноября 1958 г. // Изв. АН СССР. Сер. Геофизическая. — 1962. — № 10. — С. 1333–1339.
17. *Федотов С. А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование территории СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 121–150.
18. *Федотов С. А.* О сейсмичности, свойствах мантии и сейсмическом прогнозе в области Курило-Камчатской дуги: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — М., 1969. — 278 с.
19. *Федотов С. А.* Реализация долгосрочного сейсмического прогноза для тихоокеанской фокальной зоны у берегов Курило-Камчатской дуги на 1965–1970 гг. и уточнение прогноза на 1971–1975 гг. // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. — Новосибирск: Наука, 1974. — С. 101–108.
20. *Федотов С. А., Багдасарова А. М., Кузин И. П., Тараканов Р. З.* Землетрясения и глубинное строение юга Курильской островной дуги. — М.: Наука, 1969. — 212 с.
21. *Федотов С. А., Чернышев С. Д., Чернышева Г. В., Викулин А. В.* Уточнение границ очагов землетрясений с $M \geq 7\frac{3}{4}$, свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги // Вулканология и сейсмология. — 1980. — № 6. — С. 52–67.
22. *Ben-Menachem A., Rosenman M.* Amplitude patterns of tsunamis: waves from submarine earthquake // J. Geophys. Res. — 1972. — Vol. 77. — № 17. — P. 3097–3128.
23. *Furomoto M.* Initial analysis LR waves from great earthquakes // J. Geophys. Res. — 1979. — Vol. 84. — P. 6867–6874.
24. *International Seismological Summary. ISC.* — Edinburg, 1969.
25. *Kanamori H.* Synthesis of long-period surface waves and its application to earthquake of October 13, 1963 // J. Geophys. Res. — 1970. — Vol. 75. — P. 5011–5027.
26. *Kellecher J., Sykes L., Oliver J.* Possible criteria for predicting earthquake location and their application to major plate boundaries of the Pacific and Carribean // J. Geophys. Res. — 1973. — Vol. 78. — № 14. — P. 2547–2585.
27. *Kellecher J., Savino J.* Distribution of seismicity before large strike-slip and trust earthquakes // J. Geophys. Res. — 1975. — Vol. 80. — № 2. — P. 260–271.
28. *Mogi K.* Sequential occurrence of recent great earthquakes // J. Phys. Earth. — 1968. — Vol. 16. — P. 30–36.
29. *Sykes L.* Aftershock zones of great earthquakes seismicity gaps and earthquake predicting for Alaska and Aleutians // J. Geophys. Res. — 1971. — Vol. 76. — № 2. — P. 8021–8041.
30. *Ward S. M.* Earthquake mechanism and tsunami generation: the Kuril Island event of October 13, 1963 // BSSA. — 1982. — Vol. 72. — № 3. — P. 759–777.

Б. В. Баранов¹, А. В. Викулин², Л. И. Лобковский¹

¹ *Институт океанологии АН СССР*

² *Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН*

**МЕЛКОФОКУСНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ
В ТЫЛУ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ
И ЕЕ СВЯЗЬ С СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ
В ЗОНЕ ПОДДВИГА ***

В работе устанавливается наличие пространственной и временной связи между мелкофокусными землетрясениями в тылу Курило-Камчатской дуги и сильнейшими землетрясениями в ее фронтальной части. Эта связь сводится к тому, что сильнейшие землетрясения в зоне поддвига приводят к усилению сейсмической активности в тылу Курило-Камчатской дуги. Показывается, что полученные результаты согласуются с представлениями клавишной модели циклов сильнейших землетрясений.

**SHALLOW-FOCUS SEISMICITY IN THE REAR
OF THE KURIL-KAMCHATKA ISLAND ARC
AND ITS RELATION TO THE LARGEST EARTHQUAKES
IN THE SUBDUCTION ZONE**

The study shows temporal and spatial relationship between shallow-focus earthquakes in the rear of the Kuril-Kamchatka island arc and largest earthquakes in its frontal part, namely, the largest earthquakes in the subduction zone evoke intensification of seismic activity in the rear of Kuril-Kamchatka island arc. The results obtained correlate with the concepts of «keyboard» model of cycles of largest earthquakes.

Введение

Основные пояса мелкофокусной сейсмической активности в островных дугах прослеживаются вдоль их фронтальных частей, отражая взаимодействие между погружающейся литосферной плитой, с одной стороны, и нависающей плитой — с другой. Известно, что напряжения и деформации в нависающей плите возникают и снимаются соответственно до и после сильнейших землетрясений. Эти циклы нагрузки и разгрузки приводят к появлению землетрясений не только в зоне контакта между плитами (межплитовые землетрясения), но и к возникновению сейсмической активности в нависающей плите (внутриплитовые землетрясения). Последние в ряде случаев образуют в тылу дуги пояса мелкофокусной активности, пространственно отделенные от землетрясений, принадлежащих зоне Беньофа.

В связи с этим предполагается [30], что должна существовать пространственно-временная корреляция между внутриплитовой активностью и сильнейшими землетрясениями, происходящими в зоне поддвига. Подобного рода корреляция была обнаружена для юго-западной и северо-восточной Японии за период с 1876 по 1975 гг. [29–31], а также для Курильской дуги с 1958 по 1978 гг. [1].

Целью настоящей работы является исследование соотношений между внутриплитовой сейсмичностью и сильнейшими землетрясениями для всей Курило-Камчатской островной дуги за период времени с 1910 по 1982 гг. К внутриплитовой сейсмичности мы будем относить мелкофокусные землетрясения ($H \leq 70$ км), возникающие в тыловых частях островной дуги.

В качестве фактического материала за период с 1911 по 1961 гг. использовались каталоги [4, 5], а с 1962 по 1982 гг. — каталоги курило-камчатских землетрясений, публикуемые в ежегодных сборниках «Землетрясения в СССР» [7]. В тыловых частях Курило-Камчатской дуги анализировались данные о распределении эпицентров землетрясений с $M \geq 5$.

* 4 (43). Вулканология и сейсмология. 1989. № 6. С. 73–84.

В анализируемых каталогах сейсмическая энергия землетрясений рассматриваемого региона классифицируется с помощью магнитудной M и энергетических K^{C67} (для Курил) и $K^{Ф68}$ (для Камчатки) шкал. Соотношения между этими шкалами были получены в работе [2]. Согласно данным этой работы магнитуде $M = 5$ отвечают значения энергетических классов $K^{C67} = 11,1$ и $K^{Ф68} = 12,1$.

Рассмотрим вначале распределение эпицентров мелкофокусных землетрясений в тылу дуги и очагов сильнейших событий в ее фронтальной части.

Распределение эпицентров тыловых землетрясений и очагов сильнейших событий для Курило-Камчатской дуги

Курильская дуга. В тылу Курильской дуги мелкофокусные землетрясения могут быть удалены от нее на расстояние 300–400 км (рис. 1). Их эпицентры приурочены главным образом к юго-западному борту Курильской котловины, образуя сейсмический пояс, пространственная отделенность которого от сейсмофокальной зоны Беньюфа отчетливо видна на разрезах (см. рис. 1, врезка). Этот пояс, протягивающийся вдоль юго-западного борта котловины, связывали с системой активных разломов, приуроченных к подножию Курильской островной дуги [17]. Изучение механизмов очагов происходящих здесь землетрясений показало [1], что подвижки являются взбросовыми или взбрососдвиговыми по плоскостям, круто падающим под островную дугу. Подобного рода разломы, как полагают [14], могут возникать в тылу дуги в результате сильного горизонтального сжатия, обусловленного поддвигом одной литосферной плиты под другую. От зоны субдукции напряжение сжатия, по-видимому, передается достаточно далеко в тыл, обуславливая сейсмическую активность не только вблизи дуги, но и на значительном удалении от нее. В последнем случае эпицентры землетрясений тяготеют к северо-восточному борту Курильской котловины, который является границей между участками с различным строением земной коры.

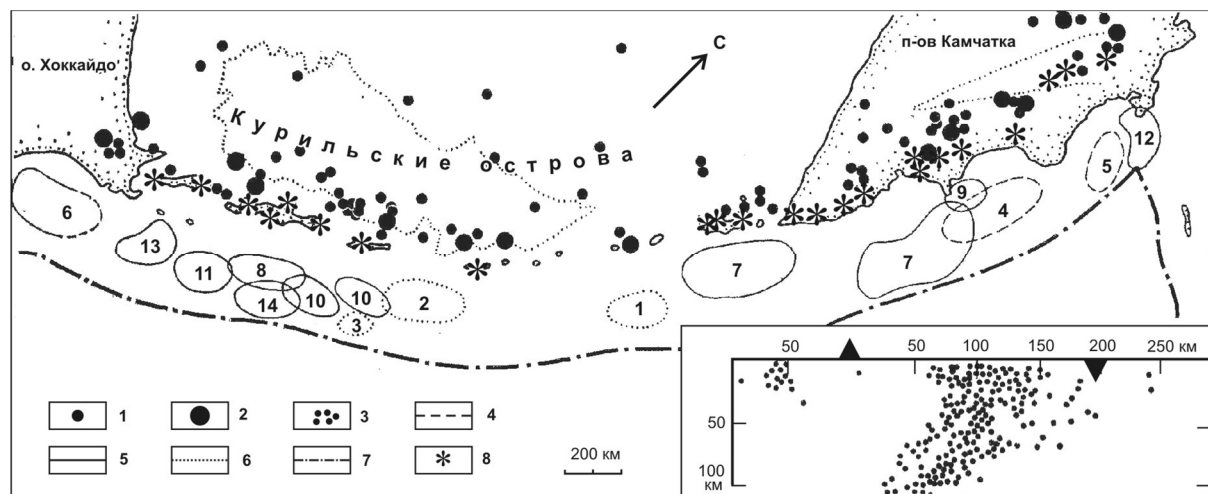


Рис. 1. Распределение эпицентров мелкофокусных землетрясений ($H \leq 70$ км) в тылу Курило-Камчатской дуги и очагов сильнейших событий в ее фронтальной части [3, 6, 19].
На врезке показан разрез сейсмофокальной плоскости в районе о-ва Итуруп по [17]:

1, 2 — эпицентры мелкофокусных землетрясений с $5 \leq M < 6$ и $M \geq 6$ соответственно; 3–5 — примерные, менее уверенные и уверенные границы очагов сильнейших землетрясений соответственно; 6 — контуры Курильской котловины и Центральной Камчатской депрессии; 7 — ось глубоководного желоба; 8 — вулканы. Очаги сильнейших землетрясений: 1 — 01.05.1915 г. с $M = 8,3$; 2 — 07.09.1918 г. с $M = 7,9$; 3 — 08.11.1918 г. с $M = 8,2$; 4 — 03.11.1923 г. с $M = 8,5$; 5 — 24.10.1923 г. с $M = 7,7$; 6 — 04.03.1952 г. с $M = 8,3$; 7 — 04.11.1952 г. с $M = 8,5$; 8 — 06.11.1968 г. с $M = 8,2$; 9 — 04.05.1959 г. с $M = 7,6$; 10 — 13.10.1963 г. с $M = 8,0$; 11 — 11.08.1969 г. с $M = 8,2$; 12 — 15.12.1971 г. с $M = 7,8$; 13 — 17.06.1973 г. с $M = 7,9$; 14 — 24.03.1978 г. с $M = 8,0$

В целом по сравнению с зоной Бенъофа сейсмическая активность в тылу Курильских островов невелика. За рассматриваемый период времени здесь было зарегистрировано 54 события с $M \geq 5$, из них восемь событий имели $M \geq 6$. Максимальную магнитуду $M = 6,75$ имело Западно-Итурупское землетрясение 07.05.1962 г.

Камчатка. На Камчатке эпицентры тыловых землетрясений с $M \geq 5$ сосредоточены в основном между цепочкой действующих вулканов и Центральной Камчатской депрессией (см. рис. 1). В самой депрессии и к западу от нее количество землетрясений резко уменьшается. Отмечается [18], что максимумы сейсмической активности располагаются в районе Козыревско-Быстринского свода, в верховьях р. Щапина и на южном окончании Центральной Камчатской депрессии, где отчетливо видна связь неглубоких землетрясений с современными тектоническими разломами.

Так же, как и в тыловых частях Курильской дуги, сейсмическая активность в пределах тыла Камчатки на 1–2 порядка ниже, чем в ее фокальном слое. За период с 1911 по 1982 гг. в тыловой части Камчатки произошло 30 событий с $M \geq 5$, из них четыре толчка имели $M \geq 6$. Одна из наиболее примечательных серий мелкофокусных землетрясений, известных на территории Камчатки, произошла в январе — марте 1957 г. Эпицентры землетрясений этой серии располагались к западу от п-ова Шипунский, между Авачинской и Жупановской группами вулканов, примерно на 70–80 км севернее г. Петропавловска-Камчатского. Наиболее сильные землетрясения этой серии ($N = 4$, $M = 5,2–5,7$) произошли 03.02.1957 г.

Самое сильное мелкофокусное тыловое камчатское землетрясение в 1911–1982 гг. произошло 16.08.1922 г. и имело магнитуду $M = 6,6$.

В целом в тылу Курило-Камчатской дуги эпицентры мелкофокусных землетрясений за рассматриваемый отрезок времени распределяются неравномерно (см. рис. 1). Участки относительно повышенной плотности землетрясений приурочены к тыловым частям Южных Курил, т. е. к тому отрезку дуги, в пределах которого с 1911 по 1982 гг. произошло восемь сильнейших событий: Итурупские (07.09.1918 г., $M = 7,9$; 08.11.1918 г., $M = 8,2$), Токачи (04.03.1952 г., $M = 8,3$), Итурупское (06.11.1958 г., $M = 8,2$), Урупское (13.10.1963 г., $M = 8,0$), Шикотанское (11.08.1969 г., $M = 8,2$), Малокурильское (17.06.1973 г., $M = 7,9$) и рой землетрясений (22–24.03.1978 г. с $M = 7,0–8,0$) вблизи о-ва Итуруп. На Камчатке и Северных Курилах эпицентры тыловых событий также сосредоточены напротив очагов сильнейших землетрясений: вблизи о-ва Онекотан (01.05.1915 г., $M = 8,3$), в Кроноцком заливе (03.02.1923 г., $M = 8,5$), Камчатском заливе (24.11.1923 г., $M = 7,7$), Большое Камчатское (04.11.1952 г., $M = 8,5$), у п-ова Шипунский (04.05.1959 г., $M = 7,6$) и Усть-Камчатское (15.12.1971 г., $M = 7,8$).

Участки повышенной плотности землетрясений отделены один от другого областями, в которых толчки данной магнитуды почти отсутствуют. В частности, не было зарегистрировано ни одного события непосредственно в тылу центральной части Курильской дуги, фронтальная область которой на данном участке рассматривается как сейсмическая брешь [19]. Тыловые землетрясения также отсутствовали на участке между мысами Лопатка и Поворотный, который, по данным работы [6], соответствовал брешу в очаге землетрясения 1952 г. Предполагается, что единый очаг этого события распадается на два: первый из них (северный) протягивается от Шипунского полуострова до м. Поворотный и смещен к желобу, а второй — от м. Лопатка до северной оконечности о-ва Онекотан и расположен ближе к островам. Расстояние между ними составляет около 140 км, и, как отмечалось выше, землетрясения в тылу располагаются только напротив этих очагов, а на участке между ними отсутствуют.

Отсутствуют эпицентры тыловых землетрясений и между двумя очагами двух сильнейших камчатских землетрясений в 1923 г., которые, согласно данным работы [3], следует рассматривать как самостоятельные толчки. Очаги этих землетрясений расположены на расстоянии около 100 км друг от друга. В отличие от этой точки зрения в работах [16, 19] полагается, что второе событие (24.11.1923 г., $M = 7,7$) является афтершоком первого (03.02.1923 г., $M = 8,5$).

Таким образом, эти данные дают основание предполагать наличие пространственной связи между мелкофокусными событиями в тылу Курило-Камчатской дуги и сильнейшими землетрясениями в ее фронтальной части. Следовательно, можно предполагать и наличие определенных временных соотношений между ними.

Временные соотношения между тыловой сейсмичностью и сильнейшими землетрясениями

Курильская дуга. В тылу Курильской дуги мелкофокусная сейсмичность, как отмечалось в работе [12], в течение 1913–1958 гг. проявилась на охотоморском шельфе Северных Курильских островов, т. е. в то время, когда во фронтальной части этого отрезка дуги произошли землетрясения 01.05.1916 г. с $M = 8,3$ и Большое Камчатское 04.11.1952 г. с $M = 8,5$. В дальнейшем сильнейшие события здесь отсутствовали, уменьшилась и активность в тылу дуги. В 1962–1975 гг. было зарегистрировано лишь небольшое число слабых землетрясений [12].

В противоположность северному отрезку дуги в тылу Южных Курил и на о-ве Хоккайдо сейсмическая активность за этот период времени (1952–1978 гг.) была относительно высокой. Здесь, во фронтальной части дуги, в это время, как уже отмечалось, произошла серия из шести сильнейших землетрясений 1952–1978 гг.

Оживление сейсмической активности наблюдалось также и на Камчатке до и после Большого Камчатского землетрясения и землетрясения 04.05.1959 г.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что существует определенная временная связь между тыловой и фронтальной сейсмичностью. Эта связь видна на графике, показывающем распределение очагов сильнейших землетрясений и эпицентров событий с $M \geq 5$ в тылу Курило-Камчатской дуги вдоль ее простирания (рис. 2). В пределах Курильской дуги первый период активности относился к 1915–1918 гг., когда в зоне контакта между плитами произошли три сильнейших землетрясения с $M \geq 7,9$. До этой серии в тылу дуги мы располагаем данными только о двух событиях: 29.12.1913 г. с $M = 5,5$ и 18.03.1916 г. с $M = 5,9$, эпицентры которых располагались на значительном удалении от очагов этих событий. Следует подчеркнуть, что уверенная регистрация курило-камчатских землетрясений с $M \geq 5,0$ осуществляется с 1952 г., поэтому до того времени данные о сейсмических событиях указанного энергетического класса могут быть неполными. Кроме того, эпицентры землетрясений определялись в начале века с точностью не более 1–2, следовательно, вполне возможно, что два упомянутых события, эпицентры которых расположены вблизи островов, не являются тыловыми.

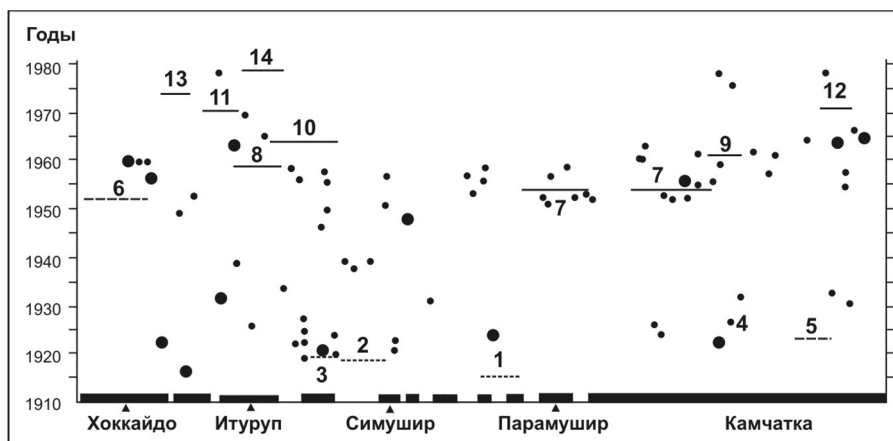


Рис. 2. Распределение очагов сильнейших землетрясений и эпицентров тыловых событий во времени вдоль Курило-Камчатской дуги (условные обозначения см. на рис. 1)

Вспышка сейсмической активности в тылу дуги напротив очагов 07.09.1918 г. и 08.11.1918 г. началась с землетрясения 12.11.1919 г. ($M = 6,3$) и продолжалась в течение семи лет до землетрясения 11.11.1926 г. ($M = 5,1$) (см. рис. 2). Всего за этот период произошло 11 событий с $M \geq 5$, эпицентры которых были приурочены как к юго-восточному, так и к северо-восточному бортам Курильской котловины. Далее, вплоть до 1987 г., данный тыловой участок дуги был спокоен. Начиная с 1926 г. в тылу дуги намечается тенденция к миграции эпицентров землетрясений в юго-западном направлении, которая кончается вспышкой сейсмической активности на о-ве Хоккайдо в 1956–1959 гг. напротив очага землетрясений Токачи в 1952 г. Скорость миграции составляла порядка 15–20 км/год.

Очагу землетрясения 01.05.1915 г. в тылу дуги соответствовал толчок с $M = 6,1$, который был зарегистрирован через восемь лет после него. Далее этот участок был сейсмически спокойным, в то время как тыловая область дуги к юго-западу от него активизировалась наряду с активизацией зоны поддвига в 1958–1978 гг.

Камчатка. В фокальной зоне Камчатки за рассматриваемый период времени первые два сильнейших землетрясения имели место с 1923 г. Первому из них (03.11.1923 г., $M = 8,5$) в тылу дуги предшествовали два толчка, один из которых (16.08.1922 г.) произошел напротив его очага и имел магнитуду $M = 6,6$ (см. рис. 2). После этого сильнейшего землетрясения наблюдалась активизация тылового участка дуги, где в течение семи лет было зарегистрировано четыре события с $M \geq 5$. Перед вторым сильнейшим землетрясением (24.11.1923 г., $M = 7,7$) сейсмичность в тылу дуги отсутствовала, и только через восемь лет после него был отмечен один толчок — 12.09.1931 г. с $M = 5,8$.

Следующая серия из трех сильнейших землетрясений у тихоокеанского побережья Камчатки охватывала период с 1952 по 1971 гг.

Первому из них — Большому Камчатскому землетрясению 04.11.1952 г. с $M = 8,5$ — в тылу дуги предшествовала вспышка сейсмической активности, которая началась за четыре года до этого события. Перед этим землетрясением здесь произошло 10 толчков, а после него — четыре события, последнее из которых имело место в 1961 г., т. е. через девять лет.

Отчетливая связь между очагами двух последующих сильнейших камчатских землетрясений (04.05.1959 г., $M = 7,6$ и 15.12.1971 г., $M = 7,8$) и эпицентрами тыловых событий не наблюдалась. Следует только отметить, что в тылу в 1957 г. было зарегистрировано одно событие против очага землетрясения 1959 г. и один толчок произошел через семь лет после землетрясения 1971 г. Эпицентры остальных мелкофокусных землетрясений попадали или между очагами этих двух событий, или происходили за 15–20 лет до и после них. Необходимо отметить, что здесь так же, как и на Курильских островах, намечается тенденция к миграции эпицентров мелкофокусных землетрясений вдоль Камчатки с юго-запада на северо-восток со скоростью около 80 км/год. В этом же направлении перемещались очаги сильнейших землетрясений 1952–1971 гг. Аналогичной тенденцией к миграции в северо-восточном направлении характеризовались и те тыловые землетрясения, которые мы связываем с сильнейшими землетрясениями 1923 г. (см. рис. 2).

Анализ пространственно-временных соотношений между тыловой сейсмичностью и сильнейшими землетрясениями в Курило-Камчатской зоне выполнен на качественном уровне. Тем не менее приведенный в статье обзор позволяет сделать вывод о том, что сильнейшие землетрясения в зоне поддвига приводят к усилению сейсмической активности в тылу Курило-Камчатской дуги. Особенно отчетливо это видно на примере Камчатки, где существуют два периода тыловой сейсмической активности, совпадающие по времени с двумя сериями сильнейших землетрясений. Для Курильской дуги подобная картина является менее определенной, поскольку эпицентры тыловых землетрясений не во всех случаях располагаются напротив очагов сильнейших событий и могут быть не так тесно связаны по времени с последними.

Геодинамический анализ особенностей пространственно-временного распределения сейсмичности в Курило-Камчатской островной дуге

Очевидно, что любая качественная, а тем более количественная интерпретация наблюдаемых закономерностей распределения мелкофокусной сейсмичности должна основываться на некоторой геотектонической концепции строения и развития Курило-Камчатской островной дуги, включая представление о глубинных физических процессах, происходящих в этом регионе. Мы будем исходить из широко распространенной в настоящее время концепции субдукции, взяв за основу разработанную в ее рамках клавишную модель сильнейших землетрясений [8–11]. Отметим, что эта модель позволила снять противоречия, существовавшие между традиционной схемой субдукции [23] и выявленной картиной пространственно-временного распределения очагов сильнейших землетрясений [15, 16], а в дальнейшем была убедительно подтверждена серией работ [24–26, 31] и стала основой долгосрочного сейсмического прогноза, получив название концепции сейсмических брешей [27].

Согласно клавишной модели фронтальные части островных дуг и активных континентальных окраин разбиты поперечными разломами на отдельные блоки-клавиши, характерный размер которых составляет ≈ 100 км (рис. 3, *a*). С внешней стороны блоки ограничены глубоководным желобом, с внутренней — системой продольных разломов, отделяющих их от более массивных частей островной дуги. Блоки расположены на пологом участке поверхности подвигаемой плиты. Движение плиты создает стабильный энергетический источник для системы блоков, который обеспечивает в ней квазистационарный сейсмический режим. Он заключается в последовательном чередовании фаз медленного нагружения блоков и их быстрой разгрузки, сопровождаемой сильнейшими землетрясениями. Нагружение сейсмогенных блоков, характеризующееся в основном их горизонтальным сжатием вкрест простирания дуги, осуществляется благодаря сильному сцеплению подошвы блоков с поверхностью движущейся плиты. Кроме того, блоки взаимодействуют по своим тыловым граням с основным массивом дуги, который блокирует их смещение в сторону континента. Наконец, они взаимодействуют друг с другом благодаря трению их боковых граней.

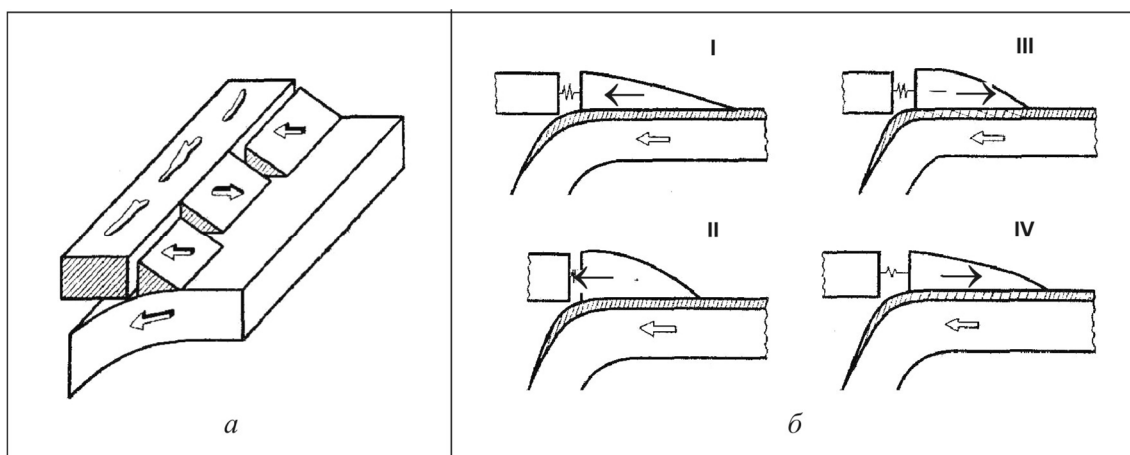


Рис. 3. Блоковое строение фронтального склона островной дуги (*a*) по [9] и стадии сейсмического цикла (*б*) по [10]. Заштрихована контактная зона (см. пояснения в тексте)

Катастрофическое землетрясение происходит тогда, когда в сейсмогенном блоке в результате сжатия накапливается предельная величина упругой энергии, а в контактной зоне между подошвой блока и поверхностью плиты возникают предельные касательные напряжения. В момент землетрясения разрушается структура контактной зоны, касательные напряжения здесь падают и происходит сейсмическая подвижка надвигового типа, при которой блок смещается в сторону океана (см. рис. 3, *б*, стадии III–IV), в то время как соседние блоки остаются на месте. На афтершоковой стадии развития сейсмического процесса сместившийся блок продолжает преимущественно выдвигаться в океан по разупрочненной контактной поверхности за счет запасенной в нем упругой энергии (см. рис. 3, *б*, стадия IV). В конце концов он останавливается, а в контактной зоне происходит консолидация и упрочение материала. Сцепление между плитой и островодужным блоком при этом возрастает, и последний начинает «пассивно» перемещаться на подвигаемой плите к островной дуге, сжимаясь и постепенно накапливая упругую энергию (см. рис. 3, *б*, стадии I, II). Как показывают расчеты [8], уровень критической энергии в блоке вновь достигается за время около 100 лет, что, собственно, и определяет характерный период циклов сильнейших землетрясений, поскольку афтершоковая стадия занимает всего несколько лет.

Рассмотрим с позиций клавишной модели наблюдаемые особенности распределения мелкофокусной сейсмичности в тылу Курило-Камчатской островной дуги и характер ее взаимосвязи с сильнейшими фронтальными землетрясениями. Отметим прежде всего, что, как показывают расчеты [8], сброс напряжений в сейсмогенных блоках при землетрясениях и на афтершоковой стадии сейсмического процесса происходит не более чем на 30–50 % от величины их критического уровня. Таким образом, каждый блок в течение всего сейсмического цикла находится в сос-

тоянии существенного регионального сжатия, на которое накладывается медленная догрузка, сейсмический сброс и сравнительно быстрая афтершоковая частичная разгрузка. На стадии нагружения сейсмогенный блок, подобно штампу, давит на тыловую область дуги, расположенную напротив него. При этом в силу упругости литосферы давление передается достаточно далеко, включая область окраинного бассейна.

Очевидно, что максимальное боковое давление блока на расположенный против него участок островной дуги и литосферы окраинного моря достигается тогда, когда сам блок подходит к состоянию предельного сжатия. Отсюда становится понятной пространственная и временная приуроченность мелкофокусной тыловой сейсмичности к очагам сильнейших фронтальных землетрясений, так как напряжения в сейсмогенном блоке на разломах в тылу дуги достигают своих предельных значений почти одновременно. В этом случае достаточно небольшого тектонического возмущения, чтобы произошло сильнейшее фронтальное землетрясение или соответствующее тыловое мелкофокусное землетрясение. Сравнительно небольшая магнитуда тыловых землетрясений с $M \geq 5-6$ обусловлена, по-видимому, субвертикальной ориентацией тыловых разломов, находящихся в условиях бокового сжатия, что препятствует реализации больших подвижек (рис. 4). Когда происходит сильнейшее фронтальное землетрясение, то вызванное им тектоническое возмущение, распространяясь по литосфере в разные стороны, достигает через некоторое время зоны тылового разлома и инициирует в нем сейсмическую активность.

Скорость распространения тектонических волн определяется совместным деформированием упругой литосферы и подстилающей вязкой астеносферы, что впервые установил Эльзассер, который, собственно, и выделил этот важнейший класс движений [22]. Одномерная модель Эльзассера в виде полубесконечной упругой плиты, лежащей на вязком слое, показывает, что равномерный сброс напряжений вдоль границы плиты создает деформационную тектоническую волну возмущения, которая распространяется по литосфере, подчиняясь диффузионному закону. В работах [20, 21] было отмечено, что процесс диффузии распространяющегося по литосфере тектонического возмущения может служить механизмом, посредством которого сейсмическая активность передается вдоль границ плит.

В работе [13] было сделано обобщение одномерной модели Эльзассера на двумерный случай. Определяющее уравнение для горизонтальных смещений U_i в тонкой плоской и упругой плите, плавающей на вязкой астеносфере, имеет вид [13]:

$$a^2[\nabla^2 U_i + (1 + \nu)/(1 - \nu) \text{grad}_i U] = \frac{\partial U_i}{\partial t}, \quad (1)$$

$$i = x, y; -\infty < x, y < \infty,$$

где $a = hNE/\eta$; H, h — толщины литосферы и астеносферы; E, ν — модуль сдвига и коэффициент Пуассона среды литосферы; η — коэффициент вязкости астеносферы.

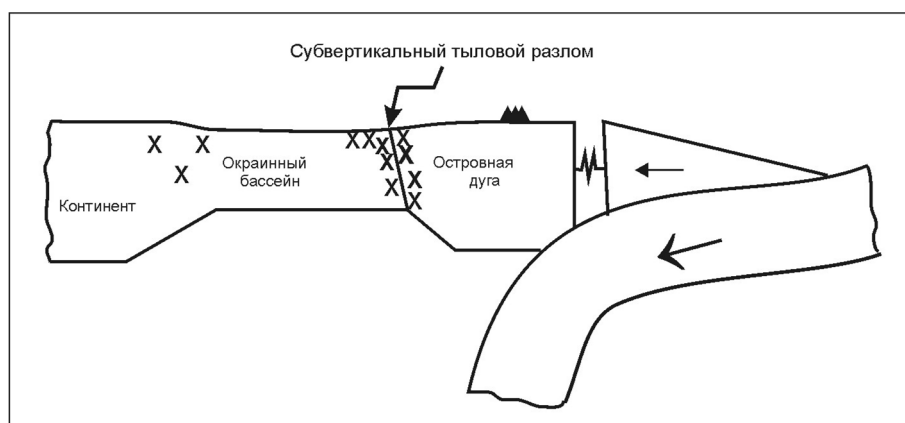


Рис. 4. Схематический разрез через островную дугу

Показан субвертикальный разлом, образующийся вдоль сочленения дуги с котловиной Охотского моря

Положим $\theta = \text{div } U$ и $\omega = \text{rot } U$ и применим к уравнению (1) операции div и rot . Тогда после некоторых преобразований получим:

$$\frac{2a}{1-\nu} \Delta \theta = \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (2)$$

$$a \Delta \omega = \frac{\partial \omega}{\partial t}, \quad (3)$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ — оператор Лапласа.

Уравнения (2), (3) относятся к диффузионному типу и описывают затухающие тектонические возмущения. Эти уравнения показывают, что аналогично тому, как в твердом (упругом) теле распространяются продольные и поперечные упругие волны, так в данном случае продольные и поперечные (тектонические) возмущения (возмущения сжатия — растяжения и сдвига) распространяются независимо друг от друга, причем с разными скоростями.

Уравнения (2), (3) являются основными для интерпретации обсуждаемых эффектов миграции сейсмической активности. Первое из них описывает распространение тектонического возмущения вкrest простираия дуги после сильнейшего фронтального землетрясения (сейсмический сброс напряжений, т. е. начальное возмущение, происходит в направлении, ортогональном к дуге). Тектонические волны растяжения (здесь, конечно, имеются в виду дополнительные растягивающие напряжения, которые накладываются на общее состояние сжатия системы), идущие от фронтальных блоков к тыловым разломам, обеспечивают наблюдаемую пространственно-временную связь фронтальной и тыловой сейсмичности. Из уравнения (2) следует, что за время t возмущение распространяется на расстояние порядка

$$x \approx \sqrt{\frac{2a}{1-\nu}} t.$$

Примем для грубой оценки следующие значения параметров: $H = 60$ км, $h = 100$ км, $E = 5,5 \cdot 10^{11}$ дин/см², $\eta = 5 \cdot 10^{19}$, $\nu = 0,25$. Тогда за один год расстояние x , на которое распространится волна возмущения, будет равно 70 км, а за четыре года волна пройдет расстояние 140 км. Эти оценки качественно согласуются с наблюдаемыми временными запаздываниями тыловой сейсмичности по отношению к фронтальной.

Уравнение (3) описывает распространение тектонического возмущения вдоль простираия дуги, причем в этом случае мы имеем дело с волной сдвига. Физический смысл этого типа возмущения достаточно очевиден. Когда какой-либо сейсмогенный блок резко смещается в сторону океана в процессе сильнейшего землетрясения, участок островодужной литосферы, расположенный в его тылу, также смещается в направлении океана, увлекая за собой смежные участки дуги, что приводит к распространению продольного возмущения сдвига (рис. 5). С этим возмущением естественно связать предполагаемую миграцию тыловой сейсмической активности вдоль Курильской дуги с северо-востока на юго-запад. Скорость этой миграции, которая оценивается величиной ~ 20 км/год, вполне сопоставима со скоростью диффузии тектонических напряжений и деформаций, описываемых уравнением (3). Во всяком случае, как следует из сравнения коэффициентов диффузии уравнений (2) и (3), скорость распространения волны сдвига вдоль дуги примерно в 1,6 раза меньше скорости распространения волны растяжения вкrest простираия дуги.

С возмущением сдвига, распространяющимся вдоль дуги, можно связать и общую миграцию очагов сильнейших землетрясений. Действительно, после срыва одного из сейсмогенных блоков продольная тектоническая волна будет сдвигать в сторону океана тыловые участки дуги, блокирующие смежные блоки, и приводить к их дополнительному сжатию, тем самым создавая благоприятные условия для срыва блоков (см. рис. 5).

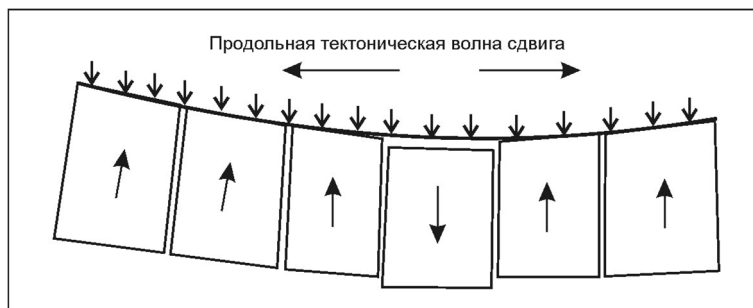


Рис. 5. Возникновение продольной тектонической волны сдвига вследствие смещения блока в сторону океана после сильнейшего землетрясения (см. пояснения в тексте)

Поскольку коэффициент диффузии зависит от таких параметров, как толщина литосферы, вязкость астеносферы и т. д., которые изменяются, по-видимому, толще, чем литосфера Курильских островов и прилегающей глубоководной котловины, то с этим обстоятельством может быть связана большая скорость распространения сдвиговой волны возмущения и соответственно миграции сейсмической активности на Камчатке по сравнению с Курильской островной дугой.

В заключение отметим, что изложенные здесь теоретические соображения носят в основном постановочный качественный характер. В дальнейшем на основе этих представлений предполагается разработать математическую теорию, обобщающую количественную клавишную модель и учитывающую наличие тектонических волн в системе взаимодействующих литосферных плит, сейсмогенных блоков и астеносферы в зонах субдукции.

Литература

1. Баранов Б. В., Лобковский Л. И. Мелкофокусная сейсмичность в тылу Курильской островной дуги и ее связь с зоной Заварицкого — Беньюфа // Докл. АН СССР. — 1980. — Т. 225. — № 1. — С. 67–71.
2. Викулин А. В. О соотношении между энергетическими и магнитудными классификациями Камчатки, Курил и Японии // Вулканология и сейсмология. — 1983. — № 3. — С. 90–98.
3. Викулин А. В. Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова // Вулканология и сейсмология. — 1986. — № 3. — С. 72–83.
4. Викулин А. В., Ким Ч. У. Курило-камчатские землетрясения. Данные наблюдений 1911–1952 гг. // Материалы Мирового центра данных Б. — М., 1983. — 82 с.
5. Викулин А. В., Ким Ч. У. Курило-камчатские землетрясения. Данные наблюдений 1953–1961 гг. // Материалы Мирового центра данных Б. — М., 1983. — 84 с.
6. Викулин А. В., Чернобай И. П. Механизм очага Урупского (1963 г.) и Большого Камчатского (1952 г.) землетрясений // Динамические процессы в дискретных геофизических системах. — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 58–66.
7. Землетрясения в СССР в 1962–1982 гг. — М.: Наука, 1965–1985.
8. Керчман В. И., Лобковский Л. И. Моделирование сейсмотектонического процесса в активных переходных зонах по клавишной схеме сильнейших землетрясений // Докл. АН СССР. — 1986. — Т. 291. — № 5. — С. 1086–1089.
9. Лобковский Л. И. К теории релаксационных автоколебаний островодужных блоков и циклов сильнейших землетрясений // Физические свойства вещества и процессы в недрах Земли: материалы 1-й Всесоюз. геофиз. шк. — М.: ИФЗ АН СССР, 1986. — С. 62–86.
10. Лобковский Л. И., Баранов Б. В. К вопросу о возбуждении цунами в зонах поддвига литосферы плит / Процессы возбуждения и распространения цунами. — М.: ИО АН СССР, 1982. — С. 7–17.
11. Лобковский Л. И., Баранов Б. В. Клавишная модель сильнейших землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // Докл. АН СССР. — 1984. — Т. 275. — № 4. — С. 843–847.
12. Поплавская Л. И., Оскорбин Л. С. Сейсмическая активность земной коры шельфовых зон Охотского моря // Сейсмическое районирование Курильских островов, Приморья и Приамурья. — Владивосток: Наука, 1977. — С. 120–127.

13. Райс Дж. Механика очага землетрясения / Механика. Новое в зарубежной науке. — М.: Мир, 1982. — Т. 28. — 236 с.
14. Сорохтин О. Г. Возможный механизм образования региональных надвигов и геосинклинальной складчатости // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1973. — № 7. — С. 3–7.
15. Федотов С. А. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. — 1965. — № 36 (203). — С. 66–93.
16. Федотов С. А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. — М.: Наука, 2005. — С. 36–62.
17. Федотов С. А. Глубинное строение, свойства верхней мантии и вулканическая деятельность Курило-Камчатской островной дуги по сейсмологическим данным на 1964 г. // Вулканизм и глубинное строение Земли: материалы 2-го Всесоюз. вулканол. совещ. — М.: Наука, 1966. — С. 8–25.
18. Федотов С. А., Токарев П. И., Годзиковская А. А., Зобин В. М. Детальные данные о сейсмичности Камчатки и Командорских островов (1965–1968 гг.) // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. — Новосибирск: Наука, 1974. — С. 36–45.
19. Федотов С. А., Чернышев С. Д., Чернышева Г. В., Викулин А. В. Уточнение границ очага землетрясений с $M \geq 7\frac{3}{4}$, свойства сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги // Вулканология и сейсмология. — 1980. — № 6. — С. 52–67.
20. Anderson D. L. Accelerated plate tectonics // Science. — 1975. — Vol. 187. — P. 1077–1079.
21. Bott M. H., Dean D. S. Stress diffusion from plate boundaries // Nature. — 1973. — Vol. 243. — P. 339–341.
22. Elsasser W. M. Convection and stress propagation in the mantle // Application modern physics to the Earth and Planetary interiors / Ed. S. K. Runcorn, Wiley Interscience. — N. Y., 1969. — P. 223–246.
23. Isacks B., Oliver I., Sykes L. R. Seismology and the new global tectonics // J. Geophysics Research. — 1968. — Vol. 73. — P. 5855–5899.
24. Kelleher I., Sykes L. R., Oliver J. Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Carribean // J. Geophysics Research. — 1973. — Vol. 78. — P. 2547–2585.
25. McCann W. R., Nishenko S. P., Sykes L. R., Krause J. Seismic gap and plate tectonics: seismic potential for major boundaries // Pure and Applied Geophysics. — 1979. — Vol. 117. — P. 1082–1147.
26. Mogi K. Some feature of recent seismic activity in and near Japan // Bulletin Earthquake Research Institute. — 1968. — Vol. 46. — P. 1225–1236.
27. Proceedings of conference of methodology for identifying seismic gaps and soon-to-break gaps. — California, 1978. — P. 924.
28. Seno T. Interplate seismicity in Tohoku and Hokkaido and large interplate earthquakes: a possibility of a large interplate earthquake off the Southern Sanriku coast, Northern Japan // Journal Physics Earth. — 1979. — Vol. 27. — P. 21–51.
29. Shimazaki K. Interplate seismicity and interplate earthquakes historical activity in Southwest Japan // Tectonophysics. — 1976. — Vol. 33. — P. 33–42.
30. Shimazaki K. Correlation between interplate seismicity and interplate earthquakes in Tohoku, Northeast Japan // Bulletin Seismology Society of America. — 1978. — Vol. 68. — P. 181–192.
31. Sykes L. R. Aftershock Zones of great earthquakes, seismicity gaps and earthquake prediction for Alaska and the Aleutian // J. Geophysics Research. — 1971. — Vol. 76. — P. 8021–8041.

А. В. Викулин

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ ВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА *

Представлена академиком М. А. Садовским 24.01.1989 г.

Оправдываемость долгосрочного сейсмического прогноза для островных дуг и континентальных окраин Тихого океана оказалась достаточно высокой — не менее 80–90% [1–4]. Это указывает на то, что статистические методы, с помощью которых было установлено свойство цикличности сейсмического режима, лежащее в основе такого прогноза, являются адекватными. В настоящей работе проводится совместный анализ особенностей пространственного, временного и энергетического распределений землетрясений, выявленных статистическими методами с использованием данных о землетрясениях северо-западной окраины Тихого океана (Японская, Курило-Камчатская и Алеутская островные дуги) с магнитудами $M \geq 7$, происшедших в 1904–1986 гг. [5–8].

Анализ взаимного расположения афтершоковых областей землетрясений показал [5, 7], что существует определенное значение магнитуды M_1 , в малой окрестности которого такое распределение имеет следующую особенность: афтершоковые области землетрясений с $M \geq M_1$ имеют тенденцию не перекрывать друг друга, в то время как афтершоковые области землетрясений с $M < M_1$ практически полностью расположены внутри афтершоковых областей более сильных событий. Особое значение магнитуды для рассматриваемого района оказалось $M_1 = 7,7 \pm 0,2$. Если тенденция к такому взаимному расположению афтершоковых областей землетрясений сохранится в дальнейшем, то отмеченная особенность будет существовать в течение отрезка времени, названного С. А. Федотовым [2] сейсмическим циклом, продолжительностью $T_1 = 190 \pm 40$ лет. Землетрясения с $M \geq M_1$ в дальнейшем будем называть сильнейшими.

С учетом выявленной особенности для установления границ очаговых областей сильнейших землетрясений нами предложено правило, использующее данные об афтершоках первого года и макросейсмические данные о главном толчке [6, 7]. Зависимости $L(M)$ для размеров очаговых областей землетрясений, оконтуренных в соответствии с этим правилом, представлены на рис. 1. Видно, что зависимости для японских и курило-камчатских землетрясений практически совпадают и близки аналогичной мировой зависимости [9]. Особенностью является то, что размеры очаговых областей алеутских сильнейших землетрясений не зависят от магнитуды. Согласно работе [10] полученные зависимости отражают иерархию блокового строения, характерную для рассматриваемого района.

Проведено исследование распределения чисел землетрясений по временным интервалам между ними [5]. Показано, что временное распределение в окрестности точки $M_2 = 7,7-7,8$ имеет такую особенность, которая определяется квазипериодическим характером сейсмического режима. Длительность периода $T_2 = 230 \pm 50$ лет.

Итак, независимым образом были выявлены особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана во времени и их очаговых областей в пространстве. При этом оказалось, что особые значения магнитуд и характерные времена близки: $T_1 \approx T_2$, $M_1 \approx M_2 \approx M_{12}$. Исследование проводили на базе одного исходного материала. Поэтому установленные равенства позволяют сделать вывод о том, что в пределах рассматриваемого района существуют пространственно-временные закономерности в распределении очаговых областей сильнейших землетрясений.

Пространственно-временная карта очаговых областей всех сильнейших землетрясений северо-западной части Тихого океана в 1904–1986 гг. приведена на рис. 2. Видно, что положение очаговых областей таких землетрясений удовлетворяет гипотезе миграции в направлении от Японии к Аляске со скоростью $V = 250 \pm 30$ км/год. При этом расстояния между миграционными цепочками монотонно уменьшаются от 14,1 до 5,5 года, равняясь в среднем $9,8 \pm 3,0$ года. Полученное значение для скорости «волны» миграции хорошо согласуется с данными о времен-

* 5 (55). Докл. Академии наук СССР. 1990. Т. 31. № 4. С. 821–824.

ных изменениях параметров сейсмических волн в северном полушарии Земли [11] и с современными расчетами в теории передачи тектонических напряжений вдоль контактов раздела литосферы, астеносферы и мезосферы [12].

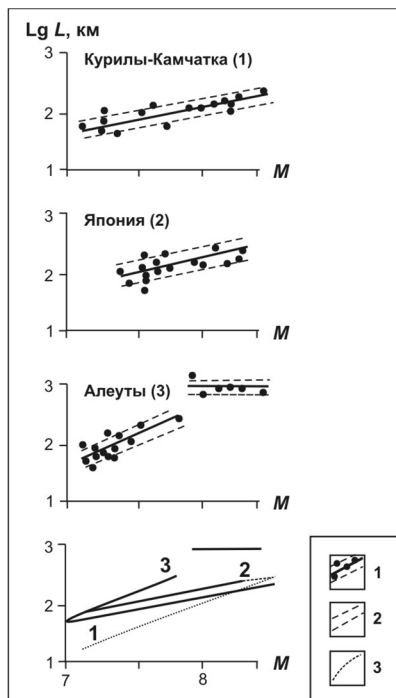


Рис. 1. Зависимости для протяженности очаговых областей северо-западно-тихоокеанских землетрясений:

1 — экспериментальные значения и рассчитанные по ним методом наименьших квадратов теоретические зависимости $Lg L(M)$, при этом границы очаговых областей землетрясений проводились в соответствии с правилом в [6, 7]; 2 — мировые зависимости $Lg L(M)$ по [9]; 3 — зависимость $Lg L(M)$ для курило-камчатских землетрясений по [1]

С использованием выявленных закономерностей для северо-западной окраины Тихого океана построен прогноз, включающий места расположения очаговых областей будущих сильнейших землетрясений и интервалов времени, в течение которых в этих местах можно ожидать главные толчки [6–8]. Построенный нами прогноз существенно отличается от прогноза для того же района, данного в работах [3, 4].

В работе [7] показано, что график повторяемости землетрясений в окрестности точки $M_3 = 7,6 \pm 0,1$ имеет особенность. Как видим, существует примерное равенство $M_{12} \approx M_3$, согласно которому пространственно-временным закономерностями размещения очаговых областей сильнейших землетрясений можно поставить в соответствие особенности энергетического распределения. Физически этот вывод равносителен утверждению, что очаги сильнейших землетрясений северо-западной части Тихого океана можно рассматривать как взаимодействующие. Следовательно, миграционные цепочки, представленные на рис. 2, можно считать проявлением такого взаимодействия.

Результаты, полученные для северо-западной окраины Тихого океана протяженностью примерно 9 000 км, можно, по-видимому, распространить на все тихоокеанское кольцо. На это указывают данные о закономерностях расположения очаговых областей сильнейших [4] и миграционных циклах сильных [13] тихоокеанских землетрясений.

Уравнение миграции очаговых областей сильнейших землетрясений вдоль кольца можно записать в виде

$$\omega_0 t \pm k X = \varphi_0, \tag{1}$$

где φ_0 — постоянная; X — расстояние вдоль кольца; $k = 2\pi/L$; $L = 4,7 \cdot 10^4$ км — протяженность кольца; $\omega_0 = 2\pi/T_0$; $T_0 = L/V = 180 \pm 30$ лет — длительность одного периода миграции вдоль кольца.

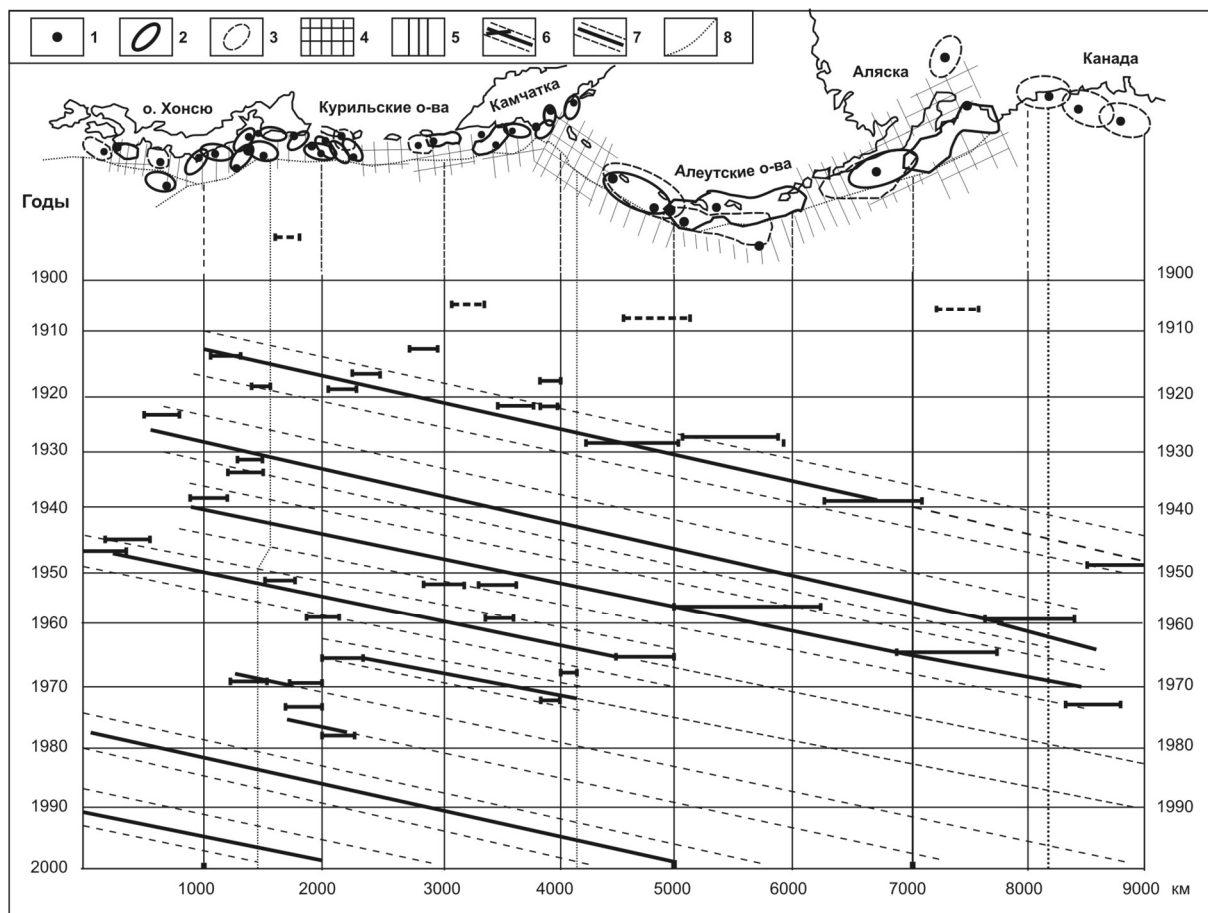


Рис. 2. Пространственно-временная карта очаговых областей северо-западно-тихоокеанских сильнейших землетрясений 1904–1986 гг.:

1 — эпицентры землетрясений; 2 — границы очаговых областей землетрясений, проведенные с точностью $\pm 5\text{--}10$ км в соответствии с правилом в [6, 7]; 3 — границы таких же землетрясений, проведенные с худшей точностью; 4 — наиболее вероятные места, в пределах которых в будущем могут располагаться очаговые области сильнейших землетрясений; 5 — менее вероятные места расположения очаговых областей таких же землетрясений; 6 — положение очаговых областей землетрясений на пространственно-временной карте и проведенные по ним миграционные цепочки; 7 — прогнозные цепочки, в пределах которых в будущем следует ожидать появления очаговых областей сильнейших землетрясений; 8 — оси глубоководных желобов

В очаговых областях сильнейших землетрясений, как известно [1–3], график изменения сейсмической активности A и сброшенной сейсмической энергии D со временем имеет δ -образный вид. Поэтому миграция очаговых областей сильнейших землетрясений одновременно сопровождается миграцией сейсмичности $C(A, D)$. С учетом выражения (1) для величины сейсмичности можно записать:

$$C(A, D) \approx \Phi(\omega_0 t - k X) + \Phi(\omega_0 t + k X),$$

где Φ — произвольная функция. С другой стороны, условие квазипериодичности позволяет сделать вывод о том, что $C(A, D) \approx \exp(i\omega_2 t)$, где $\omega_2 = 2\pi/T_2$. Отсюда в силу близости периодов T_2 и T_0 окончательно получаем:

$$C(A, D) \approx \Phi(\omega_0 t \pm k X) \approx \exp(i(\omega_{0,2} \pm k X)).$$

Полученный результат показывает, что сейсмический процесс в пределах окраины Тихого океана можно представить в виде бегущих по кольцу навстречу друг другу волн сейсмичности с периодом и длиной волны, равными длительности сейсмического цикла и размеру очаговой области сильнейшего землетрясения. В рамках такой модели два важных сейсмогеодинамических параметра приобретают физический смысл.

Отметим, что в основу волновой модели положены только выявленные нами особенности сейсмического режима, установленные статистическим анализом. Это позволяет использовать такую модель в том числе и для независимой проверки механических моделей очага землетрясений, основанных на представлениях физики разрушения.

Предлагаемая модель является логическим завершением намеченной С. А. Федотовым [1, 2] в начале 1960-х гг. программы исследований сейсмического режима островных дуг и континентальных окраин Тихого океана на региональном уровне.

В последнее время в геофизической литературе явление миграции сейсмической активности связывают с распространением в системе литосфера — астеносфера тектонических возмущений, имеющих волновой характер [12, 14]. Кроме того, установлены и другие особенности сейсмического режима. Так, на примере желоба Нанкай показано [7], что очаги землетрясений с $M \geq 7,9$, происшедших в 684–1946 гг., мигрируют в сторону береговой линии со скоростью 0,2 км/год при характерном времени миграции около 600 лет и периоде повторяемости в одном месте примерно 130 ± 40 лет. С использованием этих данных для нанкайских землетрясений с $M \geq 7,9$ нами построен прогноз места и времени [7]. На примере Курило-Камчатской дуги с использованием данных детальных сейсмологических наблюдений показано [7, 15], что очаговые области сильнейших землетрясений имеют определенную структуру, связанную с особенностями сброса избыточных напряжений в эпицентральных областях достаточно сильных землетрясений.

Таким образом, простота предлагаемой волновой модели, по-видимому, позволяет надеяться на то, что объединение механического и феноменологического способов описания сейсмичности протяженных зон с учетом «поперечной» миграции, а также взаимодействия очагов землетрясений друг с другом, особенностей иерархии их размеров и структуры даст возможность построить более физическую модель сейсмического процесса.

Литература

1. Федотов С. А. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. — 1965. — № 36 (203). — С. 66–93.
2. Федотов С. А. Сейсмическое районирование СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 121–150.
3. Федотов С. А., Чернышев С. Д. // Вулканология и сейсмология. — 1987. — № 6. — С. 93–109.
4. Proc. VI conf.: Methodology for identifying seismic gaps and soon-to-break gaps. — California, 1978. — 924 p.
5. Викулин А. В. // Сейсмические процессы на Северо-Востоке СССР. — Магадан, 1984. — С. 54–78.
6. Викулин А. В. // Вулканология и сейсмология. — 1986. — № 3. — С. 72–83.
7. Викулин А. В. Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1987. — 54 с. — Препринт.
8. Викулин А. В., Чернобай И. П. Динамические процессы в дискретных геофизических системах. — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 58–66.
9. Ризниченко Ю. В. Исследования по физике землетрясений. — М.: Наука, 1976. — С. 9–27.
10. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. — М.: Наука, 1987. — 104 с.
11. Физические свойства вещества и процессы в недрах Земли // В. Н. Николаевский, А. А. Ан, Е. И. Люкэ [и др.]. — М., 1986. — С. 140–171.
12. Николаевский В. Н. // Итоги науки и техники. Сер. Механика деформируемого твердого тела. — М., 1983, — С. 149–230.
13. Жадин В. В. // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1984. — № 1. — С. 34–38.
14. Лобковский Л. И., Баранов Б. В. // ДАН. — 1984. — Т. 275. — № 4. — С. 843–847.
15. Викулин А. В. // Деп. ВИНТИ 1982, № 47–82. — С. 255–281.

А. В. Викулин¹¹ Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН**МИГРАЦИЯ ОЧАГОВ СИЛЬНЕЙШИХ КАМЧАТСКИХ
И СЕВЕРО-КУРИЛЬСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИХ ПОВТОРЯЕМОСТЬ****Ввиду малочисленности данных для обоснования основных положений
статья публикуется в дискуссионном порядке (примеч. науч. ред.)*

На основании данных о положении очагов сильнейших землетрясений XX в. сейсмофокальная зона у берегов Камчатки и Северных Курильских островов в данной работе разбита на блоки. На материале о сильнейших землетрясениях XVIII–XX вв. показано существование трех миграционных процессов. Два процесса протекают вдоль сейсмофокальной зоны. Один, затрагивая несколько блоков-очагов сильнейших землетрясений, развивается в направлении с юго-запада на северо-восток при длительности цепочки очагов, не превышающей 21 год. Второй процесс затрагивает все блоки и протекает в обоих направлениях с примерно одинаковыми скоростями, равными 4 ± 1 км/год. Имеющиеся данные позволяют также предположить, что в пределах каждого блока очаги сильнейших землетрясений мигрируют вкост сейсмофокальной зоны, повторяясь в среднем один раз в 100 ± 40 лет. Полученные данные предполагается использовать для определения интервалов времени, в течение которых в пределах выделенных блоков следует ожидать сильнейших землетрясений.

**MIGRATION OF THE LARGEST EARTHQUAKE FOCI IN KAMCHATKA
AND NORTH KURILES, REITERATION OF EARTHQUAKES**

Based on the data of the largest 20th century earthquake foci location, the seismofocal zone near Kamchatka coast and Northern Kurile Islands is divided into blocks. Three migrational processes are demonstrated as a result of the analysis of the data on the largest earthquakes in XVIII–XXth centuries. Two of the processes run along the seismofocal zone. One of these occurring in a few blocks or foci of the largest earthquakes runs from SW to NE and the duration of the focus chain does not exceed 21 years. Another occurs in all blocks running in both directions with approximately equal velocities of 4 ± 1 km/yr. The data obtained enable one to assume that the foci of largest earthquakes within each block migrate across the seismofocal zone repeating averagely once every 100 ± 40 years. These new data are proposed to be used for determination of time intervals during which largest earthquakes could be expected within individual blocks.

Введение

На основании изучения закономерностей пространственного и временного распределений очагов сильнейших ($M \geq 7,9$) землетрясений, происшедших в районе желоба Нанкай в 684–1946 гг. (рис. 1), выявлены следующие особенности таких распределений [3]:

1. Сейсмофокальный объем можно разбить на три зоны, границы которых фиксированы во времени. Размеры зон примерно равны по протяженности: $l_0 = 270 \pm 30$ км.

2. Очаговые области сильнейших землетрясений объединяются в цепочки, в пределах которых они мигрируют из одной в другую в направлении с северо-востока на юго-запад. При этом в пределах одной миграционной цепочки очаги сильнейших землетрясений захватывают две или все три зоны. Интервалы времени между землетрясениями в миграционной цепочке изменяются в следующих пределах: около нуля (в случае сильнейших землетрясений 1605 и 1707 гг., представленных двумя почти одновременными толчками с очагами, расположенными в соседних зонах); одного дня (23–24.12.1854 г.); 3–4 лет (1096 и 1099 гг.) и 23 лет (1923, 1944 и 1946 гг.), т. е. справедливо следующее соотношение для величины временного интервала между землетрясениями в цепочке: $0 \leq \tau \leq 23$ года.

3. Повторяемости сильнейших землетрясений в пределах каждой из зон близки и в среднем равны одному такому событию в течение $T_1 = 128 \pm 44$ года.

4. В пределах каждой из зон очаговые области сильнейших землетрясений мигрируют в сторону береговой линии. Значения скоростей миграции для каждой зоны близки друг другу, составляя в среднем величину $V_1 = 0,17 \pm 0,04$ км/год. Характерное время миграции $T_0 = 600$ лет.

* 6 (67). Вулканология и сейсмология. 1992. № 1. С. 46–61.

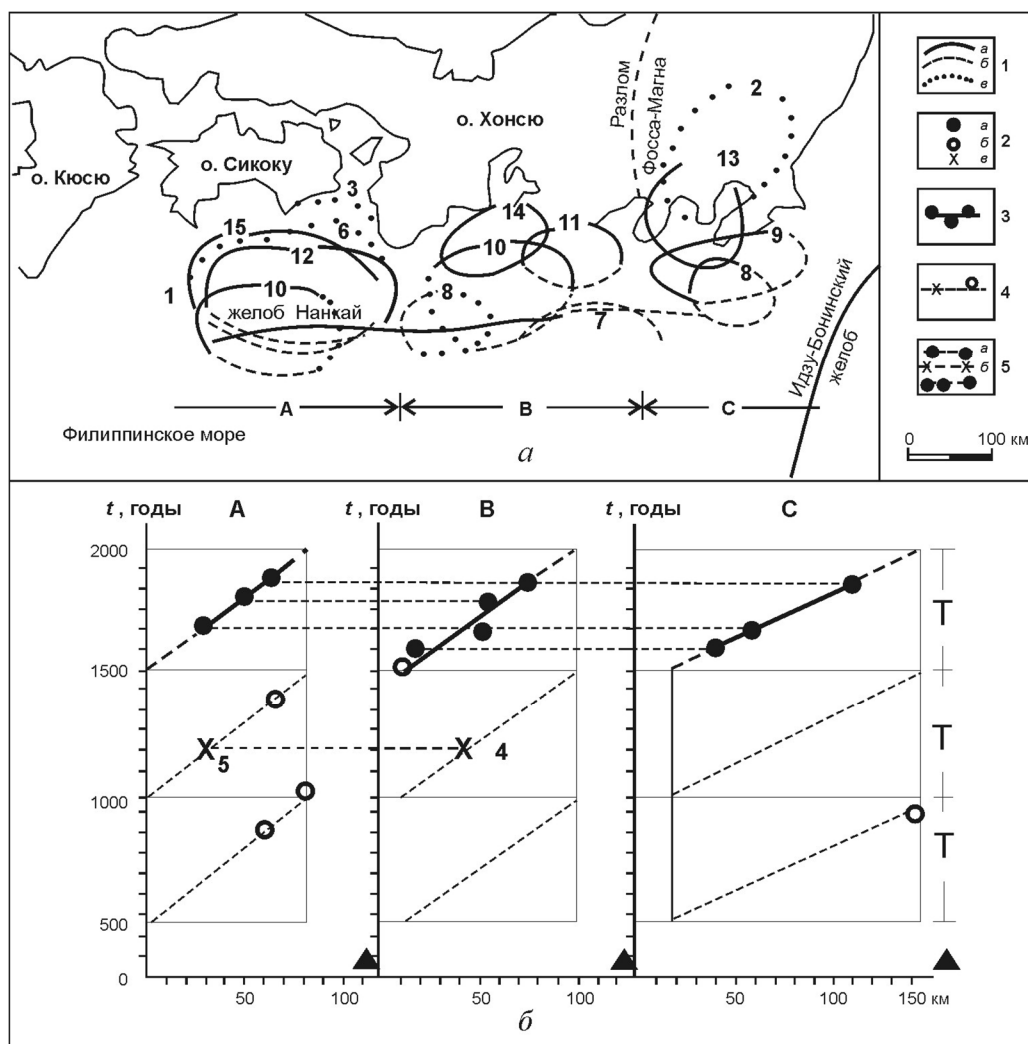


Рис. 1. Расположение очаговых областей землетрясений 684–1946 гг. с $M \geq 7,9$ в районе желоба Нанкай (а) и их пространственно-временная карта (б):

1 — уверенные (а), менее уверенные (б) и вероятные (в) участки границ очаговых областей землетрясений; 2 — уверенные (а), менее уверенные (б) и вероятные (в) значения, определяющие величину расстояния от оси желоба до ближайших к берегу участков границ очаговых областей землетрясений; 3 — миграционные цепочки, рассчитанные для каждой из трех зон (А, В, С) методом наименьших квадратов и объединяющие очаговые области землетрясений 1605–1946 гг.; 4 — такие же цепочки, продолженные в интервале времени 648–1498 гг.; 5 — пары (а) и тройки (б) землетрясений. Цифры 1–15 обозначают следующие землетрясения: 1 — 27.11.684 г., $M = 8,0-8,4$; 2 — 818 г., $M = 7,9$; 3 — 26.08.887 г., $M = 8,6$; 4 — 21.02.1099 г., $M = 8,0$; 5 — 17.12.1096 г., $M = 8,4$; 6 — 03.08.1361 г., $M = 8,4$; 7 — 20.09.1498 г., $M = 8,6$; 8 — 31.01.1605 г., $M = 7,9$; 9 — 31.12.1703 г., $M = 8,2$; 10 — 28.10.1707 г., $M = 8,4$; 11 — 23.12.1854 г., $M = 8,4$; 12 — 24.12.1854 г., $M = 8,4$; 13 — 01.09.1923 г., $M = 8,2$; 14 — 07.12.1944 г., $M = 8,0$; 15 — 21.12.1946 г., $M = 8,0$

Выявленные особенности пространственно-временного распределения очаговых областей землетрясений с $M \geq 7,9$ позволили построить для желоба Нанкай прогноз [3, 5, 6]. Этим прогнозом для выделенных зон определяется не только вероятный временной интервал следующих сильнейших землетрясений (2070 ± 40 год), но и их макросейсмический эффект, который по шкале *MSK-64* должен быть на $1,0 \pm 0,5$ балла больше, чем при последних сильнейших нанкайских землетрясениях 1923, 1944 и 1946 гг.

Согласно определенной нами ранее зависимости для протяженности очаговых областей японских землетрясений L от их магнитуд M [3] наибольший размер очага L_{\max} сильнейшего землетрясения, происшедшего вблизи Японии, при $M = M_{\max} = 8,5$ составляет 270 км. Как видим,

протяженность каждой из зон l_0 , выделенных в пределах желоба Нанкай, по величине совпадает с размерами очаговой области сильнейшего землетрясения с максимальной магнитудой. Такие зоны принято называть блоками, которые, по сути, близки блокам М. А. Садовского [17].

Обращает на себя внимание также то обстоятельство, что за время $T_0 = 600$ лет в пределах каждого блока в районе желоба Нанкай происходит $n = T_0/T_1 = 5$ (3–7) сильнейших землетрясений. Очевидно, что по сути отрезок времени T_0 определяет период повторяемости максимально сильных сотрясений, которые возможны в пунктах побережья желоба Нанкай.

Закономерности, установленные для желоба Нанкай, могут быть, по-видимому, справедливы и для других участков сейсмофокальной зоны окраины Тихого океана. Действительно, как показали результаты комплексного исследования [12], сейсмофокальную зону вблизи Курильских островов можно разбить на блоки с достаточно четкими границами. Эффект миграции землетрясений отмечен для многих сейсмоактивных регионов Земли [5, 8, 9, 13, 14]. Отметим, что значения для продольной скорости миграции очагов сильнейших землетрясений северо-западной части Тихого океана, полученные на одном и том же сейсмологическом материале нами [5] и в работе [8], почти совпадают между собой (соответственно 250 ± 30 и 222 км/год). Оба эти значения близки оценке той же величины в работе [14]. Другие значения скоростей миграции связаны, по-видимому, с тем, что эти значения в разных работах определялись для совокупностей землетрясений, составленных из событий различных магнитудных диапазонов, происходящих в различные интервалы времени. Значения повторяемостей сильнейших землетрясений, составляющие в среднем 100–200 лет, установлены для побережья Санрику (Япония), Чили, Южных Курильских островов [20] и других регионов.

Проведенный обзор показывает, что в ряде островных дуг и континентальных окраин наблюдаются такие же закономерности в размещении сильнейших землетрясений и их очагов во времени и в пространстве, как и для желоба Нанкай. Для таких островных дуг и континентальных окраин это дает возможность построить также прогноз, позволяющий кроме расположения очагов-блоков указать и интервалы времени, в течение которых в пределах этих блоков следует ожидать сильнейших землетрясений. Такие блоки в научной литературе принято называть сейсмическими брешами.

В настоящей работе исследуются закономерности размещения очагов сильнейших землетрясений у берегов Камчатки. Как показано в работах [1, 3], к классу сильнейших камчатских землетрясений, очаги которых имеют тенденцию не перекрывать друг друга в течение сейсмического цикла, относятся землетрясения с магнитудами $M \geq 7,6$. Землетрясения именно таких магнитуд имеют очаговые области протяженностью 100 км и более и на побережье Камчатки сопровождаются сотрясениями 7–8 баллов и выше. Наибольшие значения магнитуд землетрясений, происшедших у берегов Камчатки в XX столетии, показали $M_{\max} = 8,5$. К ним относятся землетрясение 03.02.1923 г. и Большое Камчатское землетрясение 04.11.1952 г., очаговые области которых достигали размеров 200–250 км [2, 7].

Блоковое строение сейсмофокальной зоны

От начала инструментальных сейсмологических наблюдений (1904 г.) и до настоящего времени у берегов Северных Курил, Камчатки и Командорских островов произошло 9 землетрясений с магнитудами $M \geq 7,6$. Положение их очаговых областей определено в работах [2, 7, 20, 21] и представлено на рис. 2, а. Наши построения [2, 7] и построения, проведенные в работах [20, 21], отличаются положением очаговых областей сильнейших землетрясений 1923 и 1952 гг.

В феврале 1923 г., как нами было показано в работе [2], произошло два сильнейших землетрясения: 3 февраля с $M = 8,5$ и 24 февраля с $M = 7,7$. Для каждого из этих толчков была определена своя очаговая область. Согласно данным работ [20, 21] второе землетрясение (24.02.1923 г.) является афтершоком первого, очаг которого в этих работах дается в двух вариантах. Первый вариант, по мнению авторов, наиболее предпочтителен, включает в себя определенные нами очаги землетрясений 3 и 24 февраля и область, расположенную между ними, протяженностью ~ 100 км. Второй вариант совпадает с определенной нами областью очага землетрясения 3 февраля. Как видим, различия между нашими определениями и определениями работ [20, 21] принципиальны.

Нами были приведены данные в подтверждение ранее высказанной гипотезы, согласно которой Большое Камчатское землетрясение 04.11.1952 г. с $M = 8,5$ было представлено двумя толчками с $\Delta t = 5$ с, каждому из которых отвечала своя очаговая область [7]. Протяженности очагов составляют 200–250 км для толчка в Авачинском заливе и 200 км для толчка против о-ва Парамушир при расстоянии между ними 100–150 км. Согласно работам [20, 21] очаг Большого Камчатского землетрясения протягивается вдоль Камчатки и Северных Курил на 500–600 км. Он включает в себя оба определенных нами очага и пространство между ними. В этих работах, на наш взгляд, для Большого Камчатского землетрясения значительно завышены и размеры очага вкрест сейсмофокальной зоны.

Как видно из данных, представленных на рис. 2, *а*, взаимное расположение очаговых областей сильнейших землетрясений 1904–1971 гг. позволяет разбить сейсмофокальную зону у берегов Камчатки на 9 блоков. При этом границы блоков, являющиеся местами соприкосновения очагов сильнейших землетрясений, коррелируют с положением проливов между Курильскими островами, камчатскими заливами и полуостровами.

Размеры блоков L_i приведены в табл. 1. Значения L_i лежат в пределах 100–200 км, составляя в среднем 150 ± 40 км. В табл. 1 приведены значения магнитуд M_i сильнейших землетрясений, происшедших в каждом из этих блоков в 1904–1971 гг. Опираясь на данные, полученные для желоба Нанкай, в дальнейшем будем полагать, что границы выделенных блоков не изменяются с течением времени (по таким же принципам разделение Курило-Камчатской зоны на участки проведено в работе [20]. — **Примеч. науч. ред.**)

Из данных, приведенных в табл. 1, также видно, что весь рассматриваемый район разбит на две зоны. Первая (северная) зона включает блоки I–V с $L = 120 \pm 20$ км, вторая (южная) — блоки VI–IX с $L = 190 \pm 20$ км. Менее значимо эти зоны различаются и по значениям магнитуд сильнейших землетрясений, происшедших в XX в.

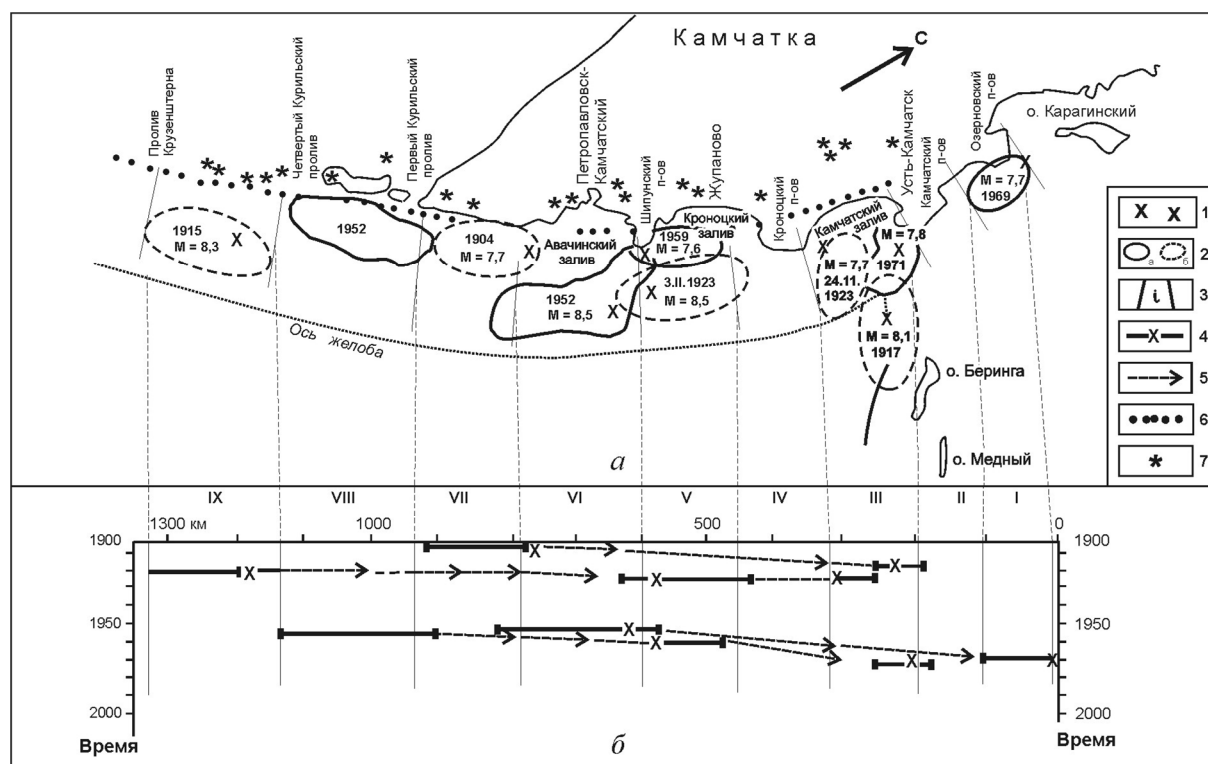


Рис. 2. Расположение очаговых областей сильнейших северо-курильских и камчатских землетрясений XX в. в пространстве (*а*) и пространстве — времени (*б*):

1 — эпицентры землетрясений; 2 — уверенные (*а*) и менее уверенные (*б*) границы очаговых областей землетрясений (цифры обозначают год землетрясения и его магнитуду); 3 — границы блоков сейсмофокальной зоны (*i* — I–IX); 4 — положение эпицентра землетрясения и его очаговой области на пространственно-временной карте; 5 — цепочки очаговых областей землетрясений, мигрирующих в северо-восточном направлении (миграция 2-го типа); 6 — западная граница сейсмофокальной зоны; 7 — вулканы

Таблица 1

Параметры блоков сейсмофокальной зоны Камчатки

| Параметры | Номера блоков | | | | | | | | | Средние значения |
|------------|---------------|-----|----------|-----|----------|-----|------|------|-----|--|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII* | VIII | IX | |
| L_i , км | 100 | 100 | 130 | 130 | 140 | – | – | – | – | 120 ± 20 |
| | – | – | – | – | – | 180 | 160 | 200 | 200 | 190 ± 20 $\bar{L} = 150 \pm 40$ |
| M_i | 7,7 | – | 7,7; 7,8 | – | 7,6; 8,5 | – | – | – | – | $7,9 \pm 0,3$ |
| | – | – | – | – | – | 8,5 | 7,7* | – | 8,3 | $8,2 \pm 0,3$ $\bar{M} = 8,0 \pm 0,4$ |

* В пределах VII блока в 1904 г. 25 и 26 июня произошли два землетрясения с магнитудами $M = 7,7$ [15]. Считаем, что одно из этих землетрясений было главным, сильнейшее событие, другое либо форшок, либо афтершок.

Миграция очагов сильнейших землетрясений в направлении с юго-запада на северо-восток (миграция 2-го типа)

На рис. 2, а видно, что очаги сильнейших землетрясений XX столетия группируются в цепочки, вытянутые вдоль береговой линии Камчатки в направлении с юго-запада на северо-восток и захватывающие несколько блоков. Наиболее отчетливо тенденция к такому пространственно-временному группированию блоков-очагов сильнейших землетрясений прослеживается на данных, представленных на рис. 2, б. В течение последнего столетия выделяются три цепочки землетрясений, очаговые области которых имеют тенденцию мигрировать в направлении с юго-запада на северо-восток: 25.06.1904 г. — 30.01.1917 г.; 01.05.1915 г. — 24.02.1923 г. и 04.11.1952 г. — 04.05.1959 г. — 15.12.1971 г. Длительность таких цепочек очагов составляет соответственно $\tau = 13, 8$ и 19 лет. Как видим, эти значения не превышают длительности цепочек очагов нанкайских сильнейших землетрясений, направление миграции — противоположное.

В пределах II–III блоков сейсмофокальная зона Камчатки стыкуется с сейсмофокальной зоной Командорских островов, которые, по-видимому, можно рассматривать как продолжение Алеутской островной дуги. Поэтому в случае, если миграция очаговых областей сильнейших землетрясений соответствует какому-либо физическому процессу, протекающему в коре и верхней мантии в пределах сейсмофокальной зоны, в районе, захватывающем II и III блоки, миграционные цепочки очагов должны «раздваиваться» на две ветви: ветвь, протягивающуюся вдоль Камчатки в сторону Озерного, и Алеутскую ветвь, идущую в сторону Командорских островов. По-видимому, первая из уже отмеченных нами миграционных цепочек, включающая очаги землетрясений 1904 и 1917 гг., и является Алеутской ветвью, так как очаг сильнейшего землетрясения 1917 г., как показано в работе [2], протягивается вдоль Алеутского глубоководного желоба. В таком случае, учитывая, что Большое Камчатское землетрясение 1952 г. было представлено двумя толчками, последнюю из отмеченных миграционных цепочек, включающую очаги землетрясений 1952, 1959 и 1971 гг., можно разбить на две цепочки. Первая, камчатская, включает очаги землетрясений 1952_{II}–1969 гг., вторая охватывает очаги землетрясений 1952_I–1959–1971 гг. и через очаг последнего землетрясения «уходит» в сторону Командорских островов. Этот вариант цепочек и отображен на рис. 2, б.

Положение очагов сильнейших землетрясений XVIII–XIX вв.

Рассмотрим данные о камчатских сильнейших землетрясениях, происшедших в XVIII и XIX вв., которые на суше сопровождались сотрясениями силой 8 баллов и выше и которые, согласно данным каталога [15], можно отнести к классу сильнейших событий, имеющих магнитуду $M \geq 7,6$.

Список камчатских землетрясений, у которых положение очагов определяется достаточно уверенно, открывается землетрясением 17.10.1737 г. с магнитудой $M = 8,3 \pm 0,7$ [15]. Последствия этого землетрясения были во многом схожи с последствиями Большого Камчатского зем-

летрясения [18, 19]: аномально большое цунами, в обоих случаях превышающее 10–20 м, значительная по протяженности плейстосейстовая область, протягивающаяся примерно на 500 км от о-ва Парамушир до г. Петропавловска-Камчатского. На основании этих данных, как и для землетрясения 04.11.1952 г., можно, по-видимому, принять, что землетрясение 17.10.1737 г. было представлено двумя толчками с очагами, расположенными в пределах VII и IX блоков (рис. 3, б).

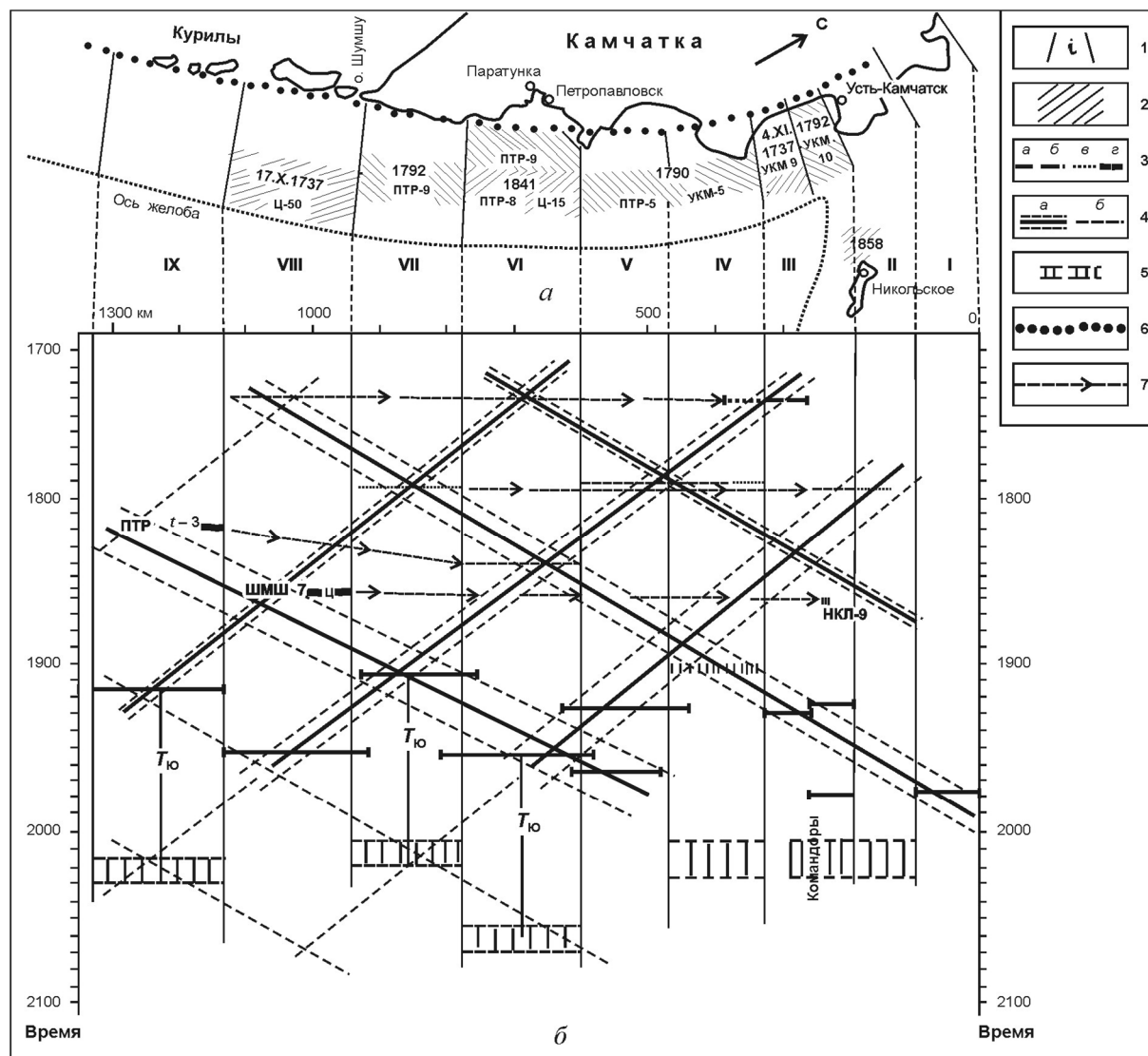


Рис. 3. Расположение очагов сильнейших северо-курильских и камчатских землетрясений XVIII–XIX вв. в пространстве (а) и таких же землетрясений XVIII–XX вв. в пространстве — времени (б):

1 — границы блоков сейсмофокальной зоны; 2 — вероятное положение очаговых областей землетрясений XVIII–XIX вв.; цифры обозначают год землетрясения, балльность по шкале MSK-64 в Петропавловске-Камчатском (ПТР), Паратунке (ПРТ), Усть-Камчатке (УКМ), Никольском (НКЛ) и на о-ве Шумшу (ШМШ), высоту волны цунами; $t = 3$ — длительность отмеченных при землетрясении колебаний, мин; 3 — положение очаговых областей землетрясений XX в. на пространственно-временной карте (а); достаточно уверенное (б), менее уверенное (в) и предположительное (г) положение очаговых областей землетрясений XVIII–XIX вв. на пространственно-временной карте; 4 — цепочки очаговых областей землетрясений XVIII–XX вв., мигрирующих вдоль зоны со скоростью 4 ± 3 км/год (а), и теоретическое продолжение таких цепочек в будущее (б) — миграция 1-го типа; 5 — пространственно-временные области, в пределах которых должны располагаться очаговые области землетрясений в будущем; 6 — западная граница сейсмофокальной зоны; 7 — цепочки очаговых областей землетрясений XVIII–XIX вв., мигрирующих в северо-восточном направлении; $T_{ю}$ — повторяемость сильнейших землетрясений для Южной Камчатки

Согласно работе [15] 18.11.1742 г. в пределах VIII блока произошло землетрясение с $M = 7,5 \pm 0,1$. Аналогичный случай имел место и после Большого Камчатского землетрясения, когда 28.02.1973 г. в пределах части его очага, расположенной в VIII блоке, произошло Парамуширское землетрясение с $M = 7,5$ [3, 15, 16]. Поэтому землетрясение 1742 г. можно считать афтершоком толчка 17.10.1737 г. с очагом в VII блоке.

Согласно работе [15] землетрясение 17.12.1737 г. с очагом в VIII блоке, по-видимому, можно считать ошибочным, как полагает и С.Л. Соловьев [18]. Если все же принять, что это землетрясение имело место и магнитуду $M = 7,5 \pm 1,0$ [15], то его следует считать афтершоком толчка 17.10.1737 г.

Отличие двух сильнейших землетрясений Южной Камчатки, происшедших 17.10.1737 г. и 04.11.1952 г., состоит в следующем. Во-первых, землетрясение 17.10.1737 г. в месте, где впоследствии возник г. Петропавловск-Камчатский, ощущалось как 9 (8–9)-балльное, землетрясение 1952 г. — как 7-балльное. Во-вторых, цунами на Северных Курилах после землетрясения 17.10.1737 г. было большей интенсивности, чем цунами после землетрясения 1952 г. С учетом этих данных можно принять, что положение очаговых областей толчков 17.10.1737 г. в пределах отмеченных блоков несколько иное, чем положение очаговых областей землетрясения 1952 г. (см. рис. 3, а). В пределах VIII блока очаг землетрясения 17.10.1737 г., по-видимому, расположен дальше от береговой линии и, следовательно, поверхность очага на океанском дне располагалась на большей глубине, что могло обеспечить большее цунами на Северных Курилах. В пределах VI блока, наоборот, очаг землетрясения 17.10.1737 г. должен быть расположен ближе к береговой линии, что обеспечивает на побережье большой макросейсмический эффект.

Землетрясение 04.11.1737 г. с $M = 7,8 \pm 0,7$ в Нижнекамчатске сопровождалось сотрясениями до 9 баллов [15]. По-видимому, землетрясение 1756 г., ощущавшееся в Нижнекамчатске как 8-балльное [24], являлось его афтершоком.

Землетрясение 02.12.1790 г. с $M = 7,5 \pm 0,7$ и эпицентром, расположенным в северо-восточной части Кроноцкого залива, в месте сочленения IV и V блоков [15], ощущалось как 5-балльное в Петропавловске и Нижнекамчатске. Оно сопровождалось форшоками и афтершоками, которые продолжались до февраля 1791 г. [15]. По этим данным наиболее вероятно, что очаговая область землетрясения 1790 г. захватывала соседние блоки, расположенные в Кроноцком заливе (блок V) и против Кроноцкого полуострова (блок IV).

Землетрясение 22.08.1792 г. — одно из самых больших камчатских землетрясений по размерам плейстосейстовой области: как очень сильное оно ощущалось по всему восточному побережью Камчатки от Петропавловска до Нижнекамчатска. Аналогом этого события, по-видимому, может быть землетрясение 1707 г. в районе желоба Нанкай. Согласно работе [15] землетрясение 1792 г. с $M = 8,4 \pm 0,7$ разрушило Нижнекамчатск (10–11 баллов). Учитывая, что в месте расположения бывшего селения Нижнекамчатск плохие грунты, балльность при этом землетрясении, по-видимому, следует оценить ближе к 9–10 баллам.

Наиболее вероятно, что очаговые области землетрясения 04.11.1737 г. и толчка, разрушившего в 1792 г. Нижнекамчатск, как и очаги землетрясений 24.02.1923 и 1971 гг., в основном располагались в пределах Камчатского залива (блок III), но на более близком расстоянии от его береговой линии, что и обеспечило наблюдавшиеся макросейсмические эффекты [4]. Возможно, что очаговые области землетрясений 04.11.1737 г. и 1792 г. были вытянуты не вкрест, а вдоль сейсмофокальной зоны Камчатки, затрагивая при этом соседние блоки.

При землетрясении 1792 г. были отмечены 8-балльные колебания в Петропавловске и 8–9-балльные колебания в Паратунке. Эти пункты отстоят от Нижнекамчатска более чем на 400 км. По-видимому, землетрясение 1792 г., так же как нанкайские землетрясения 1605 и 1707 гг. и Большое Камчатское землетрясение 1952 г., было представлено двумя почти одновременными толчками. Очаговая область толчка, вызвавшего 8-балльные колебания в Петропавловске и Паратунке, с учетом данных о положении очаговых областей землетрясений 17.10.1737 и 02.12.1790 гг. должна быть расположена в пределах блока VII. Сильнейшее землетрясение 1904 г. с очагом, расположенным в этом блоке, в Петропавловске также сопровождалось сотрясениями до 8 баллов [15].

Землетрясения 1737, 1790 и 1792 гг. могут составить три миграционные цепочки, очаги в которых мигрируют в направлении с юго-запада на северо-восток. Первая цепочка включает очаги землетрясений 1737 г. Возможно, эта цепочка очагов продолжалась в сторону Командор-

ских островов, где 18.02.1742 г. произошло сильное землетрясение, сопровождавшееся афтершоками. Вторая цепочка включает очаг землетрясения 1790 г., который, по-видимому, захватил два (IV и V) блока; третья — два очага толчков в 1792 г.

Землетрясение 17.05.1841 г. с $M = 8,4 \pm 0,7$ и очагом в Авачинском заливе сопровождалось 8-балльными сотрясениями в Петропавловске [15, 19]. Сравнение макросейсмического эффекта в том же пункте при землетрясениях 17.10.1737 г. (9 баллов), 1841 г. (8 баллов) и 1952 г. (7 баллов) позволяет принять, что очаг сильнейшего землетрясения 1841 г. был расположен в пределах VI блока, в центральной его части.

Вопрос о том, к какой миграционной цепочке 2-го типа можно отнести очаг сильнейшего землетрясения 1841 г., будет рассмотрен позже.

Землетрясение 23.11.1899 г. В промежутке между сильнейшими землетрясениями 1841 и 1904 гг., согласно работе [15], к числу сильнейших камчатских землетрясений можно отнести только одно событие. Это землетрясение произошло 23.11.1899 г. с магнитудой $M = 7,9 \pm 1,0$ и эпицентром вблизи западной границы сейсмоактивной зоны на расстоянии 20–30 км от Петропавловска. Ошибка в определении координат эпицентра этого землетрясения составляет 2–3. Данные об этом землетрясении в [15] как о сомнительном событии приведены со ссылкой на каталог Гутенберга — Рихтера [23]. Этот каталог составлен на основании данных инструментальных сейсмологических наблюдений. Значения магнитуд землетрясений, содержащиеся в каталоге Гутенберга — Рихтера до 1910 г., завышены примерно на 0,5 единицы магнитуды [22]. Поэтому если все же считать, что в 1899 г. у берегов Камчатки произошло сильнейшее землетрясение, имевшее наименьшую для землетрясений такого класса событий магнитуду, близкую к $M = 7,6$, то наиболее вероятным местом расположения его очага с учетом возможной ошибки в определении эпицентра землетрясения и отсутствия макросейсмических данных о нем [15], как нам представляется, является IV блок. Действительно, блоки I–III и VIII, IX расположены от инструментального эпицентра на расстоянии, большем 2–3. В блоке VII такое землетрясение не могло произойти ввиду того, что в пределах этого блока сильнейшее землетрясение произошло чуть позже, в 1904 г. В 1899 г. в блоках V и VII землетрясение с магнитудой $M \geq 7,6$ не было бы пропущено.

Встречная миграция (миграция 1-го типа)

На рис. 3, б отчетливо видно, что очаговые области сильнейших землетрясений XVIII–XX вв. на пространственно-временной карте могут располагаться в пределах противоположно направленных цепочек с примерно равными наклонами. В таких цепочках значения скоростей миграции отличны от приведенных ранее.

В табл. 2 даны параметры миграционных цепочек, которые задавались в виде

$$t_i(\pm\tau) = V^{-1}X_i + t_0,$$

где t_i и X_i — времена и координаты очагов сильнейших землетрясений; V_i — параметр, по смыслу соответствующий скорости, с которой очаги сильнейших землетрясений мигрируют вдоль i -й цепочки: $\Delta t_{0,i} = t_{0,i} - t_{0,i+1}$ — интервал между i и $(i+1)$ миграционными цепочками. Параметры рассчитывали методом наименьших квадратов по центрам тяжести очаговых областей землетрясений 1904–1971 гг. и по центрам тяжести блоков, в пределах которых, как мы полагаем, располагались очаги сильнейших землетрясений 1737–1899 гг. На рис. 3, б видно, что пространственно-временная карта очаговых областей сильнейших камчатских землетрясений может образовывать «ячеистую» структуру, в узлах которой расположены очаги таких землетрясений. Отклонения от подобного расположения отмечаются для двух землетрясений с очагами в блоке V (03.02.1923 г., $M = 8,5$; 04.05.1959 г., $M = 7,6$).

Экстраполируя миграционные прямые, можно увидеть, что на карте в узлах, лежащих на пересечении цепочек 3–4 и 1–6, отсутствуют очаги сильнейших землетрясений, которые должны были бы произойти с очагами в пределах соответственно блоков II–III в $1840 \pm \alpha$ г. и блока VIII в $1865 \pm \alpha$ г., где диапазон возможного отклонения α не должен превышать максимального значения τ_{\max} , которое, согласно данным табл. 2, составляет 26 лет. Рассмотрим каждый случай в отдельности.

VIII блок, 1840–1890 гг. Землетрясение с $M = 8,0 \pm 0,4$ и очагом в пределах VIII блока, расположенного против о-вов Парамушир и Шумшу на расстоянии 300–400 км от Петропавловска, в случае, если оно происходило, должно было ощущаться на этих островах силой не менее 7 баллов и в самом городе 5 ± 1 балл. В середине XIX в., после 1841 г., в названных местах ощущалось несколько землетрясений силой 5 баллов и выше. Их анализ показывает, что на фоне уменьшения афтершоковой активности после сильнейшего землетрясения 1841 г. с очагом в блоке VI выделяется также активизация VIII блока, расположенного против о-вов Парамушир и Шумшу. Эта активизация, как нам представляется, могла быть связана с землетрясением в этом блоке, происшедшем 29.07.1854 г. Согласно работе [15] значение магнитуды этого землетрясения $M = 7,0 \pm 1,0$, что позволяет отнести землетрясение 29.07.1854 г. к классу сильнейших событий. Очаг этого землетрясения схематично изображен на рис. 3, б.

Таблица 2

Параметры миграционных цепочек 1-го типа

| Номер цепочки | Дата землетрясения в цепочке | Параметры цепочек | | | | |
|---------------|--|-------------------|-------------------|--------------|--------------------|----------------|
| | | τ , лет | V^{-1} , год/км | t_0 , год | Δt_0 , год | V , км/год |
| 1 | 1915–1972 _I –1737 _{II} | 2 | $0,322 \pm 0,006$ | -219 ± 6 | 124 | 3,11 |
| 2 | 1952 _I –1904–1841–1790–04.11.1737 | 9 | $0,30 \pm 0,02$ | -95 ± 11 | | 3,33 |
| 3 | 1952 _{II} –1899–03.02.1923–1792 _{II} | 26 | $0,31 \pm 0,07$ | 14 ± 34 | 109 | |
| 1–3 | Среднее | 12 ± 10 | $0,31 \pm 0,03$ | ± 17 | 117 ± 8 | $3,2 \pm 0,1$ |
| 4 | 17.10.1737 _{II} –1790 | – | $-0,25$ | 167 | | $-4,00$ |
| 5 | 17.10.1737 _I –1792 _{II} –1841–1899–24.02.1923–1969 | 11 | $-0,23 \pm 0,01$ | 248 ± 9 | 81 82 | $-4,34$ |
| 6 | 1899–24.02.1923–1969 1904–1952 _{II} –1959 | 18 | $-0,19 \pm 0,09$ | 330 ± 62 | | $-5,26$ |
| 4–6 | Среднее | 15 ± 4 | $-0,22 \pm 0,05$ | ± 36 | 81 ± 1 | $-4,5 \pm 0,5$ |
| 1–6 | Среднее для V по модулю | 13 ± 8 | $0,27 \pm 0,05$ | ± 24 | 99 ± 18 | $-3,9 \pm 0,8$ |

II–III блоки, 1814–1866 гг. Сильнейшее землетрясение с очагом, расположенным в пределах этих блоков, в случае правильности наших построений должно было заметно ощущаться в Нижнекамчатске, если его относить к камчатской миграционной цепочке 2-го типа, или на Командорских островах, если его относить к алеутской миграционной цепочке того же типа. Просмотр источников [15, 18] показывает, что основной толчок в районе Командорских островов, по-видимому, имел место 22.01.1858 г. и магнитуду $M = 7,8 \pm 0,7$. Толчок 28.10.1849 г. с близкой магнитудой и последующие толчки можно считать, по-видимому, его форшоком и афтершоками. Схематично положение очага землетрясения 22.01.1858 г. показано на рис. 3, б. Видно, что на пространственно-временной карте очаг этого землетрясения должен был бы располагаться вблизи узла, лежащего на пересечении 3-й и 4-й цепочек.

Землетрясения 29.07.1854 г. и 22.01.1858 г., «разрешенные» миграционными цепочками 1-го типа, с очагами в пределах VIII блока и вблизи Командорских островов соответственно, могут составить алеутскую ветвь миграционной цепочки 2-го типа.

Миграция вкrest сейсмофокальной зоны

Будем считать, что западная граница очаговой области землетрясения 17.10.1737 г. в пределах блока, расположенного в Авачинском заливе, проходила по западной границе сейсмофокальной зоны Камчатки, определенной в работе [10]. Тогда положение очагов сильнейших землетрясений 17.10.1737, 1841 и 1952 гг. в этом блоке указывает на то, что очаги сильнейших землетрясений могут мигрировать вкrest сейсмофокальной зоны в направлении от береговой линии со скоростью $\sim V_{\perp} = 60-85 \text{ км} / 1952-1737 \text{ лет} = 0,3-0,4 \text{ км/год}$. Близкое значение скорости миграции и то же ее направление при тех же предположениях относительно положения западных границ очаговых областей землетрясений 04.11.1737 и 1792 гг. можно получить при анализе положения очагов этих событий и землетрясений 24.02.1923, 1971 гг.: $\sim V_{\perp} = 50 \div 60 \text{ км} / 179 \div 186 \text{ лет} = 0,3 + 0,4 \text{ км/год}$.

В пределах V и VIII блоков, по данным за 1737–1971 гг., направление скорости миграции очагов сильнейших землетрясений вкrest сейсмофокальной зоны при тех же условиях получается обратным к береговой линии. При этом значение скорости миграции оказывается близким значению $V_{\perp} = 40 \text{ км} / 1959-1923 \text{ лет} = 1 \text{ км/год}$ для очагов землетрясений 03.02.1923 и 1959 гг. и $V_{\perp} = 0,3-0,4 \text{ км/год}$ для очагов землетрясений 17.10.1737 и 1952 гг.

В пределах других блоков отсутствуют данные, с помощью которых можно было бы оценить направление скорости поперечной миграции и ее величину. Как видим, возможные значения скоростей поперечной миграции лежат в пределах 0,3–0,4 км/год. Значение 1 км/год получено для V блока за малый отрезок времени (1923–1959 гг.). По-видимому, являясь, по сути, «мгновенным значением», оно может рассматриваться как предельно возможное значение. Близкое значение для поперечной скорости миграции камчатских землетрясений в классе событий $M \geq 7,0$, равное 1,5 км/год, было получено в работе [8].

Эти данные, по-видимому, позволяют сделать вывод о том, что, как и для очаговых областей нанкайских сильнейших землетрясений, очаговые области камчатских сильнейших землетрясений могут мигрировать вкrest сейсмофокальной зоны. Однако в отличие от желоба Нанкай, где миграция в пределах всех блоков происходит в одном направлении, миграция очагов сильнейших землетрясений Камчатки в разных блоках ее сейсмофокальной зоны может проходить, вероятно, в обоих возможных направлениях. Такая «разнонаправленная поперечная» миграция может указывать, по-видимому, на то, что в пределах сейсмофокальной зоны Камчатки наряду с субдукцией одновременно может происходить и наддукция, т. е. напоздание материковой плиты на океаническую. На принципиальную возможность такого движения мне впервые указал Л. Н. Рыкунов (им же предложен и термин).

О повторяемости сильнейших землетрясений в пределах одного блока

В табл. 3 приведены значения, характеризующие повторяемость сильнейших землетрясений в пределах каждого блока. Из данных, представленных в этой таблице, видно, что средние значения повторяемости сильнейших землетрясений в блоках III–VIII близки друг другу: $T_0 = 96 \pm 32$ года. Близкое значение повторяемости было найдено и для нанкайских сильнейших землетрясений — 128 ± 44 года [3]. Полученные данные позволяют предположить, что такое же значение повторяемости сильнейших землетрясений, по-видимому, должно иметь место и для IX блока. Ближайший к этому блоку пункт, макросейсмические данные в котором являются достаточно полными — Петропавловск-Камчатский. Поэтому для определения значения повторяемости сильнейших землетрясений в пределах IX блока проанализируем макросейсмические данные для него в окрестности времени 1819 г., т. е. 1915 — T_0 .

Блок IX находится на расстоянии 450–650 км от Петропавловска. Землетрясения с $M = 8$ и очагом, расположенным в этом блоке, в городе должны ощущаться в среднем как 3-балльные, максимально как 4–5-балльные.

В первой половине XIX в., до 1841 г., в Петропавловске отмечено около 20 толчков, среди которых достаточно отчетливо выделяются две группы землетрясений. К первой группе относятся землетрясения, предварявшие и сопровождавшие в 1827 г. извержение Авачинского вулкана, расположенного в 30 км от Петропавловска. Ко второй группе можно отнести землетрясения, которые, по-видимому, являются форшоками сильнейшего землетрясения 1841 г. с очагом в Авачинском заливе.

Отличительными особенностями сильнейшего землетрясения являются продолжительность ощутимых колебаний (1 мин и более) и цунами. Такие признаки в течение первой половины XIX столетия в Петропавловске отмечены дважды. Первый раз — 28.10.1820 г., когда зафиксировали несколько толчков, которые были довольно сильны и продолжались до 3 мин. Второй раз — 9.08.1827 г. Согласно работе [11] 09.08.1827 г. началось сильное извержение Авачинского вулкана, которое в том месте, где впоследствии возник Петропавловск-Камчатский, сопровождалось землетрясениями до 7 баллов и сильным отливом воды в Авачинской бухте [18].

Таблица 3

**Значения повторяемости сильнейших землетрясений
в пределах блоков сейсмофокальной зоны**

| Номер блока | Дата землетрясения | Значение повторяемости, лет | Число данных | Средняя повторяемость, лет | Дисперсия, лет |
|-------------|---|-----------------------------|--------------|----------------------------|----------------|
| III | 04.11.1737–1792– 24.02.1923–1971 | 55, 131, 48 | 3 | 78 | 38 |
| IV | 1790–1899 (?) | 109 (?) | 1 | 109 (?) | — |
| V | 1790–03.02.1923–1959 | 133, 36 | 2 | 85 | 49 |
| VI | 17.10.1737–1841–1952 | 104, 111 | 2 | 108 | 4 |
| VII | 1792–1904 | 112 | 1 | 112 | — |
| VIII | 17.10.1737–1854–1952 | 117, 98 | 2 | 108 | 10 |
| II–VIII | В среднем для Камчатки | — | 11 | 96 | 32 |
| III–V | В среднем для Северной Камчатки, в том числе (см. текст): первая подгруппа (T_{c1}) вторая подгруппа (T_{c2}) | 131, 109, 133 | 3 | 124 | 11 |
| | | 36, 55, 48 | 3 | 46 | 8 |
| VI–VIII | В среднем для Южной Камчатки ($T_{ю}$) | 117, 98, 112, 104, 111 | 5 | 108 | 7 |

Продолжительность временного интервала между 28.10.1820 г. и 01.05.1915 г., когда в пределах IX блока произошло сильнейшее землетрясение с $M = 8,3$, составляет 95 лет. Это значение почти совпадает со средним для Камчатки значением повторяемости сильнейших землетрясений в пределах одного блока (см. табл. 3). Схематическое положение очага сильнейшего землетрясения в пределах IX блока, которое могло произойти 28.10.1820 г., изображено на рис. 3, б. Такое положение очага не противоречит требованиям, которые могут быть предъявлены к миграционным цепочкам 1-го и 2-го типов (см. рис. 3, б). Действительно, к миграционной цепочке 2-го типа может быть отнесена цепочка очагов землетрясений 1820–1841 гг. В этом случае длительность миграционной цепочки такого типа должна быть увеличена до 21 года. На то, что положение очага землетрясения 1820 г. может удовлетворить миграции 1-го типа, указывают примерно равные по модулю и противоположные по знаку наклоны миграционных цепочек, составленных из событий 1820–17.10.1737_I г. ($V^{-1} = 0,32$ год/км) и 1820–1854–1904–1952_{II}–1959 гг. ($V^{-1} = -0,19$ год/км).

Более детальный анализ данных, приведенных в табл. 3, позволяет разбить все блоки по разбросу значений периодов повторения сильнейших землетрясений в них на несколько групп. К первой группе будут относиться блоки VI–VIII, для которых значения повторяемостей близки друг другу и лежат в пределах 98–117 лет (разброс значений не превышает 10%), составляя в среднем 108 ± 7 лет. К этой же группе блоков, как следует из полученных данных, можно отнести и блок IX, повторяемость сильнейших землетрясений в котором, по-видимому, близка к 95 годам. С учетом этого значение повторяемости почти не изменится и в целом для группы, включающей южно-камчатские блоки VI–IX ($T_{ю} = 106 \pm 8$ лет).

Ко второй группе блоков, значения повторяемостей в которых имеют больший разброс (~ 50 %), можно отнести северо-камчатские блоки III—V: $T_c = 85 \pm 40$ лет. В свою очередь, значения повторяемостей сильнейших землетрясений в этих блоках можно разбить на две подгруппы, периоды повторения в которых оказываются близкими: $T_{c1} = 124 \pm 11$ лет и $T_{c2} = 46 \pm 8$ лет (см. табл. 3).

Вопрос о продолжительности периода повторения сильнейших землетрясений в блоках I и II остается открытым. Однако сейсмичность Камчатки по мере продвижения вдоль ее сейсмофокальной зоны на север, в сторону о-ва Карагинский, заметно затухает. Поэтому представляется вполне вероятным, что сильнейшие землетрясения в пределах этих блоков — крайне редкие события. Тогда, считая, во-первых, что сильнейшие землетрясения с очагами в пределах блоков I и II отмечены без пропусков с 1737 г., во-вторых, что очаг землетрясения 1792 г. был расположен в пределах двух блоков (II и III), для сильнейших землетрясений в пределах I и II блоков можно получить вероятную оценку повторяемости ($1969 - 1792 = 177$ лет).

Заключение

Приведенная в работе пространственно-временная карта очагов-блоков сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений XVIII—XX вв. может вызвать большое количество вопросов. На некоторые из них, возможно, в настоящее время трудно дать ответ. Проведенный в работе анализ преследует определенную цель — угадать конечный результат, т. е. представляет собой попытку построения схемы прогноза сильнейших землетрясений, основанной на следующих трех допущениях. Во-первых, сейсмический режим является квазипериодическим процессом. Во-вторых, этот процесс реализуется с помощью механизма продольной и поперечной миграции очагов сильнейших землетрясений в рамках модели региона. В-третьих, регион имеет блоковое строение с границами, фиксированными во времени. Данные, полученные для желоба Нанкай, отмечающаяся близость характерных сейсмических параметров островных дуг северо-западной части Тихого океана и возможность описания сейсмического процесса в пределах всей окраины Тихого океана в рамках единой модели, имеющей физический смысл [5], позволяют, на наш взгляд, считать, что для выполненных нами построений имеются достаточно веские основания.

Полученные результаты позволяют перейти к построению вероятной схемы сейсмического прогноза для Камчатки и Северных Курил. Такой прогноз позволяет определить интервалы времени, в течение которых можно ожидать сильнейшие землетрясения в выделенных блоках и предсказывать их макросейсмический эффект.

Литература

1. Викулин А. В. Свойства эпицентральных областей курило-камчатских землетрясений // Сейсмические процессы на Северо-Востоке СССР. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1984. — С. 54–78.
2. Викулин А. В. Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова // Вулканология и сейсмология. — 1986. — № 3. — С. 72–83.
3. Викулин А. В. Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1987. — 54 с. — Препринт № 2.
4. Викулин А. В. Еще раз о долгосрочном сейсмическом прогнозе для Камчатского залива // Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ДальНИИС, 1989. — С. 14–15.
5. Викулин А. В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–824.
6. Викулин А. В., Викулина С. А. Закономерности размещения очаговых областей сильнейших землетрясений в районе желоба Нанкай. — Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ АН СССР, 1989. — 44 с. — Препринт № 5.
7. Викулин А. В., Чернобай И. Л. О некоторых особенностях двух сильнейших курило-камчатских землетрясений // Физические поля и свойства горных пород Северо-Востока СССР. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 44–59.

8. Вилькович Е. В., Шнирман М. Г. Волны миграции эпицентров (примеры и модели) // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений. Вычислительная сейсмология. — Вып. 14. — М.: Наука, 1982. — С. 27–37.
9. Губерман Ш. А. D-волны и дискретность распределения сильных землетрясений по широте // Математическое моделирование и интерпретация геофизических данных. Вычислительная сейсмология. — Вып. 16. — М.: Наука, 1984. — С. 51–58.
10. Гусев А. А., Шумилина Л. С. Геометрия сейсмоактивного объема коры и мантии в районе Камчатки и Командорских островов // Исслед. по физике землетрясений. — М.: Наука, 1976. — С. 194–200.
11. Гуценко И. И. Извержения вулканов мира. — М.: Наука, 1979. — 476 с.
12. Иващенко А. И., Ким Ч. У., Бобков А. О. Распределение скорости упругих волн под континентальным склоном Курильского глубоководного желоба // Сейсмологические исслед. Мирового океана. — М.: Наука, 1983. — С. 117–126.
13. Касахара К. Механика землетрясений. — М.: Мир, 1985. — 264 с.
14. Маламуд А. С., Николаевский В. Н. Циклы землетрясений и тектонические волны. — Душанбе: Дониш, 1989. — 142 с.
15. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. — М.: Наука, 1977. — 536 с.
16. Землетрясения и цунами 28 февраля 1973 г. / Л. С. Оскорбин, В. М. Зобин, Л. И. Поплавская [и др.] // Землетрясения в СССР в 1973 г. — М.: Наука, 1976. — С. 200–210.
17. Садовский М. А., Болховитинов Д. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. — М.: Наука, 1987. — 100 с.
18. Соловьев С. Л. Основные данные о цунами на тихоокеанском побережье СССР 1737–1979 гг. // Изучение цунами в открытом океане. — М.: Наука, 1978. — С. 61–136.
19. Федотов С. А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. — 1965. — № 36 (203). — С. 66–93.
20. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 121–150.
21. Федотов С. А., Чернышев С. Д. 20 лет долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги: достоверность в 1981–1985 гг., в целом за 1965–1986 гг. и прогноз на 1986–1990 гг. // Вулканология и сейсмология. — 1987. — № 6. — С. 93–109.
22. Abe K. Complements to «Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980» // Phys. Earth and Planet. Intern. — 1984. — Vol. 34. — № 1–2. — P. 17–23.
23. Gutenberg R., Richter C. The seismicity of the Earth 1904–1952. — Princeton Univ. Press, 1954. — 273 p.
24. Предварительный отчет о сейсмическом районировании участка строительства Кроноцкой ГЭС на Камчатке. — М.: ИФЗ АН СССР, 1968. — 169 с.

А. В. Викулин¹¹ Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН**О ПРИРОДЕ АВСТРАЛИЙСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ***

Исследовано распределение в пространстве и во времени эпицентров австралийских землетрясений, происшедших за последние 200 лет и сопровождавшихся на материке колебаниями с интенсивностью > 4 баллов. Показано, что эпицентры сильных землетрясений мигрируют вдоль окраины материка в направлении с востока на юг, затем на запад и т. д. На основании выявленных закономерностей на ближайшие десятилетия построен сейсмический прогноз для Австралии. Намечена схема построения модели, в основу которой закладывается принцип механического взаимодействия «соприкасающихся» Тихоокеанской и Австралийской тектонических плит.

ON THE NATURE OF AUSTRALIAN EARTHQUAKES

A spatio-temporal distribution of epicentres is studied for Australian earthquakes that occurred over last 200 years and that were accompanied by IV intensity vibrations in the mainland. Epicentres of large earthquakes are shown to migrate along the border of the continent from east to south, then to west, etc. Based on the regularities obtained, a seismic forecast is made for Australia for the near few decades. A model is proposed to explain these spatio-temporal regularities of Australian seismicity; The model is based on the hypothesis that the contiguous Pacific and Australian tectonic plates mechanically interact with each other.

Сейсмичность Австралии значительно слабее по сравнению с различными регионами тихоокеанского кольца, например с Японией или Камчаткой. «Сейсмический климат» островных дуг и континентальных окраин Тихого океана определяется в основном землетрясениями с магнитудами ~ 8 и более при их средней повторяемости в одном месте один раз в ~ 100 лет (табл. 1) [7, 8]. Список австралийских землетрясений за более чем 200-летний интервал наблюдений в 1788–1989 гг. содержит лишь два землетрясения с магнитудой ~ 7 [23, 35]. Тем не менее ущерб, причиняемый Австралии землетрясениями, значителен. Так, материальные потери при последнем сильном землетрясении с $M = 5,6$, происшедшем 27.12.1989 г. и сопровождавшемся в г. Ньюкастле 9-балльными колебаниями, составили 4 миллиарда долларов [36, 37]. В этой связи проблема прогноза землетрясений для Австралии весьма актуальна.

Наиболее полно изучены закономерности распределения землетрясений, происходящих в пределах самого активного региона Земли — окраины Тихого океана. В работах [2, 5, 6, 39] сделано предположение, что сейсмический процесс в пределах Тихоокеанского кольца можно представить в виде волн сейсмичности, бегущих по кольцу навстречу друг другу. При этом оказалось, что очаги землетрясений можно считать взаимодействующими [6, 39, 40], что проявляется в виде миграции землетрясений, протекающих как в пределах достаточно протяженных участков кольца [3, 9, 10, 12, 13, 27], так и в окрестности очагов отдельно взятых сильнейших землетрясений [1, 18, 19, 22, 26, 31, 32]. Это так называемый эффект высокой краевой сейсмической активности [18]. Для описания сейсмического процесса разработаны и тектонические модели [15, 16, 25].

В рамках таких моделей созданы схемы прогноза землетрясений [3, 4, 9, 10, 12, 17, 20, 21, 28–30, 33, 38, 40–42], оправдываемость которых, как показано в работах [17, 18, 33], близка к 0,8–0,9. Такое высокое значение, по-видимому, указывает на то, что построенные сеймотектонические модели достаточно адекватно описывают сейсмический процесс, протекающий на различных масштабных уровнях — от очага землетрясения до всего Тихоокеанского кольца [6, 8].

Тихоокеанская и Австралийская литосферные плиты тесно взаимодействуют, на большом протяжении соприкасаясь между собой. В этой связи результаты исследований сейсмичности окраины Тихого океана и базирующиеся на них идеи могут оказаться полезными при построении модели сейсмического процесса и следующей из нее схемы сейсмического прогноза для Австралии.

* 7 (77). Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 99–108.

Таблица 1

**Повторяемость сильнейших землетрясений
в разных регионах Тихоокеанского кольца**

| Регион | M | Даты сильнейших землетрясений | T_1 , год | T_2 , год |
|--------------------|-----|----------------------------------|-------------|-------------|
| Камчатка | | | | |
| Камчатский залив | 8,4 | 22.08.1792 | — | 90 ± 40 |
| | 7,7 | 24.02.1923 | 131 | |
| | 7,8 | 15.12.1971 | 48 | |
| Кроноцкий залив | 8,5 | 03.08.1923 | — | |
| | 7,6 | 04.05.1959 | 36 | |
| Авачинский залив | 8,3 | 17.10.1737 | — | |
| | 8,4 | 17.05.1841 | 104 | |
| | 8,5 | 04.11.1952 | 111 | |
| Япония | | | | |
| Район Токио | 7,9 | 31.01.1605 | — | 130 ± 50 |
| | 8,2 | 31.12.1703 | 98 | |
| | 8,2 | 01.09.1923 | 220 | |
| Юго-западнее Токио | 8,6 | 20.09.1498 | — | |
| | 7,9 | 31.01.1605 | 107 | |
| | 8,4 | 28.10.1707 | 102 | |
| | 8,4 | 23.12.1854 | 147 | |
| | 8,0 | 07.12.1944 | 90 | |
| Перу | | | | |
| Район Кальяо | 8,3 | 1513–1515 | — | 110 ± 50 |
| | 8,5 | 09.07.1586 | 72 | |
| | 8,5 | 20.10.1687 | 101 | |
| | 8,0 | 28.10.1746 | 59 | |
| | 8,0 | 24.08.1942 | 196 | |
| Алеуты | | | | |
| Полуостров Аляска | 8,0 | 22.07.1788 | — | 100 ± 50 |
| | 8,3 | 10.11.1938 | 150 | |
| Ближние острова | 8,0 | 17.08.1906 | — | |
| | 8,5 | 04.02.1965 | 59 | |

Примечание. Символы T_1 , T_2 , T_3 — периоды повторения сильнейших ($M \sim 8$ и более) землетрясений соответственно в одном месте, в пределах района (дуги) и в масштабе всего Тихоокеанского кольца ($T_3 = 100 \pm 50$ лет).

Сейсмичность Австралии. Список австралийских землетрясений. Данные о сильных австралийских землетрясениях, ощущавшихся с интенсивностью > 4 баллов, помещены в работах [23, 35]. Список представлен 77 землетрясениями с магнитудами $M = 2,6$ и более, происшедшими в интервале 1788–1989 гг. Наибольшее значение магнитуды — $M = 7,2$. У первого землетрясения, происшедшего в районе Сиднея и сопровождавшегося 22.06.1788 г. сотрясениями $\sim IV$ баллов, не определены координаты эпицентра и магнитуда.

Распределение чисел N зарегистрированных австралийских землетрясений 1788–1989 гг. по их магнитудам имеет следующий вид:

| | | | | | | | | | |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $M \pm 0,25$ | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 |
| N | 3 | 7 | 9 | 25 | 25 | 26 | 4 | 3 | 3 |

График повторяемости землетрясений, рассчитанный в диапазоне магнитуд $M \geq 4,5$, удовлетворяет уравнению

$$\text{Lg } N(\pm 0,24) = -(0,47 \pm 0,12)M + (3,65 \pm 0,67).$$

Из приведенных данных видно, что представительными, т. е. отмеченными без пропусков, являются землетрясения с магнитудами ~ 5 и более. Список землетрясений с $M \geq 4,5$ приведен в табл. 2.

Таблица 2

Список австралийских землетрясений 1788–1989 гг. с $M \geq 4,5$

| Дата землетрясения | Градус | | H, км | M | I, баллы |
|-----------------------|--------|--------|-------|-----|----------|
| | ю. ш. | в. д. | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 22.06.1788 | — | — | | — | IV |
| 12.02.1801 | 33,5 | 150,6 | | 5,0 | VI |
| 02.08.1837 | 33,0 | 152,0 | | 5,0 | VI |
| 27.01.1841 | 33,0 | 152,0 | | 4,5 | VI |
| 21.11.1850 | 40,7 | 145,2 | | 5,4 | VII |
| 18.06.1868 | 32,75 | 151,60 | | 5,5 | VIII |
| 18.10.1872 | 32,29 | 149,54 | | 5,0 | VI |
| 03.01.1880 | 43,0 | 146,4 | | 5,5 | VI |
| 07.07.1883 | 35,1 | 138,7 | 10 | 4,7 | IV |
| 28.08.1883 | 25,5 | 151,7 | | 5,9 | VII |
| 13.07.1884 | 40,5 | 148,5 | | 6,2 | VII |
| 12.05.1885 | 39,9 | 148,9 | | 6,5 | VII |
| 29.11.1886 | 34,75 | 148,80 | | 5,5 | VII |
| 05.07.1886 | 34,8 | 149,1 | | 5,3 | VI |
| 26.01.1892 | 40,4 | 149,5 | | 6,9 | VII |
| 10.05.1897 | 37,33 | 139,75 | 14 | 6,5 | IX |
| 19.09.1902 | 35,0 | 137,4 | 14 | 6,0 | VIII |
| 14.07.1903 | 38,43 | 142,53 | 10 | 5,3 | VII |
| 04.05.1908 | 42,0 | 145,4 | | 5,0 | VII |
| 04.11.1911 | 42,1 | 145,1 | | 4,8 | VI |
| 10.06.1916 | 32,5 | 153,0 | | 5,4 | VI |
| 06.06.1918 | 23,5 | 152,5 | | 6,3 | VII |
| 15.08.1919 | 32,45 | 150,63 | | 5,2 | VIII |
| 01.03.1924 | 41,6 | 145,0 | | 5,1 | VII |
| 18.12.1925 | 33,0 | 152,0 | | 5,3 | VII |
| 27.10.1930 | 34,48 | 148,75 | | 5,3 | VII |
| 02.09.1932 | 38,3 | 145,0 | | 4,5 | V |
| 18.11.1934 | 34,8 | 149,2 | | 5,6 | VIII |
| 12.04.1935 | 25,50 | 151,67 | | 5,7 | VII |
| 29.04.1941 | 26,8 | 116,1 | 33 | 7,2 | VIII |
| 06.08.1948 | 37,36 | 139,68 | | 5,6 | VI |
| 10.03.1949 | 34,74 | 148,20 | | 5,5 | VIII |
| 11.03.1952 | 31,3 | 116,5 | | 5,1 | IV |
| 19.11.1952 | 34,80 | 149,25 | | 4,9 | VI |
| 28.02.1954 | 34,93 | 138,69 | 4 | 5,4 | VIII |

Окончание табл. 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------|-------|--------|----|-----|------|
| 30.08.1955 | 30,7 | 116,4 | | 5,8 | VI |
| 01.01.1958 | 42,2 | 146,1 | | 5,3 | V |
| 18.05.1959 | 36,22 | 148,84 | 15 | 5,3 | VII |
| 02.11.1959 | 33,36 | 135,98 | | 5,2 | VI |
| 21.05.1961 | 34,55 | 150,50 | 19 | 5,6 | VIII |
| 18.01.1963 | 32,25 | 117,17 | 18 | 4,9 | VII |
| 14.11.1964 | 40,22 | 144,60 | | 4,5 | V |
| 25.01.1965 | 31,93 | 138,50 | | 4,6 | VI |
| 28. 08.1965 | 32,23 | 138,30 | 16 | 5,0 | V |
| 03.05.1966 | 37,04 | 147,13 | 8 | 5,0 | V |
| 14.10.1968 | 31,60 | 117,00 | 5 | 6,9 | IX |
| 17.06.1969 | 25,26 | 116,73 | | 5,6 | V |
| 20.06.1969 | 38,47 | 148,30 | 19 | 5,3 | VI |
| 10.03.1970 | 31,11 | 116,47 | 1 | 5,1 | VI |
| 06.02.1971 | 33,48 | 138,56 | 12 | 4,6 | VI |
| 06.07.1971 | 38,42 | 145,11 | 23 | 5,0 | VI |
| 18.04.1972 | 31,58 | 138,62 | | 5,3 | VII |
| 09.03.1973 | 34,14 | 150,29 | 20 | 5,5 | VIII |
| 04.09.1974 | 30,79 | 116,97 | | 4,5 | VI |
| 06.03.1975 | 17,08 | 126,38 | | 5,2 | V |
| 24.07.1975 | 21,09 | 120,47 | 33 | 5,1 | IV |
| 29.10.1976 | 31,64 | 117,00 | | 4,7 | V |
| 15.05.1977 | 35,00 | 117,95 | | 4,5 | V |
| 30.06.1977 | 34,67 | 148,87 | 12 | 4,5 | IV |
| 04.07.1977 | 35,65 | 148,89 | 13 | 5,0 | VI |
| 02.12.1977 | 37,86 | 144,26 | 15 | 4,5 | V |
| 01.05.1978 | 23,64 | 115,59 | | 5,7 | IV |
| 28.11.1978 | 23,36 | 152,43 | 12 | 5,0 | V |
| 02.06.1979 | 30,78 | 117,16 | 15 | 6,2 | IX |
| 11.10.1979 | 30,79 | 117,15 | 15 | 4,8 | VI |
| 08.12.1980 | 32,12 | 114,11 | 37 | 5,2 | IV |
| 10.12.1980 | 30,73 | 117,15 | 13 | 5,0 | VI |
| 16.06.1981 | 38,90 | 144,20 | 15 | 4,9 | V |
| 15.11.1981 | 34,25 | 150,90 | 14 | 4,6 | V |
| 06.02.1982 | 30,88 | 117,15 | | 4,5 | VI |
| 21.11.1982 | 37,20 | 148,96 | | 5,4 | VI |
| 26.11.1982 | 33,94 | 147,25 | | 4,6 | VI |
| 29.12.1983 | 30,79 | 138,40 | | 4,5 | VI |
| 09.08.1984 | 34,81 | 149,17 | | 4,5 | VII |
| 30.03.1986 | 26,22 | 132,82 | 5 | 6,0 | — |
| 22.01.1988 | 19,84 | 133,99 | | 6,5 | VI |
| 27.12.1989 | 32,95 | 151,61 | | 5,6 | IX |

Примечание. Символ *I* — интенсивность сейсмических колебаний при землетрясениях по шкале ММ (модифицированная шкала Меркалли) [34].

Распределение эпицентров землетрясений в пространстве и во времени. Карта эпицентров австралийских землетрясений с $M \geq 4,5$ приведена на рис. 1. Видно, что эпицентры таких землетрясений в основном распределены в узкой полосе, окаймляющей материк вдоль его береговой линии.

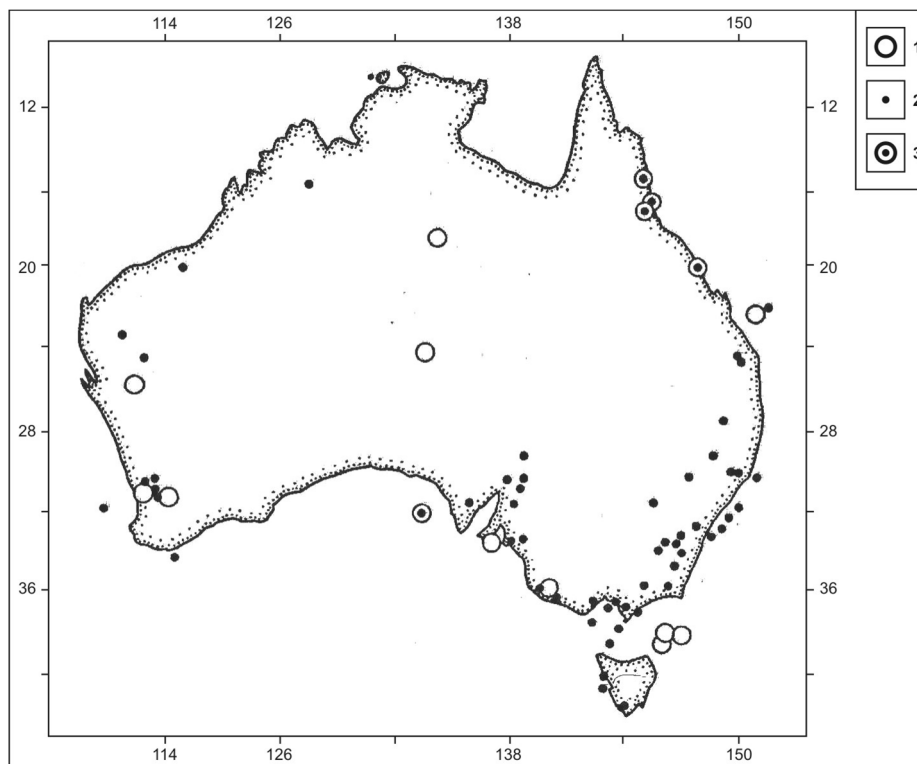


Рис. 1. Карта эпицентров сильных австралийских землетрясений в 1801–1989 гг. [23, 25]:

1, 2 — эпицентры землетрясений соответственно с $M \geq 6$ и $4,5 \leq M < 6,0$;
3 — эпицентры землетрясений с $M < 4,5$ в северо-восточной части материка

Распределение землетрясений с $M \geq 5$ в различных интервалах времени представлено на рис. 2, где видно, что землетрясения имеют тенденцию группироваться в пространстве и во времени. Это проявляется в том, что сейсмические события в течение различных интервалов времени происходят в пределах разных и по протяженности достаточно малых участков побережья, тем самым образуя скопления эпицентров землетрясений. Такие скопления землетрясений отмечены в пределах сначала восточного и юго-западного (XIX — начало XX в.; рис. 2, а), затем западного и юго-восточного (середина XX в.; рис. 2, б), западного и северо-западного (конец XX в.; рис. 2, в) участков побережья материка.

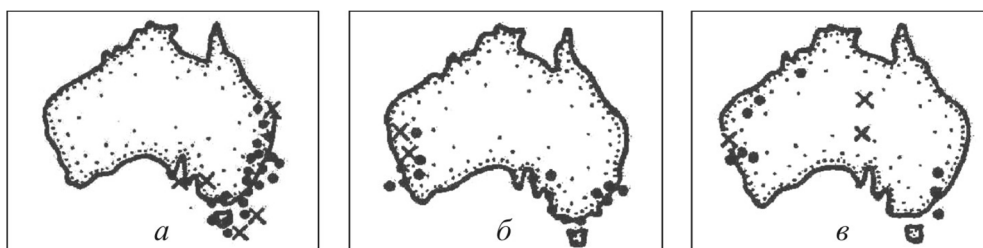


Рис. 2. Распределение эпицентров австралийских землетрясений с $M \geq 5,0$ в 1801–1935 (а), 1936–1973 (б), 1974–1989 (в) гг.

Распределение австралийских землетрясений с $M \geq 5,0$ в течение меньших по продолжительности временных интервалов представлено на рис. 3, из которого видно, что можно выделить два цикла закономерного изменения сейсмичности и в каждом из них имеет место миг-

рация скоплений эпицентров землетрясений вдоль побережья материка (по часовой стрелке) в направлении с востока на юг и затем на запад: $a \rightarrow б \rightarrow в \rightarrow г \rightarrow д$ и $и \rightarrow к \rightarrow л$ (?). Количественно миграцию можно характеризовать величиной угла, вершина которого расположена в некоторой «центральной» точке материка, а величина отсчитывается по часовой стрелке от линии азимута $\alpha = 90^\circ$.

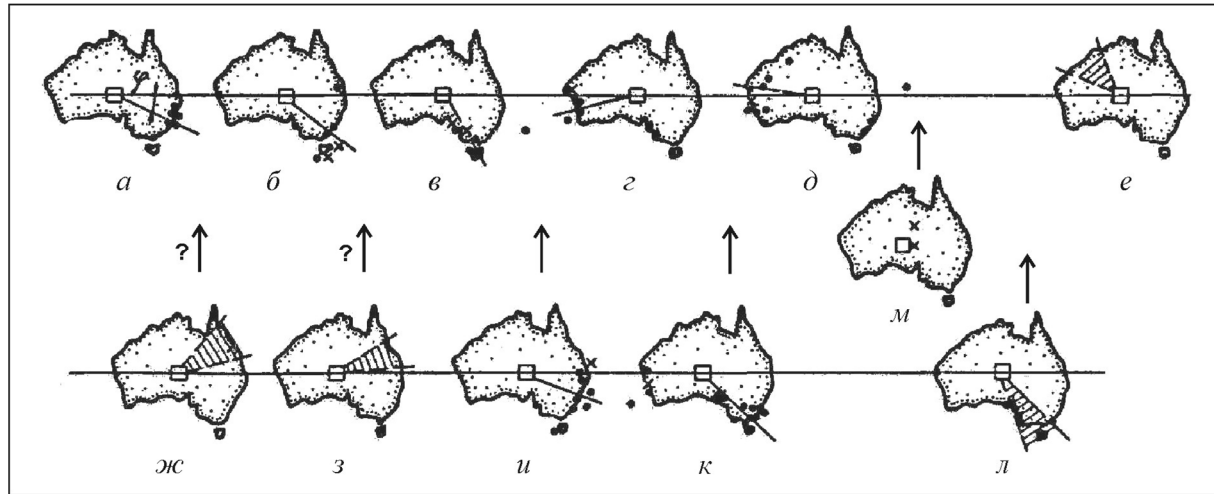


Рис. 3. Миграция землетрясений вдоль побережья Австралии и сейсмический прогноз:

a — 1801–1872 гг., $26 \pm 13^\circ$; $б$ — 1880–1892 гг., $39 \pm 1^\circ$; $в$ — 1897–1908 гг., $62 \pm 60^\circ$; $г$ — 1941–1945 гг., $167 \pm 10^\circ$; $д$ — 1975–1982 гг., $190 \pm 30^\circ$; e — (?) 2000–2010 гг., $220 (\pm 16)^\circ$; $ж$ — (?) 1872–1880 гг., $324 (\pm 16)^\circ$; $з$ — (?) 1893–1897 гг., $344 (\pm 16)^\circ$; $и$ — 1916–1935 гг., $20 \pm 21^\circ$; $к$ — 1958–1973 гг., $44 \pm 11^\circ$; $л$ — 1989–(2000?) (70?) — 38° ; $м$ — 1986–1988 гг., $\varphi = ?$ (Остальные обозначения такие же, как на рис. 1)

Параметры, характеризующие миграцию скоплений эпицентров землетрясений, представлены в табл. 3. Видно, что циклы сдвинуты на интервал времени, составляющий величину, близкую к $T_0 = 80 \dots 100$ лет. Используя данные, представленные в табл. 3, можно показать, что значение угловой скорости, с которой сейсмичность на уровне $M \geq 4,5$ мигрирует вдоль окраины материка, изменяется в пределах 0,3–4,0 град/год в среднем, составляя величину $V = 1,4 \pm 1,4$ град/год.

Таблица 3

Параметры миграционных циклов сильных австралийских землетрясений

| Фаза процесса (рис. 3) | Начало и окончание выделенных фаз, годы | Середина и продолжительность выделенных фаз, годы | Угол миграции сейсмичности, град | T_0 |
|------------------------|---|---|----------------------------------|--------------|
| Первый цикл | | | | |
| a | 1801–1872 | 1836 ± 35 | 26 ± 13 | 90 ± 30 |
| $б$ | 1880–1892 | 1886 ± 6 | 39 ± 21 | 80 ± 10 |
| $в$ | 1897–1908 | 1902 ± 5 | 62 ± 6 | $90-100$ (?) |
| $г$ | 1941–1945 | 1943 ± 2 | 167 ± 10 | — |
| $д$ | 1975–1980 | 1978 ± 3 | 190 ± 30 | — |
| Второй цикл | | | | |
| $и$ | 1916–1935 | 1926 ± 10 | 20 ± 21 | 90 ± 30 |
| $к$ | 1958–1973 | 1996 ± 8 | 44 ± 11 | 80 ± 10 |
| $л$ | 1989–? | $1995 \pm ?$ | 38 | $90-100$ (?) |

Примечание. Символ T_0 — временные интервалы между одинаковыми фазами в циклах.

Прогноз сильных землетрясений Австралии. Выявленные закономерности пространственно-временного распределения землетрясений с $M \geq 5,0$ позволяют создать вероятный сценарий развития сейсмического процесса у берегов Австралии в ближайшие годы.

Начиная с конца XIX — начала XX вв. оба установленных цикла сейсмичности проявлялись по очереди. Действительно, происходило следующее чередование фаз: $v \rightarrow z \rightarrow d$, $u \rightarrow k \rightarrow l$. Фаза m , проявившаяся в 1986–1988 гг. двумя землетрясениями с магнитудами 6,0 и 6,5, по-видимому, не связана с миграционным процессом, протекающим вдоль окраины материка и определяющимся взаимодействием между континентальной и океанической частями плиты. Вероятно, фаза m характеризует составляющую сейсмического процесса, связанную с движением плиты в целом.

Таким образом, в ближайший период времени, который будет продолжаться, вероятно, до конца этого века, наиболее активным должно оставаться юго-западное побережье (на рис. 3, *л* заштрихованный сектор). Затем, в течение следующего десятилетия (2000–2010 гг.), наиболее активным, как представляется, должно стать северо-западное побережье Австралии (рис. 3, *е*).

Отсутствие чередования фаз, по данным XIX в., скорее всего может быть связано с неполнотой сейсмических данных в течение этого отрезка времени для северо-восточного побережья Австралии. Если будут установлены следы ощутимых землетрясений в пределах этой части побережья в течение фаз $ж$, $з$ в XIX в., то такого рода данные могут стать подтверждением прогноза, сформулированного для фаз $л$, $е$.

Интерпретация выявленных закономерностей сейсмичности Австралийского материка

Австралийское (материковое) сейсмическое кольцо. Протяженность внешней границы Тихого океана — 50 тыс. км. Линейная скорость миграции очагов сильнейших землетрясений вдоль этой границы составляет 250 ± 30 км/год [6, 13, 39, 40]. При этих параметрах значение угловой скорости миграции сейсмичности вдоль Тихоокеанского кольца приближается к величине $V = 1,8 \pm 0,2$ град/год. Видно, что угловая скорость миграции сейсмичности вдоль окраины Тихого океана по своему значению фактически совпадает с величиной такой же скорости вдоль окраины Австралийского континента.

В работах [7, 11] предполагается, что Тихоокеанская плита вращается вокруг некоторой своей центральной точки. В своей юго-западной части она соприкасается с Австралийской плитой, поэтому представляется, что совпадение значений угловых скоростей миграции сейсмичности вдоль окраин Австралийского материка и Тихоокеанской плиты, а также близость радиусов, определяющих линейные размеры этих плит в районе их соприкосновения, неслучайны. Они могут быть положены в основу модели, которая с позиции механики достаточно прозрачна.

Механическая модель сейсмического процесса. Схематично Австралийскую литосферную плиту можно представить в виде тонкого диска. Действительно, при примерно овальной форме как плиты (П), так и материка (М), линейные размеры которых $L_P = 5...8$ тыс. км, $L_M = 3...5$ тыс. км, мощность океанической плиты $D_0 \approx 5$ км, а континентальной D_M — несколько десятков километров. Видно, что условия модели (плита — тонкий диск) заведомо выполняются: $L_{П,М} \geq D_{0,М}$.

Тихоокеанская и Австралийская плиты соприкасаются между собой вдоль линии, которая простирается на ~ 10 тыс. км, что составляет более одной трети протяженности всей окраины Австралийской плиты. Ввиду такой большой протяженности линии соприкосновения плит вращение Австралийской плиты относительно Тихоокеанской плиты должно происходить без «проскальзывания». О таком механизме зацепления плит, по-видимому, свидетельствует и факт близости значений «сейсмических» периодов: $T_3 = 100 \pm 50$ лет (табл. 1) и $T_0 = 80...100$ лет (табл. 3) соответственно для тихоокеанских сильнейших и австралийских сильных землетрясений.

В такой механической модели сосредоточение сильных землетрясений в пределах достаточно узкой полосы, протягивающейся вдоль береговой линии Австралийского материка, может быть объяснено достаточно просто. Действительно, как может следовать из решения задачи о вращающемся тонком диске [14, с. 73], напряжения, возникающие во вращающейся плите, будут наибольшими в том месте, где максимален градиент изменения ее мощности, т. е. в пределах узкой полосы вдоль окраины материка. Именно в этом месте мощность плиты резко изменяется от $D_0 \approx 5$ км для океанической части плиты до $D_M = 30...40$ км для материковой.

Австралийский материк как очаг сильнейшего землетрясения. Данные, представленные на рис. 2, показывают, что максимумы сейсмической активности приходятся на восточную и западную окраины материка. При этом указанные максимумы проявляются в разные отрезки времени. Аналогичным образом изменяется сейсмичность и на краях очагов сильнейших курило-камчатских землетрясений [1].

Таким образом, приведенный анализ указывает на существование вполне определенной аналогии между сейсмическими процессами, протекающими на разных масштабных уровнях: от очага сильнейшего землетрясения до Австралийского материка. Эффект высокой сейсмичности на краях очагов землетрясений независимо установлен в большом количестве работ [1, 18, 19, 22, 26, 31, 32]. Эти данные, а также возможность описания австралийской сейсмичности в рамках механической модели указывают на то, что выявленная аналогия имеет вполне определенный физический смысл, а сам эффект краевой сейсмичности является достаточно общим свойством сейсмического процесса. Сформулированное утверждение позволяет высказать гипотезу относительно природы сильных землетрясений, а именно: основой механизма достаточно сильного землетрясения является поворот.

Автор признателен Д. Рину, который в приятных беседах в Бангкоке обратил его внимание на актуальность сейсмических проблем для Австралии.

Литература

1. Баранов Б. В. Сейсмическая активность на краях очагов сильнейших курило-камчатских землетрясений и долгосрочный сейсмический прогноз / Б. В. Баранов, А. В. Викулин, К. А. Кечекезян, Л. И. Лобковский // Геофиз. исслед. при решении геологических задач. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1989. — С. 24–42.
2. Викулин А. В. Свойства эпицентральных областей курило-камчатских землетрясений // Сейсмические процессы на Северо-Востоке СССР. — Магадан, 1984. — С. 54–78.
3. Викулин А. В. Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова // Вулканология и сейсмология. — 1986. — № 3. — С. 72–83.
4. Викулин А. В. Уточнение положения очагов сильнейших землетрясений и долгосрочный сейсмический прогноз для Алеутской островной дуги и Южной Аляски // Сейсмичность и сейсмический прогноз на Дальнем Востоке. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 71–72.
5. Викулин А. В. Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1987. — 54 с. — Препринт.
6. Викулин А. В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–824.
7. Викулин А. В. О понятии и величине сейсмического риска // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1. — № 3. — С. 118–123.
8. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса // Природа. — 1992. — № 7. — С. 11–19.
9. Викулин А. В. Миграция очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений и их повторяемость // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 46–61.
10. Викулин А. В. Прогноз времени сильнейших землетрясений у берегов Камчатки и Северных Курил // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 62–69.
11. Викулин А. В. Сейсмичность и вращение Земли // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1. — № 3. — С. 124–130.
12. Викулин А. В., Викулина С. А. Закономерности размещения очаговых областей сильнейших землетрясений в районе желоба Нанкай. — Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ АН СССР, 1989. — 44 с. — Препринт № 5.
13. Вилькович Е. В. Шнирман М. Г. Волны миграции эпицентров (примеры и модели) // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений. Вычислительная сейсмология. — Вып. 14. — М.: Наука, 1982. — С. 27–37.
14. Ландау Л. Д. Лифшиц Е. М. Теория упругости. — М.: Наука, 1965. — 204 с.
15. Лобковский Л. И. Баранов Б. В. Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // Докл. АН СССР. — 1984. — Т. 275. — № 4. — С. 843–848.
16. Маламуд А. С., Николаевский В. Н. Циклы землетрясений и тектонические волны. — Душанбе: Дониш, 1989. — 142 с.
17. Федотов С. А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. — 1965. — № 36 (203). — С. 66–93.

18. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование территории СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 121–150.
20. Федотов С. А., Викулин А. В., Чернышев С. Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для северо-восточной Японии // Сейсмичность и сейсмический прогноз на Дальнем Востоке. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 120–122.
21. Федотов С. А., Чернышев С. Д. 20 лет долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги: достоверность в 1981–1985 гг., в целом за 1965–1986 гг. и прогноз на 1986–1990 гг. // Вулканология и сейсмология. — 1987. — № 5. — С. 93–109.
22. Чузунова Г. П. Сейсмический режим и механизмы очагов в процессе подготовки сильного землетрясения (на примере Южно-Курильской зоны) // Сейсмичность и механизмы очагов землетрясений Дальнего Востока. — Южно-Сахалинск: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1980. — С. 72–79.
23. Atlas of Isoseismal Maps of Australian Earthquakes. Department of National Development & Energy // Bureau of Mineral Res. Geol. and Geoph. Bull. 214. — Canberra, 1982. — P. 1–6.
24. Current plate notions / C. DeMets, R. G. Gordon, D. F. Argus, S. Stein // Geophys. J. Int. — 1990. — Vol. 101. — № 2. — P. 425–478.
25. Elsasser W.M. Convection and stress propagation in the mantle // Application modern physics to the Earth and Planetary interiors. — Ed. Runcorn S. K. N. Y.: Wiley Interscience, 1969. — P. 223–246.
26. Kanamori H. Great earthquakes at island areas and the lithosphere // Tectonophysics. — 1971. — Vol. 12. — P. 187–198.
27. Kasahara K. Earthquake mechanics. — Cambridge Univ. Press, 1981.
28. Kelleher J., Savino J. Distribution of seismicity before large strike slip and thrust earthquakes // J. Geophys. Res. — 1975. — Vol. 80. — № 2. — P. 260–271.
29. Kelleher J., Sykes L., Oliver J. Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and Caribbean / J. Geophys. Res. — 1973. — Vol. 78. — № 4. — P. 2547–2585.
30. Mogi K. Sequential occurrence of recent great earthquakes // J. Phys. Earth. — 1968. — Vol. 16. — P. 30–36.
31. Mogi K. Two kinds of seismic gap // Pure and Appl. Geophys. — 1979. — Vol. 117. — № 6. — P. 1172–1186.
32. Perez O. Seismicity preceding large shallow thrust and strike slip earthquakes // Abstracts of XVIII General Assembly of IUGG. Symposium IASPEL. — Hamburg, 1983. — P. 150.
33. Proc. of conf. of methodology for identifying seismic gaps and soon-to-break gaps. — California, 1978. — P. 924.
34. Rutlage J. Brazes. Reevaluation of modified Mercalli intensity scale for earthquakes using distance as determinant // BSSA. — 1979. — Vol. 69. — № 3. — P. 911–924.
35. Rynn J. M. W. Earthquake Prognostics for Australia: Earthquake Zonation of Urbanised Areas in Australia — Implementation of International Lessons with those from the 1989 Newcastle and Other Australian Earthquakes. — Center for Earthquake Research in Australia, 1992. — 27 p.
36. Rynn J. M. W. Earthquake Prognostics for Australia: Earthquake Zonation of Urbanised Areas in Australia Implementation of International Lessons with those from the 1989 Newcastle and other Australian Earthquakes // Hazard Assessment, Risk Evaluation. Loss Reduction and Earthquake Insurance: 7th International Seminar Earthquake Prognostics / Asian Institute of Technology. — Bangkok, Thailand, 1992. — P. 75–76.
37. The 1989 Newcastle. Australia. Earthquake: the Facts and the Misconceptions / J. M. W. Rynn, E. Brennan, P. R. Hughes, et al. // Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering. — 1992. — Vol. 25. — № 2. — P. 77–145.
38. Sykes L. R. Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps and earthquake prediction for Alaska and Aleutian // J. Geophys. Res. — 1971. — Vol. 76. — № 2. — P. 8021–8041.
39. Vikulin A. V. Phenomenological wave model of seismic process and ways to its further development // Geodesy-Seismology: Deformations and Prognosis. International Symposium. — Erevan, 1989. — P. 148.
40. Vikulin A. V. Migration of the largest earthquake sources across the Nankai trench // Tsunamis: Their science and Hazard mitigation proceedings of the International Tsunami Symposium. — Novosibirsk, 1989. — P. 141–148.
41. Vikulin A. V. Forecast of the Largest Earthquakes at the Costs of Kamchatka and North Kuriles // Hazard Assessment. Risk Evaluation, Loss Reduction and Earthquake Insurance: 7th International Seminar of Earthquake Prognostics / Asian Institute of Technology. — Bangkok, Thailand, 1992. — P. 72.
42. Wyss M., Habermann R. E. Seismic quiescence precursory to a past and a future Kurile Island earthquake // Pure and Appl. Geophys. — 1979. — Vol. 117. — P. 1195–1211.

А. В. Викулин, С. Л. Сеньюков¹¹ Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН

МИГРАЦИЯ ФОРШОКОВ И АФТЕРШОКОВ В ОЧАГЕ КРОНОЦКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 05.12.1997 г. с $M = 7,5-7,7$ *

В работе исследуются особенности миграции камчатских землетрясений с $K \geq 12$, $H < 100$ км, происшедших в течение 1997 — 04.03.1998 гг. На основании выявленных в работе закономерностей показывается существование трех фаз сейсмического процесса: фоновой, форшоковой и афтершоковой. Первая фаза характеризуется низким уровнем сейсмической активности региона и скоростями миграции, близкими к криповым. Вторая и третья фазы определяются высоким уровнем сейсмичности и большими, достигающими звуковых, значениями скоростей миграции в очаге Кроноцкого землетрясения. Формулируется новый форшоковый прогнозный признак. Дается объяснение установленным закономерностям миграции форшоков и афтершоков. Теоретически выводится закон Омори.

MIGRATION OF FORSHOCKS AND AFTERSHOCKS IN THE SOURCE ZONE OF THE KRONOTSKOYE EARTHQUAKE of December 5, 1997 of $M = 7,5-7,7$

This paper studies the behaviour of migration of the Kamchatkan earthquakes of $K \geq 12$, $H < 100$ km which occurred during 1997 to March 4, 1998. Based on the revealed regularities we assume the existence of three stages of the seismic process; the background, foreshock and aftershock. The first stage is characterized by the low level of seismic activity and by the velocities of migration which are close to those of the creep. The second and the third stages are determined by the high level of seismicity and by the high (up to nearly sound) values of migration velocity in the source zone of the Kronotskoye earthquake. A new precursory pattern of forecasting is proposed. Explanations are provided for the revealed regularities of the foreshocks and aftershocks migration. Omory's law has been deduced theoretically.

Введение

5 декабря 1997 г. вблизи Кроноцкого полуострова произошло землетрясение, которое было самым сильным на Камчатке за последние 26 лет. Оно сопровождалось достаточно мощным по количеству и частоте появления сильных толчков афтершоковым процессом. Только в течение первых двух дней в Петропавловске, удаленном на 300 км от эпицентра главного толчка, ощущалось более 30 землетрясений с интенсивностью до 5 баллов [1].

Уже в самые первые часы после Кроноцкого землетрясения авторами было отмечено, что в пределах его предполагаемого очага эпицентры сильных последующих толчков имеют тенденцию вполне закономерным образом перемещаться в пространстве и во времени (мигрировать). При этом с течением времени скорость миграции сильных афтершоков и частота их появления заметно уменьшились. Это позволило уже на вторые сутки после главного толчка высказать предположение о том, что афтершоковый процесс заметно пошел на спад и более сильного землетрясения не произойдет.

Закономерности миграции совокупностей афтершоков с $M \geq M_0$ в широком магнитудном диапазоне $3 \leq M_0 \leq 7$ выявлены в очагах лишь для нескольких землетрясений, очаги которых имели большую протяженность и высокую мощность афтершокового процесса [2–4]: Алеутского 09.03.1957 г. с $M = 7,9$ (форшоки и афтершоки — 9 часов, $M_0 \geq 7$, $N = 9$), Аляскинского 27.03.1964 г. с $M = 8,3$ (афтершоки — 10 часов, $M_0 \geq 6$, $N = 6$), Чилийского 20.05.1960 г. с $M = 8,3$ (форшоки и афтершоки — первый день, $M_0 \geq 5,5$, $N = 21$) и в Сан-Фернадо 09.02.1971 г. с $M = 7,1$ (афтершоки — первые часы, $M_0 \geq 3$, $N = 26$; афтершоки — 7 недель, $M_0 \geq 3,3$, $N = 5$). Анализ этих в общем-то многочисленных по объему данных, характеризующих распределение форшоков и афтершоков в течение первых часов — 7 недель до и после главных толчков, показал, что скорость их миграции пропорциональна магнитуде, определяемой по формуле

* 8 (110). Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1998. С. 80–88.

$$M_0 = (1,28 \pm 0,31) \text{ Lg } V [\text{км/год}] - (1,43 \pm 1,56), \quad (1)$$

и изменяется в широких пределах от скорости, близкой к скорости крипа $V_{\text{кр}} \approx 0,1-0,5$ км/ч при $M_0 = 3$, до скорости, значение которой по порядку величины приближается к скорости звука (сейсмических волн) $M_{\text{зв}} \approx 1$ км/ч при $M_0 \rightarrow 8$ [5].

Большое количество сильных толчков, зарегистрированных примерно в течение месяца после землетрясения 5 декабря 1997 г. с $M = 7,5-7,7$, позволяет с большой детальностью исследовать временные особенности миграции форшоков и афтершоков в пределах Кроноцкой сейсмической брешы.

Исходные данные

При анализе использовались получаемые группой оперативной обработки КОМСП ГС РАН данные о камчатских землетрясениях с $K \geq 12$ ($M \geq 5$), $H < 100$ км, происшедших в течение 01.01.1997 г. — 04.03.1998 г. Список таких событий включает 88 землетрясений, их эпицентры изображены на рис. 1. Данные о шести землетрясениях, эпицентры которых расположены вне пределов сейсмофокальной зоны у восточных берегов Камчатки — Северных Курил (пять — в районе Командорских и Ближних островов, одно — на севере Камчатки), далее при расчетах нами не учитывались.

Эпицентры большей ($64/82 \approx 0,8$) части событий, происшедших в пределах примерно месячного по продолжительности интервала времени (03.12.1997 г. — 01.01.1998 г.), компактной группой расположены вблизи Кроноцкого полуострова (рис. 1, б, в–ж) или, согласно работе [6], в пределах Кроноцкого сейсмофокального блока, протяженность которого $L = 140$ км. Эпицентры предвалявших (01.01.1997 г. — 02.12.1997 г.) эту компактную группу и последующих (02.01.1998 г. — 04.03.1998 г.) землетрясений распределены в пределах всего сейсмофокального объема вблизи Камчатки и Северных Курил (рис. 1, а, з). Относительная точность определения координат эпицентров рассматриваемой выборки событий в среднем не хуже 5–10 км, что позволяет с достаточной детальностью исследовать закономерности их пространственно-временного распределения.

Три фазы сейсмического процесса

«Траектории» движения эпицентров землетрясений (прямолинейные отрезки, соединяющие все следующие друг за другом землетрясения исследуемого каталога) представлены на рис. 1. Для каждой траектории определялось значение скорости V , численно равное отношению длины прямолинейного отрезка, соединяющего эпицентры соседних во времени землетрясений каталога, к интервалу времени между ними. Как можно видеть из данных, представленных на рис. 1, часто совокупности отрезков-траекторий могут рассматриваться и как колебательные движения эпицентров землетрясений вдоль и вкрест сейсмофокальной зоны. Для таких совокупностей траекторий определялось значение частоты ν как величины, обратной половине периода полного колебания.

Значения скоростей миграции V , рассчитанных для всех ($N = 81$) последовательных пар землетрясений, и достаточно уверенно определяемых частот ν ($N = 49$) приведены на рис. 2. Из данных, представленных на этом рисунке, видно, что анализируемый временной интервал 1997–04.03.1998 гг. по характеру изменения зависимостей $V(t)$ и $\nu(t)$ достаточно четко разбивается на четыре следующих друг за другом отрезка времени. Первый (01.01.1997 г. — 02.12.1997 г.) и четвертый (02.01.1998 г. — 04.03.1998 г.) из них могут быть отождествлены с фоновой фазой сейсмического процесса, определяемой низким уровнем сейсмической активности $\text{Lg } \nu_{\text{фон}} [\text{ч}^{-1}] = -2,6 \pm 0,3$, $N_{\text{фон}} (K \geq 12) = 22 \pm 10 \text{ год}^{-1}$ и малыми значениями скоростей миграции $\text{Lg } V_{\text{фон}} [\text{км/ч}] = 0,15 \pm 0,35$, $V_{\text{фон}} \sim 1$ км/ч, близкими к скорости крипа. При этом, согласно данным работы [7], в пределах Кроноцкого блока в течение полутора лет до землетрясения 5 декабря 1997 г. наблюдалось глубокое сейсмическое затишье по землетрясениям с $K \geq 9$.

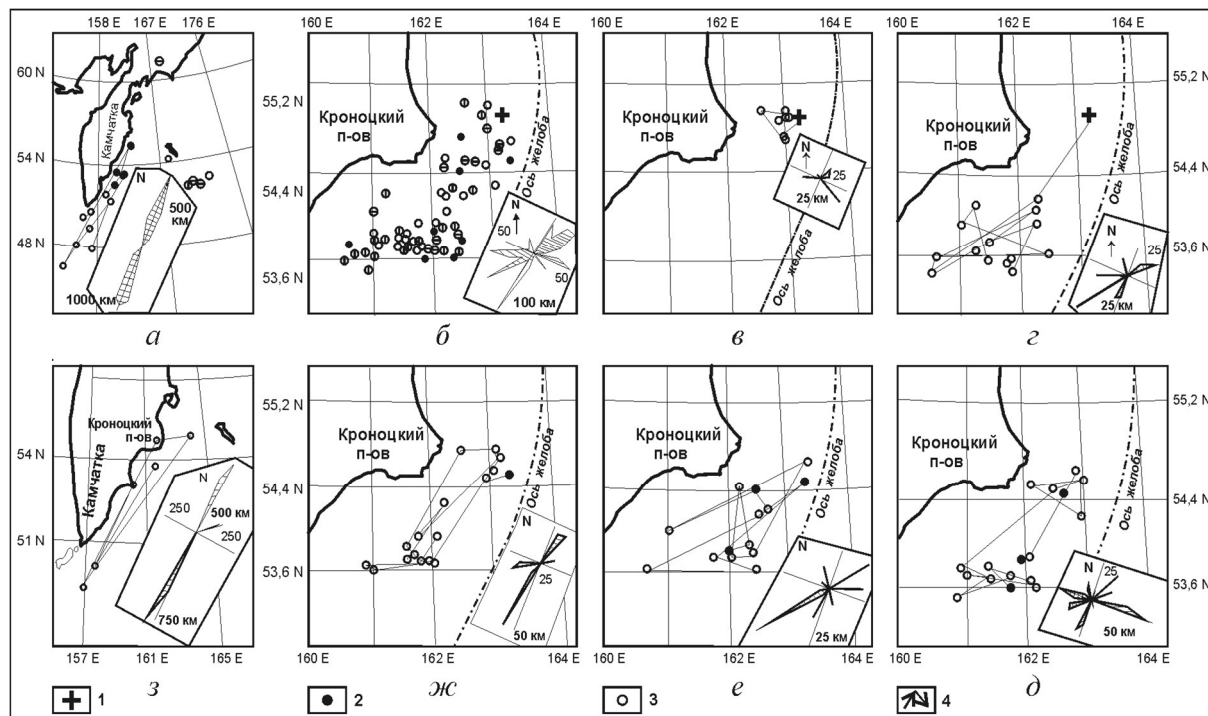


Рис. 1. Сейсмичность Камчатки — Северных Курил, «траектории» движения эпицентров и их гистограммы (на врезках) по данным о землетрясениях с $K \geq 12$, $H \leq 100$ км, происшедших в течение 1997–04.03.1998 гг. за различные периоды времени:

01.01.1997 г. — 02.12.1997 г. (а), 03.12.1997 г. — 01.01.1998 г. (б), 11^h 03^m 03–05.12.1997 г. (в), 11^h 27^m — 18^h 48^m 05.12.1997 г. (г), 18^h 49^m 05.12.1997 г. — 10^h 59^m 06.12.1997 г. (д), 11^h 00^m 06.12.1997 г. — 18^h 14^m 07.12.1997 г. (е), 18^h 15^m 07.12.1997 г. — 01.01.1998 г. (ж), 02.01.1998 г. — 04.03.1998 г. (з); 1–3 — эпицентры главного толчка 05.12.1997 г. в 11^h 26^m с $M = 7,5-7,7$ (1), наиболее сильных афтершоков с $M > 6$ (18^h 48^m 05.12.1997 г. с $M = 6,8$; 10^h 59^m 06.12.1997 г. с $M = 6,4$ и 18^h 14^m 07.12.1997 г. с $M = 6,7$) (2) и землетрясений с $K \geq 12$ (3); 4 — «траектории» движения эпицентров землетрясений

В течение второго (03–05.12.1997 г.) и третьего (05.12.1997 г. — 01.01.1998 г.) отрезков времени, наоборот, очень большое ($N = 64$) количество сильных ($K \geq 12$) землетрясений было зарегистрировано только в пределах Кроноцкой бреши при полном их отсутствии в других сейсмофокальных блоках Камчатки — Северных Курил. Второй — форшоковой фазе сейсмического процесса соответствует период «оживления» сейсмичности, в течение которого скорость миграции V и частота «колебания» эпицентров сильных толчков ν в районе будущего главного толчка резко увеличиваются примерно на один-два порядка: $V \sim 10$ км/ч, $N (K \geq 12) \approx 6$ день⁻¹.

В течение третьей — афтершоковой фазы значения V и ν в области очага главного толчка плавно уменьшаются примерно на 4 порядка в соответствии с зависимостями, определенными методом наименьших квадратов:

$$\text{Lg } V [\text{км/ч}] = (-0,94 \pm 0,12) \text{Lg } t [\text{ч}] + (2,80 \pm 0,17), N = 63; \quad (2)$$

$$\text{Lg } \nu [\text{ч}^{-1}] = (-0,72 \pm 0,15) \text{Lg } t [\text{ч}] + (0,60 \pm 0,24), N = 29. \quad (3)$$

При этом значение скорости миграции уменьшается от скорости, по порядку величины близкой к скорости звука сразу после главного толчка $\text{Lg } V_{\text{афт}} [\text{км/ч}] \sim 3,5$, $V_{\text{афт}} \sim 0,8$ км/с, до скорости крипа в конце афтершоковой фазы.

Среднее значение логарифма скорости миграции, определенное по всей совокупности данных о форшоках и афтершоках Кроноцкого землетрясения с $K \geq K_0 = 12$ ($M_0 \approx 5$), составляет $\text{Lg } V (K_0 = 12) [\text{км/год}] = 6,3 \pm 0,8$ и хорошо согласуется со значением $\text{Lg } V (M_0 \approx 5) [\text{км/год}] = 5,1 \pm 0,8$, полученным из зависимости (1), построенной в работе [5] на основании известных мировых данных о скоростях миграции афтершоков в очагах сильнейших землетрясений [2–4].

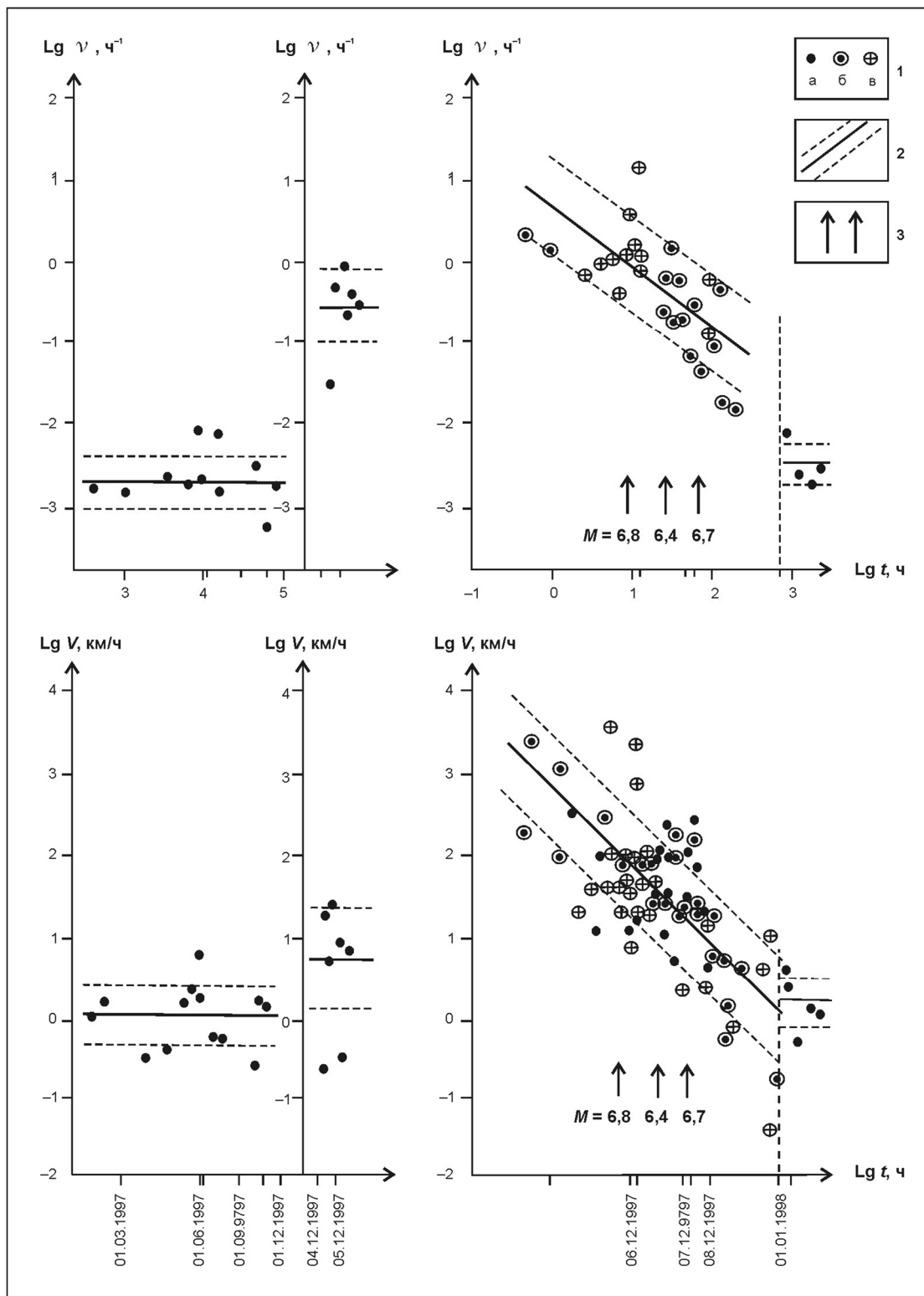


Рис. 2. Значения скоростей миграции V эпицентров землетрясений с $K \geq 12$ и частот их «колебания» ν по данным за 1997 — 04.03.1998 гг.:

1 — рассчитанные значения V и ν , в том числе для миграции вдоль (б) и вкост (в) сейсмофокальной зоны в течение афтершокового периода 05.12.1997 — 01.01.1998 гг. (афтершоковой фазы); 2 — рассчитанные методом наименьших квадратов прямолинейные зависимости $Lg V(Lg t)$, $Lg \nu(Lg t)$ и среднеквадратичные отклонения; 3 — моменты наиболее сильных афтершоков с $M > 6$

О движении Кроноцкого сейсмофокального блока

Как видно из данных, представленных на рис. 2, обе прямолинейные зависимости $Lg V(t)$ и $Lg v(t)$ в течение афтершоковой фазы параллельны друг другу. Тогда из соотношений (2) и (3) получаем $V = Av$. Здесь коэффициент A пропорционален разности свободных членов этих соотношений и по величине равен протяженности Кроноцкого сейсмофокального блока A [км] = $10^{2,2 \pm 0,2} = 150 \pm 50 \approx L$. Таким образом, зависимость между скоростью миграции сильных ($K \geq 12$) афтершоков землетрясения 5 декабря 1997 г. и частотой их появления в пределах Кроноцкого сейсмофокального блока может быть записана в виде

$$V = L \cdot v. \quad (4)$$

Соотношения (2) и (3), как видно из данных, представленных на рис. 2, в равной степени определяют закономерности миграции эпицентров землетрясений как вдоль, так и вкрест сейсмофокальной зоны на протяжении всей афтершоковой фазы. Поэтому соотношение (4) фактически является математической формулировкой утверждения о том, что Кроноцкий сейсмофокальный блок в течение афтершоковой фазы двигался как целый.

Обсуждение результатов

Полученные в работе результаты позволяют сформулировать новый прогнозный признак, который заключается в следующем. Перед главным толчком на гистограмме траекторий появляется значительная компонента, соответствующая движению эпицентров сильных форшоков вкрест сейсмофокальной зоны (см. рис. 1, в). При этом значения скорости миграции эпицентров сильных форшоков и «частоты» их колебаний резко увеличиваются на один-два порядка по сравнению с «фоновыми» значениями (см. рис. 2).

Учет взаимодействия сейсмофокальных блоков друг с другом позволил построить ротационную модель сейсмического процесса, в рамках которой было показано существование двух типов нелинейных волн, являющихся решением (модельного) уравнения Синус — Гордона [8] и соответствующих реальным тектоническим и деформационным уединенным волнам [9], генерируемым в зоне перехода от Тихого океана к материкам [10–12]. В этом классе решений уравнение (1), которому, как уже отмечалось, соответствуют в том числе и полученные в настоящей работе данные о скоростях миграции форшоков и афтершоков в очаге Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г., описывает (фор-) афтершоковую миграционную «ветвь» нелокализованных волн, распространяющихся в очагах сильнейших землетрясений (в сейсмофокальных блоках) [5]. При этом оказалось, что сбрасываемая в пределах сейсмофокального блока сейсмическая энергия обычным в механике нелинейных (уединенных) волн способом взаимосвязана со скоростью волны миграции афтершоков:

$$E \sim V^2. \quad (5)$$

Полученное таким образом соотношение (5) явилось следствием решения планетарной по масштабу динамической задачи о движении цепочки взаимодействующих друг с другом сейсмофокальных блоков в пределах окраины Тихого океана [9].

С другой стороны, полученное в настоящей работе соотношение (4) явилось следствием решения такой же по сути динамической задачи о миграции афтершоков, полученного на локальном масштабном уровне в пределах отдельно взятого (Кроноцкого) сейсмофокального блока. Подставляя соотношение (4) в соотношение (5), получаем выражение для сейсмической энергии, сбрасываемой мигрирующими с «частотой» v афтершоками в пределах сейсмофокального блока протяженностью L :

$$E \sim (Lv)^2. \quad (6)$$

Полученное соотношение другим, чем в работе [5], способом позволяет в рамках ротационной модели сейсмического процесса дать объяснение существованию цепочек миграции афтершоков большой ($M_0 = 6-7$) магнитуды именно в достаточно больших по протяженности очагах сильнейших землетрясений.

Зависимости $V(t)$ и $v(t)$, как видно из данных, представленных на рис. 2, подобны друг другу в течение всего исследуемого периода 1997 — 04.03.1998 гг. Поэтому утверждение о движении Кроноцкого сейсмофокального блока как целого справедливо, по-видимому, для всех трех фаз. Тогда соотношение (6) фактически равносильно утверждению о том, что вращательное (согласно ротационной модели сейсмического процесса) движение сейсмофокальных блоков, в пределах которых регистрируются миграционные цепочки сильных афтершоков, имеет (вращательно-) колебательную или крутильную составляющую.

По-видимому, именно такой характер движения сейсмофокального блока позволяет в рамках ротационной модели сейсмического процесса теоретически получить закон уменьшения со временем величины сейсмической энергии, сбрасываемой афтершоками в очаге главного толчка (закон Омори) [6]. Действительно, определяя из выражения (3) выражение для v и подставляя его в соотношение (6), получаем:

$$E \sim t^{-n}, \quad (7)$$

где $n = 1,4 \pm 0,3 \sim 1$.

Таким образом, гиперболический закон Омори представляет собой зависимость, которая в рамках нелинейной (4) механической системы [8, 9, 12] в течение афтершоковой фазы описывает «релаксацию» очага землетрясения, находящегося во взаимодействии с другими сейсмофокальными блоками.

Литература

1. *Сильное* Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года: основные данные, сейсмичность очаговой зоны, механизм очага, макросейсмический эффект / А. А. Гусев, В. И. Левина, В. А. Салтыков, Е. И. Гордеев // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1998. — С. 32–54.
2. *Mogi K.* Migration of seismic activity // Bulletin of Earthquake Research Institute. — 1968. — Vol. 46. — P. 53–74.
3. *Вилькович У. В., Шнирман М. Г.* Математические модели строения Земли и прогноз землетрясений // Вычислительная сейсмология. — Вып. 14. — М.: Наука, 1982. — С. 27–37.
4. *Казахара К.* Механика землетрясений. — М.: Мир, 1985. — 264 с.
5. *Викулин А. В.* Миграция сейсмичности, тектонические волны и собственные колебания планеты. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1997. — 19 с. — Препринт № 4.
6. *Викулин А. В.* Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. с $M = 7,5–7,7$ (Камчатка) в схеме долгосрочного сейсмического прогноза // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1998. — С. 90–98.
7. *Салтыков Д. А., Кузнецов Ю. А., Кравченко Н. М.* Сейсмические затишья и активизации, предшествовавшие Кроноцкому землетрясению // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1998. — С. 55–67.
8. *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Ротационная модель сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1996. — 41 с. — Препринт № 2.
9. *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. — 1998. — Т. 17. — № 6. — С. 95–103.
10. *Elsasser W. M.* Application modern physics to the Earth and Planetary interiors / ed. Runcorn. — S.K.N.Y.: Wiley Interscience, 1969. — P. 223–246.
11. *Невский М. В., Морозова Л. А., Фьюз Г. С.* Дискретные свойства геофизической среды. — М.: Наука, 1989. — С. 18–33.
12. *Николаевский В. Н.* Геомеханика и флюидодинамика. — М.: Недра, 1996. — 448 с.

А. В. Викулин, А. Г. Иванчин

Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН

РОТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА *

В статье показывается, что предложенная ранее авторами ротационная модель очага сильнейшего землетрясения применима к описанию сейсмического процесса, протекающего в пределах окраины Тихого океана. Получается аналитическое выражение для энергии взаимодействия сейсмофокальных блоков друг с другом. Дается объяснение спектру скоростей миграции сейсмичности. Показывается, что известные дислокационные модели очага тектонического землетрясения являются предельным случаем ротационной модели, когда взаимодействием очагов-блоков можно пренебречь. Обсуждается применение ротационной модели к решению проблемы тектонического движения.

THE ROTATIONAL MODEL OF THE SEISMIC PROCESS

The paper shows that the author's rotational model for the source of the largest earthquake can be applied to the description of Pacific seismic process. The analytical expression for the energy of focal block interaction has been obtained. An explanation is presented for the spectra of velocities of seismicity migration. It is also shown that the known dislocation model for the source of a tectonic earthquake are an extreme situation for the rotational model when the interaction of the block-sources can be neglected. The employment of the rotational model for the purpose of studying tectonic movement is also suggested.

Введение

Анализ сейсмологического материала позволил выявить пространственные, временные и энергетические особенности сейсмического режима, на основе которых оказалось возможным построить феноменологическую волновую модель сейсмического процесса, протекающего в пределах окраины Тихого океана [2]. В рамках модели получили физическое обоснование такие сейсмотектонические параметры, как повторяемость сильнейших землетрясений и размер их очагов — протяженность элементарного сейсмофокального блока [3]. Тектономеханическая интерпретация феноменологической модели позволила достаточно просто объяснить геометрическую форму островных дуг и континентальных окраин Тихого океана [4]. Для этого оказалось достаточно учесть взаимосвязь, существующую между сейсмическим процессом и вращением планеты [21]. Полученные результаты показали, что сейсмический волновой процесс на планетарном масштабном уровне, как составная часть более общего тектонического движения, может быть представлен в рамках механических моделей, учитывающих эффекты вращения планеты. В рамках такого сейсмомеханического подхода удалось объяснить пространственно-временные закономерности сейсмичности в масштабе австралийского материка и показать, что они являются результатом совместного движения (вращения) Тихоокеанской и Австралийской тектонических плит [5].

Анализ пространственно-временных закономерностей сейсмичности, выполненный на разных масштабных уровнях, показал, что австралийский материк может рассматриваться и как очаг сильнейшего землетрясения [5]. Выявленная аналогия позволила предположить, что процессы накопления и сброса напряжений в пределах каждого элементарного сейсмофокального блока — в очаге сильнейшего землетрясения — также обусловлены вращением планеты [6]. Такое предположение подтверждается как геологическими данными о повороте сейсмофокальных блоков в районе Эквадора [43] и в пределах центральной части Алеутских островов в миоцене — плиоцене [45], так и данными о взаимосвязи сейсмичности и вращения планеты [27, 30].

Постановка и решение задачи о поворачивающемся блоке

На возможность постановки задачи в такой плоскости, кроме уже приведенных геофизических и геологических данных, указывают также результаты физических лабораторных экспериментов, согласно которым макрообъемы поликристаллических тел (металлов) при их нагру-

* 9 (113). Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 6. С. 95–103.

жении (растяжении) поворачиваются на сотни и тысячи градусов [34]. Постановка механической задачи, ее аналитическое решение для макрообъема шаровой формы и обсуждение полученных решений в плане их применения к проблеме очага тектонического землетрясения подробно представлены в работах [6, 21, 47].

Следует отметить также работы [1, 17], в которых использовались представления о геофизической среде как континууме, состоящем из жестких упругих блоков, разделенных между собой пластическими прослойками. В такой модели нагружение среды вызывает относительное проскальзывание и перекачивание блоков [17], а также вращение блоков или зерен относительно друг друга и межзерновое скольжение [1].

Основная идея, позволяющая применить результаты лабораторных [13] и теоретических [1, 7] исследований на образцах поликристаллических тел к реальным земным условиям, заключается в следующем. За счет внутренних источников некоторый макрообъем тела поворачивается, т.е. приобретает момент импульса M . В случае вращения тела (планеты) изменение направления момента импульса макрообъема (сейсмофокального блока) в соответствии с законами механики [26] должно компенсироваться моментом силы K : $dM/dt = K$. Поэтому в рамках механотектонической задачи в связи с приведенными ранее данными будем считать, что результатом поворота сейсмофокального блока или очага готовящегося сильнейшего землетрясения (макрообъема V) является появление в окружающем блок пространстве поля упругих напряжений с соответствующим моментом силы. При этом будем полагать, что кинетическая энергия вращения макрообъема при его остановке (т.е. при землетрясении) полностью переходит в упругую энергию.

Для определения поля упругих деформаций U вокруг поворачивающегося объема V решается уравнение упругого равновесия [26]

$$\text{grad div } U - \text{arotrot } U = 0; \quad (1)$$

– с нулевыми граничными условиями на бесконечности:

$$U \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty; \quad (2)$$

– с действующей на объем V силой, равной нулю:

$$F_i = \int_S \sigma_{ij} dS_j = 0; \quad (3)$$

– с моментом силы, не зависящим от размера V :

$$K_i = \int_S n_k e_{ikj} \sigma_{ij} dS_j \neq f(R_0), \quad (4)$$

где $a = (1 - 2\nu)/(2(1 - \nu))$; ν — коэффициент Пуассона; \int — интеграл по поверхности объема с характерным размером R_0 .

Решением задачи (1)–(4) для элемента V , имеющего форму шара с радиусом R_0 , в сферической системе координат (r, φ, θ) с началом $r = 0$ в центре объема V , углом φ , отсчитываемым в плоскости, перпендикулярной оси поворота элемента V ($\theta = \pi/2$), в области $r \geq R_0$ являются поля смещений U и напряжений σ :

$$U_r = U_\theta = 0, \quad U_\varphi = R_0^4 r^{-2} \Omega (\rho/15G)^{1/2} \sin \theta \sin \beta/2, \quad r \geq R_0, \quad (5)$$

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = 3/2 R_0^4 r^{-3} \Omega (\rho G/15)^{1/2} \sin \theta \sin \beta/2, \quad r \geq R_0. \quad (6)$$

Остальные компоненты тензора напряжений равны нулю.

Момент силы, который создает образующееся вокруг поворачивающегося объема V упругое поле, и его энергия определяются из соотношений [6]:

$$K = -6 \pi^2 \Omega R_0^4 (\rho G/15)^{1/2} \sin \beta/2 \quad (7)$$

$$W = 16/15 \pi \rho \Omega^2 R_0^5 \sin^2 \beta/2, \quad (8)$$

где ρ — плотность тела; G — модуль сдвига; Ω — угловая скорость вращения тела. Появление в соотношениях (5)–(8) множителя $\sin \beta/2$ является «геометрическим» следствием решаемой задачи. Действительно, момент поля упругих напряжений, который определяется как разность $\vec{K} = \vec{K}_1 - \vec{K}_2$ между начальным и конечным положениями момента в неинерциальной системе координат, для очага шаровой формы не зависит от положения оси поворота ($|\vec{K}_1| = |\vec{K}_2|$) и потому

в соответствии с теоремой косинусов $K = 2|K_1| \sin \beta / 2$ $K = 2$, где β — угол, на который в процессе движения повернулся шаровой макрообъем V .

Как видим, решения (5)–(8) задачи о поле упругих напряжений вокруг поворачивающегося объема V действительно определяются величиной угловой скорости, с которой вращается тело, что и объясняет название модели, данное ей авторами: ротационная [6, 21, 47].

Теорема соответствия момента сил дислокации

В последнее время достаточно убедительно было показано, что геофизическая среда с точки зрения данных очаговой сейсмологии (энергия, сбрасываемая в очаге, пропорциональна его объему), хорошо описывается в рамках так называемой блочно-иерархической модели [36]. В рамках такой модели намечается схема построения сейсмического процесса, в основу которой закладываются представления о самоподобной фрактальной структуре [37, 38]. Таким образом, сама логика построений подводит авторов такого подхода к выводу, что сейсмический процесс неустойчив во времени [38, с. 79] и потому «точный долгосрочный прогноз в принципе невозможен» [38, с. 6]. Впрочем, термин «точный долгосрочный прогноз», конечно, нуждается в дополнительном комментарии.

Отличие нашего подхода, как можно видеть, заключается в том, что в рамках ротационной модели под геофизической средой мы понимаем конкретную среду — сейсмофокальный объем, а под сейсмическим процессом — его волновую «составляющую», отвечающую особенностям пространственного, временного и энергетического распределений землетрясений. Общим же для обоих подходов — блочно-иерархического и ротационного — является неразрушение блоков при землетрясениях. В противном случае, как справедливо замечено в работе [36], «земля должна была бы превратиться в песок».

В работе [6] в рамках ротационной (блоковой) модели было показано существование глубокой взаимосвязи между модельными соотношениями (5)–(6) и решениями для полей смещений и напряжений, создаваемых круговой дислокацией [25]. Другими словами, выражения для тензора дислокационного момента $d_{ik} = S_i b_k$ [25, с. 160] и момента сил (7) с учетом (5) $K = GU_0 S$ эквивалентны друг другу в случае, если площадь дислокационной петли и длина вектора Бюргера равны $S_i = S = \pi R_0^2$ и $b_k = U_0$, где $U_0 = 1/2 \pi U_\varphi$ — среднее в плоскости $\vartheta = \pi/2$ смещение вдоль поверхности блока ($r = R_0$).

Тем самым было показано, что аналогом сейсмического момента M_0 [23] в рамках ротационной модели является момент силы (7).

Оценки, проведенные в работе [6], показали хорошее соответствие между теоретическими величинами, получаемыми в рамках ротационной модели (5)–(8), и экспериментально наблюдаемыми параметрами, которые, согласно работе [23], являются характерными для очагов сильнейших тихоокеанских землетрясений. Действительно, положим модельные параметры $\rho = 3 \text{ г/см}^3$, $G = 10 \text{ н/м}^2$, $\Omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$ и $R_0 = (3/4 \cdot L/2 \cdot D/2 \cdot H)^{1/3} = [3/4 \cdot (150-200)/2 \cdot (75-100)/2 \times (50-100)]^{1/3} \text{ км} = 40-100 \text{ км}$ — радиус элементарного шарового сейсмофокального блока, по объему равновеликого среднему очагу в классе сильнейших курило-камчатских и японских землетрясений, имеющих овальную (эллиптическую) форму. Тогда любые три из четырех (одно из таких значений требуется для определения величины модельного параметра $\sin \beta / 2$, но в настоящей работе не будем обсуждать вопрос о численном значении этого параметра, что, очевидно, имеет выход на тектонические аспекты модели — этот круг вопросов постараемся затронуть в последующих публикациях) параметров: смещение $U \approx 10 \text{ м}$, сброшенное напряжение $\sigma \approx 100 \text{ бар}$, сейсмический момент $M_0 \sim 10^{29} (10^{28}-10^{30}) \text{ дин} \cdot \text{см}$ и выделяющаяся сейсмическая энергия $W \sim 10^{17} \text{ Дж}$ — как легко можно убедиться, автоматически получаются из соотношений (5)–(8).

Таким образом, проведенные оценки показали, что применение ротационной модели к расчету параметров очага сильнейшего тихоокеанского землетрясения и сейсмологически и физически обосновано. Более того, сама возможность комплексного самосогласованного аналитического описания нескольких физических величин в рамках одной модели без использования дополнительных данных (в том числе данных инструментальных сейсмологических наблюдений о параметрах очагов землетрясений) указывает на ее определенные преимущества перед известными дислокационными моделями очага тектонического землетрясения.

Модель двух взаимодействующих очагов сильнейших землетрясений

В рамках ротационной модели находит свое естественное объяснение установленный факт взаимодействия очагов землетрясений [3], наиболее очевидно проявляющийся в их миграции [2, 7, 15, 46]. Действительно, с одной стороны, согласно модельным представлениям возникающие вокруг сейсмофокального блока напряжения накапливаются в окружающем его пространстве. С другой стороны, сама сейсмофокальная зона — часть литосферы, в пределах которой и реализуется сейсмический процесс — представляет собой цепочку соприкасающихся блоков, очагов сильнейших землетрясений. Поэтому в рамках ротационной модели процесс накопления напряжений в какой-либо части литосферы должен определяться движением как близкорасположенного, так и соседних с ним сейсмофокальных блоков.

Для определения величины энергии взаимодействия сейсмофокальных блоков воспользуемся известной закономерностью, согласно которой упругая энергия (в рамках закона Гука) пропорциональна квадрату деформации. Тогда, записывая величину деформации какой-либо части литосферы в виде суммы деформаций, создаваемых в этой части каждым из n сейсмофокальных блоков в отдельности ($U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$), получим выражение

$$W = GU^2 = G(\sum U_i^2 + 2\sum \sum U_i U_j) = \sum W_i + W_{int}, \quad (9)$$

в котором второе слагаемое W_{int} определяет величину энергии взаимодействия блоков друг с другом; W_i — собственная энергия i -го блока, определяемая соотношением (8). Соответствующее такой величине значение момента сил определяется из соотношения

$$K_0 = \sum K_i + K_{int} = \sum K_i + 1/2 \sum \sum \partial W_{int} / \partial \theta_{ij}, \quad (10)$$

где K_i — собственный момент сил каждого из $i = 1, 2, \dots, n$ блоков, определяемый соотношением (7); K_{int} — момент сил, отвечающий за взаимодействие блоков друг с другом; θ_{ij} — угол между направлениями моментов i и j -го блоков.

Для простоты рассмотрим модель двух блоков, центры масс которых расположены на расстоянии l друг от друга. Для макрообъемов шаровой формы с равными радиусами R_0 значение энергии взаимодействия, как можно показать из работы [6], определяется по формуле

$$W_{int} = 3/2 \pi \rho R_0^8 \Omega^2 l^{-3} \cos \phi, \quad (11)$$

где ϕ — угол между направлениями моментов сил полей напряжений, создаваемых вокруг каждого из макрообъемов (блоков).

Как видим, энергия взаимодействия двух блоков зависит от взаимной ориентации их моментов. Минимаксная ($\phi = 0, \pi$) величина энергии взаимодействия при численных значениях приведенных параметров ρ, Ω и R_0 и расстоянии между блоками, равном их протяженности ($l = 4R_0$), составляет: $W_{int, \min} \approx 10^{16} \div 10^{18}$ Дж.

Проведенные оценки показывают, что согласно ротационной модели энергия взаимодействия двух сейсмофокальных блоков при определенных условиях может достигать величины упругой энергии, сбрасываемой при отдельно взятом сильнейшем землетрясении. Установленное совпадение значений равносильно утверждению, согласно которому между сейсмофокальными блоками с параллельно ($\phi = 0$) или антипараллельно ($\phi = \pi$) ориентированными моментами имеет место сильное взаимодействие. Такое взаимодействие, если оно реализуется в природе, должно приводить к тому, что сильнейшие землетрясения в обоих блоках должны либо происходить одновременно, либо не происходить вовсе. Действительно, если в одном из таких блоков накопилась достаточная для сильнейшего землетрясения энергия, то в результате «параллельного» ($\phi = 0$) взаимодействия такой же по величине энергией должен обладать и второй сейсмофокальный блок. В случае же «антипараллельного» ($\phi = \pi$) расположения моментов блоков энергия их взаимодействия, наоборот, компенсирует энергию, накапливаемую в готовящемся очаге. Имеющиеся сейсмологические данные, как нам представляется, подтверждают такой теоретический вывод модели. Покажем это.

В сейсмологической практике известны случаи, когда в течение небольшого интервала времени практически одновременно происходят два достаточно сильных землетрясения с близкорасположенными очагами — так называемые дуплеты. Сильнейшие землетрясения-дуплеты происходят

достаточно редко. В пределах северо-западной окраины Тихого океана нам известны следующие такие события, отмеченные независимо друг от друга разными исследователями на основании анализа макросейсмических данных, данных о цунами и инструментальных сейсмологических наблюдений: 31.01.1605 г. ($M=7,9$) в районе желоба Нанкай [40], 04.11.1952 г. ($M=8,5$) в районе Северных Курил — Южной Камчатки [8, 35] и 13.10.1963 г. ($M=8,0$) на Южных Курилах [9]. Реконструкция сейсмического процесса позволила сделать вывод о том, что землетрясения-дуплеты, близкие тем, которые отмечены в 1605 и 1952 гг., происходили 28.10.1707 г. ($M=8,4$) в пределах желоба Нанкай [10] и 17.10.1737 г. ($M=8,4$) на Северных Курилах — Южной Камчатке [11]. Кроме того, в работе [11] было отмечено, что сильнейшие землетрясения-дуплеты на Камчатке, возможно, происходили в 1790 и 1792 гг. Данные о расположении очагов сильнейших камчатских и нанкайских землетрясений по результатам работ [3, 10, 12, 13] представлены на рис. 1.

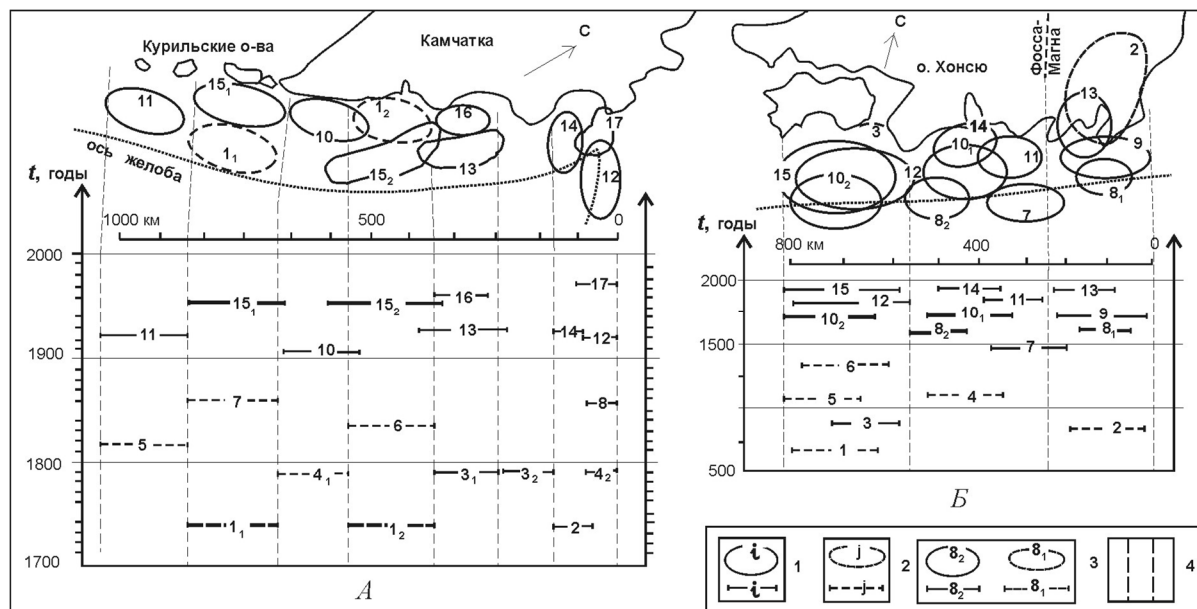


Рис. 1. Расположение очагов сильнейших землетрясений Камчатки — Северных Курил в XVIII–XX вв. (А) и района желоба Нанкай в VI–XX вв. (Б) [3, 10, 13]:

1, 2 — уверенное и примерное положение очагов; i, j — номера землетрясений; 3 — положение очагов толчков-дуплетов; 4 — границы сейсмофокальных блоков, определенные по взаимному расположению очагов сильнейших землетрясений. Цифры обозначают следующие землетрясения:

А: 1 — 17.10.1737 г., $M=8,3$; 2 — 04.11.1737 г., $M=7,8$; 3 — 02.12.1790 г., $M=7,5$; 4 — 22.08.1792 г., $M=8,4$; 5 — 8.10.1820 г., $M=7-8$; 6 — 17.05.1841 г., $M=8,4$; 7 — 29.07.1854 г., $M=7\pm 1$; 8 — 22.01.1858 г., $M=7,8$; 9 — 23.11.1899 г., $M=7,9$; 10 — 26.06.1904 г., $M=7,7$; 11 — 01.05. 1915 г., $M=8,3$; 12 — 30.01.1917 г., $M=8,1$; 13 — 03.02.1923 г., $M=8,5$; 14 — 24.02.1923 г., $M=7,7$; 15 — 04.11.1952 г., $M=8,5$; 16 — 04.05. 1959 г., $M=7,6$; 17 — 15.12.1971 г., $M=7,8$;

Б: 1 — 27.11.684 г., $M=8,0-8,4$; 2 — 818 г., $M=7,9$; 3 — 26.08.887 г., $M=8,6$; 4 — 17.12.1096 г., $M=8,4$; 5 — 21.02.1099 г., $M=8,0$; 6 — 03.08.1361 г., $M=8,4$; 7 — 20.09.1498 г., $M=8,6$; 8 — 31.01.1605 г., $M=7,9$; 9 — 31.12.1703 г., $M=8,2$; 10 — 28.10.1707 г., $M=8,4$; 11 — 23.12.1854 г., $M=8,4$; 12 — 24.12.1854 г., $M=8,4$; 13 — 01.09.1923 г., $M=8,2$; 14 — 07.12.1944 г., $M=8,0$; 15 — 21.12.1946 г., $M=8,0$

Приведенные данные показывают, что сильнейшие землетрясения-дуплеты редко, но все же происходят. Можно выделить два района: желоб Нанкай и Северные Курилы — Южная Камчатка, в каждом из которых такие события отмечены, по-видимому, как минимум дважды. При этом, как было показано в работах [2, 3, 10, 11], относительно пространственно-временных закономерностей (миграция, непересечение очагов и повторяемость в одном месте) эти толчки-дуплеты являются вполне «обычными» событиями.

Из данных, представленных на рис. 1, также видно, что расстояние между очагами в дуплете примерно равно протяженности очага одного отдельно взятого толчка: $\Delta L=100-200$ км. По данным японских источников [40], два толчка 31.01.1605 г. произошли «практически одно-

временно». Анализ инструментального сейсмограммного материала показал, что при каждом из событий в 1952 и 1963 гг. толчки происходили с интервалом $\Delta t = 4\text{--}5$ с [8]. При этом было отмечено, что второй толчок в каждом дуплете никак не мог быть следствием «перераспределения напряжений после первого толчка», так как скорость передачи «упругой» информации при этом должна была бы существенно превысить значение скорости продольных волн:

$$\Delta L / \Delta t \approx 20\text{--}50 \text{ км/с} > V_{P, \max} \approx 8\text{--}10 \text{ км/с} [8].$$

Как видим, параметры реальных очагов толчков-дуплетов близки параметрам рассмотренной ранее модели двух взаимодействующих блоков. Поэтому фактические данные по сильнейшим землетрясениям-дуплетам, на наш взгляд, подтверждают теоретический вывод ротационной модели о существовании сильного взаимодействия с положительной ($-\pi/2 < \phi < \pi/2$) энергией. На существование сильного взаимодействия с отрицательной ($\pi/2 < \phi < 3/2\pi$) энергией, по-видимому, указывают сейсмологические данные для района Центральных Курил протяженностью 250–300 км. Действительно, в пределах этого участка сейсмофокальной зоны, заключенного между островами Симушир и Кетой, где, не перекрываясь, могли бы разместиться 3–5 очагов сильнейших землетрясений, в течение последних 200–250 лет не было отмечено ни одного такого землетрясения [33] при их средней для окраины Тихого океана повторяемости в одном месте, равной одному событию в 100 ± 50 лет (см. рис. 1) [13].

Таким образом, сейсмологические данные и данные о цунами, полученные на материале Камчатки и Японии в течение последних нескольких сотен — тысячи лет, достаточно убедительно доказали, что сильное взаимодействие между сейсмофокальными блоками — очагами сильнейших землетрясений — существует и количественно может быть описано с помощью модельного соотношения (10). Тем самым было показано, что ротационная модель позволяет в принципе рассчитывать взаимодействие сейсмофокальных блоков друг с другом.

Волны миграции сейсмичности

Рассмотрим сейсмический процесс, протекающий в пределах всей окраины Тихого океана [14]. Для простоты будем полагать, что сейсмофокальный объем представляет собой одномерную цепочку взаимодействующих блоков, имеющих одинаковые размеры. Каждый блок будем характеризовать моментом инерции I и его объемом $V = 4/3 \pi R_0^3$. Уравнение движения блока запишем в виде $I \cdot \partial^2 \beta / \partial t^2 = K_1 + K_2$, где K_1 — момент силы, соответствующий полю упругих напряжений, которое появляется вокруг рассматриваемого блока независимо от его взаимодействия с другими блоками цепочки и определяется соотношением (7); K_2 — момент силы, отвечающий за взаимодействие рассматриваемого блока с другими блоками цепочки.

Величина K_2 в соответствии с моментной теорией упругости [28] должна быть пропорциональна как упругой энергии, накопленной вокруг рассматриваемого блока ($V \cdot \partial^2 \beta / \partial z^2$), так и упругой энергии, соответствующей всем остальным блокам цепочки. В качестве последней выбираем величину, равную средней линейной плотности упругой энергии цепочки блоков W . Здесь z — координата вдоль цепочки очагов. Таким образом, получаем: $K_2 = wV \partial^2 \beta / \partial z^2$.

Окончательно уравнение движения блока с координатой z в момент времени t может быть записано в виде

$$\partial^2 \Psi / \partial z^2 - c_0^{-2} \partial^2 \Psi / \partial t^2 = k_0^2 \sin \Psi, \quad (12)$$

где $\Psi = \beta/2$.

Отсюда

$$c_0^{-2} = 2/5 \rho R_0^2 w^{-1}, \quad k_0^2 = 9/4 \Omega R_0 w^{-1} (\rho G/15)^{1/2}. \quad (13)$$

Полученное уравнение, к решению которого свелась задача о взаимодействующих сейсмофокальных блоках (точнее, о взаимодействующих блоках и соответствующих им полях упругих напряжений), называется уравнением синус-Гордона (SG) [16]. В ряду физических задач, описываемых с помощью SG-уравнения, например [18, 22, 29], параметры c_0 и k_0 , даваемые соотношениями (13), имеют соответственно смысл скорости и волнового числа.

Покажем, что закон дисперсии, соответствующий уравнению SG при условиях (13), объясняет спектр скоростей миграции сейсмичности. Известный фактический материал по скоростям миграции сейсмичности вдоль сейсмофокальной зоны собран в работе [7] и представлен на рис. 2. Анализ, проведенный в этой работе, показал, что спектры скоростей миграции сейсмичности удовлетворяют следующим двум зависимостям: $E \approx V_1^5$, $V < c_0$ и $E \approx V_2^2$, $V_2 > c_0$. Эти соотношения соответствуют локализованным (солитонам) и нелокализованным (экситонам) решениям SG-уравнения [18] и на рис. 2 обозначены римскими цифрами I и II.

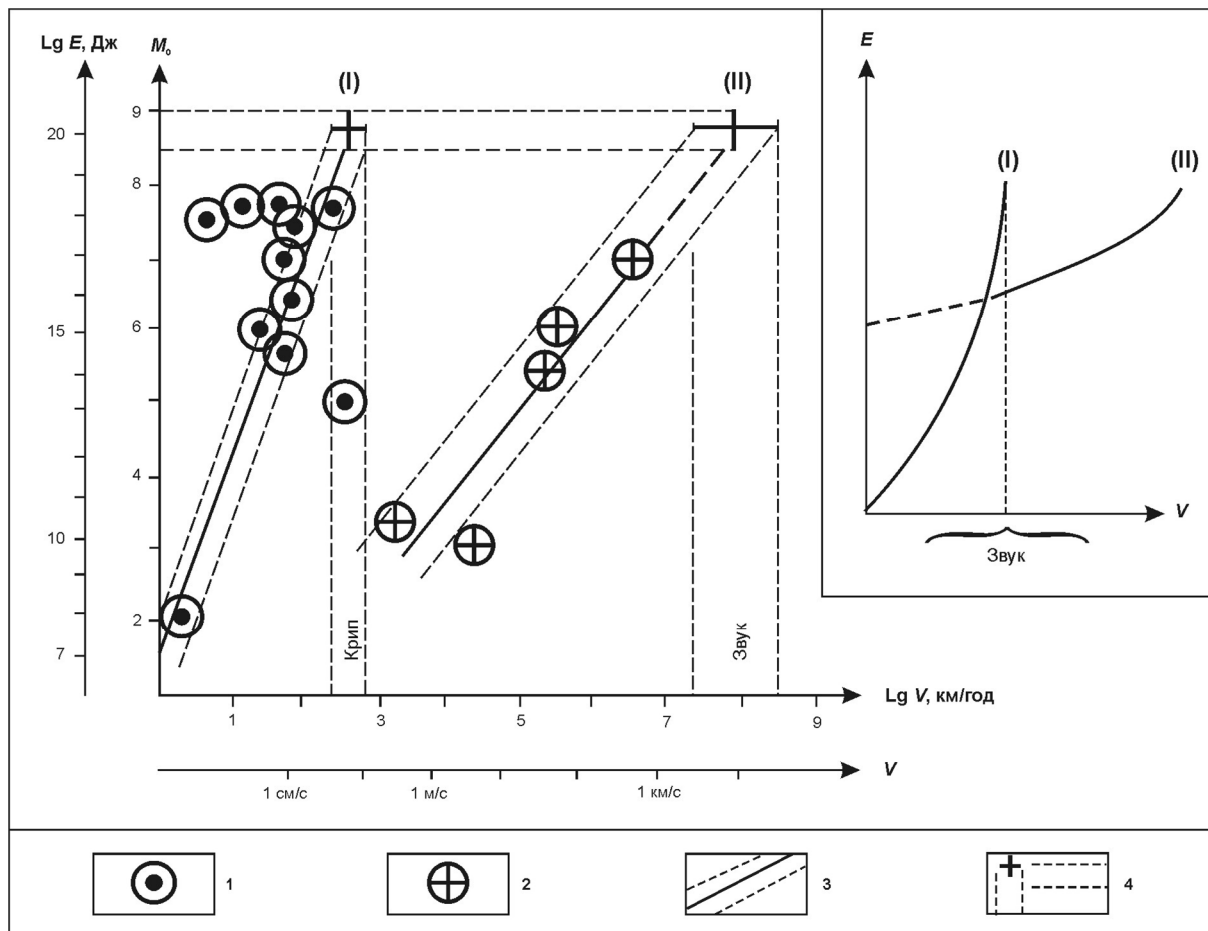


Рис. 2. Значения скоростей продольной миграции сейсмичности в пределах окраины Тихого океана [2, 3, 7, 15, 23, 46]:

1, 2 — значения соответственно скоростей миграции основных толчков и афтершоков; 3 — зависимости $Lg V$ для основных толчков (I) и афтершоков (II) как функции наименьшей магнитуды M_0 в выборке событий; 4 — «полосы предельных» значений магнитуд и скоростей миграции. На врезке представлены солитонное (I) и экситонное (II) решения уравнения SG согласно работе [18]. Сопоставление солитонной и экситонной ветвей решений уравнения SG с решениями, полученными в рамках ротационной модели, проводится в работе [7]

В рамках ротационной модели становится понятно, почему волны миграции афтершоков выделены только в очагах таких сильнейших землетрясений, которые имеют большую (около 1000 км) протяженность, т. е. представлены совокупностями нескольких субочагов [7]. Действительно, скорость нелокализованных волн связана с их длиной характерным для SG-уравнения дисперсионным соотношением $V^2 = c_0^2 (1 + \lambda^2 / \lambda_0^2)$, где λ и λ_0 — длины волн, распространяющиеся со скоростями соответственно V и c_0 [22]. Тогда длина волны миграции афтершоков $\lambda = \lambda_0 (V^2 / c_0^2 - 1)^{1/2} \approx \lambda_0 V / c_0$ должна существенно превышать протяженность «элементарного» сейсмофокального блока или очага сильнейшего землетрясения $\lambda_0 \approx 2 R_0$, так как в соответствии с данными, представленными на рис. 2, $V \gg c_0$.

Тем самым было показано, что уравнение (12), полученное в рамках ротационной модели, отражает волновые свойства сейсмического процесса, которые и определяют его природу. Поэтому применение модельного уравнения (12) к описанию закономерностей сейсмичности тихоокеанской сейсмофокальной зоны физически оправданно. Отметим, что в рамках такого подхода модельные параметры скорости крипового движения c_0 и обратного размера «элементарного» сейсмофокального блока k_0 , даваемые соотношениями (13), должны рассматриваться как константы среды, в которой реализуется сеймотектонический процесс.

Цепочка тихоокеанских сейсмофокальных блоков

В рамках модельного уравнения (12) получает свое естественное объяснение и блоковое строение сеймотектонического процесса. Существование пространственной структуры (или квазичастиц) является тривиальным следствием его инвариантности относительно преобразования Лоренца [39]. В случае нашей задачи прообразом такой частицы является сейсмофокальный тектонический блок или очаг сильнейшего землетрясения, поворачивающийся в условиях вращающейся планеты.

Большой материал, полученный различными исследователями, показывает, что очаги сильнейших землетрясений в пределах всей окраины Тихого океана в пространстве — времени группируются в миграционные цепочки [6–8, 11, 23, 46]. Поэтому следствием ротационной модели является также и вывод, согласно которому движение сейсмофокальных блоков должно происходить под действием упругого поля, описываемого уравнением (12) с характерными параметрами (13) и подчиняющегося «законам сохранения» (9) и (10).

Таким образом, данные по миграции очагов сильнейших землетрясений указывают на существование дальнего действия, описываемого с помощью некоего «самосогласованного» поля, образовавшегося вокруг взаимодействующих блоков, слагающих сейсмоактивную окраину Тихого океана. Такое поле, как следует из выражений (9) и (10), характеризуется энергией и моментом, который имеет дипольную природу. При этом представляется, что выражения для энергии и момента, отвечающие взаимодействию какого-либо блока со всеми остальными блоками сейсмофокальной цепочки, могут быть получены из соотношения (10) и (11) путем замены l на l_* , где l_* — расстояние между центром рассматриваемого блока и точкой приложения момента, соответствующего сумме моментов всех остальных блоков цепочки.

Проведем сравнение ротационной модели с известными дислокационными моделями, в основе которых заложены представления о магистральном плоском разрыве, образующемся внутри очага тектонического землетрясения [19, 31, 42]. Для этого воспользуемся полученным в рамках дислокационных моделей теоретическим соотношением между основными параметрами очага землетрясения [23, 24]:

$$E / M_0 = \sigma / 2G. \quad (14)$$

Важным здесь является то обстоятельство, что это соотношение можно считать в известном смысле экспериментально подтвержденным [23]. В рамках ротационной модели, в которой сбрасываемая при землетрясении энергия $E \equiv W$ и сейсмический момент $M_0 \equiv K_0$ определяются из соотношений (9) и (10), равенство (14) переписывается в виде

$$\frac{W}{K_0} = \frac{32 / 45 \sin^2 (\beta / 2) + L_1 \cos \phi}{L_2 \sin (\beta / 2) + L_1 \sin \phi} = \frac{\sigma}{2G}, \quad (15)$$

где безразмерные параметры $L_1 = (R_0 / l_*)^3$, $L_2 = 4\pi \Omega^{-1} R_0^{-1} (G / 15\rho)^{1/2}$. Можно видеть, что в случае отсутствия взаимодействия между блоками $W_{int} = 0$, $K_{int} = 0$ (или $l \rightarrow \infty$, $L_1 = 0$) равенство (15) переходит в равенство (14), в котором энергия и момент силы (сейсмический момент) определяются из соотношений (8) и (7), а величина сбрасываемых напряжений с точностью до коэффициента ≈ 1 равна той же величине, определяемой из выражения (6) для тонкой полосы сферической формы, протягивающейся в среде вдоль $\vartheta \approx \pi / 2$ ($\pi / 4 \div 3/4 \pi$) по поверхности блока $r = R_0$. В общем виде, как видно из равенства (15), величина сбрасываемых при сильнейшем земле-

трясения напряжений $\sigma(\beta, \phi)$ определяется как процессом подготовки самого блока (т. е. величиной угла его поворота β), так и его взаимодействием с другими блоками (т. е. ориентацией его момента относительно моментов других блоков, количественно определяемой величиной угла ϕ).

Таким образом, проведенное сравнение показало, что ротационная модель является более общей. При этом дислокационные модели представляют собой частный случай ротационной модели, когда взаимодействием между очагами-блоками можно пренебречь. В этом предельном случае одновременно оба подхода — и ротационный, и дислокационный — одинаково хорошо описывают поля смещений и напряжений вдали от очага. В рамках дислокационных моделей описать взаимодействие сейсмофокальных блоков — очагов сильнейших землетрясений — и тем более сильное взаимодействие между ними, по-видимому, невозможно.

Обсуждение результатов

В настоящей работе было показано, что предложенная ранее авторами ротационная модель очага тектонического сильнейшего землетрясения применима и для описания сейсмического процесса, протекающего в пределах окраины Тихого океана. Это стало возможным вследствие того, что в основе ротационной модели заложены такие представления, которые позволяют аналитически описывать взаимодействие сейсмофокальных блоков — очагов сильнейших землетрясений — друг с другом.

Проведенный в работе [7] анализ и представленные ранее данные подтверждают результаты работ [32, 44, 46], согласно которым процесс миграции сейсмичности, как и волны деформации, имеет тектоническую природу. Это позволяет применять ротационную модель в том числе и к исследованию закономерностей тектонического развития окраины Тихого океана.

География нашей планеты обнаруживает удивительные закономерности, связанные с существованием пространственной симметрии рельефа ее поверхности. Действительно, согласно данным, представленным в работе [41], почти все континенты противоположны океанам и располагаются в углах тетраэдра. При этом пространственное распределение континентов и океанов в соответствии с гипсометрической кривой имеет два максимума, отвечающие поверхностям материков и океаническому дну. Наконец, примечательной особенностью многих горных хребтов и цепочек островов на нашей планете является их дугообразная форма. Центры дуг образуют два больших пояса, из которых один опоясывает Тихий океан, а другой проходит через Альпийскую и Гималайскую системы до Океании. Эти пояса следуют вдоль двух больших окружностей, пересекаясь под прямым углом. Как видим, современная тектоническая активность Земли концентрируется в достаточно узких поясах, образующих планетарные по масштабу системы. Имеющиеся данные позволяют предположить, что подобными особенностями обладали и более древние орогенетические системы [41].

Таким образом, тектонические процессы на нашей планете в течение достаточно продолжительного, в геологическом смысле, отрезка времени происходят в соответствии с закономерностями, которые удовлетворяют определенным свойствам симметрии пространства и времени. Видимо, именно эти свойства пространства и времени — их однородность и изотропия — согласно работе [26] и обуславливают выполнение в геофизических процессах фундаментальных законов сохранения энергии и импульса, которые в рамках ротационной модели описываются соотношениями (9) и (10).

Литература

1. *Быков В. Г.* О возможности формирования уединенных сейсмических волн в зернистых геоматериалах // Физико-технические пробл. разработки полезных ископаемых. — 1996. — № 2. — С. 31–35.
2. *Викулин А. В.* Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1987. — 54 с. — Препринт.
3. *Викулин А. В.* Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–824.

4. Викулин А. В. Сейсмичность и вращение Земли // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1. — № 3. — С. 124–130.
5. Викулин А. В. О природе австралийских землетрясений // Вулканология и сейсмология. — 1994. — № 2. — С. 99–108.
5. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Ротационная модель сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1996. — 41 с. — Препринт № 2.
7. Викулин А. В. Миграция сейсмичности, тектонические волны и собственные колебания планеты. — Петропавловск-Камчатский: КОМС ГС РАН, 1997. — 19 с. — Препринт.
8. Викулин А. В., Чернобай И. П. О некоторых особенностях двух сильнейших курило-камчатских землетрясений // Физические поля и свойства горных пород Северо-Востока СССР. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 44–59.
9. Викулин А. В., Чернобай И. П. Механизм очага Урупского (1963 г.) и Большого Камчатского (1952 г.) землетрясений // Динамические процессы в дискретных геофизических системах. — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 58–66.
10. Викулин А. В., Викулина С. А. Закономерности размещения очаговых областей сильнейших землетрясений в районе желоба Нанкай. — Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ АН СССР, 1989. — 44 с. — Препринт № 5.
11. Викулин А. В. Миграция очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений и их повторяемость // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 46–61.
12. Викулин А. В., Гусяков В. К., Титов В. В. О природе максимального цунами // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1. — № 3. — С. 131–134.
13. Викулин А. В. Южно-Курильское землетрясение 4 октября 1994 г. как предвестник сильнейшего землетрясения на юге Камчатки // Вулканология и сейсмология. — 1996. — № 5. — С. 106–112.
14. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Модель сейсмического процесса // Вычислительные технологии. — 1997. — № 2. — С. 20–25.
15. Вилькович Е. В., Шнирман М. Г. Волны миграции эпицентров (примеры и модели) // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений. Вычислительная сейсмология. — М.: Наука, 1982. — Вып. 14. — С. 27–37.
16. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1988. — 248 с.
17. Гарагаш И. А. Микродеформации предварительно напряженной дискретной геофизической среды // Докл. РАН. — 1996. — Т. 347. — № 1. — С. 95–98.
18. Давыдов А. С. Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах // Успехи физических наук. — 1982. — Т. 138. — Вып. 4. — С. 603–643.
19. Добровольский И. П. Механика подготовки тектонического землетрясения. — М.: ИФЗ АН СССР, 1984. — 190 с.
20. Жуков Л. В., Остапенко О. Е. Связь сейсмической активности с неравномерностью вращения Земли за период с IX.1955 г. по XII.1963 г. — Л.: Пед. ин-т им. Герцена, 1979. — 18 с. — Деп. в ВИНТИ, № 859-80.
21. Иванчин А. Г., Викулин А. В. Ротационная модель сейсмического процесса в пределах окраины Тихого океана // Закономерности строения и эволюция геосфер. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 1994. — С. 49–50.
22. Изюмов Ю. А. Солитоны в квазиодномерных магнетиках и их исследование с помощью рассеяния нейтронов // Успехи физических наук. — 1988. — Т. 155. — Вып. 4. — С. 553–592.
23. Касахара К. Механика землетрясений. — М.: Мир, 1985. — 264 с.
24. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. — М.: Наука, 1975. — 176 с.
25. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. — М.: Наука, 1965. — 204 с.
26. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. — М.: Наука, 1973. — 208 с.
27. Линьков Е. М. Сейсмические явления. — Л.: ЛГУ, 1987. — 248 с.
28. Лихачев В. А., Волков А. Е., Шубегов В. Е. Континуальная теория дефектов. — Л.: ЛГУ, 1986. — 232 с.

29. *Солитоны в действии* / ред. К. Локгрэн, Э. Скотт. — М.: Мир, 1981. — 312 с.
30. Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. — М.: Мир, 1964. — 384 с.
31. *Основы физики очага и предвестники землетрясений* / В. И. Мячкин, Б. В. Костров, Г. А. Соболев, О. Г. Шамина // Физика очага землетрясений. — М.: Наука, 1975. — С. 6–29.
32. Николаевский В. Н., Рамазанов Т. К. Генерация и распространение тектонических волн вдоль глубинных разломов // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1966. — № 10. — С. 3–13.
33. *Новый каталог сильнейших землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г.* / ред. Н. В. Кондорская, Н. В. Шебалин. — М.: Наука, 1977. — 536 с.
34. Панин В. Е., Гиряев Ю. В., Лихачев В. А. Структурные уровни деформации твердых тел. — Новосибирск: Наука, 1984. — 229 с.
35. Попов Г. И. Об условиях образования цунами // Бюл. Совета по сейсмологии. Проблемы цунами. — 1961. — С. 7–22.
36. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. — М.: Наука, 1987. — 100 с.
37. *Дискретные свойства геофизической среды* / ред. М. А. Садовский. — М.: Наука, 1989. — 175 с.
38. Садовский М. А., Писаренко В. Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. — М.: Наука, 1991. — 96 с.
39. Скотт С., Чжу Ф., Макфлин Д. Солитон — новое понятие в прикладных науках // ТИИЭР. — 1973. — Т. 61. — С. 79–123.
40. Соловьев С. Л., Го Ч. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. — М.: Наука, 1974. — 312 с.
41. Шейдеггер А. Основы геодинамики. — М.: Недра, 1987. — 384 с.
42. Anderson D. L., Whitcomb J. H. The dilatancy — diffusion model of earthquake prediction // Proc. Conf. of Tectonic Problems of the Andreas fault system. — Stanford Univ. Publ., 1973. — Vol. XIII. — P. 111.
43. Daly M. C. Correlation between Nazca-Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador // Tectonics. — 1989. — Vol. 8. — № 4. — P. 769–790.
44. Elsasser W. M. Convection and stress propagation in the mantle // Application of modern physics to the Earth and Planetary interiors / ed. S.K. Runcorn. — N.Y.: Wiley, 1969. — P. 223–246.
45. Geist E. L., Childs J. R., Scholl D. W. The origin of summit basins of the Aleutian ridge: implications for block rotation of an arc massif // Tectonics. — 1988. — Vol. 7. — № 2. — P. 327–341.
46. Mogi K. Migration of seismic activity // Bulletin of Earthquake Research Institute. — 1968. — Vol. 46. — P. 53–74.
47. Vikulin A. V., Ivanchin A. G. A model of inertial earthquake's source / I.P. Zonenshain memorial conference on plate tectonics, Moscow, November 17–20, 1993. — М.: IO RAS, 1993. — P. 12.

А. В. Викулин^{1, 2, 3}, С. А. Викулина⁴, Л. Аргас⁵

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Россия*

² *Камчатский государственный технический университет, Россия*

³ *Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, Россия*

⁴ *Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Россия*

⁵ *ООО «Натали-Турс», Барселона, Испания*

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ЛИССАБОНСКОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ 01.11.1755 Г.*

В работе проводится анализ данных о цунами и макросейсмических данных о Лиссабонском землетрясении (01.11.1755 г.) с $M = 8,4-8,9$. Показывается, что имеющиеся в литературе данные о высокой волне цунами в лиссабонской бухте при катастрофе 1755 г. сильно завышены. Определяются положение и размеры очага основного толчка. Показано, что движения в очаге происходили по системе разломов северо-восточного простирания. При этом сам Лиссабон, его окрестности и западное атлантическое побережье Португалии были расположены на периферии очага, что объясняет высокий уровень наблюдавшихся колебаний поверхности грунта и, как следствие, большие разрушения. Приведены новые данные о повторяемости катастрофических событий в пределах западного окончания альпийского тектонического пояса. Показано, что продолжительный пожар в Лиссабоне был связан, возможно, с поступлением из недр Земли горячего газа по системе разломов.

NEW LISBOA EARTHQUAKE DATA 01.11.1755

Analysis of tsunami and of macroseismic data of Lisboa 01.11.1755, $M = 8,4-8,9$ earthquake is made. It is showed the height of 1755 tsunami in Lisboa Bay is overstated strongly. The location and the measurement of general foci are assessed. It is showed the movements in foci of Lisboa earthquake taken place along of north-eastwards system ruptures. Lisboa and its outskirts and westerly Atlantic coast of Portugal was located on periphery of 1755 earthquake foci. The high amplitude of the ground surface oscillations and big damage are explained of such foci location. New data on repeatability of strongest earthquakes over the range western Alpine tectonic brunch are cited. It is showed the long-lasting (five days!) Lisboa fire was related with the gas coming from the Earth by means of system ruptures.

Нет, и в церкви все не так...
Все не так, ребята!

В. Высоцкий

Введение

Печально известное Лиссабонское землетрясение, происшедшее более двух с половиной веков тому назад (01.11.1755 г.), и его последствия, казалось бы, уже подробно описаны в многочисленных источниках и достаточно полно исследованы [Болт, 1981; Гир, Шах, 1988; Клячко, 1999; Никонов, 2005; Неймар, 1898; Рихтер, 1963].

Тем не менее информация об этом землетрясении, которую можно услышать из уст гидов, почерпнуть из туристических путеводителей [Испания, 2007; Португалия, 2006а, 2006б], и последствия, которые можно увидеть своими глазами, показывают, что Лиссабонское землетрясение и его особенности изучены еще недостаточно полно.

Во вводной части проведен обзор и критический анализ известных данных о Лиссабонском землетрясении, на которые «наложены» наши наблюдения и выводы, полученные в ходе туристической поездки летом 2007 г. по Испании и Португалии по маршруту Барселона — Сарагоса — Саламанка — Порту — Лиссабон — Толедо — Мадрид — Барселона.

Обзор данных о Лиссабонской катастрофе и их анализ

Данные, приведенные далее, базируются в основном на опубликованных в работах [Клячко, 1999; Никонов, 2005; Неймар, 1898; Рихтер, 1963] показаниях очевидцев событий, происшедших в 1755 г.

* 10 (223). Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2007. № 2. Вып. 10. С. 74–86.

Лиссабон. Это началось 1 ноября в 9 часов 50 минут, когда большая часть населения самой богатой и обширной столицы Европы, которое, по разным оценкам, составляло 250–500 тыс. человек, в День всех святых собралась на утреннюю молитву в многочисленных церквях Лиссабона. Вдруг земля сильно заколебалась, и менее чем за минуту колебания сменились мощными толчками, которые, нарастая, следовали один за другим в течение 8 минут [Неймар, 1898, с. 313–314; Клячко, 1999, с. 17]. Капитан, оказавшийся в морском порту, наблюдал, как каменные постройки Лиссабона медленно, величественно начали качаться из стороны в сторону, «как пшеничное поле от легкого ветра», в направлении «от моря» [Никонов, 2005, с. 23–24] к северо-востоку.

Потом все ненадолго успокоилось. Примерно через 20 минут земля снова затряслась и волновалась около 8 минут. Во время второго сильнейшего толчка, по разным источникам, произошло два процесса, «разнонаправленных» относительно невозмущенного уровня моря. По одним данным [Неймар, 1898, с. 314; Клячко, 1999, с. 18], имело место опускание в море новой лиссабонской набережной. По другим данным, в Лиссабоне море вначале отступило далеко от набережной, обнажив морское дно на несколько километров, а затем внезапно нахлынуло [Португалия, 2006а, с. 63]. После этого на целый час наступило затишье [Неймар, 1898, с. 314].

В результате этих двух толчков были полностью разрушены 12 тыс. из 20 тыс. домов Лиссабона, и кроме того, 59 церквей, 90 монастырей, более 50 дворцов [Клячко, 1999, с. 19; Никонов, 2005, с. 25]. Последние оценки несколько отличаются у разных исследователей: у одних они относятся только к Лиссабону [Никонов, 2005], у других [Клячко, 1999], по-видимому, к нескольким городам, пострадавшим при толчках 1755 г. Например, в книге [Португалия, 2006а, с. 63–64] сообщается о 300 разрушенных дворцах и 110 церквях. Вероятно, здесь имеются в виду потери, имевшие место в пределах всей Португалии. Лиссабон же был полностью разрушен на 2/3 — это признается всеми источниками. В результате, по разным оценкам, только в Лиссабоне погибло от 30 до 60 тыс. человек, при этом из 20 тыс. духовных особ осталась в живых только половина [Неймар, 1898, с. 323–324; Рихтер, 1963, с. 103; Клячко, 1999, с. 19; Никонов, 2005, с. 21]. Сами португальцы сообщают о 40 тыс. погибших в Лиссабоне [Португалия, 2006б, с. 22].

На долю третьего мощного толчка уже почти ничего не осталось. В почве возникли многочисленные трещины. Дальнейшее очевидцы были не в силах внятно описать. По мнению крупнейшего специалиста в этой области А. А. Никонова, людям, не переживавшим сильные землетрясения в большом городе, почти невозможно представить этот «армагеддон». Боевые генералы, прошедшие войну 1941–1945 гг., признавались, увидев уничтоженный землетрясением 1948 г. Ашхабад (100 тыс. погибших), что «это совершенно ни с чем не сравнимо» [Неймар, 1898, с. 314; Клячко, 1999, с. 19; Никонов, 2005, с. 24].

Частые интенсивные толчки продолжались до вечера, и через три часа относительного спокойствия, около 11 часов, во многих местах города *одновременно* показался огонь. Его невозможно было потушить. Пожар «свирепствовал» в течение 5 суток, в результате чего выгорел весь город [Неймар, 1898, с. 313–314; Клячко, 1999, с. 17; Никонов, 2005, с. 25].

В течение ноября и декабря толчки повторялись. Отдельные из них продолжали разрушения. Самый сильный афтершок случился 9–11 декабря [Клячко, 1999, с. 19]. Он ощущался во всей Португалии, в Испании, Северной Ирландии, Южной Франции, Швейцарии и Южной Германии. Сейсмическая активность в районе продолжалась 10 месяцев, но возобновлялась и позже, вплоть до 1762 г. [Никонов, 2005, с. 25].

Общая макросейсмическая картина, отображающая проявления Лиссабонского землетрясения в Европе и Африке, представлена на рис. 1. Более детальная картина (только в Испании было обследовано 3 000 населенных пунктов), построенная на основе нескольких тысяч опросных листов, не уступающих, с точки зрения современной сейсмологии, современным аналогам, дана в работе [Никонов, 2005, с. 26, 28]. Из этих достаточно подробных и детальных макросейсмических данных следует принципиальной важности вывод, а именно: все португальское побережье от Лиссабона (мыса Рока) до г. Фару (*Faro*) и далее до пограничного испанского г. Аямонт (*Ayamonte*) протяженностью 350 км подверглось сотрясениям интенсивностью 9 баллов и более. При этом в пределах его юго-восточной части (100 км) максимально зарегистрированные сотрясения *заведомо достигали 10 баллов* и, следовательно, в эпицентральной области должны были соответствовать 11 баллам, если не более [Никонов, 2005, с. 28]. Другими словами, разрыв, образовавшийся при землетрясении, несомненно, вышел на поверхность земной коры на морском дне, и землетрясение должно было сопровождаться цунами.



Рис. 1. Область, затронутая Лиссабонским землетрясением 01.11.1755 г. в Европе и Африке [Рихтер, 1963, с. 104]. Римскими цифрами обозначены баллы интенсивности по 12-балльной шкале

Другие города и селения. В Португалии было полностью разрушено множество прибрежных городов [Португалия, 2006а, с. 32]. Согласно работе [Никонов, 2005, с. 21, 25], не менее 16 городов Португалии подверглись разрушениям в разной степени. В г. Фару (10 баллов) разрушения и затопление в связи с цунами повлекли за собой 3 000 смертей. Разрушения были в западной части Испании: в Севилье (более 8 баллов), Малаге (около 6 баллов) и др.; в Аямонте (9 баллов) и его окрестностях (до 10 баллов) погибло (от цунами) около 2 000 человек; «из Кадикса (7 баллов) пришла весть, что и там творятся такие же (как и в Лиссабоне. — **А. В.**) ужасы. Два города в Европе понесут огромные убытки в торговле» (Неймар, 1898, с. 314). О подобных явлениях сообщали и с Гиблартара (6–7 баллов) — все укрепления разрушены, и из Марокко (6–8 баллов) — в одной только деревушке под оползнем погибло до 8–10 тыс. человек. Жертвы в сельских местностях Португалии и Африки неизвестны.

Воздействие катастрофы на умы [Никонов, 2005, с. 21, 25–26]. Катастрофа в Лиссабоне привела в сильное возбуждение всю Европу. Свои соболезнования прислали И. Кант и Вольтер. Огромное количество брошюр, статей, политических сочинений, проповедей, стихотворений наводнили литературу [Неймар, 1898, с. 320; Рихтер, 1963, с. 103]. Так, И. Гёте называл это землетрясение «ужасным мировым событием», М. В. Ломоносов писал о «жестокой Лиссабонской судьбине». Землетрясение использовал в своем памфлете Ж. Ж. Руссо, эпизод с Лиссабонским землетрясением вставил в свою блестящую сатирическую повесть «Кандид» Вольтер. Конечно, именно Лиссабонское землетрясение имеется в виду в пьесе О. У. Холмса «Шедевр архирея, или Чудесная одноколка». Наряду с французской революцией это было самое сенсационное событие XVIII в. [Неймар, 1898, с. 320]. На таком фоне для философов и естествоиспытателей катастрофа стала поводом к смятению и уходу из «теоретического» романтизма в «более практический» прагматизм. В то время разрушенным виделся не только Лиссабон, но вообще прошлое [Никонов, 2005, с. 26]. Немудрено, что возбужденная фантазия многих из последующих интерпретаторов происшедшей в 1755 г. катастрофы доверяла многому, чего не было вовсе, и что все необычайные явления, приблизительно совпавшие с днем катастрофы, были поставлены в связь с грозным землетрясением [Неймар, 1898, с. 320].

Как видим, в оценке некоторых последствий катастрофы в тех реальных условиях, которые были в Европе, вполне возможны преувеличения в сторону их максимальных значений. Причиной тому, на наш взгляд, являются чисто психологические причины, которые могут быть

объяснены, с одной стороны, «слишком уж глубоким» философским отношением к катастрофе, с другой — отсутствием достаточно ясных и физически объяснимых механизмов землетрясения. По сути, об этом же пишет и А.А. Никонов в заключительном разделе своей великолепной статьи [Никонов, 2005]. Вспомним, первая классификация землетрясений по четырем типам была дана М.В. Ломоносовым спустя два года после Лиссабонской катастрофы, только в августе 1757 г., в статье [Ломоносов, 1986], в которой он высказал свои взгляды на геологические процессы и попытался, весьма примитивно с современной точки зрения, дать объяснение причин землетрясений.

Именно с таких позиций, на наш взгляд, и стоит подходить к оценке некоторых параметров катастрофы, которые сильно завышены, и в первую очередь к высоте цунами в Лиссабоне.

Высота цунами в Лиссабоне при катастрофе. Сразу отметим, что нам неизвестны данные, которые бы прямо указывали на большое значение высоты цунами в Лиссабоне. Действительно, «Лиссабонская газета» от 6 ноября 1755 г. писала: «1-е число текущего месяца останется навечно в нашей памяти из-за землетрясения и пожаров, разрушивших большую часть города...», «Среди ужасных последствий землетрясений... отметим разрушение высокой башни Томбо, где хранились государственные архивы» [Клячко, 1999, с. 17; Никонов, 2005, с. 23]. Как видим, здесь нет ни слова о якобы страшном и разрушительном цунами.

Приведем описание очевидца землетрясения в Лиссабоне: «После этого (после второго толчка. — А.В.) целый час было затишье. В это время распространился слух (через час после сильного цунами распространился только слух? — А.В.), что вода в море страшно поднялась... Наша таможня... низверглась в море вместе с большой площадью. Многие из *трехсот* (выделено. — А.В.) кораблей, стоявших в гавани, поднялись с якорей (на них была команда, они были целыми! — А.В.); одни потонули, другие были уничтожены. Голландское судно было выброшено в город и стояло на суше. Но... нахлынула другая волна, подхватила корабль и, не повредив его, отнесла в море» [Неймар, 1898, с. 314].

В Лиссабоне отступление моря далеко от набережной с обнажением морского дна на несколько километров и последующим приливом к берегу повторялось трижды [Португалия, 2006а, с. 63]. Согласно данным того же «туристического» источника, сильно пострадал г. Кашкайш (*Cascais*), находящийся в 26 км к западу от Лиссабона, и почти полностью разрушен г. Сетабул (*Setubal*) — в 50 км к юго-востоку от Лиссабона. Как видим, сведения о цунами для этих прибрежных городов, по сути пригородов столицы, отсутствуют [Португалия, 2006а, с. 115, 158].

«1 ноября 1755 г. цунами Лиссабонского землетрясения достигло города около 10 часов утра, через 20 минут после первого толчка. На португальском побережье (не в Лиссабоне. — А.В.) его высота во многих местах возросла до 20 футов, а кое-где до 50 футов (до 6 и 15 метров соответственно. — А.В.)» [Рихтер, 1963, с. 112]. Ясно, где цунами имело такую большую высоту и гигантскую кинетическую энергию — в португальском порту Фару (*Faro*), в испанском атлантическом порту Кадиксе (*Cadaz*) и в Гибралтаре [Неймар, 1898, с. 314; Португалия, 2006а, с. 257; Никонов, 2005, с. 25], расположенных соответственно в 230, 350 и 450 км к юго-востоку от Лиссабона. Известно, что волна прошла весь Атлантический океан и достигла берегов Америки [Неймар, 1898, с. 318].

Один из важных аргументов в пользу нашей точки зрения о завышенном цунами в Лиссабоне заключается в следующем. Согласно данным обстоятельной работы [Никонов, 2005, с. 24], материальные потери в г. Лиссабоне после землетрясения 1755 г. составили, даже по современным меркам, поистине фантастическую сумму — более 1 млрд франков золотом. Но в этой сумме никак не отражены и не выделены потери, связанные с гибелью кораблей, не говоря уже о флоте в целом: 800 млн — драгоценности, 114 млн — разрушение строений, 100 млн — потери казны и частных лиц от гибели и повреждений интерьеров, имущества. Как видим, если и пострадали корабли, то, очевидно, в незначительном количестве.

Кафедральный собор в Лиссабоне, расположенный практически на берегу, на удалении от него не более 1 км, при катастрофе совершенно не пострадал и тем самым сохранил жизнь многим людям, находящимся в соборе [Португалия, 2006а, с. 77]. Отметим, что, по словам гида, были повреждены только входные ворота, которые при службах всегда открыты. И собор не только не пострадал — после первого сильного толчка в нем возобновили службу. В случае же большого цунами жертвы в соборе были бы неизбежны в результате его затопления, да и сам собор должен был в результате подмыва просесть хотя бы на один из своих углов.

Наконец, Лиссабон расположен в 17 км от Атлантического океана, на правом берегу р. Тежу, ширина которой в районе города составляет также около 17 км. Тем самым она образует обширную просторную бухту, значительно более широкую, чем, например, Авачинская бухта, на берегу которой расположен г. Петропавловск-Камчатский. В Лиссабоне просто не могло быть значительного по высоте цунами от очага, расположенного в океане: из очевидных соображений следует, что высокая волна, не разрушившись, не может зайти в бухту ввиду достаточно узкого устья реки. Для геофизика, видевшего как расположение Лиссабона, так и конфигурацию бухты своими глазами, это совершенно очевидно. Например, при Большом Камчатском землетрясении 04.11.1952 г. ($M_S = 8,5$, $M_W = 9,0$) с высотой цунами в акватории Авачинского залива до 10 м и более высота волны в бухте была не более 1–2 м [Соловьев, 1978, с. 74–77]. Она не обладала большой кинетической энергией и имела характер медленной волны — подтопления [Викулин, Дроздюк, Семенец и др., 1997]. Приведенные нами данные очевидцев подтверждают, что именно такие и по характеру, и по высоте волны наблюдались в лиссабонской бухте в ноябре 1755 г.

Таким образом, несомненно, имело место совпадение во времени двух явлений: второй сильный толчок и приход первой достаточно малой по амплитуде и медленной волны. Данные о гигантском шестиметровом цунами [Клячко, 1999, с. 19] или первой волне высотой 12–15 м через 20 минут после первого толчка [Никонов, 2005, с. 24], которые были результатом подвижки морского дна в момент первого толчка, являются явно преувеличенными.

Относительно механизма образования как первой, так и последующих волн, приходивших на побережье лиссабонской бухты, нет единого мнения. С одной стороны, очаг землетрясения 1755 г., вне всякого сомнения, генерировал мощнейшее цунами, и приведенные данные убедительно продемонстрировали это. С другой стороны, «безусловно, речь идет о крупном оползне прибрежного участка во время второго толчка» [Никонов, 2005, с. 24–25]. Все эти данные не дают ответа на вопрос о природе волн, наблюдавшихся в лиссабонской бухте в 1755 г., а также на вопрос, опустилась или поднялась городская набережная при землетрясении. На прямой вопрос одного из авторов статьи о направлении движения набережной при катастрофе гид дал четкий ответ: берег при землетрясении поднялся.

Тем не менее можно заметить следующее. Гипотеза А. А. Никонова о возникновении цунами внутри бухты в результате обвала одного из ее подводных склонов [Никонов, 2005, с. 25] не бессмысленна и требует проверки. Такая гипотеза, например, имеет место для Петропавловска-Камчатского, вблизи которого на крутых берегах Авачинской бухты, на высоте 10 м, найдены останки, интерпретируемые И. В. Мелекесцевым именно как следы цунами.

Процессы в очаге Лиссабонского землетрясения

Сейсмичность Португалии. Землетрясение 01.11.1755 г. было не единственным в регионе. В научной литературе содержатся сведения о сильном (1356 г.) и разрушительном (1531 г.) толчках, а также об одном из шести толчков в 1722 г. [Клячко, 1999, с. 17–18], ощущавшихся в течение пяти лет перед землетрясением 1755 г. Землетрясения происходили, происходят и будут происходить и на Азорских островах, расположенных к западу от Португалии, и в соседней Испании.

На рис. 2 нанесены эпицентры всех сильных землетрясений, происшедших в XII–XXI вв. ($30^\circ \text{W} \leq \lambda \leq 0$, $32^\circ \text{N} \leq \varphi \leq 40^\circ \text{N}$), данные о которых содержатся в мировом каталоге. Видно, что совокупность эпицентров землетрясений, в основном определяющих сейсмичность Португалии (прямоугольный выделенный участок), является составной частью всего субширотного альпийского тектонического пояса, протягивающегося через Индонезию, Тибет, Среднюю Азию, Кавказ, Турцию, Средиземное море к Азорским островам. Выделенный на рис. 2 район, «ответственный» за сейсмичность Португалии, связан с тектонической структурой, протягивающейся в северо-восточном направлении от архипелага Мадейра в сторону Лиссабона (рис. 3). Данные о землетрясениях этого района приведены в таблице.

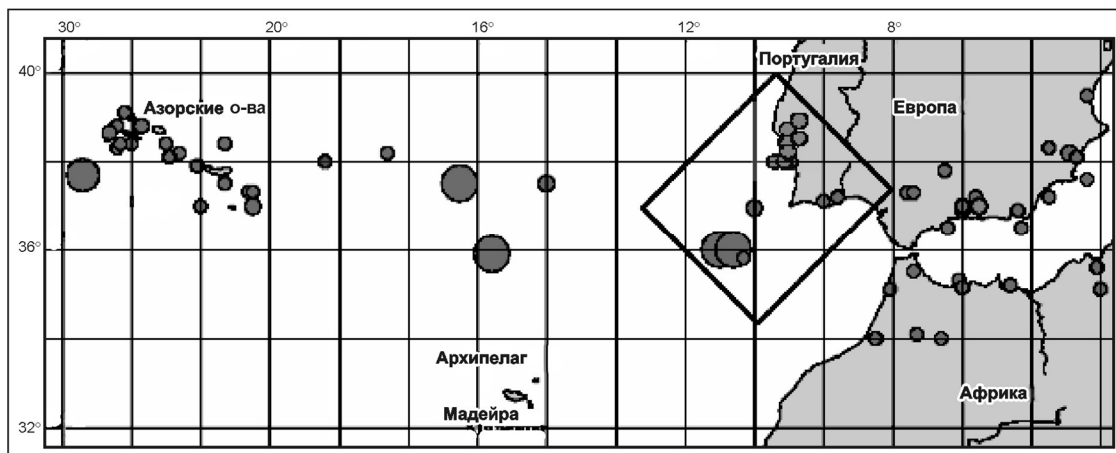


Рис. 2. Сейсмичность западного окончания ($30^{\circ} W \leq \lambda \leq 0$) субширотного альпийского тектонического пояса, простирающегося на 160° между Тихим и Атлантическим океанами, по данным мирового каталога за 2000 г. до н. э. — 2007 г. [Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007]

Нанесены эпицентры всех ($N = 83$) известных землетрясений до XIX в. включительно и с $M_S > 6$ инструментального периода наблюдений в XX–XXI вв. Эпицентры землетрясений с $M_S \geq 8$ изображены большими кружками. Квадратом выделена часть пояса, определяющая в основном сейсмичность Португалии

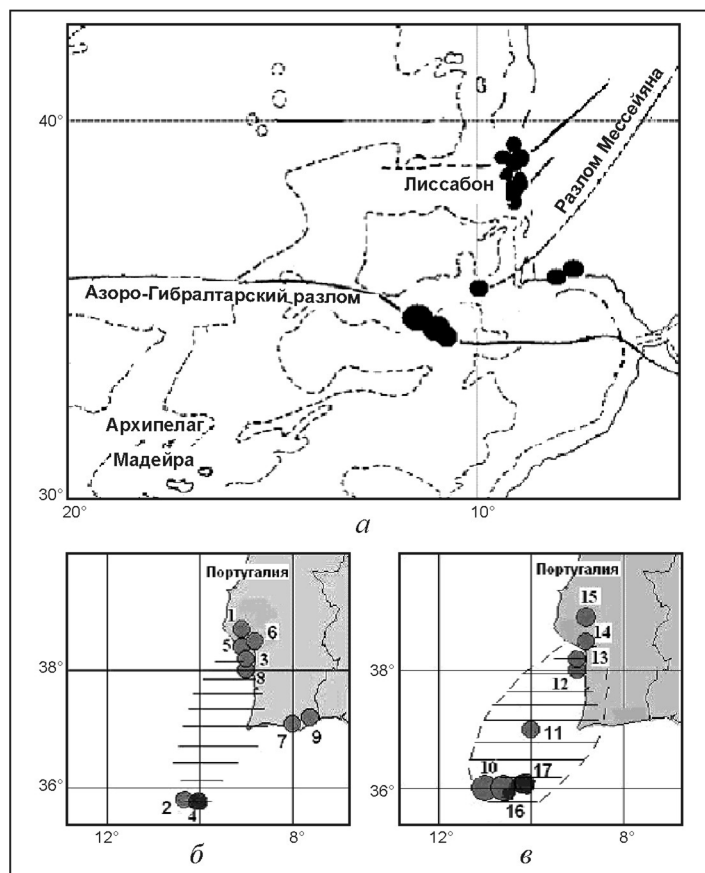


Рис. 3. Сейсмичность Португалии по данным за XII–XXI вв. (а), до катастрофы 1755 г. (б), во время катастрофы и в последующие периоды (в)

Тектонические разломы и батиметрия позаимствованы из работы [Никонов, 2005]. Кружки большого (малого) диаметра отражают положение эпицентров землетрясений с $M_S \geq 8$ ($6 < M_S < 8$). Заштрихованная область обозначает положение сейсмической брешки (б) и очага Лиссабонского землетрясения 1755 г. (в). Цифры соответствуют номерам землетрясений в таблице

**Параметры сильных землетрясений XII–XXI вв.,
определяющие сейсмичность Португалии**
(позаимствованы из мирового каталога, составленного на основе списков
землетрясений в ISC, NEIC и CEC [Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007])

| № п/п | Год | Месяц | День | Час | Минута | Долгота λ , N, град | Широта φ , W, град | Глубина, км | M_S |
|-------|------|-------|------|-----|--------|--------------------------------|-------------------------------|----------------|---------|
| 1 | 1151 | — | — | — | — | 38,7 | 9,1 | — | — |
| 2 | 1320 | 12 | 9 | — | — | 36,0 | 10,7 | — | — |
| 3 | 1344 | — | — | — | — | 38,0 | 9,0 | — | — |
| 4 | 1356 | 8 | 24 | — | — | 36,0 | 10,7 | — | — |
| 5 | 1531 | 1 | 26 | — | — | 38,4 | 9,1 | — | — |
| 6 | 1551 | 1 | 28 | — | — | 38,4 | 9,1 | — | — |
| 7 | 1587 | 11 | — | — | — | 37,1 | 8,0 | — | — |
| 8 | 1597 | 7 | 28 | — | — | 38,0 | 9,0 | — | — |
| 9 | 1722 | 12 | 27 | — | — | 37,2 | 7,6 | — | — |
| 10 | 1755 | 11 | 1 | 9 | 50 | 36,0 | 11,0 | — | 8,4–8,9 |
| 11 | 1755 | 11 | 1 | 10 | 16 | 37,0 | 10,0 | — | — |
| 12 | 1755 | 11 | 1 | 11 | 16 | 38,0 | 9,0 | — | — |
| 13 | 1858 | 11 | 11 | 7 | 15 | 38,2 | 9,0 | — | — |
| 14 | 1858 | 11 | 11 | 7 | 30 | 38,5 | 8,8 | — | — |
| 15 | 1909 | 4 | 23 | 17 | 40 | 38,9 | 8,8 | 33 | 6,6 |
| 16 | 1969 | 2 | 28 | 2 | 40 | 36,0 | 10,6 | 22 | 8,0 |
| 17 | 2007 | 2 | 12 | 10 | 35 | 35,8 | 10,3 | 10 | 6,2 |

Положение очага Лиссабонского землетрясения 1755 г. Форшоки. Всего в пределах португальской структуры в течение последних девяти веков произошло 17 сильных (ощущавшихся населением) землетрясений: первое в 1151 г. (см. табл., № 1) в месте, в которое примерно через 100 лет «переедет» столица Португалии [Португалия, 2006б, с. 22], и пока последнее в феврале 2007 г. (№ 17). Эпицентры всех землетрясений в совокупности представлены на рис. 3, а, батиметрия и положение тектонических разломов на котором позаимствованы из работы [Никонов, 2005]. Видно, что сильные землетрясения вблизи Португалии происходят в пределах тектонической структуры, на суше продолжающейся системой разломов северо-восточного простирания, в море прослеживающейся до архипелага Мадейра, тем самым примерно под прямым углом пересекающей Азоро-Гибралтарский разлом. На рис. 3, б представлены эпицентры землетрясений, произошедших в районе 1151–1722 гг., т. е. Лиссабонской катастрофы (№ 1–9), а на рис. 3, в — во время катастрофы в 1755 г. (№ 10–12) и после нее до 2007 гг. включительно (№ 13–17).

Как следует из данных, представленных на рис. 3, б, эпицентры землетрясений в 1151–1722 гг. оконтурили «пустую» (заштрихованную) зону, протяженность которой составила 300–350 км. Такие «пустые» зоны — зоны сейсмического затишья, оконтуренные областью с высокой сейсмичностью — К. Моги назвал сейсмическими брешами первого рода [Викулин, 2003]. При этом имела место следующая закономерность в распределении «краевой» сейсмичности: толчки по очереди происходили на противоположных краях сейсмической брешы. Действительно, толчки 1151, 1344, 1531–1551–1597 гг. (в табл. соответственно № 1, 3, 5–6–8) происходили на северо-восточном краю брешы, а толчки 1320 и 1356 гг. (№ 2 и 4) — на ее юго-западном краю. Эффект чередования краевой сейсмичности отмечен в очагах многих сильнейших землетрясений планеты [Викулин, 2003; Лобковский, 1988]. Как видим, очаг Лиссабонского землетрясения 1 ноября 1755 г. с магнитудой $M_S = 8,4 - 8,9$ ($M_W \approx 9$) располагался в таком месте, которое сеймотектоническим процессом «готовилось» в течение как минимум пяти веков.

Следует отметить, что анализ имеющихся данных, выполненный через четверть века, позволил сделать вывод о существовании предвестникового сейсмического затишья в течение нескольких лет перед Лиссабонской катастрофой [Никонов, 2005, с. 27]. Наиболее сильные из предварявших катастрофу 1755 г. толчков отмечены в 1356 и 1531 гг. (см. табл. № 4, 5). В Лиссабоне они сопровождались соответственно сильными колебаниями и разрушениями [Клячко, 1999, с. 17–18; Португалия, 2006а, с. 77]. Это позволяет считать, что место очага будущей катастрофы было «обозначено» уже за 250 лет до того, как она случилась. Последний сильный форшок, сопровождавшийся наиболее сильными ощутимыми колебаниями в г. Фару, произошел в 1722 г. [Португалия, 2006а, с. 257] на восточном краю области сейсмического затишья (№ 9) за 33 года до катастрофы.

Миграция афтершоков. Развитие сейсмического процесса в очаге Лиссабонского землетрясения отчетливо прослеживается расположением в пространстве и во времени его афтершоков в 1755 г. и толчков в последующие годы (рис. 3, в). Видно, что в течение длительного времени в северо-восточном направлении происходила миграция эпицентров землетрясений. Процесс миграции проявился сразу же после главного толчка (табл., № 10) его афтершоками в 1755 г. (№ 11–12) и продолжился последующими толчками в 1858 г. (№ 13, 14) и 1909 г. (№ 15).

Скорость миграции афтершоков в 1755 г. достигает большой величины ($V \approx 0,1$ км/с), что в соответствии с установленной в работе [Викулин, 2003; Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007] зависимостью $V(M)$ позволяет оценить их магнитуду: $M_S = 7,5–8,0$. Миграция афтершоков является характерной особенностью сейсмического процесса, отражающей направление его развития в очагах сильнейших землетрясений и их размеры [Викулин, 2003, 2006]. Например, многочисленные афтершоки с магнитудами $7,5 \leq M_S \leq 8,3$, инструментально зарегистрированные после Чилийского землетрясения (22.05.1960 г., $M_W = 9,5$), мигрировали вдоль сейсмического пояса и определили тем самым и положение, и размеры очага главного толчка [Duda, 1963].

На миграцию афтершоков в сторону Лиссабона указывают также многочисленные данные о сильных моретрясениях («людей на палубе подбрасывало», «палуба сильно пострадала» [Никонов, 2005, с. 26]), которые могли происходить только в случае нахождения кораблей непосредственно над образовавшимся разрывом. При эпицентре главного толчка, удаленного от Лиссабона на 300–350 км, такой силы моретрясения ощущались на кораблях, находившихся от столицы на расстояниях от 50 лье (220–280 км) [Никонов, 2005, с. 26] до 60 миль (100 км) [Неймар, 1898, с. 314].

На основании этих данных можно принять, что очаг Лиссабонского землетрясения с $M_S = 8,4–8,9$ располагался в пределах заштрихованной области, «обозначенной» двумя его афтершоками (табл., № 11, 12) и его протяженность составила 300–350 км (рис. 3, в). Как видим, столица Португалии, ее окрестности и примыкающее к ней западное атлантическое побережье оказались расположенными, по сути, в пределах краевой зоны очаговой области, что и объясняет в этом районе высокую интенсивность колебаний и, как следствие, большие разрушения от сотрясений. Большая продолжительность колебаний (до 8 минут), отмеченная при первом и втором толчках, является следствием масштабности процесса. Например, сильнейшие камчатские землетрясения 17.10.1737 г. и 04.11.1952 г. с $M_W \approx 9$ ощущались в виде трех интенсивных волн, каждая продолжительностью до 5 минут. Для землетрясений Европы такая большая продолжительность интенсивных колебаний при землетрясении нехарактерна.

Об источнике цунами. Направление распространения разрыва при катастрофе 1755 г. в северо-восточном направлении объясняет имеющие место особенности распределения высот цунами: его малую интенсивность в направлении Лиссабона и, наоборот, высокую интенсивность в перпендикулярном направлении — как в направлении атлантического испанского побережья, так и в сторону Америки. Эти данные показывают, что причины цунами в лиссабонской бухте в ноябре 1755 г., согласно гипотезе А. А. Никонова, следует связать именно с подводными обвалами в пределах ее акватории.

Представленная нами схема процессов в очаге Лиссабонского землетрясения в принципе отличается от схемы, построенной в работе [Никонов, 2005], в которой основные движения в очаге были связаны с движениями вдоль Азоро-Гибралтарского разлома. Для уточнения сейсмического сценария возможной будущей катастрофы в районе Лиссабона требуется, очевидно, проведение целого комплекса дополнительных исследований.

О периоде повторения катастроф в районе Лиссабона

В туристических справочниках содержатся данные о землетрясении, неизвестном мировым каталогам и спискам землетрясений. В работе [Португалия, 2006а, с. 159] читаем: «В V в. на южном берегу р. Саду римляне основали рыбацкое поселение Цетобрига — современная Троя. В 412 г. его разрушило землетрясение. Спустя 1 000 лет здесь находилась королевская резиденция, исчезнувшая во время катастрофы 1755 г.». Данные об этом землетрясении могут иметь принципиальное значение при количественной оценке величины сейсмической опасности.

Как уже отмечалось, землетрясения, происходящие в районе Лиссабона, относятся к западному окончанию субширотного альпийского сейсмического пояса. В пределах только «средиземноморского» сегмента этого пояса произошло большое количество катастроф. Из них «наибольшую известность» получили землетрясение 536 г. в Сирии и Малой Азии (120 тыс. погибших), Сицилийское землетрясение 1693 г. (60 тыс. человек), Лиссабонская катастрофа [Неймар, 1898, с. 324] и землетрясение в итальянском г. Мессина в 1908 г. (120 тыс. человек).

Для кавказского сегмента этого пояса ранее была получена оценка повторяемости сильнейших в одном месте землетрясений, которая оказалась близкой одному событию в $1\,000 \pm 700$ лет [Викулин, 1992]. Отметим, что именно такой силы землетрясения и привели к переносу столицы Армении из Ани сначала в Двин, а затем в Ереван [Никонов, 1989]. Но, к счастью, этого не произошло с Лиссабоном: нашелся человек — Себастьян-Жозе ди Карвалью, маркиз и министр Помбал (1699–1782), который в той непростой ситуации не только посмел перечить португальскому королю, но и в короткий срок восстановил столицу [Португалия, 2006а, с. 63–64, 83; Португалия, 2006б, с. 22–23; Никонов, 2005]. Это феномен не только в португальской [Никонов, 2005], но и в мировой практике.

Примерно такая же по величине оценка повторяемости сильнейших землетрясений следует из макросейсмических данных для центральной части Альпийского сейсмического пояса: «21.07.365 г. землетрясение в Александрии унесло 50 тыс. жизней и частично разрушило Фаросский маяк, причислявшийся к семи чудесам света. Этот маяк был построен в III в. до н. э., имел 180 м высоты и представлял собою гигантскую мраморную башню, на вершине которой постоянно поддерживался огонь. Впоследствии маяк сильно пострадал от землетрясения 400 г. и был окончательно „добит“ землетрясением 1375 г. (т. е. примерно через 1 000 лет. — А. В.). От него осталось только название — фары» [Вокруг..., 2005].

Приведенные данные позволяют предположить, что величина повторяемости сейсмических катастроф в одном месте в пределах всего западного сектора субширотного тектонического пояса составляет примерно одно событие в 1 000 лет. К этим данным можно добавить следующее: характерные сейсмические периоды ΔT с близкой продолжительностью выявлены при анализе каталогов землетрясений Китая ($\Delta T = 1\,000$ лет), Кавказа ($\Delta T = 800\text{--}950$ лет) и Японии ($\Delta T = 1\,200$ лет) [Викулин, 2003].

Для подтверждения гипотезы о характерном периоде повторения сильнейших катастроф в пределах Альпийского пояса, к западному окончанию которого относится Португалия, требуется проведение дальнейших исследований.

Приведенные на рис. 3, в данные показывают, что сеймотектонический процесс разрядки накопленных напряжений в очаге Лиссабонского землетрясения, начавшийся 1 ноября 1755 г. около 10 часов утра, продолжался миграционной цепочкой землетрясений в северо-восточном направлении в течение более 150 лет вплоть до начала XX в. — землетрясения 23 апреля 1909 г. (табл., № 15). Последние сильные землетрясения в португальском районе произошли в конце XX — начале XXI вв. — это землетрясения 1969 и 2007 гг. (№ 16 и 17). Предпоследнее из этих двух событий имело большую для района магнитуду $M_S = 8$ (№ 16), его эпицентр располагался вблизи главного толчка (рис. 3, в). Оно считается уменьшенным аналогом Лиссабонского землетрясения 01.11.1755 г. [Никонов, 2005, с. 28]. По-видимому, можно принять, что подготовка к следующей катастрофе в португальском районе, которую, как показали приведенные данные, можно ожидать в $1755 + 1000 = 2755 \pm 700$ г., началась.

Об источниках пожара в Лиссабоне и радиоактивности почвы

Невыясненным остается вопрос о причинах быстрого, интенсивного, начавшегося во многих местах и, по-видимому, практически одновременного возгорания большого по протяженности города, в результате выгоревшего дотла. В работе [Клячко, 1999, с. 17] читаем: «А. Гумбольдт в своем „Космосе“ более 100 лет спустя утверждал „со слов очевидцев“, что столб огня и дыма вырвался из появившейся в скале Алвидрас, что на краю города, трещины. Более поздний и очень серьезный исследователь этого землетрясения сейсмолог Франсишку Луидж Перейра де Соуза (*известный сейсмолог Португалии* [Никонов, 2005]) приписывал пожар „радиоактивности почвы“. Попытки людей остановить пожар оказались неудачными». В работе [Клячко, 1999] данные о причинах пожара и радиоактивности почвы оцениваются как слухи.

Пожар в качестве одной из основных причин нанесенного землетрясением ущерба, как уже цитировалось выше, рассматривается всеми очевидцами [Клячко, 1999; Неймар, 1898] и исследователями [Болт, 1981; Гир, Шах, 1988; Клячко, 1999; Неймар, 1898; Рихтер, 1963]. В свете полученных в работе данных и результатов обследования очаговых областей последних катастрофических землетрясений предположения А. Гумбольдта и Ф. Л. Перейра де Соуза — фантастические, на первый взгляд, — тем не менее находят вполне разумное объяснение. Отметим, что не доверять выводам Ф. Л. Перейра де Соуза, собравшему и проанализировавшему *все* известные данные о Лиссабонской катастрофе и издавшему их в своем капитальном труде [Никонов, 2005], нет оснований.

Согласно данным, представленным в работе [Войтов, Попов, 1989], состояние проблемы состоит в следующем.

Подземные водогазоносные системы, несмотря на их кажущуюся региональную изолированность, представляют собой единое целое. Следовательно, возникающие в очаге землетрясения в ходе деформации пород трещины, сколы, разрывы неизбежно распространяются на всю систему. Достигнув поверхности Земли, они проявятся в изменении химического состава вод и газов, интенсивности источников глубинных минеральных вод. Это означает, что геохимические и гидродинамические признаки (а такие признаки были установлены и для Лиссабонского землетрясения [Никонов, 2005]), могут являться важной характеристикой происшедшей катастрофы.

Впервые связь между землетрясениями и нарушениями в «работе» глубинных источников отметил еще в 1912 г. основоположник русской сейсмологии Б. Б. Голицын. Тогда же он предсказал неизбежные газовые аномалии и изменения химического состава вод в источниках, связанных с землетрясениями. В. И. Вернадский примерно в то же время, размышляя о газовом обмене земной коры, сформулировал представления о газовых струях, существующих в геодинамически активных областях и несущих к поверхности Земли и в атмосферу газы из глубин. Одним из доказательств этого предположения является радиоактивность приземного слоя атмосферы.

Существенные изменения концентрации газов отмечены в очагах многих сильных землетрясений. При этом в очагах ряда сильных Газлийских землетрясений в составе газа регулярно регистрировался водород, концентрация которого заметно увеличивалась сразу после сейсмических ударов. Зафиксирован и другой эффект — регистрация β -распада короткоживущих продуктов распада радона в зоне глубинного Северо-Ферганского тектонического разлома. Установлено, что радон мог быть вынесен с глубины только потоком других газов.

Выявлено содержание радия в воде одной из скважин в зоне Предкопетдагского сейсмогенного разлома.

Согласно работе [Ташкентское ..., 1971, с. 188–198] в очагах Ташкентского землетрясения и его афтершоков также наблюдалось заметное увеличение концентрации радона, которое, как оказалось, коррелирует с изотопным отношением урана (U^{234}/U^{238}) в минеральных водах.

Как мы уже отмечали, Лиссабон располагался в пределах очаговой области землетрясения 1755 г. и на его территории при землетрясении образовалось большое количество трещин, в том числе достаточно глубокие. По образовавшимся трещинам из недр земли мог поступать в большом количестве горючий газ (например, водород), что может объяснить как появление *многочисленных* очагов возгорания, так и невозможности их тушения и, как следствие, выгорание города дотла. Выходящий из недр газ, как показали приведенные данные, мог «тащить» с собой радиоактивные элементы, которые «осели» в породе и которые через 100 лет после землетрясения обнаружил Ф. Л. Перейра де Соуза.

Нарисованная картина, в рамках которой объясняются возможные причины длительного площадного пожара в Лиссабоне, подтверждается полученными в последнее время многочисленными данными о существовании большого количества геогидрохимических предвестников Лиссабонской катастрофы. Действительно, в ряде населенных пунктов «задним числом» выявлены предвестниковые изменения температуры изливающихся вод, дебита колодцев, химического состава воды (появление у нее неприятного запаха) и др. [Никонов, 2005, с. 27]. Некоторые из этих явлений были отмечены и во время катастрофы 1 ноября 1755 г. [Неймар, 1898, с. 320].

Повороты кафедрального собора в Саламанке

Новый и старый кафедральные соборы Саламанки, находясь рядом друг с другом, дают представление о самых разных архитектурных стилях — от позднего романского (XII–XIII вв.) в старом до готическо-ренессанского в новом, строительство которого, начавшись в 1513 г., продолжалось более двух веков [Испания, 2007].

Новый собор демонстрирует великолепно исполненное каменное кружево фасада и карнизы филигранной работы. В течение многих веков существования Нового собора на его фасаде из более чем 100 фигурок отвалились и разбились только несколько. На это обратили внимание сразу после землетрясения, случившегося 1 ноября 1755 г., что, несомненно, свидетельствует в пользу утверждения: результатом откола фигурок является именно сейсмический толчок. Больше никаких внешних нарушений на фасаде, других стенах и башнях Нового собора в результате землетрясения не возникло.

Внутри Нового собора также создается ощущение полного душевного спокойствия и близости чего-то возвышенного, что, среди прочего, достигается «мягкостью» света, проникающего через многочисленные великолепные витражи, которые при землетрясении совершенно не пострадали. Однако по обоим торцам фасадной стены изнутри собора отчетливо видны трещины, которые протянулись от верхней части стены вниз более чем на 10 метров (!), что позволяет визуальнo оценить ширину трещин, составляющую при высоте стены около 30 метров как минимум несколько сантиметров (возможно, до 10 см и более).

Приведенные данные позволяют охарактеризовать интенсивность колебаний в Саламанке при землетрясении 1755 г. как 7–8 балльные по 12-балльной шкале.

В то же время согласно карте сейсмического районирования Саламанка оказывается расположенной в пределах 6-балльной зоны колебаний [Никонов, 2005, с. 28]. Выше уже отмечалось, что карта сейсмического районирования сотрясений, вызванных Лиссабонским землетрясением 1755 г., составлена с учетом большого количества фактического макросейсмического материала и является достаточно «точным» документом. Поэтому значительное расхождение между нашей оценкой и данными детального макросейсмического обследования сразу после землетрясения следует искать в некоей «нестандартной» причине.

Такие значительные по величине (ширина трещин), масштабные (длина трещин) и несквозные нарушения торцов фасадной стены Нового собора, на наш взгляд, разумным образом и достаточно просто можно объяснить только одной причиной, а именно: волны, возникшие в результате Лиссабонского землетрясения, в районе Саламанки имели в большей степени «крутильную» поляризацию, нежели сдвиговую, что и привело к повороту Нового собора сначала в одну, потом в другую сторону относительно его фасада. Такой поляризацией волн, очевидно, легко можно объяснить и смещение с наклоном возведенной в 1163 г. башни Петуха Старого собора, что можно увидеть на великолепном снимке в работе [Панченко, Семашко, 2006, с. 116]. Именно поворотные колебания в совокупности с интенсивными вертикальными толчками могли привести к повреждению ворот кафедрального собора в Лиссабоне при землетрясении.

Макросейсмические эффекты, связанные с крутильными колебаниями, были выявлены после многих землетрясений, происшедших как в «старые» времена, так и совсем недавно [Аносов, Константинова, Делемень, 2004]. До настоящего времени существующие нормативные документы не предусматривают возможный учет крутильных колебаний при оценке макросейсмических последствий землетрясений [Дроздук, 2004].

Заключение

В работе получены новые данные о Лиссабонском (01.11.1755 г.) землетрясении:

1. Показано, что имеющиеся данные о высоте цунами в лиссабонской бухте при катастрофе 1755 г. являются завышенными. Незначительное по высоте (1–2 м) цунами, несомненно, имевшее место, было вызвано скорее всего подводными обвалами, происшедшими в пределах акватории бухты. Необходимо проведение дополнительных исследований с целью уточнения возможного сценария цунами в Лиссабоне при последующих землетрясениях.

2. Установлено существование сейсмической брешы и чередование «краевых» форшоков в месте расположения очага будущей катастрофы и миграции афтершоков в 1755 г., что позволило уточнить положение очага Лиссабонского землетрясения и его размеры.

3. Приведены и проанализированы новые данные о повторяемости катастроф типа Лиссабонской 1755 г. в пределах западного окончания альпийского сейсмогенетического пояса планеты. Сформулировано предположение о значении возможного периода повторения таких катастроф в регионе, равного одному событию в 1000 лет.

4. С учетом последних данных, полученных в очаговых областях сильнейших землетрясений, показано, что возможной причиной длительного площадного пожара в Лиссабоне и выгорания его дотла является поступление горючих газов из земных недр через множество образовавшихся при землетрясении разломов.

5. На примере кафедрального собора в Саламанке показано, что одной из возможных причин повреждений зданий и сооружений при Лиссабонском землетрясении могли являться и крутильные колебания.

Полученные новые данные, несомненно, могут оказаться полезными как при составлении сценария возможных будущих катастрофических землетрясений в регионе, так и при выработке мер по уменьшению ущерба от них.

Конечно, история изобилует большим количеством совпадений. Большинство из них впоследствии получают свое объяснение. Некоторые, например «одновременное» существование мощнейших научных центров в Древней Греции, Древнем Риме и Китае [Диоген, 1979; Исаков, 2004], еще на долгое время останутся загадочными. К числу таких знаменитых и пока неразгаданных совпадений, требующих в дальнейшем своего объяснения, относятся и происшедшие в 1755 г. следующие поистине великие для науки события.

Во-первых, учреждение 12 января Московского университета; во-вторых, опубликование Э. Кантом космогонической гипотезы; в-третьих, опубликование С. П. Крашенинниковым своей главной книги о Камчатке, содержащей, среди прочего, в том числе и научное описание самого мощного за последние несколько столетий камчатского землетрясения 17.10.1737 г. с $M_W = 9$; в-четвертых — Лиссабонское землетрясение 1 ноября 1755 г.

Авторы признательны Д. Р. Акмановой и Н. А. Осиповой за помощь при сборе материала к рисункам и их изготовлении.

Литература

1. Аносов Г. И., Константинова Т. Г., Делемень И. Ф. Некоторые сведения о крутильных деформациях при землетрясениях в связи с развитием методов сейсмического микрорайонирования и усиления зданий // Вихри в геологических процессах. — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. — С. 246–252.

2. Болт Б. Землетрясения. Общедоступный очерк. — М.: Мир, 1981. — 256 с.

3. Викулин А. В. О понятии и величине сейсмического риска // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1. — № 3. — С. 118–123.

4. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: ОМСП ГС РАН, 2003. — 150 с.

5. Викулин А. В. Волновая природа ротационного упругого поля литосферы // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: материалы Междунар. науч. конф., Новосибирск, 10–13 октября 2005 г. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2006. — С. 401–419.

6. *Моделирование* геодинамических процессов окраины Тихого океана / А. В. Викулин, Г. М. Водинчар, И. В. Мелекесцев [и др.] // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: сб. докл. IV междунар. конф., с. Паратунка Камчатской обл., 14–17 августа 2007 г. — Петропавловск-Камчатский: ИКИРР ДВО РАН, 2007. — С. 275–280.
7. *К землетрясению без риска* / А. В. Викулин, В. Н. Дроздюк, Н. В. Семенец, В. А. Широков. — Петропавловск-Камчатский: СЭТО-СТ, 1997. — 120 с.
8. *Войтов Г. И., Попов Е. А.* Геохимический прогноз землетрясений // *Природа. Землетрясения: уроки и проблемы.* — 1989. — № 12. — С. 60–64.
9. *Вокруг света.* — 2005. — № 7 (2778). — С. 42.
10. *Гир. Дж., Шах Х.* Зыбкая твердь. Что такое землетрясение и как к нему подготовиться. — М.: Мир, 1988. — 220 с.
11. *Диоген Лаэртский.* О жизни, учениях и изобретениях знаменитых философов. — М.: Мысль, 1979. — 622 с.
12. *Дроздюк В. Н.* Кручение зданий при землетрясениях // Вихри в геологических процессах. — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. — С. 257–259.
13. *Исаков А. Я.* Пионеры цивилизации. — Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2004. — 232 с.
14. *Испания:* путеводитель. — М.: Авангард, 2007. — 240 с.
15. *Клячко М. А.* Землетрясение и мы. — СПб.: Интеграф, 1999. — С. 34.
16. *Лобковский Л. И.* Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. — М.: Наука, 1988. — 251 с.
17. *Ломоносов М. В.* Слово о рождении металлов от трясения Земли // Избр. произведения. Т. 1. — М.: Наука, 1986. — С. 344–360.
18. *Неймар М.* История Земли. Общая геология. Т. 1. — СПб.: Просвещение, 1898. — 761 с.
19. *Никонов А. А.* Земля землетрясений // *Природа.* — 1989. — № 12. — С. 39–46.
20. *Никонов А. А.* «Ужасное потрясение» Европы. Лиссабонское землетрясение 1 ноября 1755 г. // *Природа.* — 2005. — № 11. — С. 21–29.
21. *Панченко Н., Семашко А.* Саламанка — город-университет // *Вокруг света.* — 2006. — № 2 (2785). — С. 114–129.
22. *Португалия.* — М.: Вокруг света, 2006а. — 292 с.
23. *Португалия.* — М.: Аякс-Пресс, 2006б. — 96 с.
24. *Рихтер Ч.* Элементарная сейсмология. — М.: Иностран. лит., 1963. — 670 с.
25. *Соловьев С. Л.* Основные данные о цунами на тихоокеанском побережье СССР 1737–1976 гг. // Изучение цунами в открытом океане. — М.: Наука, 1978. — С. 61–136.
26. *Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 г.* — Ташкент: Фан, 1971. — 672 с.
27. *Duda S. J.* Strain release in the Circum-Pacific belt, Chile 1960 // *J. Geophys. Res.* — 1963. — № 68. — P. 5531–5544.

А. В. Викулин¹, С. А. Викулина²

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

² Камчатский филиал Геофизической службы РАН

АФТЕРШОКИ И ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА* AFTERSHOKS AND DOPLER'S EFFECT

It is shown that the frequency and the velocity of aftershocks in the strongest earthquake areas split by means Doppler effect connecting by Earth's rotation.

Введение

Сейсмический процесс в очаге землетрясения продолжается вполне определенное, отличное от нуля время, и это отличие становится тем заметнее, чем больше магнитуда землетрясения. Для наиболее сильных землетрясений, магнитуды и размеры очагов которых достигают наибольших значений ($M_W = 9-9,5$, $L = 1\,000-3\,000$ км), интенсивный афтершоковый процесс продолжается в течение многих дней, недель и даже месяцев [10, 15]. При этом сейсмичность всего региона (островной дуги), а часто и всей планеты в целом оказывается сосредоточенной исключительно в пределах только очага большого землетрясения и практически равна нулю за его пределами. Таким образом, пространственно-временные закономерности распределения афтершоков в очагах больших землетрясений отражают региональные и планетарные особенности сейсмического процесса Земли.

Установлено, что в очагах больших землетрясений достаточно сильные форшоки и афтершоки закономерным образом перемещаются — мигрируют. Скорости миграции наиболее сильных форшоков и афтершоков достигают «звуковых» значений $\approx 0,1-1$ км/с [6, 7, 20, 23] и имеют тенденцию увеличиваться с ростом их магнитуд [2, 3]. Как видим, сейсмический процесс в очагах больших землетрясений представляет собой растянутый в течение продолжительного отрезка времени процесс выделения упругой энергии, который с достаточно высокими скоростями в определенных направлениях (вдоль очагов больших землетрясений) «перемещается» (мигрирует) в пределах сейсмофокальной зоны на большие расстояния.

Сейсмофокальные зоны, в пределах которых располагаются очаги больших землетрясений, являясь составной частью литосферы, вместе со всей планетой участвуют во вращательном движении вокруг ее оси. Линейные скорости движения поверхности Земли в местах интенсивного проявления сейсмического процесса (в диапазоне экватор \pm средние широты) достигают значений, по величинам сравнимых со скоростями миграции форшоков и афтершоков в очагах больших землетрясений. Поэтому можно ожидать, что вследствие эффекта Доплера, связанного с вращением Земли, направленное перемещение форшоков и афтершоков в ориентированных вдоль широт и долгот очагах больших землетрясений будет характеризоваться разными значениями и частот, и скоростей их миграции.

Методика исследования

Подробно методика исследования описана в работе [3], и кратко суть ее сводится к следующему: исследовался афтершоковый процесс пяти наиболее сильных ($M_W \approx 9$) за последнее столетие землетрясений планеты, очаги которых были вытянуты в «широтном» (*latitude*) и «долготном» (*longitude*) направлениях, имели протяженность около 1000 км и более. Такие землетрясения будем называть большими. Очаги трех землетрясений имели «широтное» (*la*) простираание и располагались вдоль Алеутских островов: 09.03.1957 г., $M = 8,8$, $N_{1,2} = 421,9$, $\varphi = 52^\circ \pm 2^\circ$, $\Delta\lambda = 18^\circ$ (179° в. д. — 163° з. д.); 28.03.1964 г., $M = 9,0$, $N_{1,2} = 213$, (8), $\varphi = 58^\circ \pm 2^\circ$, $\Delta\lambda = 15^\circ$ (142°–157° з. д.) и 04.02.1965 г., $M = 8,7$, $N_{1,2} = 284,3$, $\varphi = 52^\circ \pm 2^\circ$, $\Delta\lambda = 10^\circ$ (170° в. д. — 180°).

* 11 (225). Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 300–311.

Очаги двух «долготных» землетрясений располагались (l_0) вдоль тихоокеанского побережья Южной Америки: Чилийское землетрясение 20.05.1960 г., $M = 9,5$, $N_{1,2} = 63,5$, $\lambda = 70^\circ \pm 5^\circ$ з. д., $\Delta\varphi = 40^\circ$ (10° – 50° ю. ш.); в Индийском океане: землетрясение Суматра 26.12.2004 г., $M = 9,0$, $N_{1,2} = 675,4$, $\lambda = 98^\circ \pm 5^\circ$ в. д., $\Delta\varphi = 22^\circ$ (7° ю. ш. — 15° с. ш.). Здесь $N_{1,2}$ — числа афтершоков соответственно с $M \geq 5$ и $M \geq 7,0$ ($M \geq 6,5$). После этих землетрясений интенсивные собственные колебания планеты регистрировались в течение месяца.

Данные о временах и координатах эпицентров главных толчков и их афтершоков использовались из следующих источников: для землетрясения 1957 г. — из каталога NEIC [22]; для землетрясений 1960–2004 гг. — из каталога ISC [19]. Данные об афтершоках с магнитудами $5 \leq M < 6$ землетрясений 1964 и 1965 гг. дополнялись данными из каталога [1]. Развитие форшокового и афтершокового процессов в очагах широтного Аляскинского (1964 г.) и долготного Чилийского (1960 г.) землетрясений представлено соответственно на рис. 1, *a* — *в*.

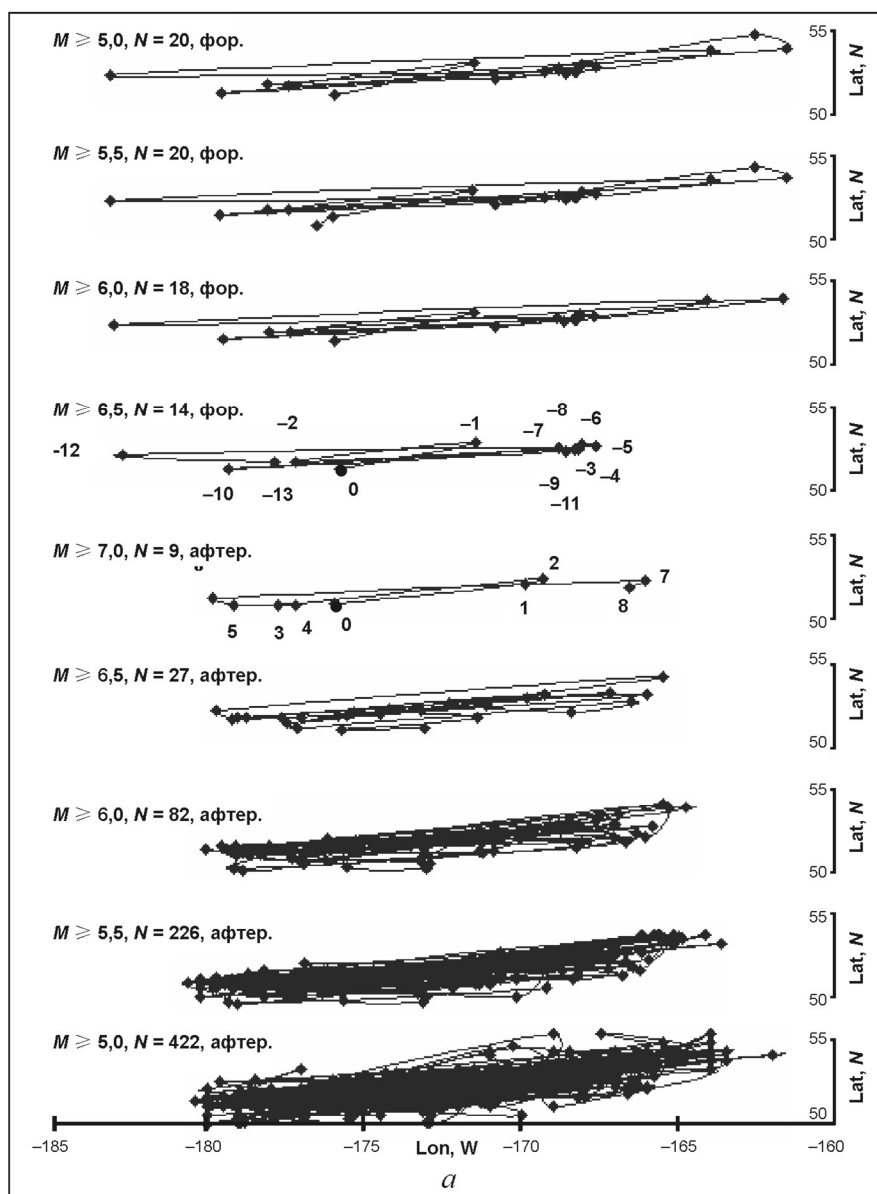


Рис. 1. Развитие афтершокового (афтер.) и форшокового (фор.) процессов в очагах Аляскинского 1964 г. (*a*) и Чилийского 1960 г. (*б*, *в*) землетрясений на различных магнитудных уровнях (окончание см. на с. 111)

Цифрами обозначены последовательные во времени афтершоки (положительные числа) и форшоки (отрицательные числа), 0 — положения главных толчков

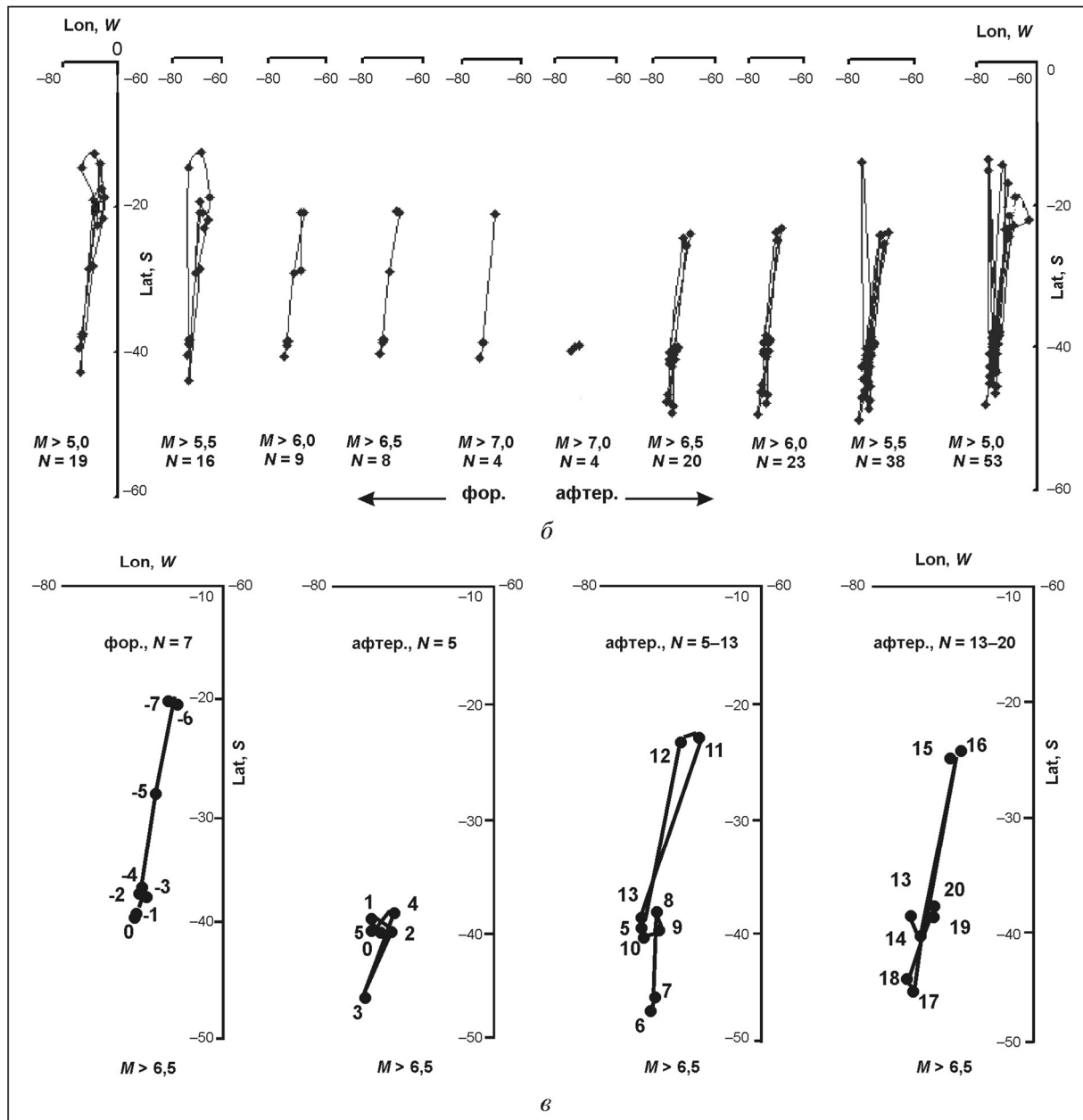


Рис. 1. Окончание (начало см. на с. 110)

Видно, что распределения сильных форшоков и афтершоков в очагах сильнейших землетрясений в пространстве и во времени неслучайны. Такие распределения, рассматриваемые совместно с эпицентрами главных толчков, с одной стороны, определяют формирование очага на стадии форшоков и его последующее развитие на стадии афтершоков. С другой стороны, они характеризуют сейсмичность брешей, являющихся составными частями («элементарными» кирпичиками) сейсмического процесса в пределах всего сейсмического пояса. Видно, что характерной особенностью таких распределений является колебательный процесс с амплитудой, близкой протяженностям очагов сильнейших землетрясений — сейсмических брешей, или элементарных сейсмофокальных блоков. Достаточно сильные форшоки не отмечены в очагах Суматринского землетрясения (2004 г.), а также землетрясения на Алеутских островах (1965 г.). Поэтому в дальнейшем мы ограничимся анализом распределения только афтершоков.

Методом наименьших квадратов для совокупностей афтершоков $M \geq 5$, $M \geq 5,5$, ..., $M \geq 7,0$ в каждом из исследуемых очагов землетрясений определялись зависимости частот ν (обратных временных интервалов между последовательными во времени афтершоками) и скоростей V от времени t :

$$\text{Lg } v \text{ [ч}^{-1}\text{]} = a \text{ Lg } t \text{ [ч]} + b, \quad (1)$$

$$\text{Lg } V \text{ [км/ч]} = A \text{ Lg } t \text{ [ч]} + B. \quad (2)$$

Примеры зависимостей (1) и (2), построенных для афтершоков в очагах Алеутского (1957 г.), Чилийского (1960 г.), Аляскинского (1964 г.) и Суматринского (2004 г.) землетрясений, приведены на рис. 2.

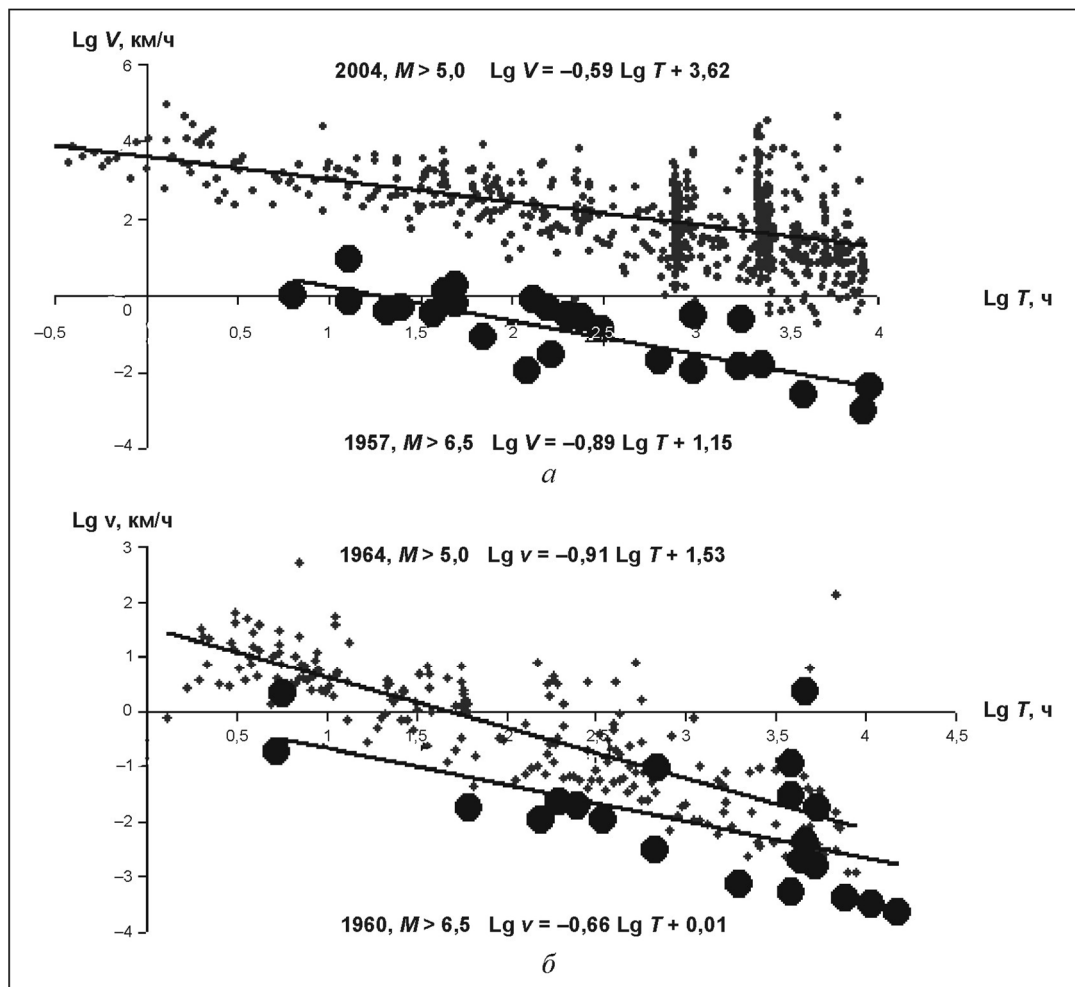


Рис. 2. Примеры зависимостей для частот V (повторяемостей) и скоростей V афтершоков от времени, полученные на магнитудных уровнях $M \geq 5$ и $M \geq 6,5$ для Алеутского 1957 г. и Суматринского 2004 г. (а), Чилийского 1960 г. и Аляскинского 1964 г. (б) землетрясений

Значения коэффициентов A , a и разностей $B - b$ для частот и скоростей афтершоков во всех анализируемых очагах сильнейших землетрясений представлены в табл. 1, 2, из которых видно, что справедливы следующие равенства:

$$A^{lo} \approx a^{lo} \approx 0,62 \pm 0,09, A^{la} \approx a^{la} \approx 0,92 \pm 0,07, (B - b)^{lo} \approx (B - b)^{la} \approx 2,26 \pm 0,15. \quad (3)$$

Из равенств (3) видно, что имеют место следующие равенства коэффициентов: «наклонов» (первые два равенства в (3)) и «свободных членов» (третье равенство в (3)). Это для широтно- и долготно-ориентированных очагов больших землетрясений определяет постоянную

$$\left(\frac{V}{v} \right)_{lo, la} = \text{const} = 10^{B-b} = L_{lo} = L_{la} = 180 (130 \div 260) \text{ км}, \quad (4)$$

которая не зависит от ориентации сейсмофокальных зон.

Таблица 1

Параметры (a , A ; $B - b$) корреляционных зависимостей, определяющих частоты и скорости миграции (осцилляций) афтершоков в пределах «долготных» очагов больших землетрясений планеты с $M_W \approx 9$ в 1957–2004 гг.

| Магнитуда M_S афтершоков | «Долготные» (l_o) очаги землетрясений | | | | |
|----------------------------|---|---|----------------------------------|---|---|
| | Чили, 1960 г., $M_W = 9,5$ | | Суматра, 2004 г., $M_W = 9,0$ | | Средние $a^{l_o} / A^{l_o} / (B - b)^{l_o}$ |
| | N | $a^{l_o} / A^{l_o} / (B - b)^{l_o}$ | N | $a^{l_o} / A^{l_o} / (B - b)^{l_o}$ | |
| $\geq 5,0$ | 63 | -0,62 / -0,34 / 1,82 | 674 | -0,49 / -0,61 / 2,36 | -0,56 \pm 0,06 / -0,48 \pm 0,13 / 2,09 \pm 0,27 |
| $\geq 5,5$ | 44 | -0,71 / -0,44 / 1,88 | 195 | -0,69 / -0,82 / 2,45 | -0,70 \pm 0,01 / -0,63 \pm 0,19 / 2,17 \pm 0,28 |
| $\geq 6,0$ | 28 | -0,62 / -0,38 / 1,88 | 49 | -0,77 / -0,78 / 2,21 | -0,70 \pm 0,07 / -0,58 \pm 0,20 / 2,05 \pm 0,17 |
| $\geq 6,5$ | 21 | -0,66 / -0,46 / 1,97 | 12 | -0,66 / -0,77 / 2,57 | -0,66 \pm 0,00 / -0,62 \pm 0,15 / 2,27 \pm 0,30 |
| $\geq 7,0$ | 4 | -0,68 / (0,28) / (0,64) | 4 | -0,95 / -0,89 / 2,56 | -0,81 \pm 0,06 / -0,89 / 2,56 |
| Средние $a / A / B - b$ | | -0,66 \pm 0,03 / -0,41 \pm 0,04 / 1,89 \pm 0,04 | | -0,71 \pm 0,12 / -0,77 \pm 0,07 / 2,43 \pm 0,08 | -0,69 \pm 0,08 / -0,64 \pm 0,10 / 2,33 \pm 0,19 |

Примечание. Значения в скобках не учитывались ввиду их больших отличий от средних значений, превышающих утроенное среднеквадратичное отклонение.

Таблица 2

Параметры (a , A ; $B - b$) корреляционных зависимостей, определяющих частоты и скорости миграции (осцилляций) афтершоков в пределах «широтных» очагов больших землетрясений планеты с $M_W \approx 9$ в 1957–2004 гг.

| Магнитуда M_S афтершоков | «Широтные» (l_a) очаги землетрясений Алеутских островов | | | | | | |
|----------------------------|---|---|------------------------------|---|-------------------------------|---|---|
| | Андреяновские, 1957, $M_W = 8,8$ | | Аляска, 1964, $M_W = 9,0$ | | Амчитка, 1965, $M_W = 8,7$ | | Средние $a^{l_a} / A^{l_a} / (B - b)^{l_a}$ |
| | N | $a^{l_a} / A^{l_a} / (B - b)^{l_a}$ | N | $a^{l_a} / A^{l_a} / (B - b)^{l_a}$ | N | $a^{l_a} / A^{l_a} / (B - b)^{l_a}$ | |
| $\geq 5,0$ | 422 | -0,69 / -0,67 / 2,2 | 213 | -0,91 / -0,91 / 2,01 | 283283 | -0,85 / -0,84 / 2,00 | -0,82 \pm 0,08 / -0,88 \pm 0,08 / 2,07 \pm 0,09 |
| $\geq 5,5$ | 226 | -0,84 / -0,80 / 2,12 | 75 | -0,94 / -0,87 / 1,94 | 83 | -0,88 / -0,87 / 2,02 | -0,89 \pm 0,04 / -0,85 \pm 0,03 / 2,03 \pm 0,06 |
| $\geq 6,0$ | 81 | -0,85 / -0,82 / 2,10 | 23 | -0,92 / -1,02 / 2,13 | 20 | -0,93 / -0,91 / 2,19 | -0,90 \pm 0,03 / -0,92 \pm 0,04 / 2,14 \pm 0,03 |
| $\geq 6,5$ | 26 | -1,01 / -0,88 / 2,12 | 8 | -0,92 / -1,02 / 2,48 | 7 | -1,01 / -1,23 / 2,48 | -0,98 \pm 0,04 / -1,04 \pm 0,14 / 2,36 \pm 0,16 |
| $\geq 7,0$ | 8 | -0,82 / -1,10 / 2,66 | — | — — — | 3 | -1,00 / -0,92 / 1,81 | -0,91 \pm 0,09 / -1,01 \pm 0,09 / 2,24 \pm 0,43 |
| Средние $a / A / B - b$ | | -0,84 \pm 0,07 / -0,86 \pm 0,11 / 2,24 \pm 0,19 | | -0,92 \pm 0,01 / -0,96 \pm 0,07 / 2,14 \pm 0,17 | | -0,93 \pm 0,07 / -0,89 \pm 0,03 / 2,10 \pm 0,19 | -0,90 \pm 0,06 / -0,93 \pm 0,08 / 2,19 \pm 0,11 |

Моментная природа сейсмического процесса

В работе [6] в результате анализа распределения афтершоков с $M \geq 5$ для очага Кроноцкого землетрясения (Камчатка, 05.12.1997 г., $M = 7,8$) аналогичным образом была получена оценка такой же величины, которая определилась как

$$\left(\frac{V}{v}\right)_{45^\circ} = L_{45^\circ} = 150 \pm 50 \text{ км.} \quad (5)$$

Как видим, она оказалась близка значениям L_{lo} и L_{la} . Очаг Кроноцкого землетрясения расположен в северо-восточной части Курило-Камчатской дуги, простирающейся примерно под углом 45° к широте (что отражено нижним индексом в выражении (5)). Как видим, на основании выражений (4) и (5) имеет место равенство

$$L_{lo} = L_{la} = L_{45^\circ} \approx L_0, \quad (6)$$

которое фактически определяет константу, не зависящую от ориентации сейсмофокальной зоны.

Очаги больших землетрясений состоят из совокупностей субочагов, и размеры каждого составляют в среднем 200 (100–300) км [8, 12, 17, 18, 21]. Очаг Кроноцкого землетрясения имеет «простое» строение — он представлен одним сейсмофокальным блоком с протяженностью, близкой L_{45° . Поэтому величину L_0 , являющуюся, по сути, «элементарным» сейсмофокальным блоком, можно считать *не зависящей от его ориентации*.

В этой связи величина L_0 является не просто константой. В соответствии с гипотезой геолога А. В. Пейве (1961) такая константа, как величина, имеющая «самостоятельную движущую силу», по сути, является *инвариантной к поворотам* и тем самым определяет физическую сущность сеймотектонического процесса — его *моментную природу*. В соответствии с гипотезой физика М. А. Садовского [14] элементарный сейсмофокальный блок L_0 имеет иерархическую структуру, ячейки которой для форшоков и афтершоков магнитудного диапазона $5 \leq M \leq 7$ имеют размеры $10 \leq L_i \text{ [км]} \leq 50$.

Колебания Чандлера

Значения скоростей и частот «широтных» афтершоков $A^{lo} = a^{lo}$ (первые равенства в формуле (3)) с высокой (не менее двух-трехкратного среднеквадратичного отклонения, т. е. 95–98%) статистической значимостью отличаются от таких же «долготных» значений $A^{la} = a^{la}$ (вторые равенства в формуле (3)). Это позволяет предположить, что интенсивность сейсмического процесса, протекающего в очаге сильнейшего землетрясения (форшоки + главный толчок + афтершоки), *взаимосвязана* с его ориентацией относительно географической широты или относительно оси вращения планеты. Новизна этого вывода определяется сформулированным нами положением о «собственной» моментной природе геодинамического процесса, существенно дополняющим и даже во многом «переворачивающим» наши представления о той «ведущей» роли, которую ротация планеты оказывает на тектонические процессы.

В рамках существующих в настоящее время представлений принято считать, что «триггерами» геодинамических процессов часто являются резкие изменения угловой скорости вращения Земли. Сформулированный нами вывод о «собственной» моментной природе сеймотектонического процесса позволяет предположить существование и обратного процесса, а именно: изменение скорости вращения Земли может быть вызвано тем или иным геодинамическим явлением. Доказательство этого было приведено нами ранее в работе [5]. В этой работе в рамках волновой ротационной модели тектонического процесса, опирающейся на представления о движении блоков и плит под действием «собственных моментов», колебания Чандлера напрямую удалось связать с разной интенсивностью сеймотектонического процесса, протекающего в пределах «долготного» Тихоокеанского и «широтного» экваториального Альпийско-Гималайского поясов как целых. Другими словами, разность между «долготными» и «широтными» коэффициентами в формуле (3), по сути, определяет величину вызывающего колебания Чандлера момента, «прикладываемого» к планете разными по интенсивности Тихоокеанским и Альпийско-Гималайским сеймотектоническими процессами.

Эффект Доплера

Волновая природа сейсмического процесса позволяет предположить, что вследствие связанного с вращением Земли эффекта Доплера значение «широтной» скорости (и частоты повторения) форшоков и афтершоков должно «расщепляться» на два, в то время как такое же значение «долготной» величины — нет. При этом вследствие увеличения значения скорости миграции афтершоков с ростом их магнитуд [2, 4] эффект расщепления должен быть все более значимым. Так, при $M = 7$ и соответствующей такой магнитуде скорости миграции $V_{M=7} \approx 1$ км/с [2, 24] теоретическая (*theoretical, th*) оценка величины ее расщепления на широте очагов алеутских землетрясений 1957, 1964 и 1965 гг. $\varphi = 50^\circ \div 60^\circ$ с. ш. составит:

$$\delta_{th} = \frac{2V_\Omega}{V_{M=7}} = \frac{2R_{Earth}\Omega}{V_{M=7}} \sin(90^\circ - \varphi) = 0,54 \pm 0,08, \quad (7)$$

где R_{Earth} — радиус Земли; Ω — ее угловая скорость вращения.

Для проверки влияния эффекта Доплера на процесс миграции землетрясений продолжим анализ представленных последовательностей сильных афтершоков в очагах последних сильнейших землетрясений планеты, очаги которых имели «широтную» и «долготную» протяженности (см. табл. 1, 2). Для этого каждая из совокупностей афтершоков разбивалась на две совокупности. В одну включались данные об афтершоках, эпицентры которых располагались к востоку (East — West, *ew*), к югу (South — North, *sn*) от предыдущих по времени эпицентров для широтных (долготных) очагов, а в другую — к западу (West — East, *we*), к северу (North — South, *ns*) для широтных (долготных) соответственно. Для каждой из совокупностей определялись описанным выше способом зависимости скоростей и частот от времени. Данные, характеризующие параметры этих зависимостей, представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Значения параметров $a_{sn,ns}^{lo}$ корреляционной зависимости, определяющих частоты миграции афтершоков в пределах «долготных» очагов землетрясений планеты с $M_W \approx 9$

| Магнитуда M_S афтершоков | «Долготные» очаги землетрясений | | | | Среднее |
|----------------------------|---------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------|
| | Чили, 1960 $M_W = 9,5$ | | Суматра, 2004 $M_W = 9,0$ | | |
| | <i>N</i> | a_{ns}^{lo} | <i>N</i> | a_{ns}^{lo} | |
| Север — юг (<i>ns</i>) | | | | | |
| $\geq 5,0$ | 32 | -0,67 | 343 | -0,50 | $-0,59 \pm 0,09$ |
| $\geq 5,5$ | 19 | -0,80 | 100 | -0,69 | $-0,75 \pm 0,05$ |
| $\geq 6,0$ | 14 | -0,83 | 26 | -0,84 | $-0,84 \pm 0,01$ |
| $\geq 6,5$ | 13 | -0,43 | 7 | -0,46 | $-0,45 \pm 0,02$ |
| $\geq 7,0$ | — | — | — | — | — |
| Среднее | | -0,68 | | -0,62 | $-0,66 \pm 0,04$ |
| Юг — север (<i>sn</i>) | | | | | |
| $\geq 5,0$ | 31 | -0,57 | 331 | -0,48 | -0,53 |
| $\geq 5,5$ | 25 | -0,62 | 95 | -0,68 | -0,65 |
| $\geq 6,0$ | 14 | -0,40 | 23 | -0,65 | -0,53 |
| $\geq 6,5$ | 8 | -0,92 | 5 | -0,67 | -0,79 |
| $\geq 7,0$ | — | — | 3 | -0,92 | -0,92 |
| Среднее | | $-0,63 \pm 0,12$ | | $-0,68 \pm 0,10$ | $-0,68 \pm 0,11$ |

Из данных табл. 3 видно, что значения $a_{sn,ns}^{lo}$ для «долготных» очагов не зависят от направления «движения» афтершоков $a_{ns}^{lo} = a_{ns}^{lo} = -0,67 \pm 0,07$ и $a^{lo} = A^{lo} = -0,67 \pm 0,09$.

Из данных табл. 4 видно, что значения $A_{we,ew}^{la}$, определенные во всем анализируемом диапазоне магнитуд, также не зависят от направления движения афтершоков $A_{we}^{la} = -0,91 \pm 0,16 \approx A_{ew}^{la} = -0,88 \pm 0,09$ (в среднем $A_{we}^{la} \approx A_{ew}^{la} \approx -0,90 \pm 0,12$) и, согласно данным табл. 1 и 2, $(a^{la})_0 = -0,90 \pm 0,06 \approx (A^{la})_0 = -0,93 \pm 0,08$ (в среднем $(a^{la})_0 \approx (A^{la})_0 \approx -0,91 \pm 0,07$). В то же время, как видно из данных табл. 4, для всех трех «широтных» очагов значения коэффициентов A_{we}^{la} монотонно уменьшаются с ростом магнитуд и при $M \geq 6,5-7,0$ достигают значений $A_{we}^{la} = -1,11 \pm 0,03$ и менее. Тем самым «расщепление» значений коэффициентов при $M \geq 6,5-7,0$ достигает значений $\Delta_1 = (A^{la})_0 - A_{we}^{la} \approx 0,21 \pm 0,03$.

Уменьшение значений A_{ew}^{la} с ростом магнитуды, как видно из данных табл. 4, в среднем статистически не значимо. При этом в диапазоне магнитуд $5,5 \leq M \leq 6,5-7,0$ с ростом магнитуды имеет место достаточно устойчивое увеличение значений этого коэффициента для очага землетрясения 1957 г. Тенденция к увеличению значения коэффициента A_{ew}^{la} имеет место и для Аляскинского землетрясения 1964 г. в области магнитуд $5,0 \leq M \leq 5,5$. Как видим, данные, «синтезированные» на основании двух наиболее сильных широтных землетрясений — Андреяновского (1957 г.) и Аляскинского (1964 г.), определяют достаточно устойчивое и статистически значимое уменьшение значений коэффициента A_{ew}^{la} во всем магнитудном диапазоне $5,0 \leq M \leq 7,0$. При этом для магнитудного диапазона $M \geq 6,5-7,0$ справедливо равенство $\Delta_2 = (A^{la})_0 - A_{ew}^{la} \approx -0,21 \pm 0,07$.

Таблица 4

Значения параметров $A_{we,ew}^{la}$ корреляционной зависимости, определяющих скорости миграции афтершоков в пределах «широтных» очагов землетрясений планеты с $M_W \approx 9$

| Магнитуда M_S афтершоков | «Широтные» (la) очаги землетрясений | | | | | | |
|-----------------------------|---|------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------|
| | Андреяновские, 1957 г. $M_W = 8,8$ | | Аляска, 1964 г. $M_W = 9,0$ | | Амчитка, 1965 г. $M_W = 8,7$ | | Среднее |
| | N | A_{we}^{la} | N | A_{we}^{la} | N | A_{we}^{la} | |
| С востока на запад (we) | | | | | | | |
| $\geq 5,0$ | 208 | -0,61 | 110 | -0,90 | 144 | -0,88 | $-0,80 \pm 0,12$ |
| $\geq 5,5$ | 115 | -0,72 | 40 | -0,94 | 43 | -0,89 | $-0,85 \pm 0,09$ |
| $\geq 6,0$ | 42 | -0,83 | 15 | -1,03 | 11 | -0,97 | $-0,94 \pm 0,08$ |
| $\geq 6,5$ | 13 | -1,08 | 4 | -1,13 | — | — | $-1,11 \pm 0,03$ |
| $\geq 7,0$ | 4 | -2,27 | — | — | — | — | -2,27 |
| Среднее | | $-0,81 \pm 0,41$ | | $-1,00 \pm 0,11$ | | $-0,91 \pm 0,04$ | $-0,91 \pm 0,16$ |
| С запада на восток (ew) | | | | | | | |
| $\geq 5,0$ | 212 | -0,72 | 102 | -0,92 | 139 | -0,81 | $-0,82 \pm 0,07$ |
| $\geq 5,5$ | 111 | -0,88 | 35 | -0,73 | 40 | -0,87 | $-0,83 \pm 0,06$ |
| $\geq 6,0$ | 39 | -0,81 | 8 | -1,11 | 8 | -0,88 | $-0,93 \pm 0,12$ |
| $\geq 6,5$ | 13 | -0,69 | 3 | -1,17 | 5 | -1,10 | $-0,99 \pm 0,20$ |
| $\geq 7,0$ | 4 | -0,72 | — | — | — | — | -0,72 |
| Среднее | | $-0,76 \pm 0,06$ | | $-0,98 \pm 0,16$ | | $-0,89 \pm 0,08$ | $0,88 \pm 0,09$ |

Таким образом, полученные данные показывают, что для двух (из трех рассмотренных) наиболее сильных и протяженных широтноориентированных очагов больших землетрясений экспериментально (*experimental, ex*) определенная величина расщепления составляет:

$$\delta_{ex} \approx \left| \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{A_{we,ew}^{la}} \right| = \frac{0,42 \pm 0,10}{0,90 \pm 0,12} = 0,5 \pm 0,1. \quad (8)$$

Полученное соотношение (8) показывает, что имеет место равенство между теоретической (7) и реально наблюдаемой (8) величинами:

$$\delta_{th} \approx 0,54 \pm 0,08 = \delta_{ex} \approx 0,5 \pm 0,1,$$

что подтверждает наблюдаемое расщепление скоростей (частот) миграции афтершоков вдоль географической широты и позволяет объяснить его с помощью эффекта Доплера, связанного с вращением Земли.

Заключение

В работе исследовались частоты ν и скорости V миграции афтершоков в очагах больших ($M_W \approx 9$) землетрясений. Показано, что значения ν и V зависят от ориентации очагов при их постоянном отношении

$$\frac{\nu}{V} = L_0 = \text{const},$$

т. е. в долготных очагах афтершоки происходят через меньшие интервалы времени (более часто) и мигрируют с большей скоростью, чем в широтных очагах. Подтверждена ранее [2, 4] предложенная гипотеза о «собственной моментной природе» сейсмофокальных блоков. Подтверждены выводы работ [5, 25], согласно которым разные интенсивности течения афтершокового процесса в долготных и широтных очагах больших землетрясений могут быть связаны с нутацией полюса Земли — колебаниями Чандлера. Приведены данные, показывающие возможность существования эффекта «расщепления» значений повторяемости афтершоков в очагах широтных больших землетрясений и дано его объяснение в рамках эффекта Доплера, связанного с вращением планеты.

Следует отметить, что близкие, по сути, эффекты обнаруживают движущиеся атомы и молекулы и в «обычных», с общепринятой физической точки зрения, телах, а не только в геолого- и геофизических [11, 14] средах, которые были рассмотрены в настоящей работе. Действительно, при высокой температуре и низкой плотности основной причиной расширения спектральных линий движущихся атомов газа является эффект Доплера [16, с. 522–524]. Тепловое движение приводит к тому, что у одной части атомов возникает составляющая скорости, направленная к наблюдателю, а у другой части атомов составляющая имеет противоположное направление. В результате спектральная линия, являющаяся суперпозицией линий, испускаемых многими атомами, вследствие эффекта Доплера расширяется [9, с. 134–136].

Как видим, аналогия между потоком атомов и сейсмическим процессом, на которую более 40 лет тому назад обратил внимание Ю. В. Ризниченко [13, с. 127–130], может быть продолжена и на «спектральном» уровне. В контексте настоящей работы аналогом теплового движения атомов могут являться «самосогласованные» волновые [2; 3; 24, р. 271–289] движения «элементарных» сейсмофокальных блоков L_0 и слагающих их иерархических ячеек L_i , расщепление спектральных линий движения которых и происходит вследствие эффекта Доплера, связанного с вращением планеты.

Автор признателен В. А. Широкову за важные смысловые замечания, которые помогли существенно улучшить работу.

Литература

1. Викулин А. В. О магнитудной классификации алеутских землетрясений // Прогноз сейсмической опасности на Дальнем Востоке. — Южно-Сахалинск: МСССС, 1984. — С. 95.
2. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003. — 150 с.
3. Викулин А. В. Волновая природа ротационного упругого поля литосферы // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: материалы науч. конф. с участием иностр. ученых, Новосибирск, 10–13 окт. 2005 г. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2006. — С. 401–419.
4. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. — 1998. — Т. 17. — № 6. — С. 95–103.
5. Викулин А. В., Кролевец А. Н. Чандлеровское колебание полюса и сеймотектонический процесс // Геология и геофизика. — 2001. — № 6. — С. 996–1009.

6. Викулин А. В., Сеньюков С. Л. Миграция форшоков и афтершоков в очаге Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. с $M = 7,5-7,7$ // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. — Петропавловск-Камчатский: Камчатская гос. акад. рыбопромыслового флота, 1998. — С. 80–88.
7. Вилькович Е. В., Губерман Ш. А., Кейлис-Борок В. И. Волны тектонических деформаций на крупных разломах // Докл. АН СССР. — 1974. — Т. 219. — № 1. — С. 77–80.
8. Геологическая история СССР и тектоника плит / ред. Л. П. Зоненшайн, Е. И. Приставакина. — М.: Наука, 1989. — 206 с.
9. Вихман Э. Квантовая физика. — М.: Наука, 1974. — 416 с.
10. Иванов В. В. Эволюция процессов землетрясения // Успехи физ. наук. — 1991. — Т. 161. — № 3. — С. 31–67.
11. Пейве А. В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. геологическая. — 1961. — № 3. — С. 36–54.
12. Ребецкий Ю. Л., Маринин А. В. Неоднородность напряженного состояния в геосреде при подготовке Суматринского землетрясения 26.12.2004 г. // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: материалы науч. конф. с участием иностр. ученых, Новосибирск, 10–13 окт. 2005 г. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2006. — С. 427–437.
13. Ризниченко Ю. В. Проблемы сейсмологии: избр. тр. — М.: Наука, 1985. — 408 с.
14. Садовский М. А. Новая модель геофизической среды // Bulgarian Geophys. J. — 1986. — Vol. XII. — № 2. — P. 3–10.
15. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 121–150.
16. Цань Сюэ-сень. Физическая механика. — М.: Мир, 1965. — 544 с.
17. Daly M. C. Correlation between Nazka-Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador // Tectonics. — 1989. — Vol. 8. — № 4. — P. 769–790.
18. Geist E. L., Childs J. R., Scholl D. W. The origin of basins of the Aleutian ridge: implications for block rotation of an arc massif // Tectonics. — 1988. — Vol. 7. — № 2. — P. 327–341.
19. ISC: International Seismological Centre // On-Line Bulletin. — URL: <http://www.isc.as.uk>
20. Mogi K. Migration of seismic activity // Bull. of the Earthquake Res. Inst. — 1968. — Vol. 46. — P. 53–74.
21. Mogi K. Some features of recent seismic activity in and near Japan. Activity before and after great earthquakes // Bull. of the Earthquake Res. Inst. — 1969 — Vol. 47. — P. 395–417.
22. NEIC: Earthquake Search Results. US Geological Survey. Earthquake Data Base. — URL: http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/recenteqsww/Quakes_all.php.
23. Plafker G., Savage J. C. Mechanism of the Chilean earthquake of May 21–22, 1960 // Bull. Geol. Soc. Amer. — 1970. — Vol. 81. — № 4. — P. 1001–1030.
24. Vikulin A. V. Earth rotation, elasticity and geodynamics: earthquake wave rotary model // Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects / eds. R. Teisseyre, M. Takeo, E. Majewski. — Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006. — P. 273–289.
25. Vikulin A. V., Krolevets A. N. Seismotectonic processes and the Chandler oscillation // Acta Geoph. Polonica. — 2002. — Vol. 50. — № 3. — P. 395–411.

А.В. Викулин¹, С.А. Викулина², Г.М. Водинчар³

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

² Камчатский филиал Геофизической службы РАН

³ Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ-ДУПЛЕТЫ И ПАРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ — ЗАКОНОМЕРНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА *

Введение

На Средних Курилах 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. с интервалом в два месяца произошли два сильнейших землетрясения с $M = 8,2-8,3$, афтершоки которых, не перекрываясь, заполнили собой сейсмическую брешь, протягивающуюся от северо-восточной оконечности очага 07.09.1918 г., $M = 8,2$ (о. Симушир), до юго-западной оконечности очага 01.05.1915 г., $M = 8,3$ (о. Шиашкотан). Очаги обоих землетрясений были вытянуты вдоль дуги. Очаг первого из них располагался вблизи островов, второго — в районе оси глубоководного желоба. В течение всей истории инструментальных (конец XIX — начало XX вв.) и макросейсмических (середина XVIII в.) сейсмологических наблюдений для района Средних Курил пара землетрясений с такими высокими значениями магнитуд не отмечалась [2, 17, 25]. Более того, существовала достаточно распространенная точка зрения, согласно которой считалось, что в области Средних Курил землетрясения с $M > 7,5$ происходить не могут [22].

Противоположной точки зрения последовательно придерживались С. А. Федотов [23] и А. В. Викулин [4–7, 9]. Они полагали, что район Средних Курил является «обычной» сейсмической брешью, в пределах которой могут и должны происходить землетрясения с магнитудами $M = 8$ и более. Согласно схеме долгосрочного прогноза, основанного на принципах миграции и повторяемости землетрясений, сильнейшее землетрясение с магнитудой $M \geq 7,6-7,9$ и очагом в районе Средних Курил ожидалось в 2004–2013 гг. [4, 5, 7]. Для таких прогнозов были достаточно веские основания. Действительно, согласно данным ряда авторов землетрясение 29.06.1780 г. с очагом в районе Средних Курил было катастрофическим [1, 15, 16, 27]. Оно сопровождалось на о. Уруп сильными сотрясениями и цунами с высотой волны до 10–12 м [19, 20] и имело магнитуду $M = 8,25$ [20]. Этим данным не противоречит и значение магнитуды землетрясения 29.06.1780 г., приводимое в наиболее представительном для тех времен каталоге [17]: $M = 7,5 \pm 1,0$.

Существует (существовала?) и промежуточная точка зрения. Согласно ей район Средних Курил представляет собой «псевдобрешь, для которой период подготовки катастрофического землетрясения с $M \geq 7,75$ на глубинах до 100 км не может уложиться в рамки сейсмического цикла (140 ± 60 лет по [23])» [15], и изучение свойств этой бреши требует проведения дальнейших специальных исследований [16]. В работе [9, с. 65] показано, как в рамках ротационной волновой модели сейсмического процесса, в которых сейсмофокальная зона представляет собой однородный сейсмический пояс, в результате моментного взаимодействия блоков (очагов сильнейших землетрясений) могут быть сняты предположения о «псевдобреши».

Обращает на себя внимание факт, согласно которому в 1780 г. в районе Средних Курил, возможно, произошли два сильнейших землетрясения. Их магнитуды могли достигать и даже превышать значение $M = 8$. Отмеченное нами землетрясение 29.06.1780 г. предварялось толчком 19 января, который согласно работе [17] имел $M = 7,0 \pm 1,0$. Землетрясение 19.01.1780 г. ощущалось на Северных Курилах и Южной Камчатке как сильный толчок, в результате чего интенсивное цунами выбросило на берег судно, стоявшее в гавани на Камчатке [19]. Эти данные позволяют предположить, что два сильнейших события, произошедшие в ноябре 2006 г. и январе 2007 г., представляли собой характерную для района Средних Курил пару событий — дуплет: два толчка через малое время τ при небольшом расстоянии Δ между их очагами.

* 12 (230). Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. С. 145–149.

Землетрясения-дуплеты

Землетрясения-дуплеты происходят не часто. По данным за 1605–2007 гг., только в пределах Японии, Курил и Камчатки достаточно уверенно выделяется 12 таких дуплетов (см. табл. 1, № 1–12). Такие землетрясения-дуплеты нельзя считать случайными событиями. Действительно, времена между толчками в дуплете невелики. Согласно табл. 1 (№ 1–12) в среднем $\tau = 3 \pm 7$ месяцев ($0 \div 2$ года), что по величине на три порядка меньше характерного периода повторяемости таких землетрясений в одном месте (100 ± 50 лет) [6, 9] или продолжительности сейсмического цикла (140 ± 60 лет по [23] или 210 ± 50 лет по [9]). Малы и расстояния между их очагами, которые в среднем равны размеру одного очага землетрясения с $M \div 8$: $L_0 \approx 200 \pm 230$ км (табл. 1, № 1–12). Данные, представленные в табл. 1, показывают, что такие дуплеты, как и «обычные» землетрясения, имеют тенденцию повторяться в одном месте, например: события-дуплеты 1605, 1707, 1854 и 1944–1946 гг. в районе желоба Нанкай (Япония), 17.10.1737 и 1952 гг. на Южной Камчатке, 04.11–17.12.1737 и 1792 гг. на юге и севере Камчатки.

Таблица 1

Список японских (1, 2, 6, 9), курильских (7, 11–14) и камчатских (3–5, 8, 10) с $M \geq 8$ толчков-дуплетов, очаги которых располагались в непосредственной близости друг от друга

| № п/п | Дата | τ | $L_{1,2}$, км | L_0 , км | Δ , км | M | Регион | Источник |
|-------|---------------------------|--------------|--------------------|------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------------|
| 1 | 31.01.1605 | ~ 0 | 150 | 700 | 400 | 7,9 | Нанкай | [6, 10, 21, 24, 26] |
| 2 | 28.10.1707 | ~ 0 | 150–200 | 500 | 100–200 | 8,4 | Нанкай | [6, 10, 11, 21, 24] |
| 3 | 17.10.1737 | (~ 0) | 200–250 | 700 | 100–200 | 8,5–9,2 | Камчатка | [6, 11, 14, 17] |
| 4 | 04.11.1737– 17.12.1737 | 1,5 месяца | 100–150 100–200 | 1100 | 800 | 7,8 8,0 | Камчатка | [6, 14, 17] |
| 5 | 22.08.1792 | ~ 0 | 200 | 800 | 400 | 8,4–8,8 | Камчатка | [6, 14, 17] |
| 6 | 23.12.1854– 24.12.1854 | 1 день | 100–200 250 | 600 | 100–150 | 8,4 8,4 | Нанкай | [6, 10, 21, 24, 26] |
| 7 | 07.09.1918– 08.11.1918 | 2 месяца | 250–300 100–150 | 400 | ~ 0 | 7,9–8,3 7,8–8,0 | Южные Курилы | [17, 20, 23, 24, 26] |
| 8 | 03.02.1923– 24.02.1923 | 21 день | 200 130 | 400 | 100 | 8,5–8,7 7,7 | Камчатка | [3, 14, 23] |
| 9 | 07.12.1944– 21.12.1946 | 2 года | 150 250 | 500 | 50–100 | 8,0 8,0 | Нанкай | [6, 10, 21, 24, 26] |
| 10 | 04.11.1952 | 5 с | 200–250 | 600 | 150 | 8,5–9,0 | Камчатка | [11–14, 17, 18] |
| 11 | 13.10.1963 | 5 с | 150 | 300 | 0 | 8,1 | Южные Курилы | [12, 13, 17, 28] |
| 12 | 15.11.2006– 13.01.2007 | 2 месяца | 200–250 200–250 | 300 | Парал- лельны | 8,3 8,2 | Средние Курилы | [2, 25] |
| 13 | 19.01.1780– 29.06.1780 | 5 месяцев | 100? 200? | 300? | Парал- лельны? | 7,0 \pm 1,0 7,5–8,5 | Средние Курилы | [1, 16, 17, 19, 20, 27] |
| 14 | 21.06.1847– 11.1853 | 4,5 года | ? ? | ? | Парал- лельны? | 7,5 \pm 1,0 7,0 \pm 1,0 | Средние Курилы | [17] |

Примечание. Символ τ — время между толчками-дуплетами; $L_{1,2}$ — размеры очагов в дуплете; L_0 — общая протяженность макросейсмической области, затронутой толчками-дуплетами; Δ — расстояние между очагами в дуплете.

Приведенные макросейсмические данные, а также данные о цунами землетрясений 1780 г. (табл. 1, № 13) показывают, что они вполне могли бы быть парой событий, по сути, близкой землетрясениям-дуплетам 2006–2007 гг. (табл. 1, № 12). Согласно данным Нового каталога [17] к такому же ряду характерных для района Средних Курил землетрясений-дуплетов можно было бы отнести землетрясения 1847 и 1853 гг. (табл. 1, № 14).

Пары землетрясений

Список землетрясений-дуплетов без труда можно расширить в сторону увеличения расстояний между очагами землетрясений при такой же малой разности времен в паре. К такого рода очевидным парам событий, на которые много раз обращали внимание исследователи, могут быть отнесены следующие японо-курило-камчатские землетрясения, данные о которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Список пар японских, курильских и камчатских землетрясений, произошедших через малые отрезки времени на больших эпицентральных расстояниях друг от друга

| № п/п | Дата | τ_1 , месяцы | Регион | Δ_1 , км | M | Источник |
|-------|---------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------|----------------|---------------------------|
| 1 | 04.11.1737– 17.12.1737 | 1,5 | Камчатка Северные Курилы | 1000 | 7,8 7,5–8,0 | [6, 14, 17] |
| 2 | 01.05.1915– 31.07.1915 | 3 | Северные Курилы Камчатка | 700 | 8,1 7,8 | [6, 7, 14, 17, 23] |
| 3 | 03.02.1923– 01.09.1923 | 7 | Камчатка Япония | 2500 | 8,5 8,2 | [3, 6, 10, 14, 23] |
| 4 | 04.03.1952– 04.11.1952 | 8 | о. Хоккайдо Камчатка | 1400 | 8,3 8,5 | [6, 7, 14, 23, 24, 26] |
| 5 | 06.11.1958– 04.05.1959 | 6 | Южные Курилы Камчатка | 1300 | 8,2 7,6–8,0 | [6, 7, 3, 14, 23, 24, 26] |
| 6 | 11.08.1969– 22.11.1969 | 3,5 | Южные Курилы Камчатка | 1900 | 8,2 7,8 | [6, 7, 17, 23] |

Примечание. Символ τ_1 — время между землетрясениями в паре; Δ_1 — расстояние между очагами в паре.

Возникает вполне естественный вопрос: а не являются ли пары землетрясений и землетрясения-дуплеты проявлением некоего общего свойства сейсмического процесса? Один из возможных путей ответа на этот вопрос был обозначен в работах [8, 9, с. 64–65]. В работе [8] были рассмотрены все ($N = 39$) происшедшие в 1899–1994 гг. сильнейшие ($M \geq 7,5$ –7,9, очаги которых имеют тенденцию не перекрывать друг друга в течение сейсмического цикла [5, 7, 9]) землетрясения северо-западной окраины Тихого океана, включающей Японскую, Курило-Камчатскую и Алеутскую островные дуги. Каждому такому землетрясению в пределах всей окраины Тихого океана поставлено в соответствие такое сильнейшее землетрясение, которое произошло через небольшой (близкий τ) интервал времени $\tau_1 = 3 \pm 2$ месяца, $\tau_{1, \min} = 0$, $\tau_{1, \max} = 8,3$ месяца при среднем интервале между землетрясениями в выборке

$$\overline{\Delta T} = \frac{1994 - 1899}{N} \approx 3 \text{ года.}$$

Числа пар n , как функция расстояния L между очагами в паре, оказались распределенными вполне закономерным образом, что отражено на рисунке. При малых L выделяется первый (нулевой) максимум $n_0 = 5$, соответствующий землетрясениям-дуплетам с расстояниями между очагами в среднем (как и на основании данных табл. 1) $L_0 \approx 200$ км. Для землетрясений-пар ($N_1 = N - n_0 = 34$) выделяется достаточно четкая последовательность максимумов чисел $n_i = 11 (5 + 6)$, 4 (5), 3 (5), 3 (4), 2, 1, на долю которых приходится

$$\frac{\sum n_i}{N_1} \cdot 100 = 80 (74 - 85) \%$$

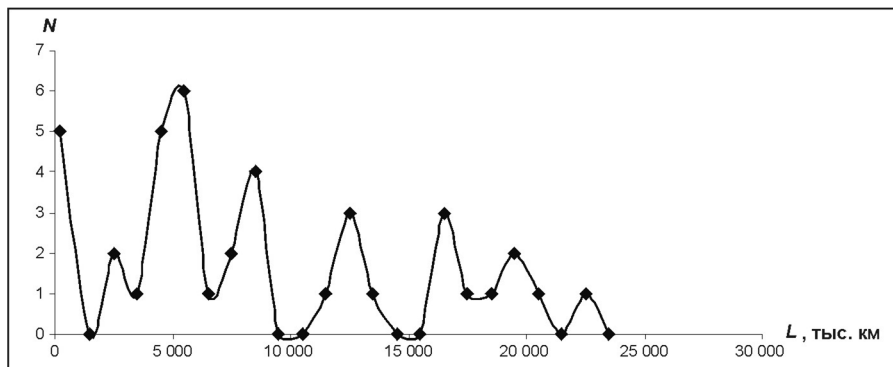
всех данных. Эти максимумы чисел n_i соответствуют парам землетрясений, очаги которых располагались друг от друга на расстояниях соответственно $L_i = 5\,000 \pm 1\,000$, $8\,000 \div 9\,000$, $12\,000 \div 13\,000$, $16\,000 \div 17\,000$, $19\,000 \div 20\,000$, $22\,000 \div 23\,000$ км.

Выводы

Полученные результаты показывают, что группирование землетрясений в дуплеты и пары является неслучайным и отражает вполне определенные пространственно-временные закономерности геомеханического процесса. Между дуплетами и парами, как можно видеть из данных табл. 1 и 2, нет существенной разницы. Данные, представленные в табл. 1 и 2, могут быть распространены на любые расстояния между очагами землетрясений в паре, включая и предельно большие, достигающие размеров, близких к половине протяженности всего сейсмического пояса. Например, в один и тот же день 17.08.1906 г. на расстоянии друг от друга 15 540 км произошли землетрясения в центральной части Алеутской дуги с $M = 8,0$ и в Чили с $M = 8,6$ [8]. На основании этих данных числа дуплетов и пар, по сути, определяют «мгновенный портрет» тихоокеанского сейсмотектонического пояса, который, очевидно, может быть проинтерпретирован как совокупность стоячих волн с длинами $L_i = iL_1$ или $L_i = L_1 + iL_1$, где $L_0 \approx 200$ км, $L_1 = 3\,000 \div 4\,000$ км, $i = 1, 2, \dots, 6$ (см. рис.).

Представляется, что пара сильных землетрясений 19.01.1780 г. и 29.06.1780 г. скорее всего является сильнейшими землетрясениями-дуплетами, очаги которых, как и очаги землетрясений 2006–2007 гг., заполнили собой сейсмофокальный объем Средних Курил. В таком случае землетрясения-дуплеты 1780 и 2006–2007 гг., по сути, являются близкими южнокамчатским сильнейшим дуплетам 17.10.1737 и 1952 гг.

Согласно данным работы [6] в районе Северных Курил 29.07.1854 г. между дуплетами 17.10.1737 г. и 1952 г. произошло сильнейшее землетрясение, которое сопровождалось ощутимыми сотрясениями и сильным цунами [17]. В этой связи вполне возможно, что и землетрясение 21.06.1847 г. с $M = 7,5 \pm 1,0$, а возможно, и пара землетрясений 21.06.1847 г. и 11.1853 г. с $M = 7,5 \pm 1,0$ с очагами в районе Средних Курил также являлись сильнейшими, заполнившими своими очагами сейсмофокальный объем Средних Курил. В таком случае значение повторяемости сильнейших дуплетов и пар землетрясений для района Средних Курил, равное 110 ± 30 лет, было бы близко значению повторяемости сильнейших землетрясений для всей окраины Тихого океана [9].



Числа N землетрясений-дуплетов и пар землетрясений как функция расстояния L между очагами

Сильнейший дуплет 15.11.2006 г. — 13.01.2007 г. и полученные в работе данные подтверждают точку зрения С. А. Федотова [5, 7, 23], Средние Курилы являются вполне обычной сейсмической брешью в пределах которой происходили и будут происходить в дальнейшем сильнейшие ($M \geq 7,5-7,9$ [5, 7, 9]) землетрясения. Отсюда также следует и другой вывод, согласно которому значения магнитуд курило-камчатских землетрясений XVIII–XIX вв., представленные в каталоге [17], скорее всего занижены на 0,5–1 единицу магнитуды, что, в частности, подтверждается данными работы [14].

Литература

1. Балакина Л. М. Шикотанское землетрясение 4 октября 1994 г. и Курило-Камчатская сейсмогенная зона // Шикотанское землетрясение 4(5).10.1994 г. Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений: информ.-аналит. бюл. Экстрен. вып. — М.: ФССН, 1994. — С. 42–51.
2. Бюллетень сейсмостанции «Петропавловск» [Электронный ресурс]. — URL: www.emsd.iks.ru

3. Викулин А. В. Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова // Вулканология и сейсмология. — 1986. — № 3. — С. 72–83.
4. Викулин А. В. Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана // Геофизические исслед. при решении геологических задач: сб. науч. тр. — Магадан: СВКНИИ АН СССР, 1989. — С. 43–57.
5. Викулин А. В. Феноменологическая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–824.
6. Викулин А. В. Миграция очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений и их повторяемость // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 46–61.
7. Викулин А. В. Южно-курильское землетрясение 4 октября 1994 г. как предвестник сильнейшего землетрясения на юге Камчатки // Вулканология и сейсмология. — 1996. — № 5. — С. 106–112.
8. Викулин А. В. Долгосрочный прогноз, миграция и пары землетрясений. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1996. — 32 с. — Препринт № 1.
9. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003. — 150 с.
10. Викулин А. В., Викулина С. А. Закономерности размещения очаговых областей сильнейших землетрясений в районе желоба Нанкай. — Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ РАН, 1989. — 44 с. — Препринт № 5.
11. Викулин А. В., Гусяков В. К., Титов В. В. О природе максимального цунами // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1. — № 3. — С. 131–134.
12. Викулин А. В., Чернобай И. П. Механизм очага Урупского (1963 г.) и Большого Камчатского (1952 г.) землетрясений // Динамические процессы в дискретных геофизических системах. — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1986а. — С. 58–66.
13. Викулин А. В., Чернобай И. П. О некоторых особенностях двух сильнейших курило-камчатских землетрясений // Физические поля и свойства горных пород Северо-Востока СССР. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1986б. — С. 44–59.
14. Гусев А. А., Шумилина Л. С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. — 2004. — № 3. — С. 34–42.
15. Кузин И. П., Лобковский Л. И., Соловьева О. Н. Об особенностях сейсмичности центральной части курильской гряды // Физика Земли. — 2001. — № 6. — С. 29–40.
16. Центрально-Курильская «брешь»: строение и сейсмический потенциал / Н. П. Лаверов, С. С. Лаппо, Л. И. Лобковский [и др.] // Докл. РАН. — 2006. — Т. 408. — № 6. — С. 1–4.
17. Новый каталог сильнейших землетрясений на территории СССР. — М.: Наука, 1977. — 536 с.
18. Попов Г. И. Об условиях образования цунами // Бюл. Совета по сейсмологии. — 1961. — № 9. — 59 с.
19. Цунами 4–5 ноября 1952 г. / Е. Ф. Саваренский, В. Г. Тищенко, А. Е. Святловский [и др.] // Бюл. Совета по сейсмологии. — 1958. — № 4. — 62 с.
20. Соловьев С. Л. Основные данные о цунами на тихоокеанском побережье СССР 1737–1976 гг. // Изучение цунами в открытом океане. — М.: Наука, 1978. — С. 61–136.
21. Соловьев С. Л., Го Ч. Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. — М.: Наука, 1974. — 310 с.
22. Тараканов Р. З., Ким Ч. У., Сухомлинова Р. И. Закономерности пространственного распределения гипоцентров Курило-Камчатского и Японского регионов и их связь с особенностями геофизических полей // Геофизические исслед. зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. — М.: Наука, 1977. — С. 67–77.
23. Федотов С. А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. — М.: Наука, 2005. — 302 с.
24. Mogi K. Monthly distribution of large earthquakes in Japan // Bull. of the Earthquake Research Inst. of Tokyo. — 1969. — Vol. 47. — Part 3. — P. 419–427.
25. NEIS. — URL: <http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>
26. Usami T., Tsuno J. Bibliography of field studies on major earthquakes in Japan // Bull. of the Earthquake Research Inst. of Tokyo. — 1969. — Vol. 47. — Part 2. — P. 271–394.
27. Utsu T. Seismic activity in Hokkaido and its vicinity // Geophys. Bull. Hokkaido Univ. — 1968. — Vol. 20. — P. 51–55.
28. Ward S. M. Earthquake mechanisms and tsunami generation: the Kurile Islands event of October 13, 1963 // BSSA. — 1982. — Vol. 72. — № 3. — P. 759–777.

А. В. Викулин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

ЭНЕРГИЯ И МОМЕНТ СИЛЫ УПРУГОГО РОТАЦИОННОГО ПОЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ*

В рамках классической теории упругости с симметричным тензором напряжений ставится и аналитически решается задача об упругом поле во вращающейся геофизической среде. Устанавливается дальнедействующий характер такого поля. Для вращающихся геофизических сред показывается существование двух новых типов упругих волн с моментом — солитонов и экситонов (в терминологии А. С. Давыдова (1982)), названных авторами ротационными. Солитонные решения, по сути, представляют собой волны глобальной миграции землетрясений (медленные тектонические волны) с максимальной скоростью ~ 1 см/с, близкой к скорости миграции наиболее сильных ($M > 7,5$) землетрясений. Экситонным решениям соответствуют волны (локальной) миграции форшоков и афтершоков в очагах землетрясений (быстрые тектонические волны), максимальная скорость которых равна скорости вспарывания и (или) скорости поперечных сейсмических волн.

Ключевые слова: геофизическая среда, сейсмофокальные блоки, вращение Земли, ротационное упругое поле, волны миграции землетрясений

ENERGY AND MOVENT OF THE EARTH'S ROTATION ELASTIC FIELD

The problem of an elastic stress field in a rotating medium is formulated and solved analytically within the limits of the classical theory of elasticity with a symmetrical stress tensor. This is a rotation elastic field of action at a distance. There are two specific types of elastic waves with a moment in rotating media: solutions and exitons, or rotation waves. The solution solutions to the wave equation represent waves of global earthquake migration (slow tectonic waves) which are no faster than ~ 1 cm/s, i. e., approach the migration velocity of large and great earthquakes ($M > 7,5$). The exciton solution correspond to waves of local migration of foreshocks and aftershocks in earthquake sources (fast tectonic waves) and have their maximum velocity comparable to faulting rate and/or to *S*-wave velocities.

Key words: solid earth, seismic focal blocks, Earth's rotation, rotation elastic field, waves of earthquake migration

Введение

Анализ геологического, геофизического и астрономического материала позволил предложить новую модель геофизической среды. В рамках такой модели среда представляет собой систему иерархически распределенных блоков, размеры которых изменяются в диапазоне 12–14 порядков величин. Описание свойств такой среды невозможно проводить в рамках привычной линейно-упругой континуальной модели, требуются новые подходы [36].

«Неотъемлемой» особенностью геофизической среды является ее существенная «изначальная» нелинейность. Все блоки, составляющие геофизическую среду, вся иерархия их систем находятся в постоянном движении относительно друг друга. Блоки способны как воспринимать энергию извне, так и обмениваться ею друг с другом. Некоторые из блоков в системах любого масштаба могут находиться в энергетическом состоянии, близком к неустойчивости. Неустойчивые блоки и целые системы, получившие дополнительную энергию, могут терять устойчивость и образовывать новые, более мелкие системы или вступать в качестве целых отдельных в более крупные системы, т. е. консолидироваться [33, 36].

Эти свойства позволили считать геофизическую среду постоянно изменяющейся — «живой» [16, 37]. Модели таких, по сути, «неклассических нелинейных» сред приведены в работах [16, 27], в которых обсуждаются и возможные подходы к их описанию.

Имеющиеся данные прямо указывают на вращательный, крутильный и вихревой характер движения блоков, плит и других геологических структур планеты [11, 12, 19, 35, 42]. Важно, что многие геологи и геофизики как исследователи, непосредственно работающие с материалом, отмечают «самостоятельный» [39], «собственный» [28], «с ненулевыми дивергенциями

* 13 (233). Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 6. С. 559–570.

и вихрями» [22] упругий [44] характер таких движений, которые прямо связаны с вращением планеты [11, 29, 35, 40, 45]. Более того, именно наличие сильно выраженных нелинейных свойств позволяет рассматривать горные породы как среду с собственными источниками упругой энергии [32]. Вращения макроструктур на большие (до 1–10 градусов) углы отмечены и в поликристаллических материалах [13, 14].

В последнее время наблюдается резкое повышение интереса к проблеме вихревых структур и их взаимосвязи с ротацией планеты [12, 35]. «Весьма показательным в этом смысле можно назвать XXXV Тектоническое совещание 2002 года [43], каждый седьмой доклад которого в той или иной мере касался теоретических, планетарных или региональных проблем ротогенеза. Несколько докладов на этом совещании были посвящены результатам изучения влияния ротационного режима Земли на новейшую и современную геодинамику. Отдельные публикации, появившиеся в последние годы [11, 24, 31, 46], подтверждают перспективность и плодотворность таких исследований, вносящих существенный вклад в познание геотектоники и геодинамики и зачастую приводящих к весьма неожиданным результатам. Огромный фактический материал, накопленный к настоящему времени по обсуждаемой проблеме [12, 35 и др.], вероятно, заслуживает того, чтобы комплекс структур, обязанных своим происхождением ротационному фактору, стал рассматриваться в рамках специально выделенной ротационной тектоники» [11, 29–31, 42].

Таким образом, геологические и геофизические данные приводят нас к специфической задаче о поле упругих напряжений во вращающейся блоковой среде [4, 5, 46].

Постановка задачи

Для блоковых геофизических нелинейных сред [16, 27, 33, 36, 37] в рамках классической теории упругости с симметричным тензором напряжений [21] была поставлена и аналитически решена задача о поле напряжений во вращающемся с угловой скоростью Ω твердом теле вокруг упруго связанного с ним небольшого, поворачивающегося *под действием внутренних источников* макрообъема V [4, 8, 9, 46]. Основная идея решения такой задачи заключается в том, что когда V упруго сцеплен с окружающей его средой (матрицей), изменение за счет внутренних источников направления момента импульса макрообъема приводит к появлению вокруг него упругих напряжений, которые в силу законов сохранения имеют момент силы. Эта идея соответствует известному положению в теории вихрей: «завихренность пропорциональна моменту количества движения частиц» [41].

Геологический блок находится под действием многочисленных геофизических полей, что, например, может привести к упорядочению движения как различных макрообъемов блока, так и вещества (флюидов, зарядов и др.) вдоль его границы. Поэтому смысл, который мы вкладываем в понятие «собственный момент блока» — по сути, спина, — наиболее близок «собственному моменту количества движения конечного объема сплошной среды» [38, с. 146]. Такой наш подход к сейсмостектоническим задачам, при котором упругое поле вокруг макрообъема (блока) вращающейся среды, по сути, «наследует» его «собственный момент» (циркуляцию), в принципе отличается от подходов других авторов, которые либо не учитывают вращение Земли [16, 20, 36], либо учитывают формально, в рамках моментной теории упругости [3, 20, 25, 48]. Отличие нашей ротационной модели от континуума Коссера, наиболее часто применяющегося для объяснения влияния ротации планеты на геофизические процессы, заключается в том, что блоки геофизической среды не просто имеют ротационные степени свободы — они имеют собственный момент, который в случае вращения среды приводит к целому ряду интересных специфических следствий.

Решение задачи

Решение задачи проведем в три этапа [5, 46].

1. Рассмотрим две системы координат, которые повернуты относительно друг друга вокруг общей оси Y на угол β . Ось Z первой (исходной) системы координат параллельна оси вращения тела (Ω) и направлена от Южного полюса к Северному. Ось \tilde{Z} второй системы параллельна моменту импульса блока V после его поворота на угол β . Начала обеих систем координат находятся в центре масс области V (рис. 1).

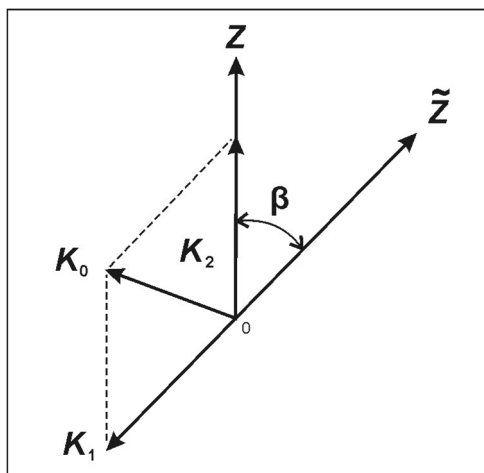


Рис. 1. Две системы координат, повернутые относительно общей оси на угол β . Ось Z параллельна оси вращения тела и направлена от его Южного полюса к Северному

Для определения величины упругих напряжений, возникающих вокруг поворачивающегося блока V , проведем следующий мысленный эксперимент.

Сначала останавливаем вращение объема V , прикладывая упругие напряжения σ_1 с моментом силы K_1 , направленным в отрицательном направлении оси \tilde{Z} . При этом считаем, что кинетическая энергия вращения области V полностью переходит в потенциальную энергию упругих напряжений σ_1 . Затем, прикладывая упругие напряжения σ_2 с моментом силы K_2 , направленным вдоль оси Z , опять раскручиваем блок V до скорости вращения тела (см. рис. 1).

Другими словами, когда мы тормозим область V , ее кинетическая энергия вращения

$$W = \frac{1}{2} I \Omega^2 \quad (1)$$

переходит в упругую энергию, определяемую тензором напряжений σ_1 , а когда мы ее раскручиваем, то создаем точно такую же кинетическую энергию, но за счет упругих напряжений σ_2 .

Рассмотрим случай, когда объем V представляет собой однородный шар, момент инерции I которого, как известно, не зависит от выбора оси вращения. Тогда равенство кинетической и потенциальной энергий приводит к соотношению

$$|\vec{K}_1| = |\vec{K}_2|.$$

Разность этих векторов и является искомым моментом силы K_0 , возникающим в результате поворота блока V в неинерциальной системе: $K_0 = K_2 - K_1$. Его модуль получаем из теоремы косинусов:

$$|\vec{K}_0| = 2 |\vec{K}_1| \sin \beta / 2. \quad (2)$$

2. Искомое поле упругих деформаций \vec{U} , как известно из работы [21], должно удовлетворять уравнению упругого равновесия

$$\text{grad div } \vec{U} - a \cdot \text{rot rot } \vec{U} = 0: \quad (3)$$

– с нулевыми граничными условиями на бесконечности:

$$|\vec{U}| \rightarrow 0 \text{ при } r = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)^{1/2} \rightarrow \infty; \quad (4)$$

– с действующей на объем V силой, равной нулю:

$$F_i = \oint \sigma_{ij} dS_j = 0; \quad (5)$$

– с моментом силы, не зависящим от размера блока V :

$$K_i = \oint x_k e_{ikl} \sigma_{lj} dS_j \neq f(R_0), \quad (6)$$

где $a = (1 - 2\nu) / 2(1 - \nu)$; ν — коэффициент Пуассона; R_0 — радиус области V ; e_{ikl} — индекс Леви — Чивита.

Решением задачи (3)–(6) в сферической системе координат (r, θ, φ) с началом $r = 0$ в центре шарового объема V области $r \geq R_0$ являются поля смещений \underline{U} и напряжений σ :

$$U_r = U_\theta = 0, U_\varphi = Ar^{-2} \sin \theta, \quad (7)$$

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = 3/2 AGr^{-3} \sin \theta, \quad (8)$$

где G — модуль сдвига; A — константа, которая будет определена ниже. Остальные компоненты тензора напряжений равны нулю.

Подставляя выражение (8) в формулу (6) для момента силы упругого поля, получаем:

$$K_{1z} = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sigma_{r\varphi} r^3 \sin \theta d\theta d\varphi = 3\pi^2 AG. \quad (9)$$

Остальные компоненты момента силы равны нулю: $K_{1x} = K_{1y} = 0$ (см. рис. 1).

3. Интегрируя плотность энергии упругих деформаций

$$W = \sum \{ \lambda / 2 (\varepsilon_{ij} \delta_{ij})^2 + G \varepsilon_{ij}^2 \},$$

где λ — модуль всестороннего сжатия, ε_{ij} — деформация, δ_{ij} — символ Кронекера, по всему объему тела и считая его несжимаемым, получим величину упругой энергии, созданной моментом силы K_1 :

$$W = 9/2 A^2 G \int_{R_0}^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^{-4} \sin \theta dr d\theta d\varphi = 4\pi A^2 G R_0^{-3}. \quad (10)$$

Приравнивая ее к кинетической энергии (1) и учитывая, что момент инерции шара $I = 8/15 \pi \rho R_0^5$, где ρ — плотность вещества, получаем следующее выражение для A :

$$A = R_0^4 \Omega \sqrt{\frac{\rho}{15G}}. \quad (11)$$

С учетом формулы (2) получаем:

– для момента силы упругого поля вокруг блока, направленного перпендикулярно плоскости его поворота:

$$K = -6\pi^2 \Omega R_0^4 \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \beta / 2; \quad (12)$$

– величины упругой энергии:

$$W = 16/15 \pi \rho \Omega^2 R_0^5 \sin^2 \beta / 2; \quad (13)$$

– поля смещений:

$$U_r = U_\theta = 0, U_\varphi = \Omega R_0^4 r^{-2} \sqrt{\frac{\rho}{15G}} \sin \theta \sin \beta / 2, r \geq R_0; \quad (14)$$

– поля напряжений:

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = 3/2 \Omega R_0^4 r^{-3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \theta \sin \beta / 2, r \geq R_0. \quad (15)$$

Остальные компоненты напряжений равны нулю.

Следует отметить, что при форме блока, близкой к эллипсоидальной или овальной, конечные формулы существенным образом не изменятся. В них, как показывают оценки работы [9], появляются коэффициенты, близкие к единице.

Оценки. При параметрах модели $\rho = 3 \text{ г/см}^3$, $G = 10^{11} \text{ н/м}^2$, $\Omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$, $R_0 \approx 100 \text{ км}$, соответствующих сейсмофокальным блокам земной коры, для сильнейших (с магнитудами $M \approx 8$) землетрясений из соотношений (12)–(15) получаем: $U_0 \approx 10 \text{ м}$, $\sigma_0 \approx 100 \text{ бар}$, $W_0 \approx 10^{16+18} \text{ Дж}$, $K_0 \approx 10^{28+30} \text{ дин} \cdot \text{см}$, которые по порядку величины близки реально регистрируемым при таких землетрясениях смещениям, сброшенным напряжениям, упругой энергии и сейсмическому моменту. Эти значения достигаются при угле поворота блока (очага землетрясения) $\beta_0 \approx U_0 / R_0 = 10^{-4} \text{ рад}$. При продолжительности сейсмического цикла (повторяемости сильнейших землетрясений в одном месте) 100–1000 лет для скорости поворота блока получаем «механическую»

(модельную) оценку $10^{-(4 \div 6)}$ град/год, которая оказалась близкой к «геологическим» скоростям вращения Исландии [23], микроплит Наска и Хуан-Фернандос [15], других блоков и плит земной коры [18].

Дальнодействие ротационного поля

Для определения величины энергии взаимодействия поворачивающихся блоков воспользуемся известной закономерностью, согласно которой упругая энергия (в рамках закона Гука) пропорциональна квадрату деформации. Тогда, записывая величину деформации какой-либо части твердого тела в виде суммы деформаций, создаваемых в этой части каждым из блоков в отдельности, получим выражение, в котором «перекрестные» слагаемые и которое определяет энергии взаимодействия блоков друг с другом.

Модель двух блоков. Для модели двух блоков полную упругую энергию можно записать в виде

$$W = G \int (a+b)^2 dV = G \left\{ \int a^2 dV + \int b^2 dV + 2 \int ab dV \right\},$$

где a, b — тензоры упругой деформации, созданные в результате поворота соответственно первой и второй областями, при этом интегрирование проводится по всему объему тела. Два первых слагаемых в правой части в выражении для упругой энергии суть собственные упругие энергии, каждая из которых вычисляется с помощью соотношения (13). Третье слагаемое и определяет выражение для энергии взаимодействия первой и второй областей:

$$W_{int} = 2G \int ab dV. \tag{16}$$

Определим энергию взаимодействия (рис. 2). Система координат на этом рисунке выбрана следующим образом. Центры масс областей лежат на оси X , расстояние между ними равно $2l$. Начало координат находится в середине отрезка, соединяющего центры масс. Ось Z выбрана таким образом, что вектор \vec{K}_a лежит в плоскости XY и ось Z перпендикулярна этой плоскости. Направление оси Z выбрано так, чтобы система координат была правой.

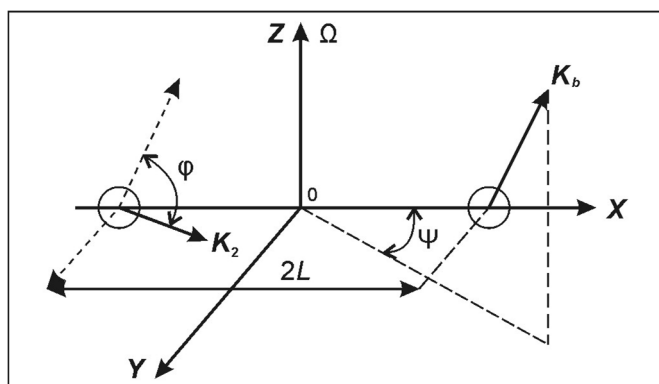


Рис. 2. Взаимная ориентация моментов сил \vec{K}_a и \vec{K}_b в модели двух блоков в прямоугольной системе координат XYZ :

ось Z параллельна оси вращения Земли $\vec{\Omega}$ и направлена от ее Южного полюса к Северному; $\vec{\Omega}$ — угловая скорость вращения Земли; ϕ и ψ — углы, определяющие соответственно направления \vec{K}_a и \vec{K}_b ; $2l$ — расстояние между центрами тяжести блоков

Из данных, представленных на рис. 2, видно, что направление вектора \vec{K}_b относительно вектора \vec{K}_a может быть определено двумя углами: углом ϕ , который можно найти из соотношения

$$\cos \phi = \frac{(\vec{K}_a \cdot \vec{K}_b)}{|\vec{K}_a| |\vec{K}_b|},$$

и углом ψ — между проекцией вектора \vec{K}_b на плоскость XY и осью X . Матрица поворота вектора \vec{K}_b в направлении вектора \vec{K}_a записывается следующим образом:

$$Q = \begin{vmatrix} \cos \psi \cdot \cos \phi & -\sin \psi & \cos \psi \cdot \sin \phi \\ \sin \psi \cdot \cos \phi & \cos \psi & \sin \psi \cdot \sin \phi \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{vmatrix}$$

Тогда тензор b в системе координат, задаваемой вектором \vec{K}_b , запишется в виде $b = QbQ'$, где Q' — транспонированная матрица.

Полагая блоки шаровыми с радиусами R_{0a} и R_{0b} , записывая выражение для тензоров a и b через соответствующие им смещения (7), подставляя их в формулу (1) с учетом выражения (11) и вычисляя соответствующие интегралы в биполярной системе координат, для энергии взаимодействия двух поворачивающихся (с одинаковой скоростью) областей получим выражение

$$W_{int} = 3/2 \pi \rho \Omega^2 R_{0a}^4 R_{0b}^4 l^{-3} \cos \phi. \quad (17)$$

Энергия взаимодействия локализована в части пространства, расположенного вне блоков, где, как можно видеть из соотношения (16), оба тензора деформации не равны нулю:

$$W_{int} \neq 0, r \geq R_{0a}, r \geq R_{0b}. \quad (18)$$

При вычислениях было сделано допущение, что расстояние l между областями много больше размера любой из областей. В этом случае при вычислении энергии взаимодействия оказалось возможным пренебречь размером соседней области и проводить интегрирование таким образом, как будто эти области точечные. Однако сделанное допущение не является принципиальным, поскольку всегда справедливо неравенство $l \geq 2R_0$ и оценки показывают, что учет конечного размера областей дает поправку к результату второго порядка малости $(R_{0a(об)}/l)^2$.

Момент силы, обусловленный энергией взаимодействия, определяем путем дифференцирования выражения (17) по углу ϕ :

$$K_{int} = -3/2 \pi \rho \Omega^2 R_{0a}^4 R_{0b}^4 l^{-3} \sin \phi. \quad (19)$$

Момент силы (19) приложен со стороны упругого поля к поверхности каждого из блоков и направлен таким образом, чтобы уменьшить величину энергии взаимодействия. Этот момент для обеих областей имеет одно и то же абсолютное значение, но для разных блоков он имеет противоположные направления.

Оценки. Будем полагать размеры обоих взаимодействующих объемов одинаковыми: $R_{0a} = R_{0b} = R_0$. Тогда из соотношений (12) и (19) получаем выражение

$$\frac{K_{int}}{K} \approx \frac{\Omega R_0}{V_S} \left(\frac{R_0}{l} \right)^3, \quad (20)$$

из которого видно, что инерционные эффекты взаимодействия, связанные с поворотом блоков внутри вращающегося тела, становятся тем более существенными, чем с большей скоростью Ω вращается тело и чем больше размер блока R_0 : $V_S = (G/\rho)^{1/2}$ — скорость поперечных волн.

Отношение энергии взаимодействия W_{int} к «собственной» энергии блока W определится на основании соотношений (13) и (17) равенством

$$\frac{W_{int}}{W} = \frac{45}{32} \frac{(R_0/l)^3 \cos \phi}{(\sin \beta/2)^2} = \delta. \quad (21)$$

Из полученного равенства видно, что максимальное ($\cos \phi \approx 1$) расстояние, на котором энергия взаимодействия будет по порядку величины близка к собственной энергии блока ($\delta \approx 1$), определится из соотношения

$$l_0 \approx 2 \beta^{-2/3} R_0 \approx (10^2 - 10^3) R_0. \quad (22)$$

Из полученного соотношения видно, что упругие поля, создаваемые вокруг поворачивающихся внутри вращающегося тела блоков, являются, по сути, *дальнодействующими*. При получении численной оценки в формуле (22) было использовано значение угла поворота блока $\beta \approx 10^{-4}$ рад, которое, как показано ранее, соответствует сильнейшему землетрясению.

Таким образом, дальнодействующий характер ротационного упругого поля может приводить к тому, что сильнейшие землетрясения, происходящие в близко расположенных блоках с параллельно ($\phi = 0$) или антипараллельно ($\phi = \pi$) ориентированными моментами, должны

происходить одновременно (или не должны происходить вовсе). Действительно, если в одном из таких блоков накопилась достаточная для сильнейшего землетрясения энергия, то в результате «параллельного» ($\phi = 0$) взаимодействия как минимум такой же энергией должен обладать и взаимодействующий с ним второй блок. В случае же «антипараллельного» ($\phi = \pi$) расположения моментов блоков энергия их взаимодействия, наоборот, должна компенсировать энергию, накапливаемую в готовящемся очаге. Имеющиеся сейсмологические данные для землетрясений-дуплетов и пар землетрясений, а также для областей, в пределах которых в течение длительного (сотни лет) времени не происходят сильнейшие землетрясения (например, Средние Курильские острова), подтверждают такой вывод модели [5]**.

Миграция землетрясений

Землетрясения на планете происходят в пределах областей, которые узкими поясами охватывают всю планету. Самым активным поясом, в пределах которого выделяется 80–85 % всей упругой сейсмической энергии и расположены очаги практически всех сильнейших землетрясений планеты, является Тихоокеанский сейсмический пояс. Ширина сейсмофокального пояса составляет 100–200 км при протяженности около $4 \cdot 10^5$ км. Верхняя часть пояса глубиной 50–100 км имеет блоковое строение. Протяженности сейсмофокальных блоков вдоль пояса составляют 100–300 км, в среднем $L_0 \approx 200$ км. Их размеры соответствуют очагам наиболее сильных, сильнейших (с магнитудами $M \geq 8$) землетрясений. Размеры очагов некоторых наиболее сильных землетрясений, состоящих из нескольких блоков, достигают 10^3 км и более. Протяженности островных дуг и континентальных окраин Тихого океана, в пределах которых такие очаги располагаются, достигают 4 тыс. км (Алеутская дуга).

Однородная цепочка блоков. Рассмотрим одномерную цепочку поворачивающихся взаимодействующих блоков, расположенную внутри твердого тела, вращающегося с угловой скоростью Ω . Будем полагать, что все блоки имеют форму шаров одинакового радиуса $R_0 (\approx 1/2 L_0)$.

Рассмотрим случай, когда все блоки в цепочке движутся равномерно. Тогда в соответствии с результатами, полученными выше, уравнение движения для блока в цепочке запишем в виде

$$I \frac{d^2 \beta}{dt^2} = \vec{K}_1 + \vec{K}_2, \quad (23)$$

где β , как и выше — угол, на который повернулся блок в результате подготовки землетрясения; $I = 8/15 \pi \rho R_0^5$ — его момент инерции; \vec{K}_1 — момент силы поля упругих напряжений вокруг блока в результате его поворота, значение которого определяется соотношением (12); \vec{K}_2 — момент силы, отвечающий за взаимодействие рассматриваемого блока с остальными блоками цепочки.

Из самых общих соображений понятно, что величина момента \vec{K}_2 должна быть пропорциональна как упругой энергии рассматриваемого блока, равной $V d^2 \beta / dx^2$, так и упругой энергии, соответствующей всем остальным блокам цепочки. В качестве последней выбираем величину, равную средней линейной плотности упругой энергии цепочки блоков w . Здесь $V = 4/3 \pi R_0^3$ — объем блока, x — координата вдоль цепочки. Таким образом, момент силы, отвечающий за взаимодействие рассматриваемого блока с другими блоками цепочки, можно записать в виде

$$\vec{K}_2 = \zeta w V d^2 \beta / dx^2, \quad (24)$$

где ζ — безразмерный коэффициент, характеризующий «однородность» цепочки. Для Тихоокеанского пояса, являющегося достаточно «однородным», примем $\zeta = 1$.

** Когда статья готовилась к печати, в районе Средних Курильских островов произошла пара землетрясений: 15.11.2006 г. с $M = 8,2$ и 13.01.2007 г. с $M = 8,3$. Их очаги «заполнили» собой часть сейсмофокального объема между о. Шиадокан на северо-востоке и о. Симушир на юго-западе [34]. Анализ показал, что характерной особенностью сейсмичности района Средних Курил является именно «парность» сильнейших ($M = 7,6$ и более) землетрясений: предыдущая такая пара землетрясений на Средних Курилах, предварявшая сильнейшие землетрясения 2006–2007 гг., произошла 19.01.1780 г. и 29.06.1780 г. [7].

Окончательно уравнение движения (23) для блока с координатой x в момент времени t с учетом формул (12) и (24) в безразмерных координатах $\xi = k_0 x$, $\eta = c_0 k_0 t$ можно записать в виде

$$\partial^2 \vartheta / \partial \xi^2 - \partial^2 \vartheta / \partial \eta^2 = \sin \vartheta, \quad (25)$$

где $\vartheta = \beta/2$. Волновое число и скорость, характеризующие сейсмический процесс, соответственно определяются из следующих соотношений:

$$k_0^2 = \frac{3\pi\Omega}{wV} \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{4/3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}}, \quad (26)$$

$$c_0^2 = \frac{wV}{I}. \quad (27)$$

Уравнение (25) известно как уравнение синус-Гордона (СГ). Сильнонелинейные уравнения, имеющие решения в виде солитонов, в том числе СГ-уравнение, в настоящее время достаточно широко используются при решении технических, физических и геофизических задач [2]. Отличительной особенностью полученного нами СГ-уравнения является то обстоятельство, что определяемые нелинейными свойствами «твердой» геофизической среды постоянные c_0 и k_0 оказались зависимыми от угловой скорости вращения тела.

Покажем, что в рамках задачи (23)–(27) действительно можно описывать наблюдаемые в геофизике волновые движения.

Свойства решений уравнения синус-Гордона. Полученное СГ-уравнение движения цепочки сейсмофокальных блоков имеет много решений. Среди них в технических, физических и геофизических приложениях часто встречаются решения в виде локализованных (уединенных) волн — солитонов (*soliton*, *s*) [2, 3]. В длинной цепочке блоков, когда можно не учитывать влияние ее концов (какими являются и сейсмические пояса планеты, в том числе тихоокеанское кольцо), возможны решения [17], получившие название экситонов (*exiton*, *ex*).

Качественная зависимость энергии возбуждения E от скорости распространения V для солитонов (*sol*, I) и экситонов (*ex*, II) приведена на рис. 3 из работы [17]. Зависимости для энергии возбуждения солитонов и экситонов удовлетворяют следующим условиям:

$$E_{sol} \sim V_{sol}^n, E_{sol} \geq 0, V_{sol} < V_0; E_{ex} \sim V_{ex}^p, V_{ex} > V_0; n > p, \quad (28)$$

где V_0 — характерная скорость процесса.

В квазилинейном приближении, когда процесс можно описать с помощью линеаризованного уравнения СГ, закон дисперсии для экситонных решений записывается в виде

$$\omega^2 = \omega_0^2 (1 + \lambda_0^2 / \lambda^2), \quad \lambda_0 = 2\pi c_0 / \omega_0, \quad (29)$$

где ω , λ — соответственно частота и длина волны экситона; ω_0 — «собственная» частота поворотного движения блока; λ_0 — соответствующая «собственной» частоте длина волны.

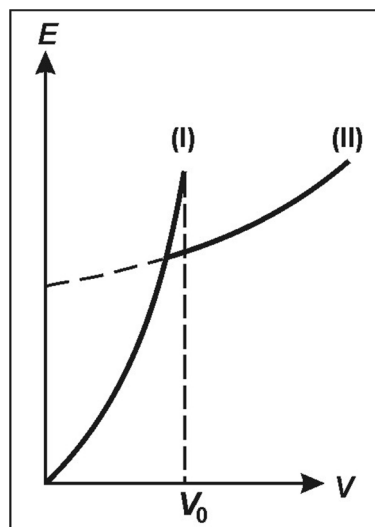


Рис. 3. Волновые решения уравнения СГ:

I — солитоны, II — экситоны; V_0 — характерная скорость процесса

Первой характерной особенностью закона дисперсии (29) является его связь с нелинейными свойствами цепочки блоков (геофизической среды, заполняющей сейсмофокальный объем), а не с ее дискретной структурой.

Второй отличительной особенностью закона дисперсии (29) является то, что частота распространяющихся по цепочке блоков волн всегда выше ω_0 . Физически очевидно, что частота ω_0 достигается при большой длине волны (в пределе $\lambda \rightarrow \infty$), когда все блоки цепочки движутся как единое целое, без ее деформации. Этот случай «нулевого» экситонного состояния соответствует экстраполяции экситонной зависимости $E_{ex}(V)$ в формуле (28) в область значений скорости $V_{ex} < V_0$:

$$V_{ex} = 0, E_{ex} = E_{min} > 0. \quad (30)$$

Волны миграции землетрясений. Известный фактический материал по скоростям миграции сейсмичности вдоль тихоокеанской сейсмофокальной зоны собран в работах [5, 6] и представлен на рис. 4. Из данных этого рисунка видно, что все поле скоростей достаточно отчетливо разбивается на две области, разделенные значением:

$$V_0 = (10^2 - 10^3) \text{ км/год} \approx 1 \text{ см/с}. \quad (31)$$

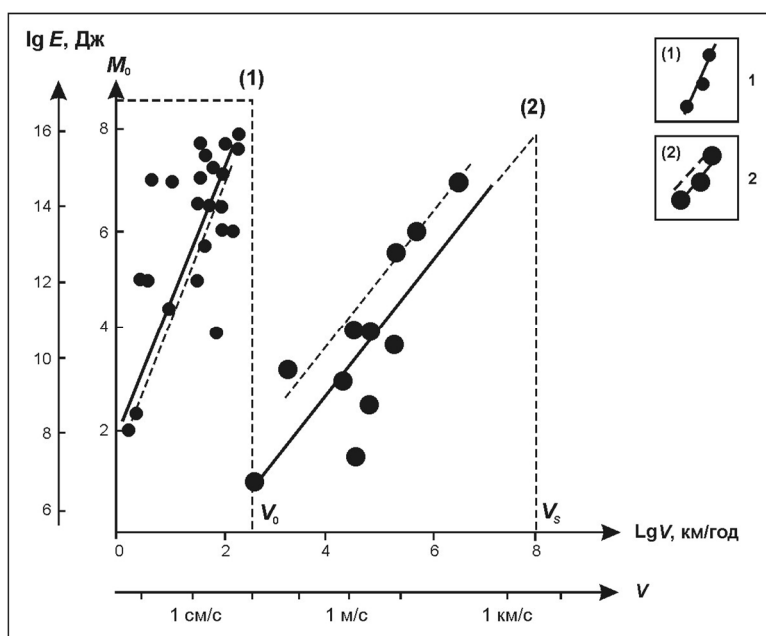


Рис. 4. Значения скоростей миграции тихоокеанских землетрясений вдоль сейсмического пояса и определенные по ним зависимости $M_0(V)$:

1, 2 — «глобальная» и «локальная» миграционные зависимости; пунктиром проведены такие же зависимости, полученные в работе [9], с использованием данных, не отмеченных «усами»; V_0 — значения скорости, разграничивающие «глобальное» и «локальное» поля точек; V_s — скорость поперечных сейсмических волн

В области с большими значениями ($V_2 > V_0$) расположены скорости миграции форшоков (предваряющих) и афтершоков (следующих после главного толчка) в очагах землетрясений (локальная миграция); в области с меньшими значениями ($V_1 < V_0$) — скорости, определяющие миграцию в больших пространственно-временных пределах (глобальная миграция).

С использованием представленных на рис. 4 данных были рассчитаны методом наименьших квадратов в пределах каждой из обозначенных областей следующие зависимости:

$$M_{0,1}(\pm 1,2) = (2,6 \pm 0,5) \text{ Lg } V_1 [\text{км/год}] + (1,9 \pm 0,8), V_1 < V_0, \quad (32)$$

$$M_{0,2}(\pm 1,2) = (1,3 \pm 0,3) \text{ Lg } V_2 [\text{км/год}] - (2,5 \pm 1,6), V_2 > V_0, \quad (33)$$

где M_0 — значения магнитуд мигрирующих землетрясений в каждой выборке. Эти зависимости практически не отличаются от таких же зависимостей, полученных нами раньше в работе [9] с использованием меньшего (примерно в два раза) по объему исходного материала (см. рис. 4).

Поэтому можно считать, что миграционные соотношения (32) и (33) определены достаточно надежно, т. е. получены с использованием достаточно большого количества данных, увеличение которых в дальнейшем не приведет к их изменению.

Полагая, что магнитуды землетрясений M с величинами упругих энергий E , сбрасываемых при сейсмических (*seismic, sc*) толчках, определяются соотношением Гутенберга — Рихтера $\text{Lg } E [\text{Дж}] = 1,8M + 4,3$, и используя мировое соотношение между магнитудой землетрясения и размером его очага L : $\text{Lg } L [\text{км}] = 0,4M - 1,0$, зависимости (32) и (33) соответственно можно переписать следующим образом:

$$E_{sc1} \approx V_1^{4+5}, \text{Lg } L_{sc1} [\text{км}] = (1,0 \pm 0,5) \text{Lg } V_1 [\text{км/год}] - (0,2 \pm 0,8), \quad V_1 < V_0, \quad (32.1)$$

$$E_{sc2} \approx V_2^{2+3}, \text{Lg } L_{sc2} [\text{км}] = (0,5 \pm 0,3) \text{Lg } V_2 [\text{км/год}] - (2,0 \pm 1,6), \quad V_2 > V_0. \quad (33.1)$$

О природе волн миграции землетрясений можно судить на основании достаточно большого количества данных о волнах деформации земной поверхности, отмеченных и зарегистрированных в очагах землетрясений и прилегающих областях в течение форшокового и афтершокового периодов. Анализ этих данных, основанный на геодезических инструментальных измерениях [1], показывает, что волны деформации представляют собой распространяющиеся вдоль поверхности Земли уединенные «горбы» или «ямы» (солитоны), диапазон скоростей которых включает большую часть диапазона скоростей волн миграции землетрясений (см. рис. 4). Моделирование позволяет считать, что уравнениями движения, решениями которых могли бы быть такие деформационные волны, являются сильнонелинейные уравнения, чаще СГ-уравнения [2].

Таким образом, и сейсмологические, и комплексные геофизические данные, а также данные моделирования прямо указывают на то, что волны миграции землетрясений являются уединенными волнами (солитонами и экситонами), природа которых определяется нелинейными свойствами среды.

Сравнение данных о миграции землетрясений со свойствами решений СГ-уравнения (23) показывает, что зависимости (1) и (2) на рис. 4, соответствующие им первые соотношения в формулах (32.1) и (33.1) и «разграничительное» положение точки V_0 качественно соответствуют зависимостям (I) и (II) на рис. 3, соотношениям (28) и такому же положению точки V_0 на рис. 3. Это позволяет считать, что полученные нами соотношения соответствуют солитонным ((32), (32.1)) и экситонным ((33), (33.1)) решениям СГ-уравнения с характерной скоростью процесса V_0 .

По аналогии с обычными упругими волнами (случай тектонического приближения в работе [26]), считая длину волны экситона λ_0 равной размеру сейсмофокального блока, т. е.

$$\lambda_0 \approx R_0, \quad k_0 = 2\pi/R_0, \quad (34)$$

для значения характерной скорости процесса c_0 получаем следующее выражение:

$$c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \Omega R_0 \sqrt{\frac{G}{\rho}} \sim V_R V_S, \quad (35)$$

или при принятых выше параметрах модели:

$$c_0 \approx 1 \text{ см/с}. \quad (36)$$

Как видим, характерная скорость модельного ((23)–(27)) сейсмического процесса c_0 оказалась близкой определяемой соотношением (31) скорости V_0 , что позволяет считать «экспериментальные» миграционные соотношения (32), (32.1) и (33), (33.1) соответственно солитонным и экситонным решениями задачи (23)–(27).

Подтверждением такого вывода можно считать доказательство того, что в рамках задачи (23)–(27) удалось отождествить «собственную» частоту ω_0 (29) поворотного движения блока с частотой нутации полюса планеты, являющейся, по сути, «нулевым» экситонным решением, соответствующим состоянию (30). Более того, в рамках той же задачи удалось предсказать расщепление частоты нутации (Чандлера) на две и дать ему объяснение: скорость миграции вдоль широты отличается от скорости миграции вдоль долготы на скорость Доплера, которая обусловлена вращением планеты [10, 47].

Значение c_0 согласно соотношению (35) с точностью до численного множителя может быть представлено в виде среднегеометрического произведения двух скоростей: центробежной $V_R = \Omega R_0$ и упругой поперечной $V_S = (G/\rho)^{1/2}$. Отсюда и название модели (23)–(27), данное ей авторами: ротационная модель [8, 9].

Заключение

В работе поставлена и аналитически решена задача о поле упругих напряжений, возникающем вокруг блока земной коры, поворачивающегося за счет внутренних источников. Единственное физическое предположение модели заключается в том, что изменение (вследствие вращения Земли) направления момента импульса блока приводит к появлению вокруг него *упругого поля с моментом силы*. Оценки показали, что в случае размера блока $R \approx 100$ км и угле его поворота $\beta \approx 10^{-4}$ рад теоретические (модельные) значения для величин упругой энергии, сейсмического момента, напряжений и подвижки близки таким же величинам, характерным для очагов сильнейших ($M > 7,5$) землетрясений. В свою очередь, такие углы поворота при разумных предположениях о повторяемости землетрясений хорошо согласуются с установленными скоростями вращения блоков и плит земной коры. Тем самым показано, что модель применима к описанию процессов, протекающих в очагах землетрясений.

Установлен дальнедействующий характер таких упругих полей напряжений, что дало возможность перейти к рассмотрению цепочки сейсмофокальных блоков, позволяющих моделировать сейсмический процесс, протекающий в сейсмических поясах планеты. Поставлена задача о движении цепочки взаимосвязанных блоков и получено ее феноменологическое решение. Показано, что решения такой задачи в виде солитонов и экситонов (в терминологии А. С. Давыдова [17]) позволяют описать весь спектр известных значений скоростей миграции землетрясений. При этом солитонные решения, представляющие собой глобальные волны миграции землетрясений, — по сути, медленные тектонические волны [3], — характеризуются максимальными скоростями ~ 1 см/с. Экситонные решения — по сути, быстрые тектонические волны — характеризуют волны (локальной) миграции [3] форшоков и афтершоков в очагах землетрясений.

В тектоническом приближении [26], считая длину волны экситона равной размеру сейсмофокального блока (очага сильнейшего землетрясения), получено значение характерной для данной модели скорости:

$$c_0^2 \approx V_R V_S.$$

Она равна среднегеометрическому произведению центробежной V_R и поперечной сейсмической V_S скоростей.

Таким образом, для блоковых вращающихся геофизических сред теоретически установлено существование нового типа упругих ротационных волн и показано, что именно такие волны ответственны за миграцию землетрясений.

Литература

1. Бахтияров В. Ф., Левин В. Е. Применение светодальномеров в геодезической обсерватории «Мишенная» (Камчатка) для регистрации движений земной поверхности // Оптический журн. — 1993. — № 10. — С. 82–85.
2. Быков В. Г. Нелинейные волновые процессы в геологических средах. — Владивосток: Дальнаука, 2000. — 190 с.
3. Быков В. Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. — 2005. — Т. 46. — № 11. — С. 1179–1190.
4. Викулин А. В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 621–824.
5. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. — 150 с.
6. Викулин А. В. Миграция и осцилляции сейсмической активности и волновые движения земной коры // Пробл. геодинамики и прогноза землетрясений: материалы I рос.-яп. семинара, Хабаровск, 26–29 сентября 2000 г. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. — С. 205–224.
7. Викулин А. В., Викулина С. А., Водинчар Г. М. Землетрясения-дуплеты и пары землетрясений — закономерность сейсмического процесса // Пробл. комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: материалы I регион. науч.-практ. конф., Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. — С. 36.

8. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Модель сейсмического процесса // Вычислительные технологии. — 1997. — Т. 2. — № 2. — С. 20–25.
9. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. — 1998. — Т. 17. — № 6. — С. 94–102.
10. Викулин А. В., Кролевец А. Н. Чандлеровское колебание полюса и сеймотектонический процесс // Геология и геофизика. — 2001. — Т. 42. — № 6. — С. 996–1009.
11. Викулин А. В., Тверитинова Т. Ю. Энергия тектонического процесса и вихревые геологические структуры // Докл. РАН. — 2007. — Т. 413. — № 3. — С. 372–374.
12. Вихри в геологических процессах / под ред. А. В. Викулина. — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН: КГПУ, 2004. — 297 с.
13. Владимиров В. И., Романов А. Е. Дисклинации в кристаллах. — Л.: Наука, 1986. — 224 с.
14. Мезоструктура: материалы междунар. семинара, Санкт-Петербург, 4–7 декабря 2001 г. // Вопр. материаловедения. — 2002. — № 1 (29). — 443 с.
15. Геолого-геофизический атлас Тихого океана. — М.; СПб: Межправительственная океанографическая комиссия, 2003. — 120 с.
16. Гольдин С. В. Физика «живой» Земли // Пробл. геофизики XXI века. Кн. 1. — М.: Наука, 2003. — С. 17–36.
17. Давыдов А. С. Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах // УФН. — 1982. — Т. 138. — Вып. 4. — С. 603–643.
18. Зоненшайн Л. П., Савостин Л. А. Введение в геодинамику. — М.: Наука, 1979. — 311 с.
19. Кац Я. Г., Козлов В. В., Полетаев А. И. Ротационные структуры земной коры // Общая и региональная геология, геология морей и океанов, геологическое картирование. — М.: М-во геологии СССР, 1990. — 44 с.
20. Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. 2 // ФТПРПИ. — 2000. — № 4. — С. 3–26.
21. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. — М.: Наука, 2003. — 246 с.
22. Лукьянов А. В. Нелинейные эффекты в моделях тектогенеза // Пробл. геодинамики литосферы. — М.: Наука, 1999. — С. 253–287.
23. Мелекесцев И. В. Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Пробл. глубинного магматизма. — М.: Наука, 1979. — С. 125–155.
24. Мирлин Е. Г. Проблема вихревых движений в «твердых» оболочках Земли и их роли в геотектонике // Геотектоника. — 2006. — № 4. — С. 43–60.
25. Николаевский В. Н. Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Докл. РАН. — 1995. — Т. 341. — № 3. — С. 403–405.
26. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. — М.: Недра, 1996. — 448 с.
27. Островский Л. А. Неклассическая нелинейная акустика // Нелинейные волны — 2004. — Н. Новгород: ИПФ РАН, 2005. — С. 109–124.
28. Пейве А. В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. геологическая. — 1961. — № 3. — С. 36–54.
29. Полетаев А. И. Ротационная тектоника // Актуальные пробл. региональной геологии и геодинамики: материалы VI Горшковских чтений, Москва, 26 апреля 2004 г. — М.: МГУ, 2004. — С. 19–25.
30. Полетаев А. И. Ротационная тектоника земной коры // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых: материалы 38-го Тектонического совещ. Т. 2. — М.: Геос, 2005. — С. 97–100.
31. Полетаев А. И. Ротационная тектоника или тектоническое вращение? // Актуальные пробл. регион. геологии и геодинамики: материалы VIII Горшковских чтений, Москва, 26 апреля 2006 г. — М.: МГУ, 2006. — С. 32–38.

32. Пономарев В. С. Горные породы как среды с собственными источниками упругой энергии // Пробл. нелинейной сейсмологии. — М.: Наука, 1987. — С. 50–64.
33. Проблемы геофизики XXI века: в 2 кн. / ред. А. В. Николаев. — М.: Наука, 2003.
34. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: материалы I региональной науч.-практ. конф., Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. — 180 с.
35. Ротационные процессы в геологии и физике // ред. Е. Е. Милановский. — М.: ДомКнига, 2007. — 528 с.
36. Садовский М. А. Новая модель геофизической среды // Българско геофизично списание. — 1985. — Т. XII. — № 2. — С. 3–10.
37. Садовский М. А. Живая Земля // М. А. Садовский. Очерки. Воспоминания. Материалы. — М.: Наука, 2004. — С. 242–245.
38. Седов Л. И. Механика сплошной среды. — М.: Наука, 1973. — 536 с.
39. Слезняк О. И. Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. — Киев: Наук. думка, 1972. — 182 с.
40. Стюарт М. В. Избранные труды. Ч. 1. — М.: Недра, 1975. — 155 с.
41. Сэффмэн Ф. Дж. Динамика вихрей. — М.: Науч. мир, 2000. — 376 с.
42. Тверитинова Т. Ю., Викулин А. В. Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2005. — № 5. — С. 59–77.
43. Тектоника и геофизика литосферы: материалы 35-го Тектонического совещ.: в 2 т. — М.: Геос, 2002.
44. Устинова В. Н., Вылцан И. А., Устинов В. Г. О пространственном и временном развитии циклически протекающих событий на Земле по геофизическим данным // Геофизика. — 2005. — № 3. — С. 65–71.
45. Chao B. F., Gross R. S. Changes in the Earth's rotational energy induced by earthquakes // Geophys. J. Int. — 1995. — Vol. 122. — P. 776–783.
46. Vikulin A. V. Earth rotation, elasticity and geodynamics: earthquake wave rotary model // Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects / eds. R. Teisseyre, M. Takeo, E. Majewski. — Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006. — P. 273–289.
47. Vikulin A. V., Krolevets A. N. Seismotectonic processes and the Chandler oscillation // Acta Geoph. Polonica. — 2002. — Vol. 50. — № 3. — P. 395–411.
48. Xie Xin-sheng. Discussion on rotational tectonics stress field and the genesis of circum-Ordos langmass fault system. Acta Seismol. Sinica. — 2004. — Vol. 17. — № 4. — P. 464–472.

ЧАСТЬ II

**СЕЙСМИЧЕСКИЙ
ПРОГНОЗ,
РИСК,
ЦУНАМИ**

А. В. Викулин

Институт физики Земли АН СССР

ВАРИАНТ ДОЛГОСРОЧНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ДЛЯ КАМЧАТСКОГО ЗАЛИВА И КРОНОЦКОГО ПОЛУОСТРОВА*

Введение

Возможное положение очагов будущих сильнейших землетрясений в пределах сейсмоактивного объема Камчатки, расположенного в районе Кроноцкого полуострова и прилегающих к нему Кроноцкого и Камчатского заливов, по долгосрочному сейсмическому прогнозу, данному в работах [26, 27, 30, 31, 33], определяется расположением очагов пяти землетрясений с $M \geq 7\frac{3}{4}$, происшедших 31.07.1915 г., 30.01.1917 г., 3.02.1923 г., 04.05.1959 г. и 15.12.1971 г. (рис. 1).

Положение и размеры очагов землетрясений 1915, 1917 и 1923 гг. были определены С. А. Федотовым в 1965 г. [26, 27]. Определение положения очагов землетрясений 1915 и 1917 гг. проводилось по макросейсмическим данным, а их размеры ввиду отсутствия данных о форшоках и афтершоках определялись на основании построенной С. А. Федотовым зависимости длины очага от магнитуды $L_{\phi}(M)$ [28]. Положение очага землетрясения 03.02.1923 г. с $M = 8,5$ определялось по совокупности макросейсмических данных и данных о расположении сильнейшего форшока и последующих афтершоков. Юго-западная граница очага, проведенная по данным макросейсмике и по расположению эпицентров главного толчка и его сильнейшего форшока с $M = 7$, определена достаточно однозначно. Северо-восточная граница очага проводится в двух вариантах (см. рис. 1): в первом размеры очага определены при помощи зависимости $L_{\phi}(M)$; во втором северо-восточная граница очага проведена на основании данных об афтершоках и балльности в Петропавловске-Камчатском и Усть-Камчатске. При этом предпочтение отдается второму варианту.

К настоящему времени появилось много существенно новых данных. Во-первых, привлечение накопившегося мирового сейсмологического материала позволило существенно уточнить списки землетрясений и в ряде важных случаев переопределить координаты эпицентров и магнитуды [5, 25].

Во-вторых, большой объем региональных данных, накопленных к настоящему времени, позволяет предложить достаточно объективные правила проведения границ очагов землетрясений [7, 31].

В-третьих, показано, что долгосрочный прогноз, аналогичный прогнозу С. А. Федотова для Курило-Камчатского региона, может быть сформулирован для других островных дуг и континентальных окраин [34–39]. Кроме того, с 1965 г., когда С. А. Федотов сформулировал долгосрочный прогноз, значительно увеличилась статистика землетрясений. Это позволило достаточно детально исследовать временное, пространственное и магнитудное распределения землетрясений. Результатом исследований явилось определение нижней границы класса сильнейших землетрясений, очаги которых имеют тенденцию не перекрываться друг с другом: $M \geq 7,6$ [7].

В-четвертых, нами обнаружены не встречавшиеся ранее в научной литературе макросейсмические описания камчатских землетрясений прошлых лет. Это позволило определить и переопределить балльность в ряде пунктов Камчатки.

* 14 (34). Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 72–83.

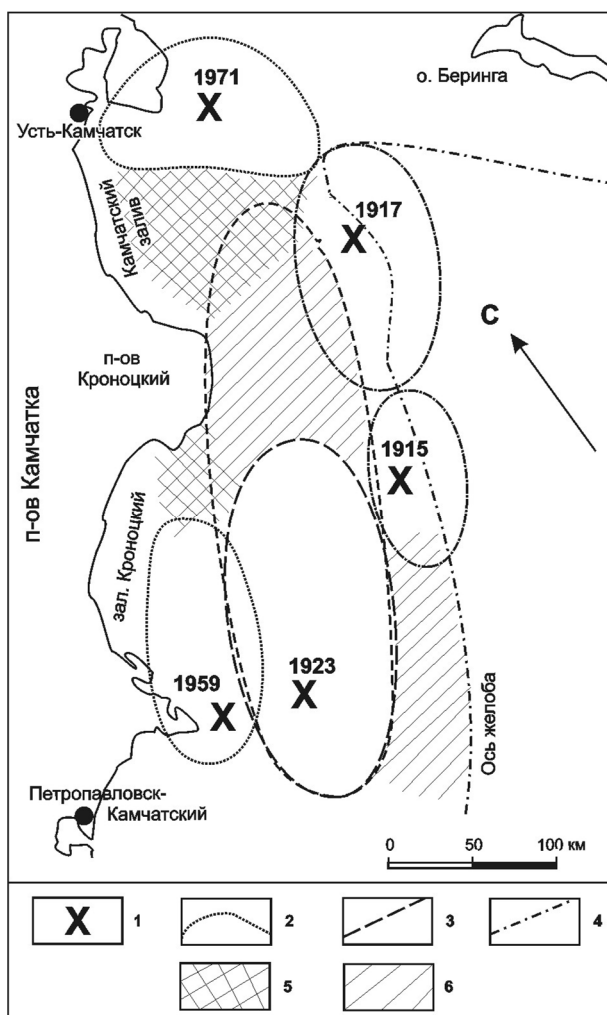


Рис. 1. Карта очагов сильнейших камчатских землетрясений в 1915–1971 гг. и вероятных мест будущих землетрясений такой силы [31]:

1 — эпицентры сильнейших землетрясений: 31.07.1915 г., 30.01.1917 г., 03.02.1923 г., 04.05.1959 г., 16.12.1971 г.; 2 — граница очагов землетрясений 04.05.1959 г. с $M = 7,6$ и 15.12.1971 г. с $M = 7,8$ по данным детальных наблюдений; 3 — два варианта границы очага 03.02.1923 г. с $M = 8,5$; 4 — примерное положение очагов землетрясений 31.07.1915 г. с $M = 7,3$ и 30.01.1917 г. с $M = 8,1$; 5 — наиболее вероятные места очагов будущих сильнейших землетрясений; 6 — менее вероятные места очагов таких же землетрясений

В свете новых данных представляется важным провести переопределение положения и размеров очагов сильнейших землетрясений 1915, 1917 и 1923 гг.

Уточнение положения очагов сильнейших землетрясений в феврале 1923 г.

Переопределение магнитуд сильнейших камчатских землетрясений, проведенное при подготовке Нового каталога [20], показало, что среди афтершоков землетрясения 03.02.1923 г. с $M = 8,5$ имеется землетрясение 24.02.1923 г. с $M = 7,7 \pm 0,5$ (ранее согласно [2] оно имело оценку магнитуды $M = 7$). Покажем, что землетрясение 24.02.1923 г., происшедшее через 21 день после главного толчка на расстоянии 240 км от него, может рассматриваться как самостоятельное событие, а не как афтершок землетрясения 03.02.1923 г.

Положение толчка 03.02.1923 г. с $M = 8,5$, его форшока 02.11.1923 г. с $M = 7$ и последующих землетрясений с $M \geq 5$ афтершокового периода за различные интервалы времени представлено на рис. 2. При построении использовались данные из каталога [5], который с 1923 г. без пропусков содержит данные о курило-камчатских землетрясениях с $M \geq 5,5$ [4].

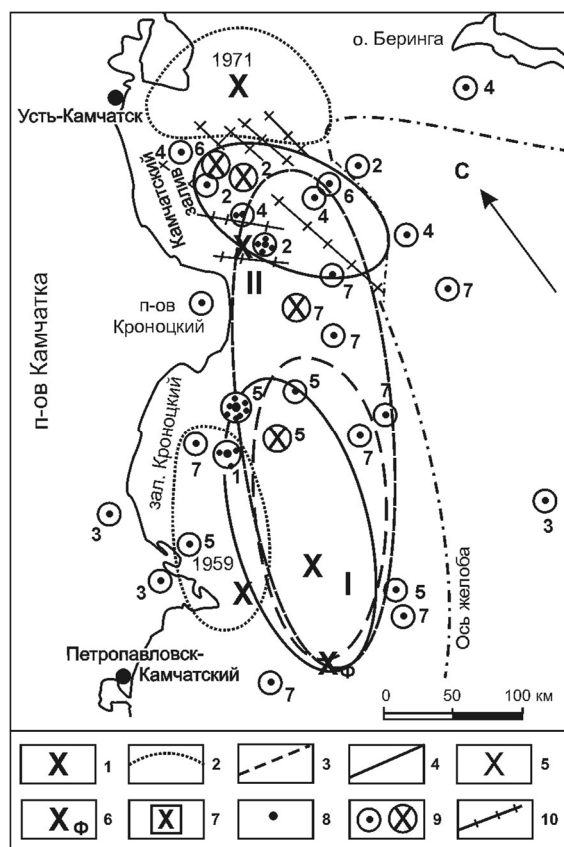


Рис. 2. Сейсмическая активность в Кроноцком и Камчатском заливах в 1923–1932 гг.:

1 — эпицентры землетрясений в 1923–1971 гг. с $M \geq 7,6$; 2 — границы очагов землетрясений 04.05.1959 г. с $M = 7,6$ и 15.12.1971 г. с $M = 7,8$; 3 — два варианта границы очага землетрясения 03.02.1923 г. с $M = 8,5$ по [26, 27, 30, 31, 33]; 4 — граница ЮЗ- и СВ-скоплений афтершоков, примыкающих к эпицентрам землетрясений 03.02.1923 г. с $M = 8,5$ (I) и 24.02.1923 г. с $M = 7,7$ (II); 5 — эпицентры землетрясений с $7 \leq M \leq 7,3$; 6 — эпицентр форшока 02.02.1923 г. с $M = 7$; 7 — эпицентры землетрясений с $5 \leq M < 7$; 8 — эпицентры землетрясений с $5 \leq M \leq 7$; 9 — эпицентр форшока 02.02.1923 г. с $M = 7$; 8 — эпицентры землетрясений с $5 \leq M \leq 7$; 9 — афтершоки, дни (i) даны на чертеже цифрами: первого дня $i = 1$; 1–3-го месяцев $i = 2$; 4–11-го месяцев $i = 3$; 12-го месяца 2–3-го годов $i = 4$; 4–7-го годов $i = 5$; 8-го года $i = 6$; 9–10-го годов $i = 7$; 10 — оси тектонических разломов по [24]

Землетрясения за 10-летний период покрывают часть сейсмоактивного объема протяженностью примерно 370 км от Петропавловска до Усть-Камчатска. События первых 8 лет (см. рис. 2, $i = 1-6$) сгруппированы в пределах двух областей. Тенденция к такому пространственному группированию проявляется сразу, по землетрясениям первого месяца; данные последующих 8 лет лишь четче ее подчеркивают. Юго-западное (ЮЗ) скопление афтершоков, включающее 14 событий, два из которых имели $M \geq 7$, приурочено к эпицентру первого сильнейшего события. Оно вытянуто вдоль глубоководного желоба и расположено в пределах района протяженностью 210 км при ширине 90 км, практически совпадая с первым вариантом очага этого землетрясения по С. А. Федотову [26, 27, 30, 31, 33]. Северо-восточное (СВ) скопление афтершоков включает 13 событий, два из которых имели $M \geq 7$. Скопление приурочено к эпицентру второго сильнейшего события (24.02.1923 г. с $M = 7,7$) и вытянуто на 140 км при ширине 70 км вдоль системы тектонических разломов северо-западного простирания [24]. Сейсмоактивный объем между ЮЗ- и СВ-скоплениями афтершоков протяженностью не менее 100 км заполняют землетрясения, которые произошли через 9–10 лет после сильнейших землетрясений в феврале 1923 г. (см. рис. 2, $i = 7$).

В пределах обоих скоплений землетрясений и вблизи от них события происходили в определенной очередности. Все три афтершока первого дня ($i = 1$) произошли в пределах ЮЗ-скопления; в течение 1–3 месяцев ($i = 2$) в пределах СВ-скопления и вблизи него произошли все

восемь афтершоков, в том числе афтершок с $M = 7,3$. Все три землетрясения 4–11 месяцев ($i = 3$) произошли вне фокальной зоны, против ЮЗ-скопления; в течение 12-го месяца и 2–3-го годов ($i = 4$) из пяти землетрясений четыре произошли внутри СВ-скопления и вблизи него. Из 12 афтершоков 4–7-го годов ($i = 5$) 11 произошли внутри ЮЗ-скопления; два афтершока 8-го года ($i = 6$) произошли внутри СВ-скопления. Такое пространственное и временное чередование землетрясений представляется неслучайным.

Покажем, что размеры ЮЗ- ($210 \cdot 90 \text{ км}^2$) и СВ- ($140 \cdot 70 \text{ км}^2$) скоплений землетрясений близки к оценкам размеров очагов курило-камчатских землетрясений соответственно с $M = 8,5$ и $M = 7,7$.

Имеется большое количество зависимостей, описывающих размеры очагов землетрясений L как функции магнитуды. Наиболее полно мировые данные, по-видимому, представлены двумя зависимостями $L(M)$, полученными Ю. В. Ризниченко [22]. Первая зависимость представляет собой визуальное осреднение данных:

$$\text{Lg } L (\pm 0,5) = 0,371 \cdot M - 0,880; \quad (1)$$

вторая была получена при разумном предположении о ходе отношения ширины очага к его длине:

$$\text{Lg } L (\pm 0,5) = 0,440 \cdot M - 1,289, \quad (2)$$

где L выражено в км. Зависимости (1) и (2) изображены на рис. 3 тонкими линиями. Основным недостатком зависимостей (1) и (2) является то обстоятельство, что они дают возможную ошибку в определении размера очага примерно 0,5 порядка. Это затрудняет практическое использование зависимостей для численного определения размеров очага по магнитуде землетрясения.

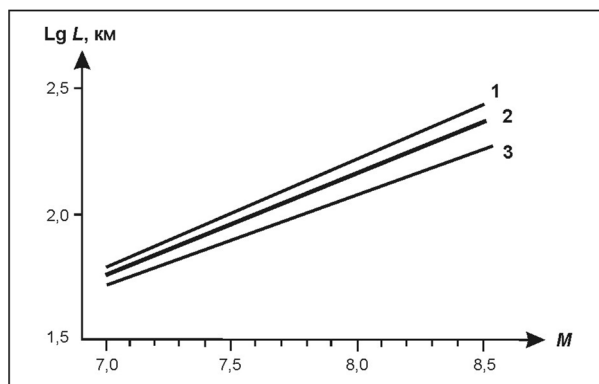


Рис. 3. Зависимости длины очага от магнитуды

Мы предложили соотношение, которое описывает связь магнитуды и протяженности очага землетрясения, исходя из того, что за границу очага принимается изолиния активности $A_{10} = 17$ [3, 7], которая характеризуется существенно меньшей ошибкой в определении длины очага по сравнению с зависимостями (1) и (2):

$$\text{Lg } L_{17} = 0,41 \cdot M - 1,10; \quad \sigma = 0,15; \quad (3)$$

$$\Delta L = 20 (8 \div 32),$$

где L_{17} — большой размер очага (в км), ограниченный изолинией активности $A_{10} = 17$; σ — среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от теоретической прямой; ΔL — средняя для всего интервала ($M \geq 7$) и предельная для концов интервала значения погрешностей (в км). Это соотношение показано на рис. 3 линией 2.

Очаги курило-камчатских землетрясений в диапазоне $M \geq 7$ примерно представляют собой эллипсы с отношением длины большей оси L к меньшей D [6, 7]:

$$\xi = \frac{L}{D} = 0,68 \cdot M - 3,53; \quad \sigma = 0,42, \quad (4)$$

где σ — среднеквадратичное отклонение теоретической прямой.

При значениях магнитуд $M = 7,7; 8,1; 8,5$ из соотношений (3) и (4) для большего L и меньшего D размеров очагов соответственно получаем:

$$\begin{aligned} L_{7,7; 8,1; 8,5} &= 110, 160, 230 \text{ км}, \Delta L = 10 \div 30 \text{ км}; \\ D_{7,7; 8,1; 8,5} &= 60, 80, 100 \text{ км}, \Delta D = 10 \div 30 \text{ км}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из соотношений (5) видно, что ЮЗ- и СВ-скопления землетрясений по своим размерам практически совпадают с линейными размерами очагов землетрясений соответственно с $M = 8,5$ и $M = 7,7$. Расстояние между обоими скоплениями, как следует из рис. 2, не менее 100 км. Это более чем в три раза превышает ΔL — возможную ошибку в проведении их границ. Поэтому имеющиеся инструментальные данные об афтершоках можно рассматривать как подтверждение гипотезы о том, что февральские землетрясения 1923 г. с $M = 8,5$ и $M = 7,7$ являлись самостоятельными событиями с очагами, совпадающими по положению соответственно с ЮЗ- и СВ-скоплениями землетрясений.

Рассмотрим теперь макросейсмические данные о землетрясениях 03.02 и 24.02.1923 г.

Второй «удлиненный» вариант положения северо-восточного конца очага землетрясения 03.02.1923 г. с $M = 8,5$ в работах [26, 27, 30, 31, 33] проводился на основании данных об афтершоках и балльности в г. Петропавловске-Камчатском и пос. Калыгирь. По работам [13, 14, 32] интенсивность колебаний при землетрясении 03.02.1923 г. составляла в Петропавловске 5–6 баллов, в Калыгире — 6 баллов. Изосейсты, отвечающие таким сотрясениям и проведенные в район очага из пунктов наблюдения, изображены на рис. 4. Видно, что они проходят через район СВ-скопления землетрясений.

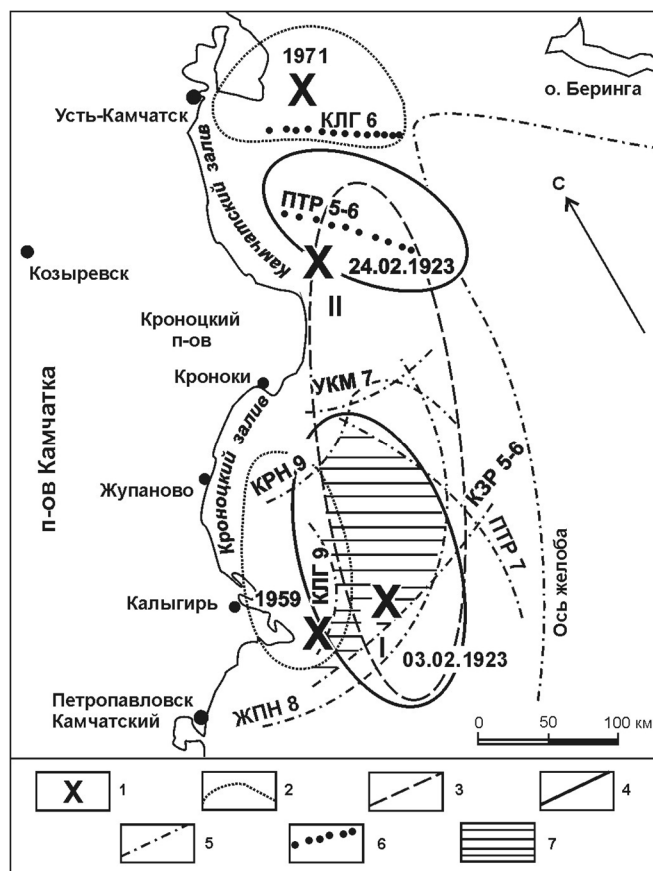


Рис. 4. Макросейсмические данные о землетрясении 03.02.1923 г. с $M = 8,5$:

1 — эпицентры землетрясений с $M \geq 7,6$ в 1923–1971 гг.; 2 — граница очагов землетрясений 04.05.1959 г. с $M = 7,6$ и 15.12.1971 г. с $M = 7,8$; 3 — два варианта границы очага землетрясения 03.02.1923 г. с $M = 8,5$ по [26, 27, 30, 31, 33]; 4 — граница ЮЗ- и СВ-скоплений афтершоков, примыкающих к эпицентрам землетрясений 03.02.1923 г. с $M = 8,5$ (I) и 24.02.1923 г. с $M = 7,7$ (II); 5 — изосейсты, проведенные в очаг из точки наблюдения, по нашим определениям (Петропавловск — ПТР, Калыгирь — КЛГ, Жупаново — ЖПН, Кроноки — КРН, Усть-Камчатск — УКМ; цифры обозначают число баллов по шкале MSK-64); 6 — изосейсты, проведенные в очаг, по данным работ [13, 14, 32]; 7 — область очага землетрясения 03.02.1923 г. с $M = 8,5$ по макросейсмическим данным

Ранее мы показали, что СВ-скопление афтершоков по размерам и форме отвечает очагу землетрясения 24.02.1923 г. с $M = 7,7$ (см. рис. 2). Сотрясения в момент землетрясения генерируются всей областью очага этого землетрясения или какой-либо его частью. Поэтому для подтверждения предложенной нами гипотезы о самостоятельности сильнейших землетрясений в феврале 1923 г. достаточно показать, что 03.02.1923 г. сотрясения в г. Петропавловске-Камчатском и пос. Калыгирь генерировались областью, совпадающей с ЮЗ-скоплением афтершоков. Другими словами, для подтверждения нашей гипотезы достаточно показать, что принятая в работах [13, 14, 32] интенсивность колебаний 03.02.1923 г. для г. Петропавловска-Камчатского и пос. Калыгирь занижена.

«В Петропавловске и Усть-Камчатске первые колебания, самые сильные за все время, продолжались 30–33 мин; в Островной, Калыгири, Жупаново и Семячике они продолжались почти три дня, постепенно слабея; в бухте Ольга землетрясение продолжалось непрерывно около двух недель... Сила колебаний почвы в Петропавловске около 6 по шкале Росси — Фореля, для побережья Кроноцкого залива — около 8, для Усть-Камчатска — около 7 баллов» [11].

Сравнение описаний шкалы Росси — Фореля (РФ) в работах [21, 23] со шкалой MSK-64 [18] показывает, что значение интенсивности, рассчитанное по РФ-шкале и затем пересчитанное в шкалу MSK-64 по соотношению в работе [18], в диапазоне 5–9 баллов будет занижено на $1 \div 2$ балла по сравнению с интенсивностью, рассчитанной сразу по шкале MSK-64. Таким образом, данная в работе [11] оценка интенсивности колебаний при землетрясении 03.02.1923 г. по шкале MSK-64 должна соответствовать в Петропавловске-Камчатском значениям 6–7 баллов, на побережье Кроноцкого залива — 8–9 и в Усть-Камчатске — 7–8 баллов.

В работе [9] находим: «Приехавшие с восточного берега граждане рассказывают: подъезжая к Петропавловску, они заметили, что во время последнего землетрясения выпучило из малого Халактырского озера много земли и ила». Эти данные соответствуют 7-балльному землетрясению. Везде в дальнейшем, где не оговорено особо, будет подразумеваться шкала MSK-64 [18]. Малое Халактырское озеро находилось в 13 км от Петропавловска-Камчатского и в 220 км от эпицентра землетрясения 03.02.1923 г. Поэтому из приведенного описания следует, что 03.02.1923 г. сотрясения в Петропавловске должны были достигать 7 баллов.

В работе [12] читаем: «... В районе пос. Калыгирь произошло сильное землетрясение, при этом в течение 10 минут дно бухты Калыгирь обнажилось и морская вода отступила от берега на две версты. Спустя несколько мгновений дно бухты вновь опустилось. И вода со страшной силой и шумом бросилась на берег. Теперь установлено, что... кошка на протяжении 3 верст завалена песком, русло реки изменилось, причем уровень реки значительно повысился, что произошло, по-видимому, от понижения почвы». Эти данные могут быть классифицированы в диапазоне $I = 9–11$ баллов. Действительно, согласно работе [18] имеем следующее: для землетрясений силой 9 баллов — «на равнинах наводнения, часто заметны наносы песка и ила»; 10 баллов — «в прибрежных районах перемещаются песчаные и илистые массы»; 11 баллов — «значительные деформации почвы в виде... перемещений в вертикальном и горизонтальном направлениях». Как видим, наиболее вероятное значение для интенсивности колебаний в пос. Калыгирь составляет 9 баллов. Значение $I^* = 6$, которое приводится в работе [14], нам представляется ошибочным.

Имеется описание землетрясения в местности, на которой в настоящее время расположен пос. Кроноки, составленное очевидцем [17]: «Юрта была очень ветхая и каждую секунду грозила обрушиться. Поперечная балка была сильно изогнута под тяжестью наваленной на потолке земли и вот-вот обломится... В три часа ночи меня разбудило самое сильное, какое только можно представить, землетрясение. Кукуль вместе со мной, пока я безуспешно пытался вылезти из него, катался взад и вперед при сильном подземном гуле и смешанном шуме от падающих сверху бревен, земли, камней и пр. Едва мог я освободить из кукуля голову и руки. Сквозь дыру, образовавшуюся в обрушившейся части потолка около двери, я увидел на фоне светлого ночного неба шатающийся березняк... Удивительно, что юрта не обрушилась от первых толчков: вероятно, морозом она была сцементирована в один монолитный кусок... Выскочив из палатки... увидел, что из ключей вода перестала течь, и пришел в ужас».

Согласно работе [18], описание бревенчатой юрты как очень «ветхой», но «сцементированной морозом», позволяет отнести ее к типу $B — B$, а обрушение части потолка — к 4-й степени. Тогда интенсивность сотрясений на побережье в районе Кронок должна быть равна 9 баллам.

Ранее из работы [11] также был сделан вывод о том, что интенсивность колебаний в бухте Ольга должна быть равна 9 баллам. Таким образом, интенсивность колебаний в Кроноках при землетрясении 03.02.1923 г. можно считать равной 9 баллам. Значение интенсивности колебаний в Кроноках 03.02.1923 г. нами, по-видимому, определено впервые.

В Козыревске «...ощущалось небывалое колебание почвы, повредившее несколько зданий» [9]. Сотрясения определили как 5–6-балльные, что совпадает с оценкой, приведенной в работе [19].

С помощью эмпирической зависимости между балльностью, с одной стороны, и магнитудой и гипоцентральной расстоянием — с другой [32], были рассчитаны радиусы изосейст, отвечающие полученным значениям балльности (табл. 1).

Таблица 1

Макросейсмические данные о землетрясении 03.02.1923 г. с $M = 8,5$

| Пункт наблюдения | I_0 | I | R , км | I^* |
|--------------------------|-------|-----|----------|-------|
| Петропавловск-Камчатский | 9 | 7 | 230 | 5–6 |
| Калыгирь | 9–10 | 9 | 70 | 6 |
| Жупаново | 9 | 8 | 160 | 8 |
| Кроноки | 9–10 | 9 | 70 | — |
| Козыревск | 7 | 5–6 | 350 | — |
| Усть-Камчатск | 9–10 | 7 | 230 | 7 |

Примечание. В табл. 1, 2 символ I_0 обозначает максимально возможное сотрясение по работе [32]; I — наши определения; R — радиусы изосейст, соответствующие значениям I ; I^* — балльность по работам [13, 14, 29, 32].

На рис. 4 эти изосейсты проведены из пунктов наблюдения в сторону очага землетрясения 03.02.1923 г. Как следует из этого рисунка, все изосейсты проходят через ЮЗ-скопление, и расположенная между ними область — макросейсмический очаг (заштрихованная область) почти целиком находится внутри ЮЗ-скопления. Поэтому можно считать, что макросейсмические данные не противоречат нашей гипотезе, согласно которой за очаг землетрясения 03.02.1923 г. с $M = 8,5$ принимается ЮЗ-скопление землетрясений.

Макросейсмические данные о землетрясении 24.02.1923 г. с $M = 7,7$, по-видимому, отсутствуют. Просмотр большого архивного материала также не дал никаких результатов. В то же время известно описание серии землетрясений в конце февраля — начале марта [10], позволяющее предполагать, что сильнейшее событие этой серии, сопровождавшееся сотрясениями в Усть-Камчатке силою до 5–6 баллов, и является землетрясением 24.02.1923 г.

О положении очага землетрясения 30.01.1917 г. с $M = 8,1$

Координаты эпицентра землетрясения 30.01.1917 г. с $M = 8,1$ в различных источниках различаются на $1,5–2^\circ$. За эпицентр этого землетрясения С. А. Федотовым [26, 27] была принята точка, имеющая по трем в то время равноправным источникам [2, 16, 23] средние координаты. Определение положения очага этого землетрясения было проведено С. А. Федотовым на основании макросейсмических данных: 7–8 баллов в Никольском (о. Беринга), 6 баллов в Ключах и 5 баллов в Петропавловске; размеры очага определены по зависимости $L_\phi(M)$ [28]. Положение очага землетрясения 30.01.1917 г., по С. А. Федотову, изображено на рис. 1 и 5.

Такое положение очага представляется не совсем удачным уже потому, что все три афтершока первого дня [2, 5] оказываются расположенными вне очага. По данным Нового каталога [20], вне очага оказывается расположенным и эпицентр этого землетрясения. Поэтому интересно со всей тщательностью пересмотреть макросейсмические данные о землетрясении 30.01.1917 г. Известны следующие описания этого землетрясения.

Петропавловск. «Петропавловские сейсмографы... записали очень сильное колебание почвы, но никто из обывателей города этого не ощущал, ибо колебания носили здесь медленный волнообразный характер. Максимальное отклонение пера на сейсмограмме — 124 мм, затем

сдвинуло магниты, выбросило перья» [21]. Следовательно, в качестве максимально возможной интенсивности колебаний почвы в Петропавловске при землетрясении 30.01.1917 г. следует принять значение 2–3 балла.

В работе [32] отсутствует значение для интенсивности колебаний почвы в Петропавловске. Значение $I^* = 5$ приводится в работах [13,14], причем только в первой имеются ссылки на более ранние источники [19, 25]. В этих источниках не определяется численное значение балльности, а даются выдержки из приведенного нами описания. Поэтому значение $I^* = 5$ для Петропавловска 30.01.1917 г. без дополнительных пояснений, на наш взгляд, не может быть принято.

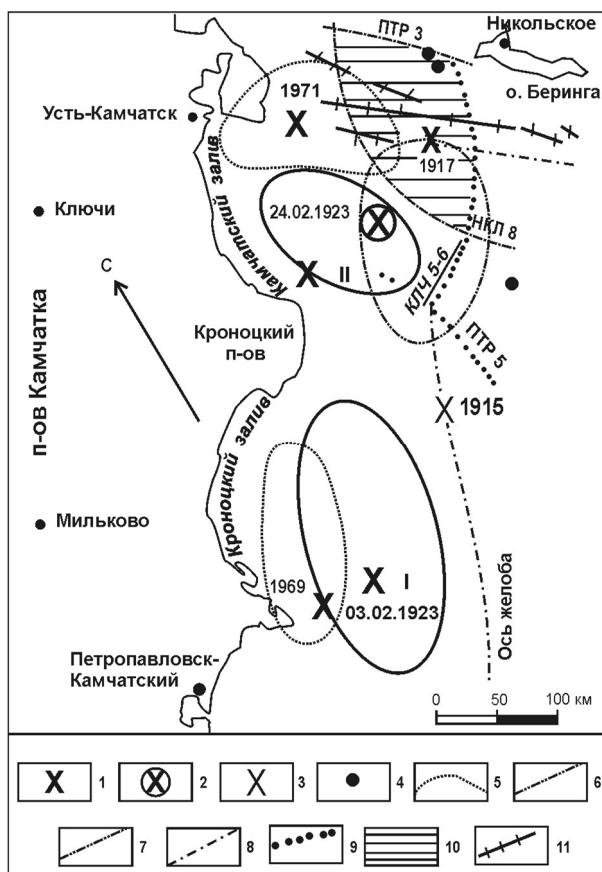


Рис. 5. Макросейсмические данные о землетрясении 30.01.1917 г. с $M = 8,1$:

1 — эпицентры землетрясений с $M \geq 7,6$ в 1917–1971 гг. по работе [20]; 2 — эпицентр землетрясения 30.01.1917 г. с $M = 8,1$ по работам [26, 27, 30, 31, 33]; 3 — эпицентр землетрясения 31.07.1915 г. с $M = 7,3$; 4 — эпицентры афтершоков первого дня 30–31.01.1917 г. с $M = 5,3$ — 5,8; 5 — граница очагов землетрясений 04.05.1959 г. с $M = 7,6$ и 15.12.1971 г. с $M = 7,8$; 6 — предполагаемые границы очагов землетрясений 1923 г.: 03.02 с $M = 8,5$ (I) и 24.02 с $M = 7,7$ (II); 7 — граница очага землетрясения 30.01.1917 г. с $M = 8,1$ по работам [26, 27, 30, 31, 33]; 8 — изосейсты, проведенные в очаг, по нашим определениям (Петропавловск — ПТР, Ключи — КЛЧ, Никольское — НКЛ; цифра обозначает число баллов по шкале MSK-64); 9 — изосейсты, проведенные в очаг, по данным в работах [13, 14, 32]; 10 — область очага землетрясения 30.01.1917 г. с $M = 8,1$ по макросейсмическим данным; 11 — оси тектонических разломов по работе [24]

Ключи. «...Земля колебалась так сильно, что многих укачивало, как на море. Продолжалось оно там до 5 минут, причем колебалась мебель и кровати, пробудились спящие, останавливались часы, разрушались дымовые трубы (по [1, 15], разрушение дымовых труб имело место лишь в некоторых домах. — А. В.). Деревья издавали своеобразный шелест, люди в испуге выбегали на улицу, матери схватывали детей, некоторые падали на колени и молились. Коровы и собаки проявляли сильное беспокойство, стаи птиц снимались с деревьев и парили в воздухе» [21]. Описание соответствует сотрясениям силой 5–6 баллов. Такое же значение приводится и в более ранних работах [13, 14]. Повышенная возбудимость и испуг жителей, по-видимому, были связаны с низкочастотным характером землетрясения.

Никольское (о. Беринга). В работе [8] читаем: «Колебание почвы было настолько сильным, что люди, находившиеся в домах, с трудом могли стоять на ногах. Благодаря тому, что все здешние дома американского типа, скрепленные гвоздями, землетрясение никакого вреда непосредственно им не причинило, но заметно расшатало. Землетрясение отозвалось разрушительно главным образом на кирпичных печах и дымовых трубах. Из 8 голландских печей, имевшихся на о. Беринга, разрушены 2, с остальных осыпалась штукатурка, а некоторые, кроме того, потрескались. Что же касается дымовых труб, имеющихся в домах туземцев, то большая часть из них упала на землю, а уцелевшие сильно повреждены. От первого же сильного толчка в домах со столов, полок и стен попадали на пол различные хозяйственные вещи и посуда... в некоторых домах опрокинулись топившиеся в то время железные каминные... на обнажившейся земле обнаружилось произведенные землетрясением трещины шириною от едва заметных до 1½ вершков» (6,3 см. — А. В.).

Из описания следует, что сооружения можно отнести к *B*-типу, повреждения — к 3–4 степени. Тогда опрокидывание тяжелых предметов, трещины в грунте шириною 4–8 см соответствуют сотрясениям силой 8 баллов. Такое же значение приводится и в более ранних работах [13, 14].

На основании полученных данных об интенсивности сотрясений в Петропавловске, Ключах и Никольском 30.01.1917 г. при магнитуде $M = 8,1$ по эмпирическому соотношению в работе [32] были рассчитаны радиусы изосейст (табл. 2).

Таблица 2

Макросейсмические данные о землетрясении 30.01.1917 г. с $M = 8,1$

| Пункт наблюдения | I_0 | I | R , км | I^* |
|------------------|-------|-----|----------|-------|
| Петропавловск | 9 | 2–3 | 510 | 5 |
| Ключи | 7 | 5–6 | 300 | 6 |
| Никольское | 9 | 8 | 130 | 7–8 |

Соответствующие дуги, проведенные из этих пунктов наблюдения в район очага землетрясения, изображены на рис. 5. Видно, что эпицентры сильнейшего события и двух из трех афтершоков первого дня расположены внутри области, оконтуренной изосейстами-дугами. Размеры этой области составляют $180 \cdot 90 \text{ км}^2$ и близки размерам очага землетрясения с $M = 8,1$ [см. равенства (5)]. Поэтому можно предположить, что очаг землетрясения 30.01.1917 г. в основном расположен в области, ограниченной изосейстами, и относительно очага, по работам [26, 27, 30, 31, 33], сдвинут на север примерно на 100 км (см. рис. 5).

О магнитуде землетрясения 31.07.1915 г.

Землетрясение 31.07.1915 г., согласно Атласу [2], имело магнитуду $M = 7\frac{3}{4}$. Сотрясения в Петропавловске достигали 5 баллов [32] при удалении от эпицентра на 310 км.

В Новом каталоге [20] магнитуда этого землетрясения $M = 7,3$. Близкое значение $M = 7,4$ было получено нами при переопределении магнитуды этого землетрясения с помощью зависимости магнитуды от числа станций мировой сети [5].

Переопределение магнитуд в Новом каталоге произошло вследствие привлечения более полных данных мировой сети станций. Поэтому землетрясение 31.07.1915 г. с $M = 7,3$ можно исключить из класса событий, очаги которых удовлетворяют правилу непересечения.

Обсуждение результатов

В настоящей работе путем анализа макросейсмических данных, по-видимому, впервые при землетрясении 03.02.1923 г. с $M = 8,5$ оценена балльность в пос. Кроноки ($I = 9$). Переопределены значения балльности для Петропавловска-Камчатского и пос. Калыгирь при землетрясениях 03.02.1923 г. и 30.01.1917 г. — ранее принятые значения для обоих пунктов в 1923 г. оказались на 1–3 балла занижены (см. табл. 1), а для Петропавловска-Камчатского при землетрясении 1917 г., наоборот, на 2–3 балла завышены (см. табл. 2).

Совместный анализ уточненных инструментальных и макросейсмических данных о сильнейших землетрясениях, происшедших в 1915, 1917, 03.02.1923 гг., очаги которых расположены в районе Кроноцкого полуострова и в акватории прилегающих к нему заливов, дал возможность переопределить положение и размеры очагов этих землетрясений.

В феврале 1923 г., по-видимому, произошли два землетрясения, очаги которых должны удовлетворять правилу непересечения: 03.02 с $M = 8,5$ и 24.02 с $M = 7,7$. При этом положение и размеры очага первого толчка 03.02 практически совпадают с первым вариантом очага этого землетрясения по данным С. А. Федотова [26, 27, 30, 31, 33], а очаг второго толчка 24.02 расположен в месте скопления последующих землетрясений в Камчатском заливе (см. рис. 2, 4).

Далее очаг землетрясения 30.01.1917 г. с $M = 8,1$ оказался расположенным на 100 км севернее очага этого землетрясения по работам [26, 27, 30, 31, 33].

Наконец, землетрясение 31.07.1915 г. с $M = 7,3$ вследствие переопределения магнитуды следует исключить из класса событий, очаги которых удовлетворяют правилу непересечения.

Как известно [26, 27], положение очагов будущих курило-камчатских сильнейших землетрясений наиболее вероятно в местах, где примерно в течение сейсмического цикла не происходили события такой силы. Поэтому переопределение положения и размеров очагов сильнейших землетрясений в районе Кроноцкого полуострова и акватории прилегающих к нему заливов равносильно изменению долгосрочного сейсмического прогноза для этого района Камчатки. Опираясь на полученные в настоящей работе результаты о положении очагов сильнейших землетрясений 1915, 1917 и 1923 гг., можно следующим образом сформулировать возможный вариант долгосрочного сейсмического прогноза для рассматриваемого района Камчатки (рис. 6).

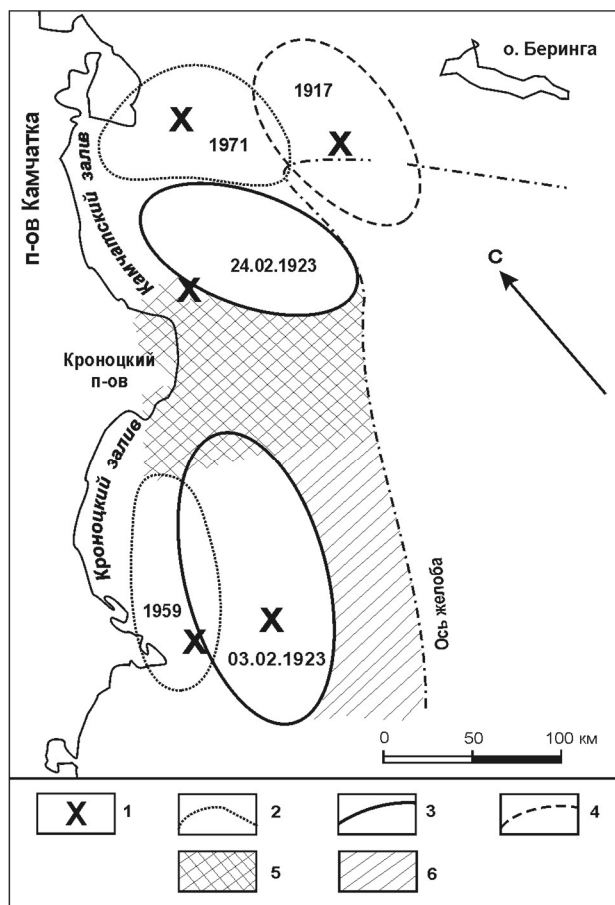


Рис. 6. Карта очагов камчатских землетрясений с $M \geq 7,6$ в 1917–1971 гг. и вероятных мест очагов будущих землетрясений такой же силы:

1 — эпицентры землетрясений с $M \geq 7,6$ в 1917–1971 гг.; 2 — границы очагов землетрясений 04.05.1959 г. с $M = 7,6$ и 15.12.1971 г. с $M = 7,8$; 3 — предполагаемые границы очагов землетрясений 1923 г.: 03.02 с $M = 8,5$ и 24.02 с $M = 7,7$; 4 — предполагаемый очаг землетрясения 30.01.1917 г. с $M = 8,1$; 5 — наиболее вероятные места очагов будущих землетрясений с $M \geq 7,6$; 6 — менее вероятные места очагов таких же землетрясений

К наиболее вероятным местам, где могут располагаться очаги будущих землетрясений с $M \geq 7,6$, следует отнести районы напротив Кроноцкого полуострова и северо-восточной части Кроноцкого залива. В пределах Камчатского залива в течение ближайших десятилетий землетрясения с $M \geq 7,6$ произойти, вероятно, не могут, так как сейсмоактивный объем этой части района заполнен очагами землетрясений 24.02.1923 г. с $M = 7,7$ и 15.12.1971 г. с $M = 7,8$. Предложенный вариант прогноза не совпадает ни с одним из двух вариантов в работах [26, 27, 30, 31, 33].

Автор благодарит С. А. Федотова, Л. С. Шумилину и В. М. Зобина за полезное обсуждение работы и ценные замечания, а также выражает признательность сотрудникам Государственного архива Камчатской области за помощь при подборке материалов о землетрясениях прошлых лет.

Литература

1. *Аппаратный журнал* Петропавловской сейсмостанции за январь 1917 г. // Землетрясение будет завтра / А. В. Викулин, Н. В. Семенец, В. А. Широков. — Петропавловск-Камчатский: КТС ИФЗ АН СССР, 1989. — С. 5–6 (вкладка).
2. *Атлас землетрясений в СССР*. — М.: АН СССР, 1962. — 337 с.
3. *Викулин А. В.* О взаимодействии эпицентральных областей курило-камчатских землетрясений // Сейсмический прогноз и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1982. — С. 11–12.
4. *Викулин А. В., Ким Ч. У.* О магнитудной классификации землетрясений Камчатки, Курил и северо-восточной части Японии в 1911–1961 гг. // Вулканология и сейсмология. — 1983. — № 5. — С. 96–102.
5. *Викулин А. В.* Курило-камчатские землетрясения. Данные наблюдений 1911–1952 гг. — М.: ММЦД Б, 1983. — 82 с.
6. *Викулин А. В.* О возможности изучения тонкой структуры очага и источника цунами. — Горький: ИПФ АН СССР, 1984. — С. 25.
7. *Викулин А. В.* Свойства эпицентральных областей курило-камчатских землетрясений. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1984. — С. 54–78.
8. *Камчатский листок*. — 1917. — № 885.
9. *Полярная звезда*. — 1923. — № 15.
10. *Полярная звезда*. — 1923. — № 28.
11. *Полярная звезда*. — 1923. — № 45.
12. *Полярная звезда*. — 1923. — № 46.
13. *О сейсмическом микрорайонировании территории Петропавловска-Камчатского* / А. В. Горячев, И. А. Ершов, Ф. А. Кириллов [и др.] // Тр. ИФЗ АН СССР. — 1963. — № 28 (195). — С. 3–60.
14. *Камчатка и Курильские острова* / А. В. Горячев, Ф. А. Кириллов, Н. В. Кондорская [и др.] // Сейсмическое районирование СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 408–433.
15. *Дело Петропавловской сейсмостанции* // Гос. архив Камчатской области. Фонд № 372.
16. *Кондорская Н. В., Ландырева Н. С.* Особенности сейсмичности Камчатской области по данным наблюдений сети стационарных станций // Изв. АН СССР. Сер. Геофизика. — 1962. — № 10.
17. *Малэс Рене.* В стране охоты и вулканов. — Хабаровск; Благовещенск, 1928. — 69 с.
18. *Медведев С. В.* Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 151–162.
19. *Никифоров П. М.* Сейсмология // Тихий океан: рус. науч. исслед. — Л.: АН СССР, 1926. — С. 77–83.
20. *Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г.* — М.: Наука, 1977. — 536 с.
21. *Пурин А. А.* Землетрясения Камчатки и их регистрация. — Петропавловск-Камчатский, 1917. — 23 с.
22. *Ризниченко Ю. В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исслед. по физике землетрясений. — М.: Наука, 1976. — С. 9–27.
23. *Рихтер Ч. Ф.* Элементарная сейсмология. — М.: Иностр. лит., 1963. — 670 с.

24. *Селиверстов Н. И.* Строение зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг по данным непрерывного сейсмического профилирования // *Вулканология и сейсмология.* — 1983. — № 2. — С. 53–67.
25. *Уланов А. С.* К материалам по сейсмологии Дальнего Востока // *Изв. Дальневост. геофизического ин-та.* — 1931. — Вып. I (VIII). — С. 101–137.
26. *Федотов С. А.* О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // *Тр. ИФЗ АН СССР.* — 1965. — № 36 (203). — С. 66–93.
27. *Федотов С. А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // *Сейсмическое районирование СССР.* — М.: Наука, 1968. — С. 121–150.
28. *Федотов С. А.* О сейсмичности, свойствах мантии и сейсмическом прогнозе в области Курило-Камчатской дуги: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — М.: ИФЗ АН СССР, 1969.
29. *Федотов С. А., Багдасарова А. М.* Сейсмичность Камчатки и Командорских островов в 1897–1961 гг. по данным инструментальных наблюдений // *Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке.* — Новосибирск: Наука, 1974. — С. 7–34.
30. *Федотов С. А.* Реализация долгосрочного сейсмического прогноза для тихоокеанской фокальной зоны у берегов Курило-Камчатской дуги на 1965–1970 гг. и уточненный прогноз на 1971–1975 гг. // *Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке.* — Новосибирск: Наука, 1974. — С. 101–109.
31. *Уточнение границ очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги / С. А. Федотов, С. Д. Чернышов, Г. В. Чернышова, А. В. Викулин // Вулканология и сейсмология.* — 1980. — № 6. — С. 52–67.
32. *Камчатка и Командорские острова / С. А. Федотов, А. А. Гусев, О. Н. Потапова, Л. С. Шумилина // Сейсмическое районирование территории СССР.* — М.: Наука, 1980. — С. 269–283.
33. *Федотов С. А., Чернышов С. Д.* Реализация долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на 1976–1980 гг. и прогноз на 1981–1985 гг. // *Вулканология и сейсмология.* — 1983. — № 5. — С. 74–80.
34. *Mogi K.* Sequential occurrence of recent great earthquakes // *J. Phys. Earth.* — 1968. — Vol. 16. — P. 30–36.
35. *Kelleher J., Savino J.* Distribution of seismicity before large strike-slip and thrust earthquakes // *J. Geophys. Res.* — 1975. — Vol. 80. — № 2. — P. 260–271.
36. *Kelleher J., Syres L., Oliver J.* Possible criteria for predicting earthquake location and their application to major plate boundaries of the Pacific and Caribbean // *J. Geophys. Res.* — 1973. — Vol. 78. — № 14. — P. 2547–2585.
37. *Ohtake M., Matumoto T., Latham G.V.* Seismicity gap near Oaxaca, Southern Mexico, as a probable precursor to a large earthquake // *Pure appl. Geophys.* — 1977. — Vol. 115. — P. 375–385.
38. *Proceedings of Conference VI on Methodology for Identifying Seismic Gaps and Soon-to-Break Gaps.* — California, 1978. — 924 p.
39. *Sykes L.R.* Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps and earthquake prediction for Alaska and Aleutians // *J. Geophys. Res.* — 1971. — Vol. 76. — № 2. — P. 8021–8041.

А. В. Викулин¹, В. К. Гусяков², В. В. Титов²

¹ Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН

² Вычислительный центр СО АН СССР

О ПРИРОДЕ МАКСИМАЛЬНОГО ЦУНАМИ*

С привлечением данных о цунами подтверждается гипотеза о том, что Большое Камчатское землетрясение 04.11.1952 г. с магнитудой $M = 8,5$ представляло собой толчок-дуплет. Приводятся данные о других сильнейших толчках-дуплетах. Формулируется вывод о том, что природа максимального цунами определяется особенностями взаимодействия очагов сильнейших землетрясений.

Камчатка — Северные Курилы

Большое Камчатское землетрясение с магнитудой $M = 8,5$, происшедшее 04.11.1952 г. у берегов Камчатки и Северных Курил, можно отнести к разряду уникальных событий. Область афтершоков этого землетрясения протянулась вдоль береговой линии на 600 км [1]. Протяженность береговой линии, подверженной цунами высотой 5 м и более, составила около 800 км [2].

Детальный анализ сейсмических данных по очагу Большого Камчатского землетрясения показал [3], что он был представлен двумя отдельными толчками с интервалом в 5 с между ними. При этом каждому из толчков отвечала своя очаговая область (рис. 1). Размеры областей составили примерно 250 км (вблизи желоба против Авачинского залива) и 200 км (против Северных Курил вблизи береговой линии) при расстоянии между ними около 150 км. Однако относительно природы этого очага существует другая точка зрения [4, 5], согласно которой 04.11.1952 г. произошло одно сильнейшее землетрясение. Его очаг имел протяженность около 600 км и покрывал оба выделенных в работе [3] очага, включая пространство между ними.

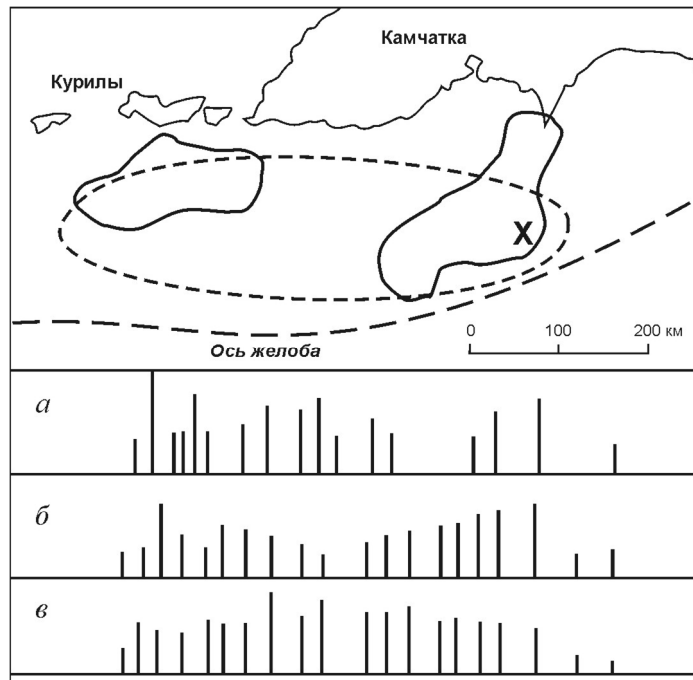


Рис. 1. Очаг землетрясения 04.11.1952 г. по данным работ [3] (сплошная линия) и [5] (пунктир). Распределение наблюдаемых (а) и расчетных высот цунами для случаев двусвязной (б) и односвязной (в) очаговых областей

* 15 (66). Вычислительные технологии. 1992. Т. 1. № 3. С. 131–134.

В настоящее время достаточно полно развиты методы численного моделирования возбуждения и распространения цунами в прибрежной зоне [6]. Такое исследование на примере Большого Камчатского землетрясения было проведено с помощью разработанной в Вычислительном центре СО АН СССР интерактивной системы моделирования цунами на персональной ЭВМ [7]. Оказалось, что расчетное распределение высот цунами вдоль Северных Курил и Камчатки после этого землетрясения полнее отвечает наблюдаемым результатам для модели двойного очага (см. рис. 1).

Реконструкция сейсмического процесса, имевшего место в данном регионе в XVIII–XIX вв. [8], показала, что землетрясение 17.10.1737 г. с $M = 8,4$, по-видимому, также было представлено двумя сильнейшими толчками, которым соответствовали те же очаги-блоки сейсмофокальной зоны. Землетрясение 17.10.1737 г. по протяженности плейстосейстовой области [9] и по высоте цунами [2] также можно отнести к разряду уникальных событий.

Желоб Нанкай

К числу наиболее продолжительных во времени и достаточно подробно описанных в литературе землетрясений можно отнести ряд сильнейших из них, происшедших вблизи юго-западной части о. Хонсю в районе желоба Нанкай. Этот, по-видимому, не имеющий аналогов ряд наблюдений насчитывает 15 землетрясений с $M = 7,9$, происшедших с 684 г. до настоящего времени. В работах [10, 11] определяется с использованием макросейсмических данных положение очагов сильнейших нанкайских землетрясений, анализируется их взаимное расположение в пространстве и распределение по времени. В результате такого анализа, в частности, было показано, что очаг каждого из сильнейших землетрясений 31.01.1605 г. с $M = 7,9$ и 28.10.1707 г. с $M = 8,4$ представлял собой двусвязную область. Размеры каждой из областей составляли 100–200 км при примерно таком же расстоянии между ними (рис. 2).

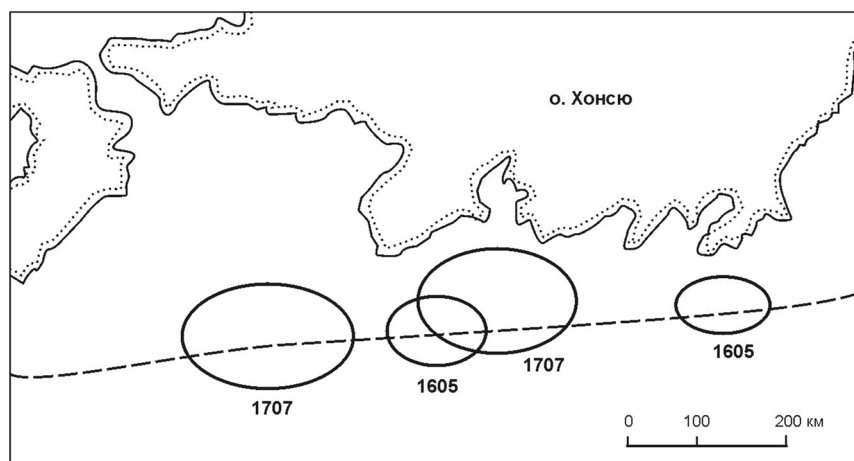


Рис. 2. Положение очагов землетрясений-дуплетов 31.01.1605 г. и 28.10.1707 г. по данным работ [10, 11]

При этих землетрясениях разрушительное цунами высотой 5 м и более наблюдалось на всем тихоокеанском побережье о. Хонсю. В районе желоба Нанкай на протяжении более 1000 км максимальные высоты цунами достигали 25–30 м [12].

Обсуждение результатов

На протяжении более 4 000 км сейсмофокальной зоны (от Камчатки на севере до юго-западной части острова Хонсю на юге) нигде более, кроме как на ее концах, не отмечено таких аномально сильных цунами как по амплитуде, так и по протяженности затронутой ими береговой линии. Нигде более в этой же зоне, кроме как опять же на ее концах, не отмечено сильнейших землетрясений-дуплетов с очаговыми областями, отстоящими друг от друга на расстоянии,

соизмеримом с их размерами. Такое совпадение нам представляется неслучайным. Оно позволяет предположить, что аномально большое по амплитуде и протяженности затронутой береговой линии цунами имеет место тогда, когда землетрясение представляет собой дуплет, каждый из толчков которого имеет свою очаговую область при расстоянии между ними, соизмеримом с их размерами. Взаимодействие волн цунами, порожденных двумя отдельными очагами, приводит к характерному распределению высот волн вдоль побережья с максимумами вблизи обеих оконечностей зоны затопления, а не вблизи ее центра, как это имеет место для обычных цунамигенных землетрясений в зонах островных дуг.

Очаги сильнейших землетрясений, как показано в работе [13], можно считать взаимодействующими. Существование толчков-дуплетов, очевидно, можно рассматривать как некое специфичное проявление такого взаимодействия. Как показано нами на примере численной модели Большого Камчатского землетрясения, данные о проявлениях цунами на побережье отражают, по-видимому, специфику такого взаимодействия. Следовательно, мы приходим к выводу о том, что можно ставить задачу выявления особенностей цунами, связанных со взаимодействием очагов сильнейших землетрясений.

Литература

1. Федотов С. А. Определение областей возникновения волн цунами при Камчатском землетрясении 4 ноября 1952 г. и Итурупском землетрясении 6 ноября 1958 г. // Изв. АН СССР. Сер. Геофизика. — 1962. — № 10. — С. 1333–1339.
2. Соловьев С. Л. Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов // Проблема цунами. — М.: Наука. 1968. — С. 7–50.
3. Викулин А. В., Чернобай И. П. О некоторых особенностях двух сильнейших курило-камчатских землетрясений // Физические поля и свойства горных пород Северо-Востока СССР. — Магадан, 1986. — С. 44–49.
4. Ben-Menachem A., Rosenman M. Amplitude pattern of tsunami: waves from submarine earthquakes // J. Geophys. Res. — 1972. — Vol. 77. — № 17. — P. 3097–3128.
5. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 121–150.
6. Гусяков В. К., Чубаров Д. Б. Численное моделирование возбуждения и распространения цунами в прибрежной зоне // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1987. — № 11. — С. 53–64.
7. Гусаков В. К., Марчук А. Г., Титов В. В. Моделирование возбуждения и распространение цунами на персональной ЭВМ // Количественная оценка сейсмической опасности на Дальнем Востоке. — Южно-Сахалинск, 1991. — С. 91–92.
8. Викулин А. В. Миграции очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений и их повторяемость // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1.
9. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. — М.: Наука, 1977. — 536 с.
10. Викулин А. В., Викулина С. А. Закономерности размещения очаговых областей сильнейших землетрясений в районе желоба Нанкай. — Петропавловск-Камчатский, 1989. — 44 с. — Препринт Камчатской геофизической станции ИФЗ АН СССР.
11. Vikulin A. V. Migration of the largest earthquake sources across the Nankai trench // Tsunamis: Their Science and Hazard Mitigation. Proceedings of the International Tsunami Symposium. — Novosibirsk, 1990. — P. 141–148.
12. Соловьев С. Л., Го Ч. Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. — М.: Наука, 1974. — 310 с.
13. Викулин А. В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–824.

А. В. Викулин

Камчатская опытно-методическая сейсмологическая станция ГС РАН

ПРОГНОЗ ВРЕМЕНИ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ У БЕРЕГОВ КАМЧАТКИ И СЕВЕРНЫХ КУРИЛ*

Статья печатается в дискуссионном порядке (примеч. науч. ред.)

На основании полученных автором данных о миграции очагов сильнейших землетрясений XVIII–XX вв. и их повторяемости строится прогноз времени будущих сильнейших северо-курильских и камчатских землетрясений конца XX — начала XXI столетий. В рамках рассматриваемого района предлагается вероятная схема развития сейсмического процесса.

FORECAST OF THE LARGEST EARTHQUAKES AT THE COASTS OF KAMCHATKA AND NORTH KURILES

A forecast of the largest earthquakes for the end of the 20th and beginning of the 21st centuries in the North Kuriles and Kamchatka is made based on the analysis of the largest earthquake foci migration and reiteration of the earthquakes in 18th and 20th centuries. A possible scheme of development of seismic process for this area is suggested.

Введение

В статье [4] в значительной степени на основании результатов, полученных для желоба Нанкай [1], выявлены следующие свойства сейсмического режима для сейсмофокальной зоны у берегов Камчатки и Северных Курил:

1. Расположение очагов сильнейших ($M \geq 7,6$) землетрясений XX в. позволило разбить на девять блоков сейсмофокальную зону у берегов Камчатки и Северных Курил. При этом блоки по своим размерам были разделены на две группы. К первой отнесены блоки, расположенные у берегов Северной Камчатки между мысами Шипунский и Озерной, протяженностью $L = 120 \pm 20$ км. Ко второй группе отнесены блоки, расположенные у берегов Южной Камчатки и Северных Курил, между проливом Крузенштерна и мысом Шипунский: $L = 190 \pm 20$ км. Северные и южные блоки различаются по значениям магнитуд сильнейших землетрясений, происшедших в них в XX в.: соответственно $M = 7,9 \pm 0,3$ и $8,2 \pm 0,3$.

2. Очаги всех сильнейших землетрясений XVIII–XX вв. группируются в миграционные цепочки, объединяющие несколько блоков и вытянутые вдоль береговой линии Камчатки в направлении с юго-запада на северо-восток. Длительность событий в таких цепочках не превышает 21 года.

3. С использованием того же сейсмологического материала построены цепочки очагов сильнейших землетрясений, скорости миграции в которых противоположны по направлению и близки по величине, составляя в среднем 4 ± 1 км/год. Такие цепочки «отстоят» одна от другой примерно на $\Delta t_0 = 100 \pm 20$ лет.

4. Анализ сейсмологических данных позволяет высказать предположение, согласно которому в пределах каждого блока очаги сильнейших камчатских землетрясений имеют тенденцию мигрировать вкрест сейсмофокальной зоны. При этом направление миграции для различных блоков, по-видимому, может быть принято различным; величина скорости поперечной миграции составляет $0,3–0,4$ км/год.

5. В пределах каждого блока сильнейшие землетрясения повторяются в среднем один раз в $T_0 = 96 \pm 32$ года. При этом значение повторяемости для южно-камчатских и северо-курильских блоков $T_{10} = 106 \pm 8$ лет. Значения повторяемости в пределах северных камчатских блоков между полуостровами Шипунский и Камчатский (блоки III–V на рис. 3 в работе [4]) $T_c = 85 \pm 40$ лет, распадаясь на две подгруппы значений: $T_{c,1} = 124 \pm 11$ лет и $T_{c,2} = 46 \pm 8$ лет. «Расщепление» значений повторяемостей (частот) для северных камчатских блоков и района сочленения Кам-

* 16 (68). Вулканология и сейсмология. 1992. № 1. С. 62–69.

чатского и Алеутского глубоководных желобов, вероятно, может свидетельствовать о том, что сейсмические процессы в каждой из этих островных дуг имеют различные характерные времена (частоты).

Близость значений Δt_0 и T_0 может указывать на то, что сейсмический процесс, по-видимому, одинаково хорошо описывается в рамках моделей, опирающихся как на миграцию со скоростью около 4 км/год, так и на повторяемость сильнейших землетрясений в одном блоке.

Полученные результаты позволяют перейти к построению схемы сейсмического прогноза для Камчатки, Северных Курил и Командорских островов. Такой прогноз в принципе позволяет определять интервалы времени, в течение которых в пределах выделенных блоков можно ожидать сильнейшие землетрясения и предсказывать их макросейсмический эффект.

Южная Камчатка — Северные Курилы

Строго в узлах миграционных цепочек 1-го типа (миграция вдоль сейсмофокальной зоны в обоих направлениях со скоростью около 4 км/год) расположены очаги сильнейших землетрясений 1737–1952 гг., происшедшие в пределах Южной Камчатки — Северных Курил (блоки VI–IX). В самих блоках наиболее близки и значения повторяемостей ($T_{Ю} = 106 \pm 8$ лет) сильнейших землетрясений. Эти данные позволяют в рамках проведенных нами построений рассчитать временные интервалы, в течение которых в пределах южно-камчатских и северо-курильских блоков следует ожидать в будущем сильнейшие землетрясения.

Продолжая миграционные цепочки в будущее, можно видеть, что центральные части IX, VIII и VII блоков пересекаются ими соответственно в 2015, 2045 и 2006 ($\pm 10-20$) гг. Эти же моменты времени близки временам, которые «разрешены», и значениям повторяемости $T_{Ю}$ сильнейших землетрясений в блоках VI–IX: 2021, 2052 и 2010 (± 8) гг.

Рассчитанные временные интервалы будущих сильнейших землетрясений на юге Камчатки и Северных Курилах приведены в таблице.

Времена будущих сильнейших землетрясений с очагами в пределах Южной Камчатки — Северных Курил (блоки VI–IX)*

| Время будущих сильнейших землетрясений | Номер блока | | | |
|--|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | IX | VIII | VII | VI |
| Год | 2018 | 2049 | 2008 | 2058 |
| Временной интервал, годы | 2008–2028 | 2039–2059 | 1998–2018 | 2048–2068 |

* Следует отметить, что при выбранном способе оценки длительности прогнозируемых временных интервалов в них будут попадать около 50 % ожидаемых землетрясений, а при удвоении длительности интервала — около 90 % (примеч. науч. ред.).

Итак, данные о миграции 1-го типа и повторяемости сильнейших землетрясений в пределах одного блока показывают, что сильнейшие землетрясения с очагами в блоках IX, VIII и VII должны произойти соответственно в 2018, 2049 и 2008 гг. При этом ошибка в определении момента времени изменяется в пределах 8–20 лет и в среднем, по-видимому, может быть принята равной 10 годам.

Интервал времени, в течение которого может произойти сильнейшее землетрясение с очагом в блоке VI, можно определить следующим образом: $1952 + T_{Ю} = 2058 \pm 8$ лет.

Северная Камчатка — Командорские острова

Очаги сильнейших камчатских землетрясений в I–V блоках и вблизи Командорских островов не располагаются строго в узлах, лежащих на пересечении миграционных цепочек 1-го типа. По этой причине в рамках наших построений времена сильнейших землетрясений с очагами в северных блоках можно рассчитать с меньшей определенностью. Однако зная времена будущих сильнейших землетрясений в пределах южных блоков и используя данные о миграционных цепочках 2-го типа (миграция вдоль сейсмофокальной зоны в направлении

с юго-запада на северо-восток при длительности цепочки, не превышающей 21 года) и повторяемости сильнейших землетрясений в блоках I–V, можно наметить вероятные схемы развития сейсмического процесса.

Сильнейшие землетрясения на Северных Курилах и на юге Камчатки, как уже отмечалось, могут произойти не ранее 1998 г. Длительность миграционной цепочки 2-го типа лежит в пределах 0–21 год. Поэтому сильнейшее землетрясение, а возможно, и несколько таких землетрясений в пределах Северной Камчатки следует ожидать в течение 1998–2019 гг. Наиболее вероятно, что очаги таких землетрясений будут расположены в IV (против Кроноцкого полуострова) и II (между очаговыми областями сильнейших землетрясений 1969 и 1971 гг.) блоках, так как именно здесь сильнейшие землетрясения не наблюдались в течение достаточно протяженных отрезков времени, равных соответственно 90 и 200 годам.

Если первое сильнейшее землетрясение на юге зоны (Северные Курилы и юг Камчатки) произойдет не в 1998 г., а несколько позже (например, в 2010 г.), то и вероятный временной интервал для северной части зоны должен передвинуться в пределы 2010–2031 гг.

Возможен также вариант, при котором сильнейшее землетрясение на севере Камчатки с очагом, например, в блоке IV произойдет почти одновременно (с интервалом от нескольких секунд до нескольких месяцев) с землетрясением на юге с очагом в VII или IX блоках. Возможна и такая схема течения сейсмического процесса, которая, по-видимому, имела место в 1792 г. [4]: двойной толчок с очагами в VII и II–III блоках.

Нельзя исключать возможность того, что сильнейшее землетрясение произойдет и за пределами рассматриваемого участка сейсмофокальной зоны с очагом в непосредственной близости от о-ва Карагинский. На то, что сейсмичность мигрирует вдоль Камчатки далее на северо-восток, указывают сильные землетрясения, происшедшие 22.01.1976 г., 10.09.1985 г. и 13.10.1988 г., с очагами, расположенными соответственно между о-вом Карагинский и Камчаткой (в проливе Литке), в Олюторском заливе и в верховьях р. Пахачи.

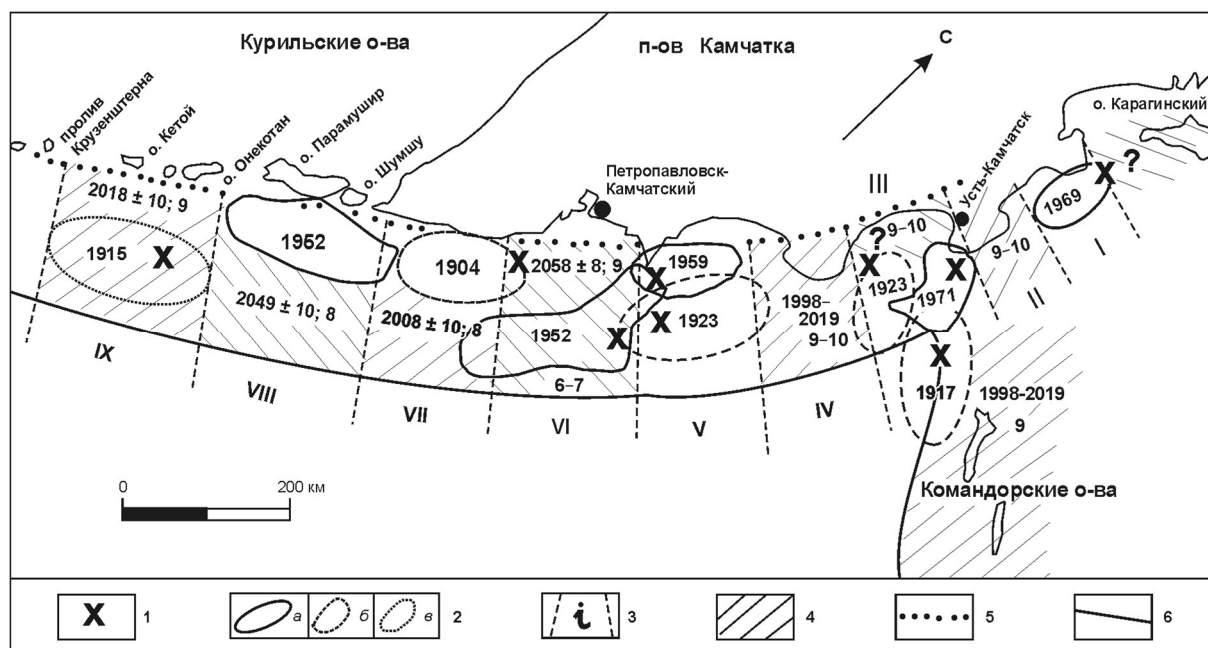
В случае двух почти одновременных толчков с очагами на юге и севере Камчатки сейсмический процесс может получить свое развитие и в сторону Командорских островов. Наиболее вероятно, что в этом случае очаг сильнейшего землетрясения может быть расположен в части сейсмофокальной зоны: вблизи линии, являющейся продолжением очага сильнейшего землетрясения 1917 г., либо против Командорских островов, либо непосредственно под этими островами, либо под беринговоморским шельфом.

Макросейсмический эффект прогнозируемых землетрясений

Места, в которых согласно схеме наших построений возможно в ближайшем будущем расположение очагов сильнейших ($M \geq 7,6$) землетрясений у берегов Северных Курил, Камчатки и Командорских островов, представлены на рисунке. Там же приведены и интервалы времени, когда такие землетрясения следует ожидать. Дадим краткие пояснения к этому рисунку.

Будем полагать, что очаг сильнейшего камчатского землетрясения не может располагаться к западу от границы сейсмофокальной зоны. При анализе используем также данные о поперечной миграции, приведенные ранее. Макросейсмический эффект оценивается по шкале MSK-64 [7] для средних грунтов.

IX блок, 2008–2028 гг. Достоверно известно только одно сильнейшее землетрясение, очаг которого располагался в пределах этого блока: 01.05 1915 г., $M = 8,3$. Макросейсмические данные об этом землетрясении неизвестны [9, 11]. Согласно каталогам [5, 8] известны только данные о трех афтершоках этого землетрясения. Положение очага землетрясения 1915 г. определено весьма приближенно. Поэтому можно ожидать, что очаг будущего сильнейшего землетрясения может находиться в любой части блока. Отсюда делается вывод, что при ожидаемом сильнейшем землетрясении сотрясения максимальной интенсивности могут достигать 9 баллов на близкорасположенных о-вах Кетой и Онекотан.



Прогнозная карта расположения очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений в будущем:

1 — эпицентры сильнейших землетрясений; 2 — уверенные (а), менее уверенные (б) и возможные (в) границы очаговых областей сильнейших землетрясений XX в.; цифра обозначает год сильнейшего землетрясения; 3 — границы между блоками сейсмофокальной зоны, $i = I-IX$; 4 — места вероятного расположения очагов сильнейших землетрясений в будущем; цифрами обозначены год ожидаемого землетрясения, временной интервал и максимальное значение балльности на берегу при землетрясении; 5 — западная граница сейсмофокальной зоны; 6 — ось глубоководного желоба

VIII блок, 2039–2059 гг. Вблизи западной границы сейсмофокальной зоны расположен очаг второго толчка землетрясения 04.11.1952 г., $M = 8,5$. Поэтому наиболее вероятным местом очага будущего сильнейшего землетрясения нам представляются районы, расположенные в центральной части блока и в части, прилегающей к оси глубоководного желоба. Таким образом, наибольший макросейсмический эффект, который в этом случае будет достигаться на близко-расположенных к очагу такого землетрясения о-вах Парамушир, Шумшу и на мысе Лопатка, не превысит, по-видимому, 8 баллов.

VII блок, 1998–2018 гг. В пределах этого блока с интервалом 25.06.1904 г. в 6 часов произошло два землетрясения с $M = 7,7$ очаги которых, как и очаг землетрясения 1952 г. в VIII блоке, были расположены вблизи западной границы сейсмофокальной зоны. Оба толчка сопровождалась в Петропавловске-Камчатском сотрясениями до 8 баллов. Вероятное расположение очага будущего сильнейшего землетрясения в этом блоке такое же, как и в соседнем VIII блоке. Максимальный макросейсмический эффект при таком землетрясении будет достигаться на побережье Камчатки, расположенном против его очага, где он не превысит 8 баллов. При таком землетрясении интенсивность колебаний в Петропавловске-Камчатском не должна быть больше 7 баллов.

VI блок, 2048–2068 гг. Этот блок расположен в Авачинском заливе напротив Петропавловска-Камчатского. При предыдущих сильнейших землетрясениях 1737, 1841 и 1952 гг. с очагами в этом блоке сотрясения в Петропавловске-Камчатском достигали соответственно 9 (8–9), 8 и 7 баллов. В согласии с этими данными можно принять, что каждый из последующих очагов таких землетрясений располагался на все более далеком расстоянии от западной границы сейсмофокальной зоны, т. е. от береговой линии Камчатки. На основании этих данных нами был сделан вывод о том, что в авачинском блоке в течение 1737–1952 гг. существовала поперечная миграция очагов сильнейших землетрясений в сторону от береговой линии. Данные о полном цикле поперечной миграции отсутствуют. Поэтому неизвестно, удалился ли очаг последнего сильнейшего землетря-

сения этой серии событий на максимально возможное расстояние от береговой линии. Можно принять два варианта расположения очага будущего сильнейшего землетрясения в пределах авачинского блока. По первому варианту очаг будет располагаться вблизи оси глубоководного желоба. Интенсивность колебаний в Петропавловске-Камчатском в этом случае не превысит 6–7 баллов. Согласно второму варианту можно предположить, что очаг будущего сильнейшего землетрясения будет располагаться вблизи западной границы сейсмофокальной зоны в месте, где, по-видимому, располагался очаг землетрясения 1737 г. Интенсивность колебаний в Петропавловске-Камчатском в этом случае на средних грунтах может достигнуть 9 баллов. Накопленные к настоящему времени данные показывают, что Петропавловск-Камчатский расположен в 9-балльной зоне и повторяемость землетрясений такой интенсивности здесь составляет одно землетрясение в 300 лет [10]. Поэтому второй вариант расположения очага будущего сильнейшего землетрясения в пределах авачинского блока нам представляется наиболее вероятным. Если и эпицентр сильнейшего землетрясения будет располагаться вблизи западной границы сейсмофокальной зоны, то, как показано в работе [6], интенсивность колебаний в Петропавловске-Камчатском на средних грунтах в этом случае может достигнуть 10 баллов.

V блок. Ближайший временной интервал, в течение которого в рамках наших построений возможно сильнейшее землетрясение, — это 1998–2019 гг. Однако подобное землетрясение в этот период крайне маловероятно, так как последние такие землетрясения в этом блоке произошли в 1923 и 1959 гг. По-видимому, следующее сильнейшее землетрясение с очагом в этом блоке может произойти не ранее второй половины следующего века. Положение очага такого землетрясения следует уточнить в дальнейшем.

IV блок. Ближайший вероятный временной интервал — это 1998–2019 гг. Достоверные данные о сильнейшем землетрясении с очагом в этом блоке неизвестны. Поэтому можно принять, что в указанном временном интервале очаг будущего сильнейшего землетрясения может расположиться в любой части блока. Если очаг такого землетрясения окажется вблизи западной границы сейсмофокальной зоны, п-ов Кроноцкий будет расположен в эпицентральной зоне будущего сильнейшего землетрясения. На побережьях Кроноцкого и Камчатского заливов в этом случае возможны колебания интенсивностью 9 баллов и более.

Если принять, что последнее сильнейшее землетрясение с очагом в этом блоке произошло в 1899 г. (см. работу [4]) и характерный период $T_{c,1} = 124 \pm 11$ лет, то следующее сильнейшее землетрясение с очагом в IV блоке можно ожидать в $1899 + T_{c,1} = 1899 + 124 (\pm 11)$ гг. или в интервале 2012–2034 гг. Как видим, этот интервал перекрывается с интервалом, выделенным ранее на основании данных о миграционных цепочках 2-го типа.

III блок. Ближайший временной интервал — это 1998–2019 гг. Сильнейшее землетрясение в данный отрезок времени маловероятно, так как последние такие землетрясения в III блоке произошли в 1923 и 1971 гг. Однако если предположить, что оно все же возможно, то его можно ожидать через характерный период $T_{c,2} = 46 \pm 8$ лет, т. е. в $1971 + T_{c,2} = 1971 + 46 (\pm 8) = 2017 \pm 8$ г. или в 2009–2025 гг. Этот временной интервал перекрывается интервалом, «разрешенным» данными о миграционных цепочках 2-го типа. Наиболее вероятное положение очага сильнейшего землетрясения в этом случае — часть блока, расположенная вблизи западной границы сейсмофокальной зоны. При этом пос. Усть-Камчатск и все побережье Камчатского залива окажутся в эпицентральной зоне. На возможность такого положения очага сильнейшего землетрясения в пределах этого блока указывалось в работе [2].

II блок. Ближайший временной интервал — 1998–2019 гг. Данные о сильнейшем землетрясении с очагом в этом блоке отсутствуют. Геометрия сейсмофокальной зоны в пределах блока изучена недостаточно полно. По-видимому, ее западная граница к северу от Усть-Камчатска размывается. В качестве возможного положения очага можно принять район, расположенный вблизи береговой линии п-ва Камчатский между очагами сильнейших землетрясений 1971 (блок III) и 1969 (блок I) гг. Возможный макросейсмический эффект при сильнейшем землетрясении с таким очагом — до 10 баллов на побережье Камчатского залива и до 9 баллов в Усть-Камчатске и на побережье Озерновского залива.

I блок. Последнее сильнейшее землетрясение с очагом в этом блоке произошло в 1969 г. По-видимому, в текущем и следующем столетиях сильнейшие землетрясения в этом блоке не произойдут.

Район вблизи Командорских островов. Ближайший временной интервал — 1998–2019 гг. Наиболее вероятное положение очага сильнейшего будущего землетрясения — полоса, являющаяся продолжением очага сильнейшего землетрясения 1917 г., напротив Командорских островов. Не исключено, что Командорские острова могут располагаться и в эпицентральной зоне такого сильнейшего землетрясения, как это часто имеет место при сильнейших землетрясениях на Алеутских островах. Колебания грунта на Командорских островах при таком сильнейшем землетрясении могут достигать интенсивности 9 баллов и более.

Стратегия развития прогнозных работ на Камчатке

В настоящее время работы по прогнозу землетрясений на Камчатке сконцентрированы в основном в районе Петропавловска-Камчатского. Это и понятно, так как именно в областном центре проживает большая часть населения полуострова, которое может подвергнуться воздействию колебаний максимальной интенсивности. Однако, с нашей точки зрения, такое сосредоточение сил не совсем обоснованно.

Проведенный в работе [4] и настоящей статье анализ показал, что против Петропавловска-Камчатского в пределах авачинской сейсмической бреши (VI блок) сильнейшее землетрясение может произойти, по-видимому, не ранее середины XXI в. Гораздо раньше, в самом конце этого века или в начале следующего столетия, сильнейшее землетрясение, по-видимому, может произойти либо в соседнем VII блоке между мысами Поворотный и Лопатка, либо в IX блоке, расположенном напротив о-вов Онекотан и Кетой, либо с небольшим временным интервалом в обоих блоках. Поэтому в рамках наших построений представляется целесообразным именно напротив названных блоков установить наибольшее количество геофизических приборов, с помощью которых можно получить сведения о сейсмическом процессе и зарегистрировать предвестники землетрясений. Чем быстрее это произойдет, тем, как нам представляется, больший ряд непрерывных наблюдений будет накоплен к моменту будущего сильнейшего землетрясения. Тем самым мы можем значительно увеличить шансы для своевременного предоставления более точного прогноза времени ближайших сильнейших землетрясений, с которых начнется новая стадия повышенной сейсмической активности в регионе.

Одновременно необходимо увеличить число таких же геофизических приборов вблизи IV (Кроноцкий полуостров) и II (Камчатский полуостров, южная часть Озерновского залива) блоков, являющихся более вероятными местами расположения очагов будущих сильнейших землетрясений на севере Камчатки. В данном случае кроме более точного прогноза времени землетрясений для этих блоков будем также иметь возможность и более полно проследить за развитием сейсмического процесса на север.

Заключение

На основании результатов, полученных при исследовании особенностей сейсмического режима северо-западной окраины Тихого океана, нами была предложена феноменологическая волновая модель сейсмического процесса [3]. Оказалось, что в рамках такой модели можно представить сейсмический процесс всей окраины Тихого океана в виде бегущих по кольцу навстречу друг другу волн сейсмичности с периодом и длиной волны, равными длительности сейсмического цикла и размеру очаговой области сильнейшего землетрясения. Возможность представления сейсмического процесса всей окраины Тихого океана в рамках одной модели позволяет надеяться, что схемы прогноза, по сути, близкие разработанным для желоба Нанкай и для Северных Курил — Камчатки, можно будет составить и для других участков тихоокеанского кольца.

Литература

1. Викулин А. В. Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана // Геофизические исслед. при решении геологических задач. — Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1989. — С. 43–57.
2. Викулин А. В. Еще раз о долгосрочном сейсмическом прогнозе для Камчатского залива // Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ДальНИИС, 1989. — С. 14–15.
3. Викулин А. В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–825.
4. Викулин А. В. Миграция очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений и их повторяемость // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 46–61.
5. Викулин А. В., Ким Ч. У. Курило-Камчатские землетрясения. Данные наблюдений 1911–1952. — М.: ММЦД Б, 1983. — 82 с.
6. Викулин А. В., Мелекесцев И. В. О вероятности и повторяемости 10-балльных землетрясений в Петропавловске-Камчатском // Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ДальНИИС, 1989. — С. 66–67.
7. Медведев С. В. Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 151–162.
8. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. — М.: Наука, 1977. — 536 с.
9. Соловьев С. Л. Основные данные о цунами на тихоокеанском побережье СССР 1737–1976 // Изучение цунами в открытом океане. — М.: Наука, 1978. — С. 61–136.
10. Шумилина Л. С., Сейдузова С. С., Потапова О. В. Камчатка // Сейсмическая сотрясаемость территории СССР. — М.: Наука, 1979. — С. 155–172.
11. Предварительный отчет о сейсмическом районировании участка строительства Кроноцкой ГЭС на Камчатке. — Петропавловск-Камчатский, 1968. — КГС ИФЗ АН СССР. Ф. 8.

А. В. Викулин, А. В. Соломатин, Н. В. Семенец

Камчатская геофизическая станция ИФЗ РАН

СЕЙСМИЧЕСКИЙ РИСК И ВОПРОСЫ СТРАХОВАНИЯ*

Землетрясение является во всех отношениях достаточно сложным событием. Это прежде всего геофизический процесс, проявляющийся в различных физических полях возмущениями, которые имеют значительные (аномальные) амплитуды в пределах больших пространств, и характеризующийся длительным временным интервалом подготовки события и скоротечностью достижения пиковых значений. При таком пространственно-временном масштабе сейсмического процесса само землетрясение пока невозможно с необходимой детальностью воспроизводить в лабораторных условиях и, как следствие, прогнозировать [1].

Последствия землетрясений вынуждают человечество, не дожидаясь завершения научного решения проблемы прогноза, искать пути действенной защиты и разрабатывать соответствующие инженерные и правовые решения. Одной из эффективных мер, призванных защитить интересы людей при стихийных бедствиях, является страхование их жизни и имущества. В США, например, накоплен большой опыт страхования населения на случай сильного землетрясения [2]. В нашей стране этой проблеме ранее практически не уделялось должного внимания [3].

Общепринято считать потери при землетрясении результатом риска и опасности. При этом риск — это все, что мы можем потерять, включая жизнь и имущество; опасность — это те природные силы, которые угрожают жизни и имуществу. Риск и опасность оказываются очень слабо взаимосвязанными.

Можно изменить подход к проблеме [4]. Анализ показывает, что содержание понятия «сейсмический риск» можно разделить на ряд составляющих: объективная, не зависящая от антропогенных факторов составляющая — сейсмическая опасность; частично зависящая от человека составляющая — сейсмический прогноз; третья, практически полностью регулируемая составляющая — сейсмостойкость здания. По нашему мнению, именно такой подход к проблеме позволяет выделить «потребительскую» сторону сейсмического риска и дать ей количественную оценку.

Сейсмическая опасность — объективная, не зависящая от деятельности человека характеристика, которая может быть определена следующими параметрами: повторяемостью сильнейших землетрясений в одном месте, размером плейстосейстовых областей с сотрясаемостью 7–8 баллов и выше (именно при такой интенсивности начинаются разрушения зданий), продолжительностью колебаний максимальной интенсивности. Очевидно, что чем чаще повторяются сильнейшие землетрясения, чем больше размер таких областей и продолжительность максимальной фазы колебаний, тем больше и величина сейсмической опасности.

Протяженности очагов землетрясений прямо пропорциональны их магнитудам (M), продолжительность колебаний при землетрясении прямо пропорциональна его магнитуде. Поэтому два последних параметра являются взаимосвязанными, а два первых независимы друг от друга. В силу этого можно принять, что величина сейсмической опасности для некоторого района прямо пропорциональна произведению двух величин: повторяемости сильнейших землетрясений и размеру области максимальных сотрясений.

В случае такого подхода к проблеме величину сейсмической опасности в относительных единицах удастся представить достаточно наглядно. Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что наибольшие размеры плейстосейстовых областей с балльностью не менее 10, 9, 8 и 7, составляют для Камчатки около 100, 200, 450 и 600 км, а для Средней Азии и Кавказа — соответственно 10, 20, 60 и 100 км. Повторяемость сильнейших землетрясений в одном месте вдоль окраины Тихого океана и вблизи Камчатки в том числе составляет примерно одно событие в 100 (± 50) лет, а для районов Средней Азии и Кавказа 1000 (± 700) лет (табл. 2).

Размеры плейстосейстовых областей сильнейших землетрясений Камчатки, как видно из приведенных данных, примерно в 10 раз превышают размеры плейстосейстовых областей

* 17 (72). Жилищное строительство. 1993. № 3. С. 12–15.

таких же землетрясений в Средней Азии и на Кавказе, а их повторяемость, наоборот, в 10 раз ниже. Таким образом, проведенный анализ показывает, что величина сейсмической опасности для Камчатки оказывается примерно в 100 раз больше, чем для Средней Азии и Кавказа. Отметим, что примерно во столько же раз количество энергии, выделяемой в очагах сильнейших камчатских землетрясений, превосходит такую же величину для кавказских и среднеазиатских землетрясений. Как видим, сейсмическая опасность, по сути, является для данной территории постоянной составляющей сейсмического риска. Рассмотрим две другие составляющие сейсмического риска.

Таблица 1

Размеры очагов землетрясений, км

| Землетрясения | Баллы | | | | Последствия |
|---|-------------|-----|-----|-----|--|
| | 10 | 9 | 8 | 7 | |
| Ашхабадское, 05.10.1948 г., $M = 7,3$ | | 19 | 57 | 95 | Разрушен Ашхабад и близкие к нему селения, погибло около 100 000 человек |
| Ташкентское, 25.04.1966 г., $M = 5,1$ | (меньше 10) | | | | Сильно поврежден центр Ташкента |
| Спитакское, 07.12.1988 г., $M = 7,3$ | 10 | 17 | 45 | 90 | Разрушен Спитак и ближайшие селения, число жертв превышает 25 000 человек |
| Нижне-Камчатское, 25.08.1792 г., $M = 8,4$ | 100? | | 450 | | Разрушен Нижне-Камчатск, зона 8-балльных колебаний протянулась до Петропавловска |
| В Кроноцком заливе 04.05.1959 г., $M = 7,6$ | | 200 | | | На всем побережье залива отмечены 9-балльные колебания, в Петропавловске — до 8 баллов |
| Большое Камчатское, 05.11.1952 г., $M = 8,5$ | | | | 600 | 7 баллов от м. Шипунского до о. Кетой, цунами смывает Северо-Курильск |

Таблица 2

Временные интервалы между землетрясениями

| Регион | M | Даты сильнейших землетрясений | Интервал, годы | Средний интервал, годы |
|------------------|-----------------------|---------------------------------|----------------|------------------------|
| Камчатский залив | 8,4 | 22.08.1792 | 131 | 90 (± 40) |
| | 7,7 | 24.02.1923 | 48 | |
| | 7,8 | 15.12.1971 | | |
| Кроноцкий залив | 8,5 | 03.02.1923 | 36 | |
| | 7,6 | 04.05.1959 | | |
| Авачинский залив | 8,3 | 17.10.1737 | 104 | |
| | 8,4 | 17.05.1841 | 111 | |
| | 8,5 | 04.11.1952 | | |
| Район Спитака | (5,3) (5,5) 7,1 | 27.03.893 1046 07.12.1988 | — | Около 1000 |
| Район Ашхабада | 7,1 | 2000 г. до н. э. | 2000 | 1000 (± 700) |
| | 7,1 | 10 г. н. э. | 943 | |
| | 7,1 | 20.08.953 | 976 | |
| | 7,2 | 01.05.1929 | 19 | |
| | 7,3 | 05.10.1948 | | |

Составляющая сейсмического риска, частично зависящая от человека, связана с возможностью решения проблемы прогноза землетрясения. Если опираться на данные долгосрочного прогноза, дающие возможность хотя бы приблизительно определить места вероятного расположения очагов и отрезки времени, в течение которых следует ожидать сильнейшие землетрясения [5], то при практическом их использовании величина сейсмического риска может быть уменьшена. Накопление знаний о природе землетрясений и уточнение прогноза позволяют увеличить достоверность фактора сейсмического риска.

В качестве факторов составляющей сейсмического риска можно привести следующие: информированность населения о мерах сейсмобезопасности и его обученность, готовность служб сейсмозащиты и спасательных отрядов, проведение сейсмозащитных мероприятий и внедрение сейсмозащитных приспособлений. Каждый из этих факторов имеет свой вес в общей оценке величины сейсмического риска.

Мы не ставим здесь задачу дать детальное определение всех факторов сейсмического риска. Важно показать, что страхование на случай землетрясения может быть эффективным средством снижения сейсмического риска, стимулируя население к действиям по индивидуальной подготовке к землетрясению, а власти — к мерам по коллективной безопасности.

Как правило, мы имеем дело с исторически сложившейся системой застройки наших городов. Это характерно и для Петропавловска-Камчатского, где выбор площадок под застройку не всегда согласовывался с их балльностью. Выбор проекта здания в части его сейсмостойкости базировался на рекомендациях, соответствующих нашему уровню знаний и требований на данный момент. Переход к строительным нормам, в большей степени соответствующим реальному положению, объективно снижал степень сейсмического риска в целом на данной территории, приводя, однако, к существенной дифференциации оценок внутри нее.

Составляющая сейсмического риска, связанная с сейсмостойкостью зданий и сооружений, определяется несколькими факторами. К основным из них относятся: тип конструкции здания, уровень антисейсмических мероприятий, заложенных в проекте, инженерно-геологические условия грунтов, качество строительства здания и срок его службы. Такая зависимость наглядно демонстрируется данными обследования, которое проведено в Петропавловске-Камчатском после сильного землетрясения 24.11.1971 г. [6].

Действительно, средняя интенсивность колебаний в городе при этом землетрясении $I_{\text{ср}} = 6,8$ балла. Максимальные I_{max} и минимальные I_{min} оценки интенсивности колебаний, определенные по воздействию на людей и предметы, составляют соответственно $I_{\text{max}} - I_{\text{min}} = 8-6$ ($\Delta I = 2$) и $8-5$ ($\Delta I = 3$ балла). Детальное обследование сооружений, расположенных в разных частях города, показало, что деревянные дома, построенные в 20–30-х гг., испытали воздействие в диапазоне интенсивностей $\Delta I_{\text{max}} - \Delta I_{\text{min}} = 8,5 - 6,2 = 2,3$; панельные, которые начали возводить с середины 60-х гг. — в диапазоне $7,3 - 5,7 = 1,6$; крупноблочные с начала 50-х гг. — $8,3 - 6,6 = 1,7$; мелкоблочные с 40–50-х гг. — $7,9 - 6,2 = 1,7$; комбинированные — $7,9 - 6,4 = 1,5$ балла.

Учет параметров, определяющих сейсмостойкость зданий, требует проведения большой работы. Результатом ее должны являться документы — паспорта зданий, в которых приведены все характеристики, количественно определяющие сейсмостойкость строений.

Жильцы в домах различных типов, расположенных на площадках с разными геологическими условиями, а также имущество жильцов подвергаются сейсмическому риску в разной степени. Имеющиеся данные по сейсмическому районированию и микрорайонированию территории, данные по детальному обследованию строений, перенесших сильные землетрясения, и данные по инженерной сейсмологии позволяют учитывать такие различия при страховании жизни и имущества граждан. На примере Петропавловска-Камчатского в качестве основных факторов, влияющих на величину сейсмического риска, могут быть выделены следующие:

1. Балльность площадки, на которой находится строение. Согласно карте сейсмического районирования Петропавловск-Камчатский расположен в 9-балльной зоне [7]. Однако по данным карты сейсмического микрорайонирования [6, с. 15–62] территория города в сейсмическом отношении не является однородной: наряду с 9-балльными в черте города имеются 8- и 10-балльные площадки. Это означает, что величина сейсмического риска, которому подвергаются люди в разных частях города, неодинакова. Так, на 8-балльной площадке риск сравнительно невелик, а на 10-балльной площадке риск значителен.

2. Тип здания (шлакоблочное, мелкоблочное, крупнопанельное, деревянное и т. д.), время его постройки и наличие сейсмоусиления. Здесь соотношение между балльностью и риском противоположное. Шлакоблочное здание, построенное достаточно давно и не усиленное, заведомо не рассчитано на колебания интенсивностью 8–9 баллов и более. Следовательно, при достаточно сильном землетрясении риск потерять имущество, а возможно, и жизнь в таком здании велик. Наоборот, в крупнопанельном доме, построенном в 80–90-е гг., такой риск невелик.

3. Закрепление мебели и ее расположение в квартире. Как показывает практика, при достаточно сильном землетрясении люди, находящиеся в квартире, начинают метаться и совершать необдуманные действия. В таких условиях их жизнь в определенной степени будет зависеть от расположения мебели в квартире и от того, насколько разумно она размещена и правильно закреплена. Ясно, что нахождение на стенах и потолке большого количества висячих предметов, наличие незакрепленной мебели, неудачное расположение тяжелых предметов (приемники, телевизоры), которые при толчках могут передвигаться и падать, при достаточно сильном землетрясении создают дополнительную угрозу для жизни людей. Следовательно, это обстоятельство также должно учитываться при определении величины взноса при страховании как жизни людей, так и их имущества.

При этом взнос при страховании мебели, которая не закреплена, должен быть большим. И наоборот, страховой взнос за мебель, которая закреплена в соответствии с необходимыми требованиями, например теми, которые приведены в памятках населению, должен быть меньшим.

При страховании, которое проводится с учетом реального сейсмического воздействия, эти факторы необходимо учитывать при одном условии: больший риск — большая плата.

При заключении договоров на страхование информация о первых двух факторах — балльность площадок и типы строений или сейсмостойкость зданий — может быть получена из паспортов зданий. Выполнение условий, изложенных в третьем пункте, может лично проверяться страховыми агентами при составлении договора на страхование.

Существующая в настоящее время система оплаты за пользование жильем в определенной степени зависит от его комфортности, которая определяется и типом строения, и временем его постройки, и местом расположения, а также количеством и качеством коммунальных услуг. Величина сейсмической безопасности, по-видимому, также может быть отнесена к разряду услуг, определяющих степень комфортности жилья. В этом случае величину квартирной платы можно было бы дифференцировать и в зависимости от величины сейсмического риска, которому подвергается строение. Дифференциация платы должна удовлетворять следующему, по нашему мнению, условию: больший риск — меньшая плата.

Как видим, условия, которые могут определять величину квартирной платы в зависимости от реального сейсмического риска, противоположны таким же условиям, определяющим величину взноса при страховании имущества граждан.

Таким образом, одновременное введение дифференцированной платы как за страхование, так и за проживание с учетом реального сейсмического риска будет, во-первых, с социальной точки зрения более справедливым. Во-вторых, такая дифференциация плат приведет к тому, что соответствующие добавки частично или, возможно, полностью будут компенсировать друг друга, тем самым создавая заинтересованность населения к такому виду страхования.

Далее приведена методика определения величины взносов по страхованию имущества на случай землетрясения. Учтены следующие основные факторы: интенсивность и период повторяемости сильных землетрясений, а также тип имущества, классифицируемый по степени устойчивости на сейсмическое воздействие. Первые два фактора определяют величину сейсмической опасности, третий непосредственно связан с возможными материальными потерями. Последний параметр, кроме того, будем дифференцировать в зависимости от грунтовых условий, типа здания и этажности.

За основу при расчетах принята классификация предметов по типам [8]: «неустойчивые», «устойчивые», «тяжелые», «малоподвижные».

Для получения оценки ожидаемого в случае землетрясения ущерба на первом этапе использованы данные обследования последствий землетрясения 24.11.1971 г., сопровождавшегося в Петропавловске-Камчатском сотрясениями в среднем 6–8 баллов, максимально 5–9 баллов. Для наших целей эти данные о сейсмическом воздействии на предметы были экстраполированы на весь диапазон интенсивностей согласно зависимости прогноза [8].

Предположим, что такие предметы, как посуда, хрусталь, телевизоры (назовем их хрупкими), при падении теряют в среднем 50% стоимости, все же остальные (обычные) — 20%. Тогда для каждого из четырех указанных типов предметов вероятная оценка годовых потерь (в % к стоимости) составит:

$$L = n [a(6)/T(6) + a(7)/T(7) + a(8)/T(8) + a(9)/T(9)],$$

где $n = 1/2$ или $1/5$ соответственно для хрупких и обычных предметов; a — значение вероятности падения предметов, % (см. табл. 3); T — вероятные периоды повторяемости землетрясений интенсивностью 6, 7, 8 и 9 баллов соответственно 6,5; 10; 22; 112 лет.

Таблица 3

Оценка (в %) вероятности падения предметов различных типов

| Баллы | Предметы | | | |
|-------|--------------|------------|---------|---------------|
| | Неустойчивые | Устойчивые | Тяжелые | Малоподвижные |
| 6 | 38 | 8 | 2 | 0 |
| 7 | 50 | 38 | 8 | 3 |
| 8 | 100 | 50 | 38 | 8 |
| 9 | 100 | 100 | 50 | 38 |

В результате оценка ожидаемого ущерба от полной стоимости для обычных/хрупких предметов составит: 3,3 / 8,1; 1,6 / 4,1; 0,7 / 1,6 и 0,2 / 0,5 % в год соответственно для неустойчивых, устойчивых, тяжелых и малоподвижных предметов. Полученные оценки соответствуют ожидаемому среднегодовому ущербу от землетрясений всех интенсивностей для первых этажей Петропавловска-Камчатского, имеющих с учетом грунтовых условий нулевой дефицит балльности.

Для учета дефицита балльности здания предположим, что в случае превышения интенсивности землетрясения I_3 над расчетной сейсмостойкостью здания I_0 на 1 балл ($I_3 - I_0 = 1$) потери будут составлять 50%, а в случае превышения на 2 балла — 100% независимо от типа предметов (табл. 4).

Таблица 4

Полученные оценки средних ожидаемых годовых потерь (в % к стоимости с учетом дефицита балльности здания)

| ΔT_0 | Предметы | | | |
|--------------|--------------|------------|-----------|---------------|
| | Неустойчивые | Устойчивые | Тяжелые | Малоподвижные |
| 0 | 3,3 / 8,1 | 1,6 / 4,1 | 0,7 / 1,6 | 0,2 / 0,5 |
| 1 | 3,5 / 8,1 | 1,9 / 4,1 | 1,0 / 1,9 | 0,6 / 0,7 |
| 2 | 5,3 / 8,6 | 4,2 / 5,7 | 3,4 / 3,7 | 3,2 / 3,3 |

Материалы, полученные в результате обследования зданий Петропавловска-Камчатского после землетрясения 24.11.1971 г., позволяют учесть в оценках суммы страховых взносов тип строения, этажность и грунтовые условия. Так, данные, определяющие сейсмическое воздействие на предметы в зависимости от типа здания и этажности [6, с. 63–80], преобразуем в приращение балльности относительно первого этажа. Для этого воспользуемся зависимостью между интенсивностью сейсмических колебаний и параметром, характеризующим степень воздействия этих колебаний на предметы (табл. 5).

С учетом влияния грунтовых условий по приращению балльности площадки $I_{гр}$ к средней по Петропавловску-Камчатскому I_0 , приведенной в карте сейсмического районирования, получим:

$$\Delta I = I_{гр} - I_0.$$

Из данных [6, с. 15–62] следует также, что увеличение интенсивности сейсмического воздействия на предметы любого класса устойчивости на 1 балл фактически эквивалентно переводу их в класс менее устойчивых предметов. Таким образом, имеется возможность учитывать суммарное приращение балльности путем интерполяции значений табл. 4 по типам предметов.

Таблица 5

**Данные об интенсивности сейсмических колебаний
и степени их воздействия на предметы**

| Тип здания | Этаж | | | | |
|---------------|------|-------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Мелкоблочное | 0 | 0,25 | 0,70 | 1,75 | |
| Крупноблочное | 0 | 0,60 | 0,60 | 0,90 | 0,80 |
| Панельное | 0 | 0,187 | 0,35 | 0,65 | 0,95 |

В качестве примера рассмотрим следующий конкретный случай: страхуется мебельная стенка в квартире на четвертом этаже панельного дома, рассчитанного на $I_3 = 9$ баллов и построенного на площадке сейсмичностью $I_{гр} = 9,5$ баллов.

Оценку величины годовых взносов по страхованию имущества в этом случае предлагается определять следующим образом. Определим дефицит балльности здания с учетом грунтовых условий: $I_{гр} - I_0 = 0,5$; величину суммарного приращения балльности за этаж I_3 и грунтовые условия: $\Delta I = I_{гр} - I_0 + I_0 + I_3 = 0,5 + 0,65 = 1,15$, где значение приращения балльности за этаж $I_3 = 0,65$ получено на основании данных, приведенных в табл. 5. Затем, экстраполируя значения годовых взносов (см. табл. 4) для обычного предмета устойчивого типа, получим, что в данном случае страховой взнос должен составлять в год около 3,6% от полной стоимости.

Если стенка достаточно надежно закреплена, ее можно отнести к типу малоподвижных предметов. В этом случае страховой взнос согласно методике должен составить 0,4–0,9%.

Приведем сопоставление сумм страховых взносов, оцененных по предлагаемой нами методике, с аналогичными, принятыми в США. Согласно нашим оценкам наибольший ожидаемый ущерб должен быть связан с вероятным разрушением здания. Если рассматривать только достаточно сейсмостойкие здания, рассчитанные на 9 баллов, и только достаточно устойчивые предметы, то величины годовых взносов должны составить 0,2–0,7%. Согласно данным работы [2] страхование недвижимого имущества в сейсмоопасных районах США, как правило, обходится в 0,15–0,2% полной страховой стоимости в год. В случае высокой степени риска эта величина может составлять и 5%. Как видим, оценки, предлагаемые здесь, близки к тем, которые приняты в настоящий момент в США. Кроме того, величины сейсмических опасностей для тихоокеанских побережий Камчатки и США тоже являются близкими. Это позволяет предложить методику определения величины страхового взноса с учетом реального сейсмического риска для реализации в Петропавловске-Камчатском.

Литература

1. Шебалин Н. В. О последствиях сильных землетрясений. Ч. 1. Земля в целом. 1900–1980 гг. // Прогноз сейсмических воздействий. Вопр. инженерной сейсмологии. — Вып. 25. — М.: Наука, 1984. — С. 96–101.
2. Гир Д., Шах Х. Зыбкая твердь. — М.: Мир, 1988. — 220 с.
3. Тихомиров И. П. Страховой случай: землетрясение. — М.: Финансы и статистика, 1991.
4. Викулин А. В. О понятии и величине сейсмического риска // Природные и антропогенные катастрофы: материалы совещ., Томск, 14–18 октября 1991 г. — Новосибирск, 1992. — С. 23–29.
5. Викулин А. В. Прогноз времени сильнейших землетрясений у берегов Камчатки и Северных Курил // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 62–69.
6. Сильные камчатские землетрясения 1971 года. — Владивосток: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1975. — 156 с.
7. Сейсмическое районирование территории СССР. — М.: Наука, 1980. — 308 с.
8. Ершов И. А., Шебалин Н. В. Проблема конструкции шкалы интенсивности землетрясений с позиции сейсмологов // Прогноз сейсмических воздействий. — М.: Наука, 1984. — С. 78–95.

А. В. Викулин

Опытно-методическая сейсмологическая партия ИВ ДВО РАН

ЮЖНО-КУРИЛЬСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 4 ОКТЯБРЯ 1994 г. КАК ПРЕДВЕСТНИК СИЛЬНЕЙШЕГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ЮГЕ КАМЧАТКИ *

Печатается в порядке дискуссии (примеч. науч. ред.)

На основании полученных автором данных о скоростях миграции очагов тихоокеанских сильнейших землетрясений и периоде их повторения, установленных на различных масштабных уровнях (глобальном — окраина Тихого океана и локальном — Северные Курилы, Камчатка), показано, что Южно-Курильское землетрясение 04.10.1994 г. с $M = 8$ является предвестником Южно-Камчатского сильнейшего ($M \geq 7,6$) землетрясения, которое, как можно полагать, должно произойти в конце XX — начале XXI столетия.

SOUTH KURIL EARTHQUAKE OF OCTOBER 4, 1994 AS A PRECURSOR OF A GREAT EARTHQUAKE IN SOUTHERN KAMCHATKA

The velocities of epicenter migration derived by this author for great Pacific earthquakes and their repeat times at different scales (global for the Pacific belt and local for the northern Kurils-Kamchatka area) show that the south Kuril $M = 8$ earthquake of October 4, 1994 is a precursor of a great ($M = 7,6$) event expected to occur in southern Kamchatka sometime in the latest 20th of early 21st century.

4 октября 1994 г. на Южных Курилах произошло землетрясение с $M = 8$, которое на о-ве Шикотан сопровождалось сотрясениями до 9 и, возможно, более баллов. Это землетрясение с $M = 8$ является самым сильным в регионе после Итурупского землетрясения в марте 1978 г.

Согласно предварительным данным, представленным Обнинским сейсмологическим центром, главный толчок 04.10.1994 г. и его афтершоки первой недели, два из которых имели $M = 7,7$, расположены к северо-востоку от о-ва Шикотан в той части сейсмофокальной зоны, прилегающей к Малой Курильской дуге (рис. 1), которая «разрешена» долгосрочным сейсмическим прогнозом С. А. Федотова [11, 12]. Это указывает на то, что очаг землетрясения 04.10.1994 г. заполнил сейсмическую брешь и, следовательно, само землетрясение относится к классу событий, названных сильнейшими [3, 4].

Имеющиеся данные о миграции сильнейших землетрясений и их повторяемости позволяют предположить, что землетрясение 04.10.1994 г. ($M = 8$) с очагом на Южных Курилах является предвестником будущего сильнейшего землетрясения на юге Камчатки.

Миграция и повторяемость сильнейших землетрясений вдоль окраины Тихого океана [3–6, 8]. Исследования, проведенные на сейсмологическом материале северо-западной окраины Тихого океана, включающей следующие друг за другом Японскую, Курило-Камчатскую и Алеутскую островные дуги, показали существование класса землетрясений, названных сильнейшими, очаговые области которых в пространстве и во времени располагаются вполне определенным образом.

В целом для всей северо-западной окраины Тихого океана к классу таких событий, как показали полученные данные, относятся землетрясения магнитудного диапазона $M \geq 7,7 \pm 0,2$. При этом для разных зон региона к классу сильнейших землетрясений следует относить землетрясения с $M \geq 7,9$ — для желоба Нанкай; с $M \geq 7,5$ — для тихоокеанского побережья о-ва Хонсю; с $M \geq 7,9$ — для о-ва Хоккайдо — Южных Курил; с $M \geq 7,6$ — для Северных Курил — Камчатки; с $M \geq 7,9$ — для Алеутских островов — Южной Аляски.

* 18 (92). Вулканология и сейсмология. 1996. № 5. С. 106–112.

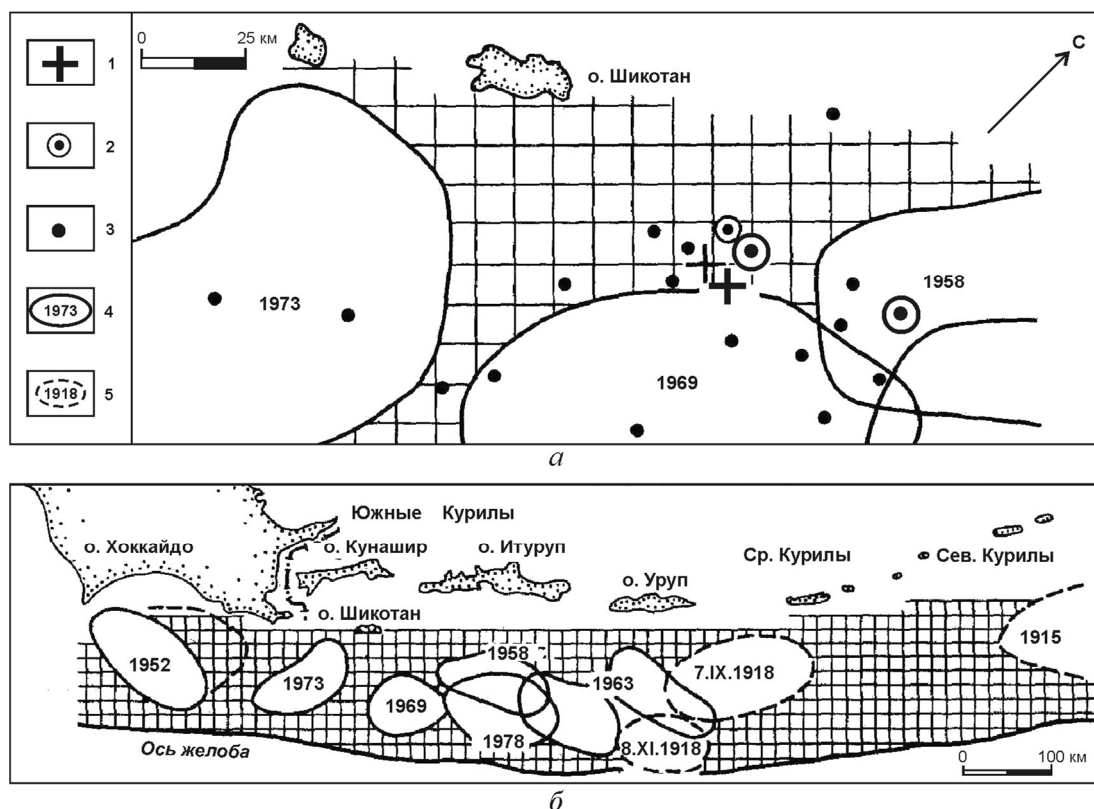


Рис. 1. Расположение главного толчка Южно-Курильского землетрясения 04.10.1994 г., его зарегистрированных афтершоков первой недели с $M \geq 5,5$ (а), очагов сильнейших Курильских землетрясений 1915–1978 гг. и сейсмических брешей (б):

1–3 — соответственно положение главного толчка с $M = 8$ и афтершоков первой недели с $M = 7,7$ и $7,1 \geq M \geq 5,5$; 4–5 — соответственно уверенные и примерные границы очагов сильнейших землетрясений

Очаги таких землетрясений группируются в миграционные цепочки, протягивающиеся вдоль сейсмофокальной зоны окраины Тихого океана от Японии к Аляске. Скорость миграции в цепочках составляет 250 ± 30 км/год (рис. 2). При этом, как видно из данных, представленных в таблице, повторяемость сильнейших землетрясений в одном месте в разных регионах Тихоокеанского кольца составляет 100 ± 50 лет.

Выявленные закономерности позволили построить сейсмический прогноз для северо-западной окраины Тихого океана в рамках волновой модели сейсмического процесса [4, 5]. Согласно этому прогнозу для участков сейсмофокальной зоны, не занятой очагами последних сильнейших землетрясений, определены возможные временные интервалы, в течение которых в пределах сейсмических брешей могут в будущем произойти сильнейшие землетрясения. Прогноз дан в двух вариантах. При этом выбор наиболее правильного варианта должен быть осуществлен на основании данных о первых последующих сильнейших землетрясениях в регионе.

С 1987 г., когда был построен такой прогноз, первое сильнейшее землетрясение в пределах северо-западной окраины Тихого океана произошло 04.10.1994 г. Его очаг, как уже было отмечено, расположен в прилегающей к островам части сейсмофокальной зоны между северо-восточной и юго-западной оконечностями о-вов Кунашир и Итуруп (рис. 1, а). Согласно прогнозу в работе [4] в этом месте сейсмофокальной зоны сильнейшее землетрясение можно было ожидать в 1995–2002 или 2001–2009 гг. соответственно по первому или второму варианту прогноза. Таким образом, Южно-Курильское сильнейшее землетрясение 04.10.1994 г., по-видимому, указывает на то, что первый вариант сделанного прогноза времени, представленный на рис. 2, более правильный. Тогда ближайший временной интервал, в течение которого в части сейсмофокальной зоны Южной Камчатки, расположенной вблизи желоба, может произойти следующее сильнейшее землетрясение — это 2001–2009 гг. [4].

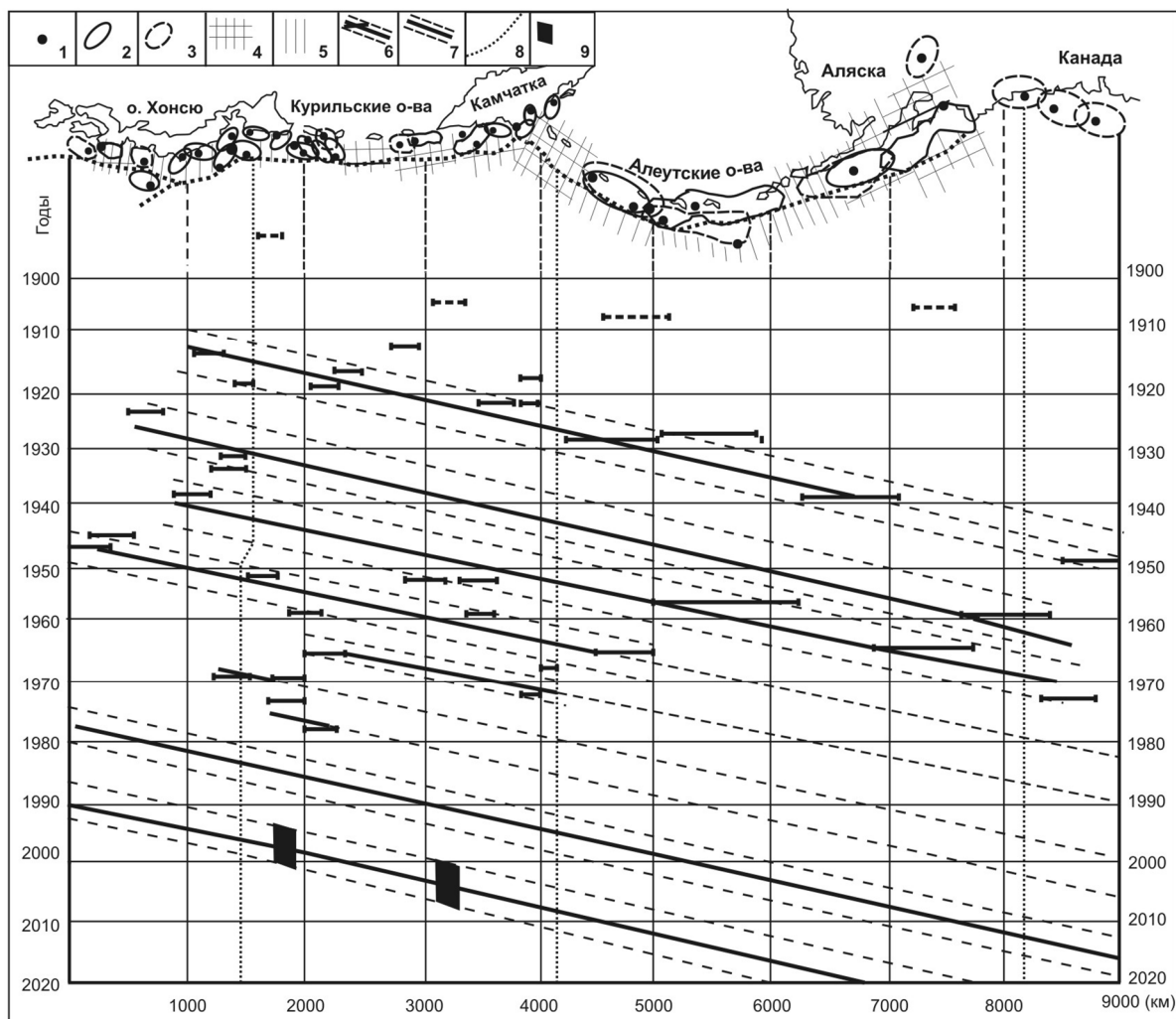


Рис. 2. Пространственно-временная карта очагов северо-западно-тихоокеанских землетрясений 1904–1986 гг. [8]:

1 — эпицентры землетрясений; 2 — границы очагов землетрясений, проведенные с точностью $\pm(5-10)$ км; 3 — границы очагов таких же землетрясений, проведенные с худшей точностью; 4 — наиболее вероятные места, в пределах которых в будущем могут располагаться очаги сильнейших землетрясений; 5 — менее вероятные места расположения очагов таких же землетрясений; 6 — положение очагов землетрясений на пространственно-временной карте и проведенные по ним миграционные цепочки; 7 — прогнозные цепочки, в пределах которых в будущем следует ожидать появление очагов сильнейших землетрясений; 8 — оси глубоководных желобов; 9 — временные интервалы, в течение которых в соответствии с построенным прогнозом могут произойти сильнейшие землетрясения с очагами вблизи о-ва Шикотан и на Южной Камчатке

Прогноз сильнейших землетрясений у берегов Северных Курил — Камчатки [6, 7]

Детальный анализ взаимного расположения очагов сильнейших землетрясений XVIII–XX столетий у берегов Северных Курил — Камчатки позволил установить существование трех миграционных процессов. Два процесса протекают вдоль сейсмофокальной зоны. Один, затрагивая несколько сейсмофокальных блоков, развивается в направлении с юго-запада на северо-восток и имеет продолжительность не более 21 года. Второй затрагивает все блоки и протекает в обоих направлениях с примерно одинаковыми скоростями (4 ± 1 км/год). Имеющиеся данные показывают, что в пределах каждого сейсмофокального блока очаги сильнейших землетрясений Северных Курил — Южной Камчатки мигрируют вкрест зоны, повторяясь в одном блоке один раз в 108 ± 7 лет (см. таблицу).

**Повторяемость сильнейших землетрясений
в различных регионах Тихоокеанского кольца [6, 7]**

| Регион | M | Дата сильнейших землетрясений | T_1 , годы | T_2 , годы |
|--------------------|-------|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| Камчатка | | | | |
| Камчатский залив | 8,4 | 22.08.1792 | — | 90 ± 30 |
| | 7,7 | 24.02.1923 | 131 | |
| | 7,8 | 15.12.1971 | 48 | |
| Кроноцкий залив | 8,5 | 03.02.1923 | — | |
| | 7,6 | 04.05.1959 | 36 | |
| Авачинский залив | 8,3 | 17.10.1737 | — | |
| | 8,4 | 17.05.1841 | 104 | |
| | 8,5 | 04.11.1952 | 111 | |
| Южная Камчатка | 8,4 | 22.08.1904 | — | |
| | 7,7 | 17.10.1737 | 112 | |
| Северные Курилы | 8,3 | 17.10.1737 | — | |
| | 7 ± 1 | 29.07.1854 | 117 | |
| | 8,5 | 05.11.1952 | 98 | |
| Япония | | | | |
| Район Токио | 7,9 | 31.01.1605 | — | 130 ± 50 |
| | 8,2 | 31.12.1703 | 98 | |
| | 8,2 | 01.09.1923 | 220 | |
| Юго-западнее Токио | 8,6 | 20.09.1498 | — | |
| | 7,9 | 31.01.1605 | 107 | |
| | 8,4 | 28.10.1707 | 102 | |
| | 8,4 | 23.12.1854 | 147 | |
| | 8,0 | 07.12.1944 | 90 | |
| Перу | | | | |
| Район Кальяо | 8,3 | 1513–1515 | — | 110 ± 50 |
| | 8,5 | 09.07.1586 | 72 | |
| | 8,5 | 20.10.1687 | 101 | |
| | 8,0 | 28.10.1746 | 59 | |
| | 8,0 | 24.08.1942 | 196 | |
| Алеуты | | | | |
| П-ов Аляска | 8,0 | 22.07.1788 | — | 100 ± 50 |
| | 8,3 | 10.11.1938 | 150 | |
| Ближние о-ва | 8,0 | 17.08.1906 | — | |
| | 8,5 | 04.02.1965 | 59 | |

Примечание. Символы T_1 , T_2 , T_3 — периоды повторения сильнейших ($M \approx 8$) землетрясений соответственно в одном месте, в пределах района (дуги) и в масштабе всего Тихоокеанского кольца; $T_3 = 100 \pm 50$ лет.

Указанные данные позволили построить прогноз времени будущих северо-курильских и камчатских сильнейших землетрясений конца XX — начала XXI столетия (рис. 3). Согласно этому прогнозу первое сильнейшее землетрясение в рассматриваемой зоне должно произойти в пределах сейсмофокального блока, расположенного на юге Камчатки между мысами Лопатка и Поворотный в 1998–2018 (2008 ± 10) гг. Имеющиеся данные позволяют также предположить, что очаг этого землетрясения должен располагаться либо в центральной части сейсмофокальной зоны, либо в части, прилегающей к оси глубоководного желоба.

Отметим, что имеются принципиальные расхождения между сделанной автором прогнозной схемой расположения в пространстве очагов будущих сильнейших землетрясений [6, 7] и схемой С. А. Федотова [10, 11]. Преимущество схемы автора, как представляется, заключается в том, что она в отличие от схемы С. А. Федотова опирается на динамические особенности сейсмического процесса, отражением которых является миграция очагов сильнейших землетрясений. Подробно эти вопросы обсуждены в работах [1, 9].

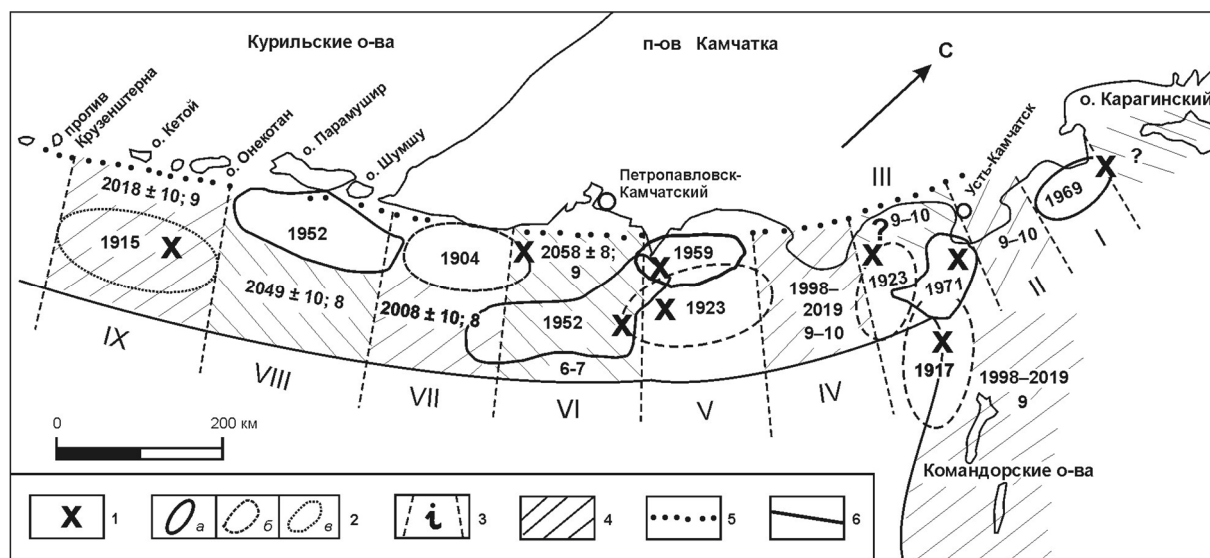


Рис. 3. Прогнозная карта расположения очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений в будущем [6]:

1 — эпицентры сильнейших землетрясений; 2 — уверенные (а), менее уверенные (б) и возможные (в) границы очагов сильнейших землетрясений XX в.; цифра обозначает год сильнейшего землетрясения; 3 — границы между блоками сейсмофокальной зоны, $i = I-IX$; 4 — места вероятного расположения очагов сильнейших землетрясений в будущем; цифры обозначают год ожидаемого землетрясения, временной интервал и максимальное значение балльности на берегу при землетрясении; 5 — западная граница сейсмофокальной зоны; 6 — ось глубоководного желоба

Обсуждение результатов

Данные о времени следующего сильнейшего землетрясения с очагом на Южной Камчатке, полученные с помощью анализа, проведенного на двух уровнях (глобальном — окраина Тихого океана [3–5, 8] и локальном — Северные Курилы — Камчатка [6, 7]), дают практически совпадающие результаты. Согласно им следующее землетрясение с очагом в южно-камчатском блоке, расположенном между мысами Лопатка и Поворотный, должно произойти в конце XX — начале XXI столетия — в 1998–2018 гг. (см. рис. 2, 3).

Другими словами, показано, что произошедшее 04.10.1994 г. Южно-Курильское землетрясение является причинно связанным с будущим Южно-Камчатским сильнейшим землетрясением, которое должно произойти в конце XX — начале XXI столетия. Это позволяет считать Южно-Курильское землетрясение (как, впрочем, и любое другое сильнейшее землетрясение в той же миграционной цепочке с очагом к юго-западу от Камчатки) предвестником будущего Южно-Камчатского сильнейшего ($M \geq 7,6$) землетрясения.

Согласно данным, полученным в работах [5–7], с предсказываемого Южно-Курильского землетрясения может начаться фаза высокой сейсмической активности на Камчатке, которая затем может переместиться и на Алеутские острова — Южную Аляску. Сейсмический прогноз для Камчатки и Алеутских островов — Южной Аляски подробно описан в работах [1, 2, 4, 7].

Следует отметить, что между очагом сильнейшего землетрясения 04.10.1994 г. и Северными Курилами — Камчаткой наиболее вероятными местами, где могут произойти одно или несколько сильнейших землетрясений, являются прилегающая к островам часть сейсмофокальной зоны,

расположенная между северо-восточной и юго-западной оконечностями соответственно о-вов Итуруп и Уруп, и район Средних Курил (см. рис. 1, б). Согласно прогнозу, построенному в работе [4], в этих частях сейсмофокальной зоны сильнейшие землетрясения могут произойти в моменты времени, предшествующие будущему Южно-Камчатскому сильнейшему землетрясению.

Пара сильнейших землетрясений, происшедших в Южно-Курильском районе 07.09.1918 г. (см. рис. 1, б) с $M = 8,2$ (очаг расположен между о-вами Уруп и Симушир) и 08.11.1918 г. с $M = 7,9$ (очаг расположен на юго-западе от очага предыдущего землетрясения вблизи оси глубоководного желоба против о-ва Уруп), указывает на то, что следующее сильнейшее землетрясение в Курильском районе может произойти уже через месяц-другой после октября 1994 г. ** В этом случае очаг следующего после 04.10.1994 г. сильнейшего землетрясения может быть расположен и в пределах сейсмической бреши напротив северо-восточного окончания о-ва Хоккайдо (см. рис. 1, б).

Литература

1. Викулин А. В. Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова // Вулканология и сейсмология. — 1986. — № 3. — С. 72–83.
2. Викулин А. В. Уточнение положения очагов сильнейших землетрясений и долгосрочный сейсмический прогноз для Алеутской островной дуги и Южной Аляски // Сейсмичность и сейсмический прогноз на Дальнем Востоке. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО РАН, 1986. — С. 71–72.
3. Викулин А. В. Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1987. — 54 с. — Препринт.
4. Викулин А. В. Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана // Геофизические исслед. при решении геологических задач. — Магадан: СКВНИИ ДВО АН СССР, 1989. — С. 43–57.
5. Викулин А. В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–824.
6. Викулин А. В. Миграция очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений и их повторяемость // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 46–61.
7. Викулин А. В. Прогноз времени сильнейших землетрясений у берегов Камчатки и Северных Курил // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 62–69.
8. Викулин А. В. О понятии и величине сейсмического риска // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1. — № 3. — С. 118–123.
9. Викулин А. В., Чернобай И. П. Механизм очага Урупского (1963 г.) и Большого Камчатского (1952 г.) землетрясений // Динамические процессы в дискретных геофизических системах. — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 58–66.
10. Федотов С. А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. — 1965. — № 36 (203). — С. 121–150.
11. Федотов С. А., Чернышев С. Д. 20 лет долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги: достоверность в 1981–1985 гг., в целом за 1965–1986 гг. и прогноз на 1986–1990 гг. // Вулканология и сейсмология. — 1987. — № 6. — С. 93–109.
12. Уточнение границ очагов землетрясений с $M \geq 7,75$, свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги / С. А. Федотов, С. Д. Чернышев, Г. В. Чернышева, А. В. Викулин // Вулканология и сейсмология. — 1990. — № 6. — С. 52–67.

** После того как статья была сдана в печать, автор считает необходимым внести следующее дополнение. Пары сильнейших землетрясений с близкорасположенными очагами вблизи о-ва Хонсю (09.03.1931 г. с $M = 7,6$ — 03.03.1933 г. с $M = 8,3$ и 03.11.1936 г. с $M = 7,7$ — 05.11.1938 г. с $M = 7,7$) и Камчатки (22.11.1969 г. с $M = 7,7$ — 15.12.1971 г. с $M = 7,8$), представленные на рис. 2, показывают, что такой интервал может быть продолжительностью ~ 2 лет.

А. В. Викулин

Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН

**КРОНОЦКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ
5 ДЕКАБРЯ 1997 Г. С $M = 7,5-7,7$ (КАМЧАТКА)
В СХЕМЕ ДОЛГОСРОЧНОГО
СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ***

Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 г. достаточно хорошо укладывается в схему долгосрочного сейсмического прогноза сильнейших землетрясений, включающую указание времени события и места расположения его очага. Однако макросейсмические данные, а также данные инструментальных сейсмологических наблюдений показывают, что это землетрясение не относится к классу сильнейших событий, следовательно, долгосрочный сейсмический прогноз для Кроноцкой бреши нет оснований считать реализованным.

**THE KRONOTSKOYE EARTHQUAKE
OF DECEMBER 5, 1997 ($M = 7,5-7,7$)
WITHIN THE FRAMEWORK OF THE LONG-
TERM SEISMIC PREDICTION**

The Kronotskoye earthquake of December 5, 1997 seems to fit well into the framework of the long-term prediction of the largest earthquakes, including both time of the event and location of its source. However macroseismic data and instrumental seismological survey data imply that this earthquake can not be regarded as a great event and thus one should not consider the long-term prediction for the Kronotskaya gap as realized.

Введение

5 декабря 1997 г. в части сейсмофокальной зоны Восточной Камчатки, расположенной напротив Кроноцкого полуострова, произошло землетрясение, которое ощущалось на территории всего полуострова. В Петропавловске и в Усть-Камчатске сотрясения достигали 5 баллов, в эпицентральной зоне на побережье полуострова Кроноцкий — до 7 баллов. Определенная по данным сейсмостанции «Петропавловск» и региональной сети КОМСП магнитуда землетрясения $M_S = 7,5-7,7$. Землетрясение предварялось форшоками и сопровождалось большим количеством афтершоков (рис. 1), из которых число ощутимых в Петропавловске в первые дни составило около 30.

Определенный по положению форшоков и афтершоков очаг землетрясения 5 декабря оказался расположенным в пределах Кроноцкого сейсмофокального блока, в котором согласно схеме долгосрочного сейсмического прогноза ближайшее сильнейшее землетрясение ожидалось с вероятностью около 70 % в 1998–2018 гг. и с вероятностью 95 % в 1988–2028 гг. (рис. 2). Как видим, Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 г., если его отнести к классу сильнейших событий, произошло в соответствии с долгосрочным сейсмическим прогнозом, построенным в работах [1, 2].

Класс сильнейших землетрясений

В работах многочисленных исследователей ([3–5] и др.) было показано, что очаги землетрясений с достаточно большим значением магнитуды имеют тенденцию не перекрывать друг друга в течение определенного интервала времени, названного С. А. Федотовым сейсмическим циклом [6].

* 19 (111). Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1998. С. 90–98.

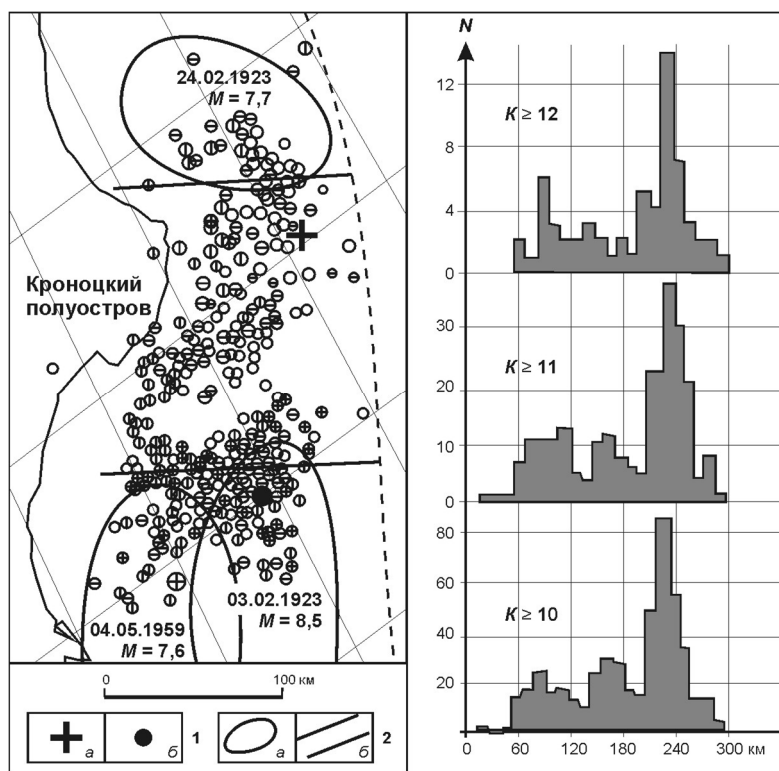


Рис. 1. Сейсмичность Кроноцкого и смежных с ним сейсмофокальных блоков в течение 05.12.1997–05.01.1998 г. ($K \geq 10$) и распределение чисел афтершоков вдоль зоны на разных энергетических уровнях:

1 — эпицентр главного толчка с $M = 7,5-7,7$ (а) и наиболее сильного ($M = 6,8$) из последующих толчков (б); 2 — положение очагов сильнейших камчатских землетрясений в 1923 и 1959 гг. (а) и границы Кроноцкого сейсмофокального блока (б) по работе [1]

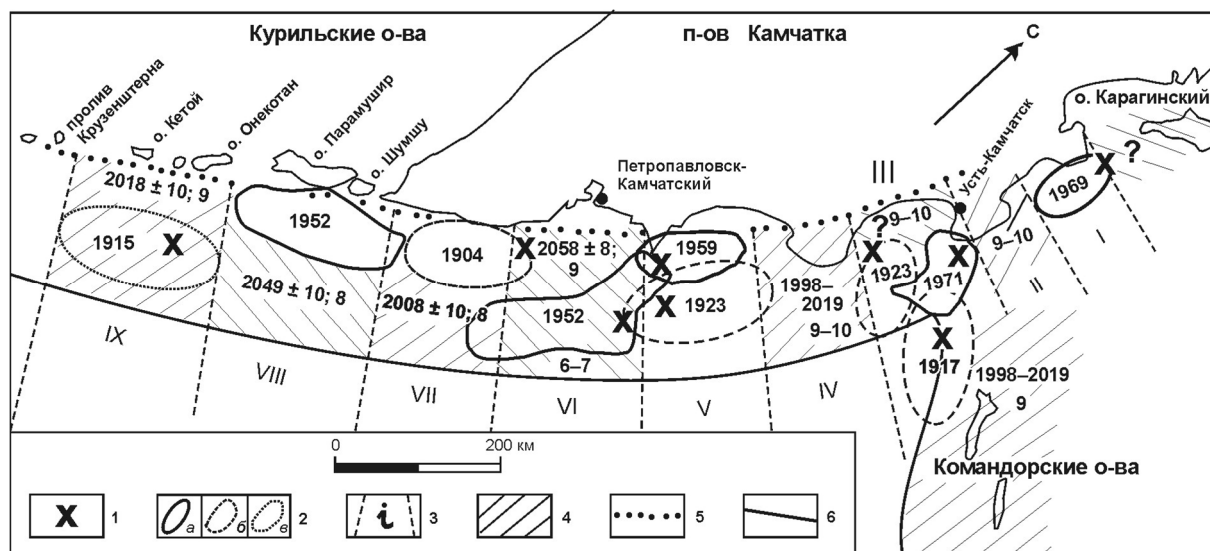


Рис. 2. Прогнозная карта расположения очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений по работе [2]:

1 — эпицентры сильнейших землетрясений; 2 — уверенные (а), менее уверенные (б) и возможные (в) границы очаговых областей сильнейших землетрясений XX в.; цифра обозначает год сильнейшего землетрясения; 3 — границы между блоками сейсмофокальной зоны, i — I-IX; 4 — места вероятного расположения очагов сильнейших землетрясений в будущем; цифрами обозначены год ожидаемого землетрясения, временной интервал и максимальное значение балльности на берегу при землетрясении; 5 — западная граница сейсмофокальной зоны; 6 — ось глубоководного желоба

Более детальный анализ, выполненный на сейсмологическом материале северо-западной части Тихого океана, включающей Японию, Курилы, Камчатку, Алеутские острова и Аляску, позволил установить существование критического значения магнитуды $M^* = 7,7$, в малой окрестности которого $\Delta M = \pm 0,2$ свойства распределений землетрясений во времени и их очагов в пространстве изменяются скачком [7], а именно: свойства квазипериодичности (цикличности) землетрясений и непересечения их очагов справедливы для всех землетрясений с $M \geq M^*$ и не выполняются для землетрясений с $M < M^*$. Для Северных Курил — Камчатки критическое значение магнитуды $M^* = 7,6$. Важным обстоятельством здесь является то, что магнитуды землетрясений измеряются по шкале M_{LH} или по близким ей шкалам Гутенберга — Рихтера, M_{jma} , M_I (макрсейсмическая магнитуда) и M_S .

Детально исследовалась *афтершоковая активность в очагах сильнейших землетрясений* Японии, Курил и Камчатки [8, 9]. Подтверждено, что активность в очагах сильнейших землетрясений в течение одного года после главного толчка уменьшается по закону Омори: $Lg A \approx Lg t$ (рис. 3, а).

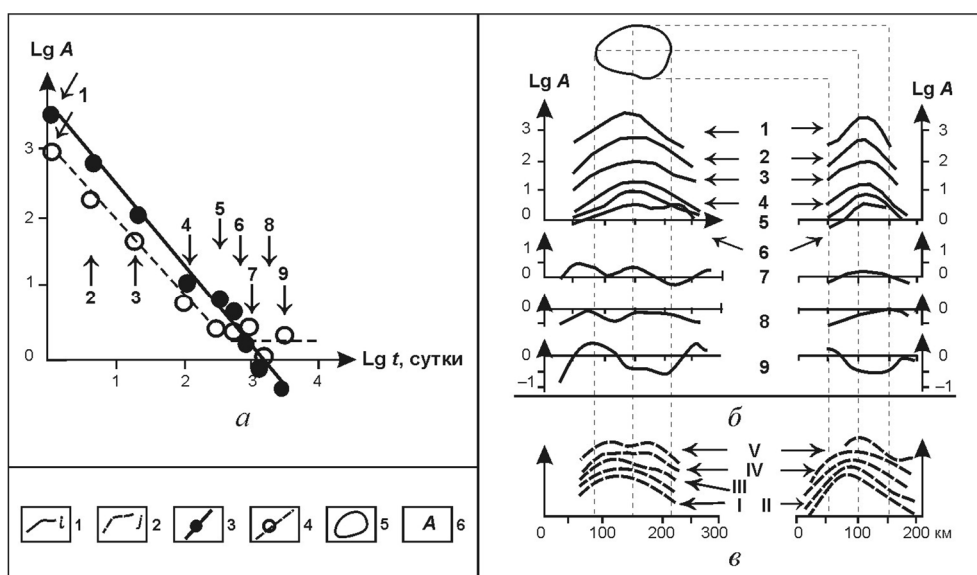


Рис. 3. Изменение сейсмической активности (а) и сейсмические сечения (б, в) в очаге курило-камчатского землетрясения с $M \approx 8$ [8, 9]:

1 — сейсмические сечения, выполненные по данным об афтершоках с $K \geq 10$ за различные отрезки времени (первый день (1), первая неделя (2), первый месяц (3), 0,5 года (4), один год (5), два-три года (6, 7), 5 лет (8) и 11 лет (9)); 2 — сейсмические сечения, выполненные по афтершокам первого года с $K \geq 10$ (I), $K \geq 11$ (II), $K \geq 12$ (III), $K \geq 13$ (IV) и $K \geq 14$ (V); 3, 4 — значения сейсмической активности и соответствующие зависимости $A(t)$ для центральной и краевой частей очага; 5 — граница очага курило-камчатского землетрясения с $M \approx 8$; 6 — значение сейсмической активности, равное числу землетрясений с $K \geq 10$ (I), происшедших на площади 1000 км^2 в течение одного года (долговременное фоновое значение $A = 1$ соответствует одному землетрясению с $K = 10$ на площади 1000 км^2 в течение одного года)

В случае достаточно полных и представительных данных (инструментальных и сейсмологических наблюдений, начиная с 50-х гг. этого столетия) установлено, что максимум активности, определенный по совокупностям афтершоков с $K \geq K_0$ в течение первого дня, первой недели, первого месяца и полугода, в диапазоне энергетических классов $10 \geq K_0 \geq 14$ всегда ($N = 30$) располагается внутри очага сильнейшего землетрясения (рис. 3, б, в). При этом уровень афтершоковой активности на краю очага начинает превышать активность в центральной части очага, как правило, через один год (рис. 3, а, б), но в некоторых ($N = 1$) случаях не ранее чем через несколько месяцев после главного толчка. Эти закономерности афтершоковой активности имели место в том числе и в очагах всех последних сильнейших землетрясений Камчатки, происшедших в 1952, 1959, 1969 и 1971 гг. (рис. 4).

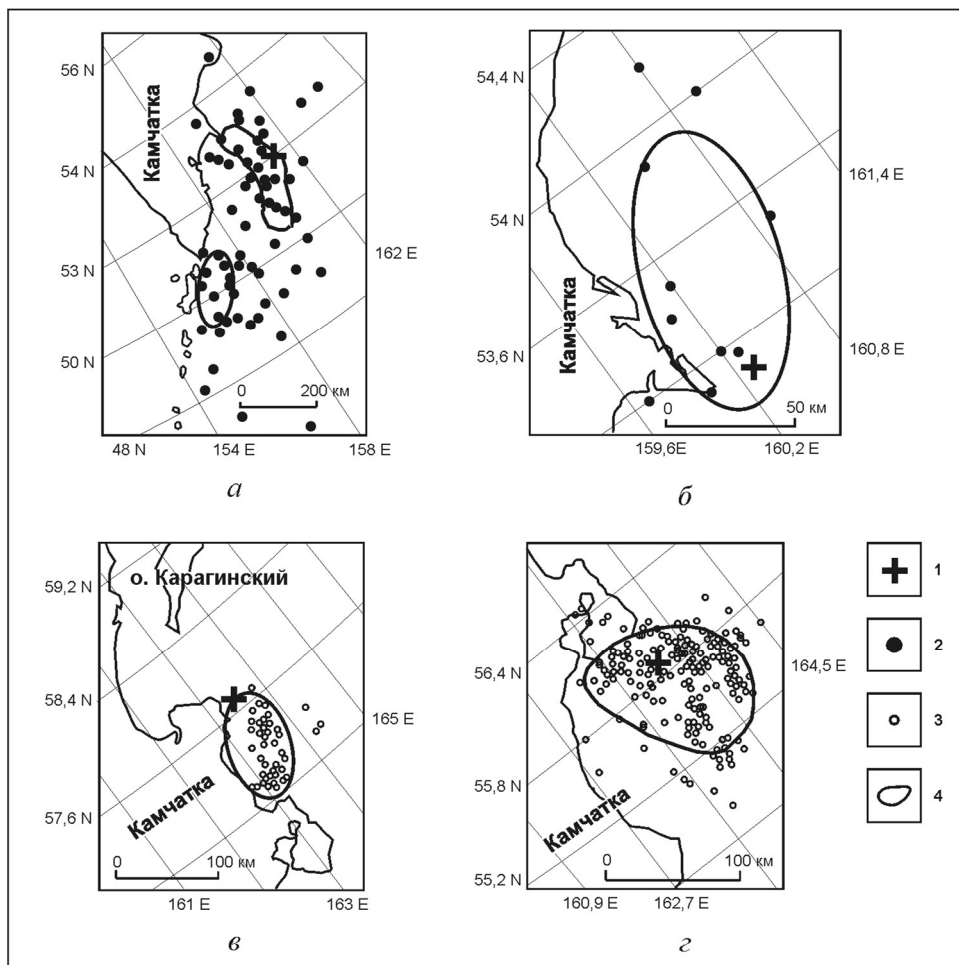


Рис. 4. Сейсмическая активность в очагах последних сильнейших камчатских землетрясений 1952–1971 гг. по данным об афтершоках за разные отрезки времени:

a — 04.11.1952 г. с $M = 8,5$, один месяц; *б* — 04.05.1959 г. с $M = 7,6$, два месяца; *в* — 22.11.1969 г. с $M = 7,7$, один день; *г* — 15.12.1971 г. с $M = 7,8$, одна неделя; 1, 2, 3 — положение эпицентров главных толчков и афтершоков соответственно с $M \geq 5$ ($K \geq 12$) и с $K \geq 10$ ($M \geq 3$); 4 — положение границ очагов по работе [1]

Значения магнитуд толчка 5 декабря, определенные региональной и мировыми сейсмологическими сетями, приведены в таблице.

Значения магнитуд Кроноцкого землетрясения

| № п/п | Станция, сеть, данные, магнитуда | Магнитуда | Источник |
|-------|--|------------------------|-----------|
| 1 | Сейсмостанция «Петропавловск-Камчатский» | $M_S = 7,5$ | Бюллетень |
| 2 | КОМСП ГС РАН (оперативные данные) | $M_S = 7,5$ | « |
| 3 | КОМСП ГС РАН (уточненные данные) | $M_S = 7,7$ | « |
| 4 | Макросейсмическая магнитуда | $M_I = 7,3$ | [9] |
| 5 | ЦОМЭ ГС РАН (оперативные данные) | $M_S = 8,0$ | Бюллетень |
| 6 | ЦОМЭ ГС РАН (уточненные данные) | $M_S = 7,9$ | « |
| 7 | NEIC (оперативные данные, USGS) | $M_w = 7,7$ | « |
| 8 | NEIC (HRV) | $M_S = 7,6; M_w = 7,9$ | « |
| 9 | ERI of Tokyo Univ (Япония) | $M_S = 7,7; M_w = 7,2$ | « |
| 10 | GEOSCOPE (Франция) | $M_S = 6,5$ | « |

Как видим, среднее значение из трех магнитуд $M = 7,5 \pm 0,1$. Согласно данным работы [11] в окрестности точки $M = 7,5 - 7,6$ имеют место следующие примерные равенства: $M_{LH} \approx M_{JMA} \approx M_W - 0,2$ и $M_S \approx M_w$. Таким образом, проведенные оценки позволяют предположить, что Кроноцкое землетрясение не относится к классу сильнейших событий, так как значение его магнитуды $M_{LH} \leq M^*$.

Афтершоковая активность Кроноцкого сейсмофокального блока в декабре 1997 г.

Распределение эпицентров главного толчка 5 декабря в 11^h 26^m и всех афтершоков с $K \geq 10$ ($M \geq 3$), зарегистрированных в течение месяца (05.12.1997 — 05.01.1998 гг.), изображено на рис. 1, на котором видно, что в течение первого месяца после главного толчка сейсмичность, определенная по совокупностям афтершоков с $K \geq K_0$, в диапазоне энергетических классов $K_0 \leq 13-14$ ($3 \leq M_0 \leq 6-7$) максимальна на краях Кроноцкого сейсмофокального блока. Такое распределение афтершоков в соответствии с данными, представленными на рис. 3, 4, не является характерным для класса сильнейших камчатских, курильских и японских землетрясений. Сгущение форшоков и афтершоков вблизи краев Кроноцкого сейсмофокального блока скорее всего соответствует правилу, которое получило название «краевая активность» [12].

Заключение

Таким образом, макросейсмические данные, а также данные инструментальных сейсмологических наблюдений и проведенный на их основе анализ указывают на то, что землетрясение 5 декабря с $M = 7,5 - 7,7$ не относится к классу сильнейших камчатских событий. Следовательно, долгосрочный сейсмический прогноз для Кроноцкой сейсмической брешы нет оснований считать реализованным.

Такой вывод является следствием критического анализа такой, по-видимому, главной и на первый взгляд противоречивой особенности Кроноцкого толчка, как его чрезвычайно низкий макросейсмический эффект [10] при достаточно высокой мощности афтершокового процесса [13]. По-видимому, такая же особенность была характерна и для землетрясения 24.02.1923 г. с $M = 7,7$ [14], очаг которого был расположен в соседнем сейсмофокальном блоке — в Камчатском заливе (см. рис. 1, 2).

Следует отметить, что долгосрочный прогноз для районов Кроноцкого п-ва и прилегающих к нему акваторий Камчатского и Кроноцкого заливов, построенный в работах [1, 2], принципиально отличается от прогноза, построенного по схеме С. А. Федотова [3, 6]. Эти отличия подробно обсуждались в работах [1, 14].

В соответствии с полученными в работе данными серию землетрясений в декабре 1997 г. следует рассматривать как форшоки и афтершоки двух наиболее сильных, происшедших 5 декабря в 11^h 26^m с $M = 7,5-7,7$ и в 18^h 48^m с $M = 6,8$ толчков, эпицентры которых расположены на северо-восточном и юго-западном краях Кроноцкого сейсмофокального блока (см. рис. 1).

Инструментальные данные о сильнейшем землетрясении с очагом в пределах Кроноцкого сейсмофокального блока отсутствуют. Последние сильнейшие землетрясения с очагами, расположенными в соседних блоках, произошли в 1923 и 1959 гг. Появление высокой активности на краях Кроноцкого сейсмофокального блока в декабре 1997 г. может указывать на то, что этот блок из стадии стабилизации «перешел» в форшоковую стадию. Другими словами, в течение ближайших лет, по-видимому, после сильнейшего землетрясения на юге Камчатки [15] такое же землетрясение можно будет ожидать и в Кроноцком сейсмофокальном блоке в соответствии с прогнозом, построенным в работах [1, 2].

Литература

1. Викулин А. В. Миграция очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений и их повторяемость // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 46–61, 62–69.
2. Федотов С. А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. — 1965. — № 36 (203). — С. 61–136.
3. Mogi K. Migration of seismic activity // Bulletin of Earthquake Research Institute. — 1968. — Vol. 46. — P. 175–203.
4. Sykes L.R. Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps and earthquake prediction for Alaska and Aleutians // J. Geophys. Res. — 1971. — Vol. 76. — № 2. — P. 8021–8041..
5. Федотов С. А. Сейсмическое районирование СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 121–150.
6. Викулин А. В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–824.
7. Викулин А. В. Сейсмичность и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ДальНИИС Госстроя СССР, 1992. — С. 3–17.
8. Викулин А. В. Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1987. — 54 с. — Препринт.
9. Сильное Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года: основные данные, сейсмичность очаговой зоны, механизм очага, макросейсмический эффект / А. А. Гусев, В. И. Левина, В. А. Салтыков, Е. И. Гордеев // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1998. — С. 32–54.
10. Гусев А. А., Мельникова В. Н. Связи между магнитудами — среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. — 1990. — № 6. — С. 55–63.
11. Геофизические исследования при решении геофизических задач / Б. В. Баранов, А. В. Викулин, К. А. Кечекезян, Л. И. Лобковский. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1989. — С. 24–42.
12. Викулин А. В., Сенюков С. Л. Миграция форшоков и афтершоков в очаге Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. с $M = 7,5-7,7$ // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1998. — С. 80–88.
13. Викулин А. В. Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова // Вулканология и сейсмология. — 1986. — № 3. — С. 72–83.
14. Викулин А. В. Южно-курильское землетрясение 4 октября 1994 г. как предвестник сильнейшего землетрясения на юге Камчатки // Вулканология и сейсмология. — 1996. — № 5. — С. 106–112.

А. В. Викулин

Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН

ПРИРОДНЫЙ РИСК СЕВЕРНОЙ КАМЧАТКИ*

Территория Северной Камчатки считалась достаточно безопасным регионом. Однако Хаилинское землетрясение 08.03.1991 г. с $M = 7$ показало, что действующая в настоящее время карта ОСР-78 в очередной раз «ошиблась» на 2–3 балла. В результате комплексного исследования в 1992–1995 гг. в Корякин была создана сеть сейсмических станций, составлена новая карта общего сейсмического районирования территории и для Беринговоморского побережья показано, что оно является цунами-опасным и береговая линия песчаных кос в течение последних десятилетий размывается со скоростью до 1 м в год. Отмечается, что для определения величины риска прибрежной территории, расположенной в сейсмической зоне, необходимо разработать новую концепцию, которая позволяла бы учитывать вклад всех составляющих природной опасности.

NATURAL HAZARD TO NOTHERN KAMCHATKA

The territory of Northern Kamchatka has been a sufficiently safe region, However, the Khailino's earthquake of March 8, 1991 has shown, that the current seismic zoning map (1978) «made a mistake» by 2–3 intensity levels according to the 12-intensity scale, As a result of integrated investigation (1992–1995) in the Koryak region a network of seismic stations and a new seismic zoning map have been made. It is inferred that the Bering Sea coastal line is tsunami-prone, and has been eroded at a speed of one meter per year during the last decades, It is noted that the determination of the amount of an apparent hazard to the coastal territory located in a seismic zone is necessary to work out a new concept that would allow taking into account all components of natural hazards,

Введение

Согласно нормативным документам, определяющим величину природного риска территории нашей страны, север Камчатки, в пределах которого располагается Корякский автономный округ (КАО), относится к достаточно безопасным регионам. К сейсмо- и цунамиопасным относятся районы юго-восточной части Камчатки [22–25]. В основу этих нормативных документов заложены представления о том, что источники сейсмо- и цунамиопасности — очаги наиболее сильных землетрясений — располагаются в Тихом океане между береговой линией Камчатки и осью глубоководного желоба. Этот же участок побережья подвержен катастрофическим цунами. При этом практически вся территория КАО расположена в зоне 5–6-балльных колебаний и Беринговоморское побережье не является цунамиопасным (рис. 1).

Имеется достаточно много данных о том, что в результате воздействия штормовых нагонов некоторые участки береговой линии Камчатки значительно изменяются. Однако систематического исследования изменчивости побережья Камчатки не проводилось. Имеющиеся натурные данные носят отрывочный характер и не являются полными. На основании таких данных не представляется возможным дать долговременную характеристику устойчивости или изменчивости береговой линии Камчатки, в том числе КАО [21].

Проблема сейсмической безопасности территории КАО резко обострилась после сильного землетрясения 8 марта 1991 г. с очагом, расположенным вблизи с. Хаилино (рис. 1; 2, а). Стало ясно, что карта общего сейсмического районирования, принятая в 1978 г. (ОСР-78), для территории КАО допускает большую ошибку типа «пропуск цели» [12]. Поэтому по инициативе администрации КАО после Хаилинского землетрясения были начаты работы по уточнению карты ОСР [3]. Работы носили комплексный характер. На территории КАО в 1992–1995 гг. кроме переопределения уровня сейсмичности проводились работы по оценке риска цунами, по определению устойчивости береговой линии к воздействию штормовых нагонов, по исследованию гидротермальных источников как индикаторов сеймотектонической активности. Исполнителем работ являлась Камчатская ОМСП ГС РАН. В работах приняли участие сотрудники ведущих (по рассматриваемым проблемам) институтов России и некоторых университетов Японии и Норвегии. Руководителем комплексных работ на всем их протяжении являлся автор статьи.

* 20 (112). Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 2. С. 36–49.

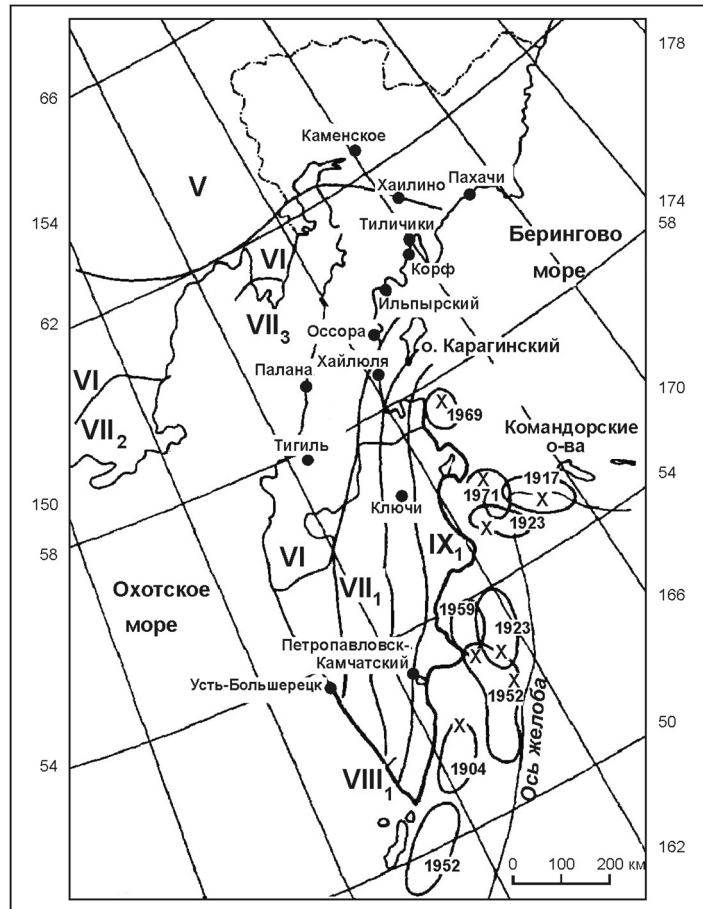


Рис. 1. Карты общего сейсмического районирования ОСР-78 [22, 23] и цунамирайонирования [24, 25] Камчатки:

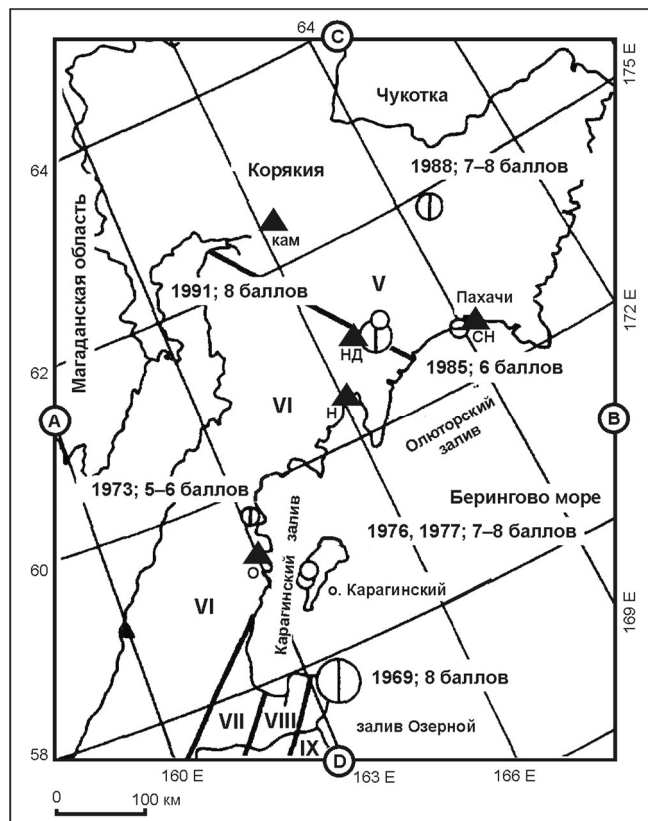
римскими цифрами обозначены зоны, имеющие балльность по шкале MSK-64 [22]; часть береговой линии, обозначенная жирной линией, является цунамиопасной с высотой волн 5 м и более; крестами обозначены эпицентры сильнейших землетрясений в XX в.; арабскими цифрами обозначены годы землетрясений; границы очагов сильнейших землетрясений проведены по работе [2]

Сейсмичность Корякии

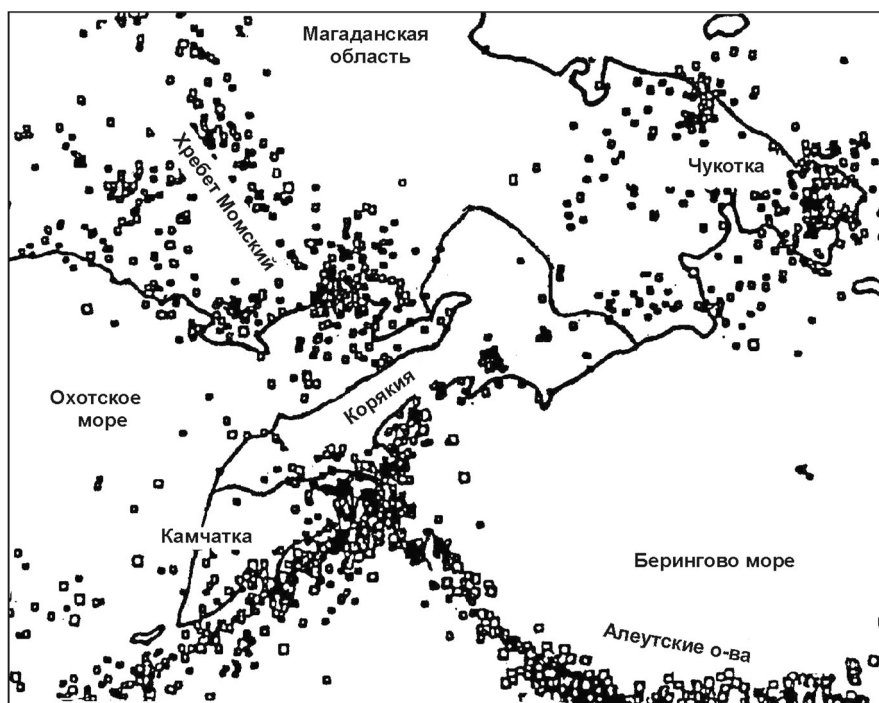
По сейсмологическим данным, территория КАО до середины 60-х гг. этого столетия являлась асейсмичной. Однако в конце 60-х — начале 90-х гг. произошли землетрясения (рис. 2, а), которые в пределах Северной Камчатки ощущались с интенсивностью, превышающей «разрешенные» картой ОСР-78 [3] значения. С наибольшим дефицитом, достигающим 2–3 баллов, на территории КАО ощущалось Хаилинское землетрясение с $M = 7$. Очаг этого 8-балльного землетрясения на карте ОСР-78 оказался расположенным в 5–6-балльной зоне (рис. 2, а) [12]. Эти данные послужили основой для постановки задачи об уточнении карты ОСР для территории КАО.

Для решения поставленной задачи на территории КАО была создана сеть, состоящая из 5 стационарных сейсмических станций (см. рис. 2, а). В одном из пунктов регистрации, расположенном в с. Каменское, совместно со специалистами университетов из городов Токио и Нагоя была установлена японская цифровая сейсмическая станция «Посейдон». Кроме того, в течение полевых сезонов работали 4 временные сейсмические станции. В результате анализа всего инструментального сейсмологического материала было показано [33], что землетрясения на территории КАО приурочены к двум поясам (см. рис. 2, а), являющимися продолжениями Курило-Камчатской и Алеутской сейсмофокальных зон соответственно на северо-восток в сторону Чукотки и на северо-запад в сторону Момского хребта (Магаданская область) (рис. 2, б). При этом оказалось, что территория КАО на уровне энергетических классов $K > 7-8$ ($M > 0$) не имеет фо-

новой сейсмичности. На примере Хаилинского землетрясения было показано, что сейсмичность в очагах сильных северо-камчатских землетрясений достаточно быстро затухает и их размеры составляют примерно $100 \times 50 \text{ км}^2$ [12, 15, 35].



a



б

Рис. 2. Сейсмичность Корьякии (а) и прилегающих регионов (б): римскими цифрами обозначены зоны, имеющие балльность по шкале MSR-64; арабскими — годы землетрясений и их интенсивность

Эти данные не позволяют применять для целей сейсморайонирования принятую в нашей стране методику [22], в которой расчет сотрясаемости осуществляется на основе линейной экстраполяции в область максимальных энергий графика повторяемости землетрясений, построенного по данным о фоновой сейсмичности.

Новая для России методика расчета сотрясаемости была предложена А. А. Гусевым и в ходе работ доведена до практического применения [7, 8, 27]. Разработанная методика развивает принятую идеологию составления карт ОСР [22] и преодолевает слабые стороны такого подхода. В первую очередь, это использование коротких рядов сейсмических наблюдений для описания долговременных характеристик сейсмического режима и гипотезы линейности графика повторяемости землетрясений при его экстраполяции в область максимально возможных магнитуд, использование в расчетах представлений об очаге как о точечном объекте, неучет разброса балла при заданных магнитуде и расстоянии и др. При построении карты (что предполагает разбиение территории на условно-однородные зоны) использовались полученные в ходе работ данные полевых геологических работ и результаты дешифрования космических снимков, которые позволили закартировать сейсмодислокации и сейсмообвалы [9, 16], а также полученные ранее данные гравиметрических исследований [13], глубинного строения [18] и электропроводности [19].

Следует отметить, что наличие разнопрофильных данных не обязательно приводит к уточнению конфигурации блоков, слагающих земную кору. В частности, используемые в работе гравиметрические данные, а также данные глубинного строения и электропроводности не привели из-за их крупномасштабности к уточнению ранее установленных границ блоков, но позволили на карте сейсморайонирования проконтролировать общую протяженность зон одинаковой балльности.

Новая для территории КАО и всей Камчатки карта ОСР представлена на рис. 3. Согласно этой карте практически вся территория КАО из 5–6-балльной зоны переместилась в 7–8-балльную. В работах по составлению карты участвовало большое количество сотрудников ОИФЗ РАН, МНТП РАН (Москва), КОМСП ГС РАН, ИВ ДВО РАН, ИВГиГ ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский). Работы по составлению карты ОСР проводились под руководством А. А. Гусева (ИВГиГ ДВО РАН) и Л. С. Шумиловой (ОИФЗ РАН).

Цунамиопасность берингоморского побережья Камчатки

До середины 60-х гг. для берингоморского побережья Камчатки отсутствовали данные о цунами, что позволяло относить этот район к нецунамиопасным [24, 25]. Даже после землетрясения 22.11.1969 г. с $M = 7,7$ (см. рис. 2, а), сопровождавшегося на побережье залива Озерной цунами высотой до 10–15 м [10], отношение к проблеме цунамиопасности берингоморского побережья Камчатки в целом не изменилось, так как полагалось, что источники цунами по-прежнему могут располагаться только в юго-западной части Берингова моря в районе Камчатского пролива и залива Озерной [10]. В результате на побережьях Карагинского и Олюторского заливов ожидалось цунами высотой не более 2–3 м при времени прихода волны 1–2 часа после сейсмического толчка [11].

Выявление на севере Камчатки двух поясов сейсмичности и приуроченность к ним эпицентров сильных (до $M = 7$ и, возможно, больше) землетрясений (см. рис. 2, б; 3) позволило высказать предположение о том, что эти пояса могут являться цунамигенными.

Работы по поиску и датировке следов цунами на берингоморском побережье КАО были начаты в 1992 г. Они проводились под руководством И. В. Мелекесцева (ИВГиГ ДВО РАН). Такие следы были установлены вблизи пос. Хайлюля (1530 г.), на о. Карагинский (720, 820 и 940 гг.) и на мысе Крещенный Огнем (1220–1230 гг.), расположенном вблизи п. Пахачи. При этом анализ результатов бурения 191-й скважины «Гломар Челенджер» показал, что в течение последних нескольких десятков тысяч лет наблюдается следующая закономерность: после 3–5 тысяч лет покоя с интервалом в первые сотни лет происходит серия цунами. По-видимому, выявленные на берингоморском побережье КАО следы цунами скорее всего должны были быть следствиями местных сильных ($M > 7$) землетрясений [14].

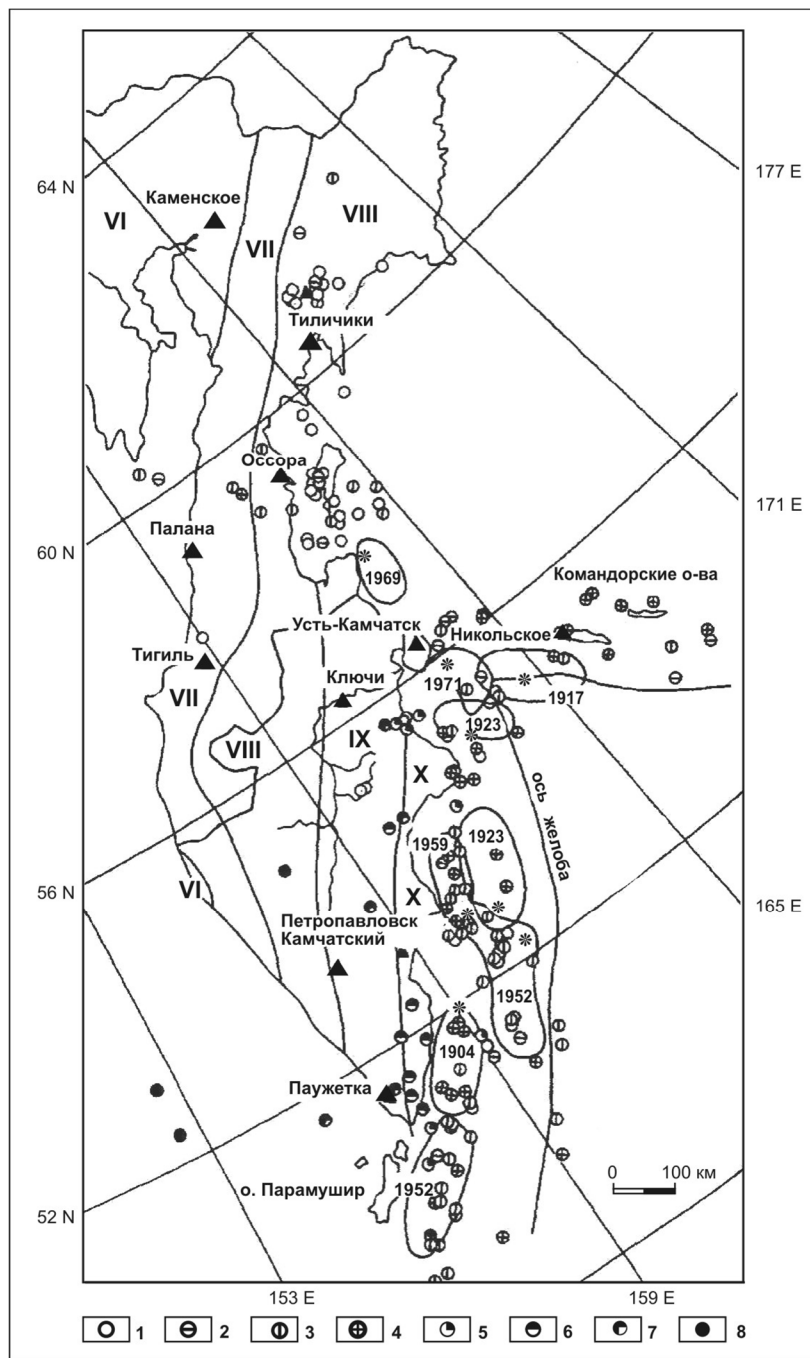


Рис. 3. Проект карты общего сейсмического районирования (ОСР) территории Корякского автономного округа (КАО) и всей Камчатки [6, 8]

Глубины гипоцентров (в км): 0–10 (1), 11–20 (2), 21–40 (3), 41–70 (4), 71–100 (5), 101–150 (6), 151–300 (7), > 300 (8). Проведены изолинии баллов VI–X (по шкале MSK-64), значения которых с 90%-ной вероятностью не будут превышены в течение 50 лет. Сейсмичность представлена эпицентрами землетрясений (обозначены кружками) энергетических классов $K = 13$ и более (магнитуд $M > 5,5$) с $\varphi < 54^\circ N$, $K = 10$ и более ($M > 3$) с $\varphi > 54^\circ N$, зарегистрированными в 1962–1993 гг. Отмечены очаги и эпицентры (обозначены звездочками) сильнейших ($M = 7,6$ и более) землетрясений, происшедших у тихоокеанских берегов Камчатки в XX в. (цифры обозначают год землетрясения, треугольники — сейсмические станции).

Карта составлена в 1995 г. в рамках работ, проводимых по инициативе администрации КАО. Заказчик — ГП «Корякстройсервис» (Палана), исполнитель — Камчатская ОМСП ГС РАН (Петропавловск-Камчатский). Авторы: А. В. Викулин, А. А. Гусев, О. Н. Егоров, В. И. Левина, В. Л. Леонов, С. Г. Леушкин, В. М. Павлов, О. В. Потапова, В. Н. Третьяков, Л. С. Шумилина

Совместно с иностранными специалистами из университетов городов Тохоку (Япония) и Бергена (Норвегия) в течение двух полевых сезонов 1993 и 1994 гг. на камчатском материале проводились исследования по отработке методики [26, 31] выявления в прибрежных осадках следов палеоцунами и определения их параметров. Первые результаты, полученные в 1994–1995 гг. [29, 30], показывают, что с помощью разработанной методики, дополненной тифрохронологическим способом датировки пеплов извержений камчатских вулканов [1], оказывается возможным составлять достаточно представительные списки цунами, а впоследствии, возможно, и сильных землетрясений, происшедших в течение последних нескольких тысяч лет [29].

Для определения высоты возможных цунами из-за местных сильных землетрясений В. К. Гусяковым с сотрудниками проведены модельные расчеты [28], в основу которых были заложены сейсмологические данные о параметрах очагов сильных землетрясений региона, установленных на примере Хаилинского землетрясения. Математическое моделирование показало, что после достаточно сильного местного землетрясения с очагом, расположенным в акваториях Карагинского и Олюторского заливов, на их побережья может обрушиться цунами высотой до 4–6 м (рис. 4). Прилив, штормовой нагон или обвал на морском дне в зоне очага землетрясения могут привести к существенному увеличению этого значения. При этом время прихода волны может составить 15–20 мин после сейсмического толчка (рис. 4, б).

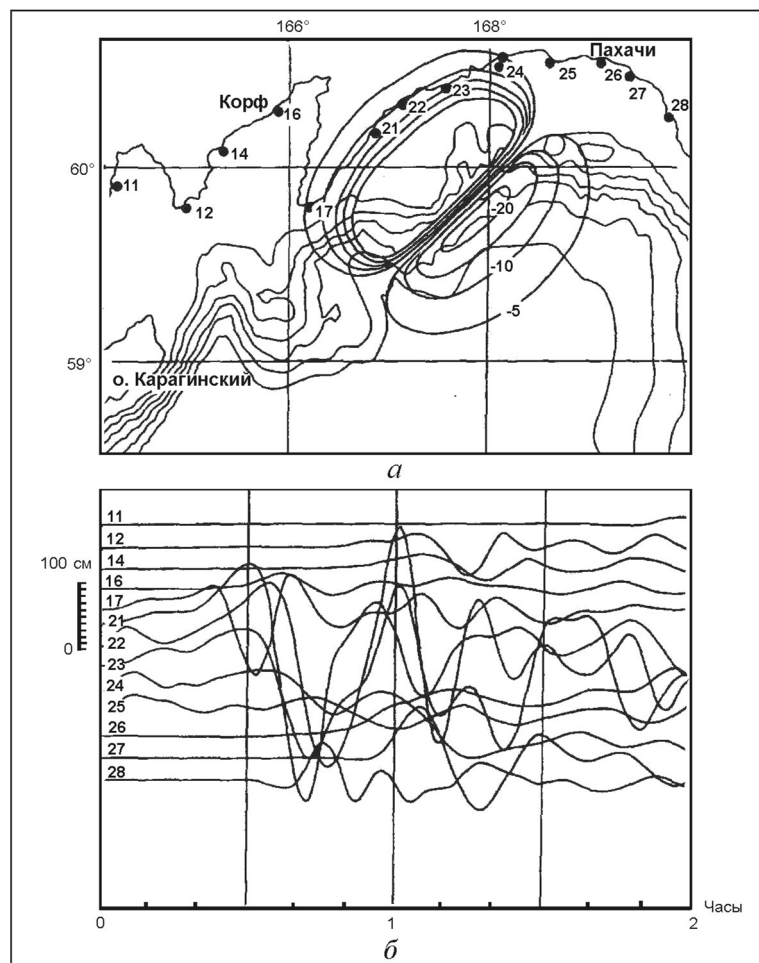


Рис. 4. Остаточные смещения в очаге гипотетического землетрясения в Олюторском заливе (а) и рассчитанные мареограммы для различных пунктов (точки 11–28) побережья (б) [28]

Полученные данные [14, 28], на наш взгляд, убедительно показывают, что цунами представляют весьма серьезную угрозу для берингоморского побережья КАО. Действительно, населенные пункты КАО, как правило, расположены на песчаных косах или в устьях рек на отметке, не превышающей 2–3 м над уровнем моря. При этом малый интервал времени между сейсми-

ческим толчком и приходом цунами на побережье накладывает очень жесткие условия на проведение мероприятий по эвакуации жителей населенных пунктов, расположенных на длинных песчаных косах, таких как Корф, Пахачи и Ильпырский.

Работы по поиску следов цунами, которые могли быть следствиями землетрясений с очагами в пределах северо-западной, протягивающейся в сторону Магаданской области сейсмической зоны, и их моделирование для охотоморского побережья не проводились.

Известно, что на Черном море, являющемся внутренним и расположенным в пределах достаточно слабого активного пояса сейсмичности, генерируются цунами [34]. Поэтому можно предположить, что и пояс сейсмичности, протягивающийся от Камчатки в сторону Магаданской области, в своей части, проходящей по акватории Охотского моря, также может являться цунамигенным.

Устойчивость береговой линии

Со стороны моря имеется еще одна угроза населенным пунктам КАО, расположенным на побережье, особенно на песчаных косах, — это значительная неустойчивость береговой линии. Например, такой большой поселок, как Корф, в котором расположены крупнейшие в КАО аэродром и портпункт, за время своего существования (с 30-х гг. нашего столетия) в результате размыва береговой линии «потерял» уже не одну улицу. Поэтому проблема устойчивости береговой линии по отношению к процессам, происходящим в прибрежных акваториях, имеет для КАО важное значение.

Работы по исследованию устойчивости береговой линии КАО проводились под руководством А. В. Порогова (МГУ, географический факультет) [21, 32].

Полевые исследования и имеющийся фактический материал (опубликованный в основном в ведомственных отчетах) показывают, что в целом для побережий КАО характерна приуроченность зон геоморфологического риска к наиболее освоенным и заселенным участкам побережий. Для трех песчаных кос — Корфской, Пахачинской и Милютынын, на которых расположены такие крупные населенные пункты, как Корф, Пахачи и Ильпырский, оказалось возможным количественно оценить изменчивость береговой линии. Значение скорости, с которой отступает берег, достигает 1 м/год. Суммарные потери сыпучего материала на участках берега протяженностью 1–2 км составляют $(30 \div 50) \cdot 10^3 \text{ м}^3$ в год. В районе возведения волнозащитной стенки (Пахачинская коса), расположенной вблизи рыбоконсервного завода, скорость отступления берега в 1,5 раза больше, чем на незащищенной части берега (рис. 5). Более сложно изменяется береговая линия Корфской косы, что, по-видимому, связано с более интенсивным освоением ее территории.

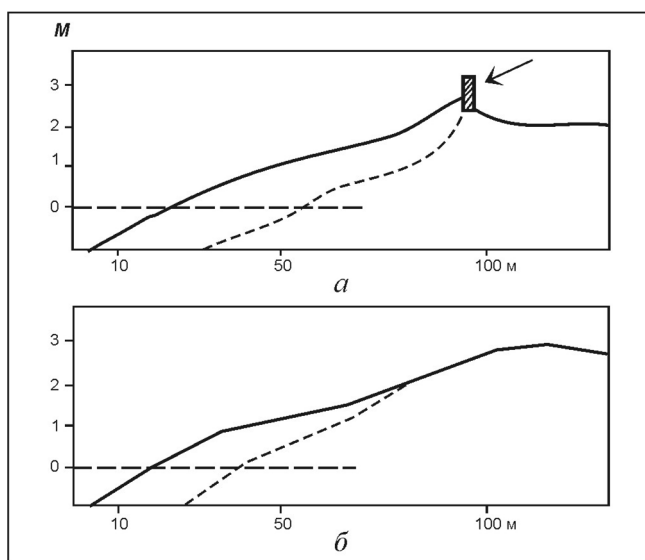


Рис. 5. Профили деформации пляжа в пос. Пахачи на участке волнозащитной стенки (а) и на фоновом участке (б) [32]

С целью определения механизма, который мог бы объяснить изменчивость береговой линии, на примере косы Милютынын (пос. Ильпырский) проводилось численное моделирование волновых процессов, происходящих в прибрежной акватории. Модель позволяла производить расчеты рефракции, трансформации и диссипации волн, определять функцию тока и скорости течений, вычислять расход сыпучего материала и давать оценку величине деформации дна [17]. Анализ показал, что исследуемая прибрежная акватория характеризуется наличием крупномасштабных вихрей, которые выявляются практически при любых волновых режимах. Эти вихри обуславливают перенос воды (следовательно, и материала) в сторону берега на более глубоких участках подводного склона и отток от берега в более мелководных областях. Максимальные скорости движения воды (приток, отток и вдоль берега) достигают значений ~ 1 м/с. Такой волновой механизм обеспечивает вдольбереговой расход материала, максимальное значение которого составляет около $300 \text{ г/с} \cdot \text{м}$. При этом суммарные продольные расходы, интегрированные по всей ширине прибрежных участков, измеряются сотнями $\text{м}^3/\text{ч}$. Пиковые значения поперечных расходов концентрируются в относительно узкой прибрежной полосе шириной несколько сот метров, где они в 1,5–2 раза могут превышать вдольбереговые расходы.

Модельные расчеты значений для скоростей течения воды в прибрежной зоне, для скорости отступления береговой линии и расхода сыпучего материала оказались близки реально наблюдаемым для Корфской, Пахачинской и Милютынынской кос. Это позволяет наработанные модельные представления о механизме течений в прибрежных акваториях закладывать в основу разработок практических мероприятий по защите береговой линии этих песчаных кос от размыва.

Термальные источники на территории Корякского автономного округа

Термальные воды являются субповерхностными индикаторами, отражающими особенности неотектонического, в том числе и сейсмостектонического, развития отдельных регионов. Проявление землетрясений и формирование трещинных систем циркуляции термальных вод связано с единым геологическим процессом развития трещиннообразования в земной коре. Изучение масштабов распространения термальных вод и характера их разгрузки в виде термальных источников позволяет использовать полученные данные в качестве дополнительного показателя неотектонической активизации региона при проведении сейсмического районирования. Исследование гидротермального режима территории КАО приобретает особое значение в связи с ее слабой сейсмостектонической и гидрогеологической изученностью.

Изучение термальных вод на территории КАО проводится на протяжении последних нескольких десятков лет. Полученные данные в основном изложены в большом количестве отчетов и еще требуют своего научного анализа и обобщения. В 1994 г. под руководством В. М. Сугрובה и Г. Н. Копыловой (ИВ ДВО РАН) были проведены широкомасштабные полевые работы и сделана первая попытка анализа всего имеющегося материала по термальным источникам на территории КАО. Основные результаты проведенной работы в контексте проблемы риска можно сформулировать следующим образом [36].

Области распространения термальных вод на территории КАО пространственно соответствуют двум выявленным сейсмически активным поясам. Основные выходы термальных вод на севере исследуемого региона приурочены к ограниченной глубинными разломами зоне северо-западного простирания, фиксирующей на поверхности область повышенной тектонической трещиноватости, пространственно соответствующей относительно слабо выраженному в структуре и сейсмичности фрагменту границы между Охотской и Северо-Американской плитами.

Использование некоторых параметров термальных вод (максимальная температура воды источников, суммарная тепловая мощность группы источников и др.) позволяет оценить степень развития по площади и относительную глубину открытой тектонической трещиноватости.

Кроме того, показано, что по тепловому потенциалу и величине геотермальных ресурсов ряд месторождений термальных вод на территории КАО может использоваться для теплоснабжения населенных пунктов и в бальнеологических целях.

Заключение

В результате выполнения работ в 1992–1995 гг. было показано, что территория КАО является зоной высокого комплексного риска. Для этой территории характерны сильные (до 7–8 баллов и, по-видимому, более) землетрясения, большие (до 4–6 м) цунами, которые могут обрушиться на берингоморское побережье через 15–20 мин после сейсмического толчка, и значительный (до 1 м в год) размыв береговой линии песчаных кос.

Распределение величины опасности по территории КАО неравномерно. Из приведенных в настоящей работе данных следует, что наибольшему риску в результате воздействия природных катастроф подвержены населенные пункты, расположенные в пределах 8-балльной зоны, протягивающейся вдоль берингоморского побережья, и особенно в его прибрежной части, подверженной воздействию цунами и размыву береговой линии (территории Олюторского и Карагинского районов КАО, прилегающие к одноименным заливам).

Цунамигенные землетрясения вблизи берингоморского побережья происходят сериями. Повторяемость событий в серии составляет первые сотни лет при временном интервале между сериями в первые тысячи лет. По-видимому, такая же закономерность характеризует повторяемость и наиболее сильных землетрясений, происходящих в пределах всей территории Северной Камчатки.

Следует отметить, что такого рода комплексные работы в масштабе значительного по площади региона в рамках единой программы проведены впервые. Как видно из полученных результатов, высокая природная опасность территории КАО определяется достаточно интенсивными процессами, происходящими в пределах сейсмической зоны северо-восточного простираения, являющейся, по-видимому, границей тектонических плит [15], и вихревыми течениями, образующимися в ее прибрежных морских акваториях [21, 32]. Дальнейшие исследования позволят как уточнить тектоническое строение региона и волновую структуру морских течений в прибрежных акваториях в условиях повышения уровня Мирового океана, так и обосновать возможности практического использования гидротермальных ресурсов (теплоснабжение, электроэнергия).

Полученные результаты позволяют рассматривать проблему риска прибрежных территорий, расположенных в сейсмически активных регионах, с принципиально иной позиции, которая позволила бы в рамках единой концепции учесть все составляющие комплексной природной опасности [6, 32]. Действительно, суммарная оценка величины природного риска прибрежной территории, например берингоморского побережья КАО, должна в совокупности определяться и сейсмической (до 7–8 баллов и, возможно, более), и цунамигенной (до 4–6 м), и штормовой (наличие волнения поверхности моря в момент сильного землетрясения может привести к значительному увеличению высоты цунами) компонентами. Известно, что сильные землетрясения часто сопровождаются извержениями вулканов. Поэтому для таких регионов, как, например, восточное побережье Камчатки, которое расположено в 9-балльной зоне [6, 22, 23], к этим компонентам следует добавить и опасность подвергнуться воздействию извержения.

Таким образом, суммарный риск, очевидно, будет превышать величину всех его составляющих в отдельности. Однако величина риска не будет являться простой суммой всех его компонент, поскольку не каждое землетрясение сопровождается цунами, не каждое цунами происходит при штормовых условиях и т. д.

Для определения величины такой комплексной оценки риска прибрежной территории, расположенной в пределах сейсмоопасной зоны (и зоны действия вулканов), необходимо проведение дальнейших исследований, целью которых должно быть установление корреляционных зависимостей между всеми составляющими природной опасности.

Для реального уменьшения величины риска, характерного для территории КАО, полученные к настоящему времени результаты необходимо закрепить на практике: утвердить новую карту ОСР, создать службу слежения и оповещения об угрозе цунами и, где это требуется, приступить к защите береговой линии от размыва. На территориальном уровне уже сделан первый важный шаг: в 1997 г. постановлением губернатора КАО при администрации создана геофизическая обсерватория, которая, несомненно, позволит сохранить созданную в ходе работ сеть

сейсмических станций и, как следствие, наработанную в 1992–1997 гг. «научную» инфраструктуру, что впоследствии позволит продолжить исследования и приступить к разработке практических мероприятий по уменьшению величины природной опасности территории Северной Камчатки**.

Литература

1. *Возраст действующих вулканов Курило-Камчатского региона* / О. А. Брайцева, И. В. Мелекесцев, В. В. Пономарева [и др.] // Вулканология и сейсмология. — 1994. — № 4–5. — С. 5–35.
2. *Викулин А. В.* Миграция очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений и их повторяемость // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 46–61.
3. *Викулин А. В.* Опыт по уменьшению опасности от природных катастроф на территории Корякии (север Камчатки) // Камчатка: развитие и окружающая среда: тез. докл. рос.-яп. симпозиума, Петропавловск-Камчатский, 4–5 июля 1995 г. — Петропавловск-Камчатский, 1995. — С. 23–24.
4. *Викулин А. В.* Природный риск территории Корякии (север Камчатки) // Геологическая среда и сейсмический процесс: материалы Всерос. межрегион. конф., Иркутск, 2–5 сентября 1997. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 1997. — С. 73–74.
5. *Викулин А. В.* Комплексный природный риск территории Северной Камчатки // Стихия. Строительство. Безопасность: сб. докл. Междунар. конф., Владивосток, 8–12 сентября 1997. — Владивосток: ДальНИИС, 1997. — С. 101–102.
6. *К землетрясению без риска* / А. В. Викулин, В. Н. Дроздук, Н. В. Семенец, В. А. Широков. — Петропавловск-Камчатский: СЭТО-СТ, 1997. — 120 с.
7. *Гусев А. А., Петухин А. Г.* Методика построения региональной прогнозной зависимости между параметрами сейсмических колебаний грунта, магнитудой и расстоянием при небольшом числе инструментальных записей на примере прогноза максимального ускорения для Камчатки // Bulgarian Geophysical J. — 1990. — Vol. XXII. — № 4. — P. 40–49.
8. *Гусев А. А., Шумилина Л. С.* Некоторые вопросы методики сейсмического районирования // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. — Вып. 2, 3. — М.: ОИФЗ РАН, 1995. — 490 с.
9. *Егоров О. Н.* Оценка сейсмичности горных регионов при отсутствии наблюдаемых инструментальных данных // Сейсмическая безопасность урбанизированных территорий: материалы Междунар. конф. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН. 2000. — С. 19.
10. *Заякин Ю. А.* Цунами на Дальнем Востоке. — Петропавловск-Камчатский: Камчат, 1996. — 86 с.
11. *Заякин Ю. А.* Возникновение и распространение цунами в западной части Берингова моря // Метеорология и гидрология. — 1988. — № 2. — С. 66–73.
12. *Корякское землетрясение 8 марта 1991 г.* Землетрясения в СССР в 1991 г. / В. М. Зобин, В. Ф. Бахтиаров, В. Н. Борисенко [и др.]. — М.: Наука, 1997. — С. 76–88.
13. *Зубин М. И., Таракановский А. А.* Тектоника и особенности поля силы тяжести района Ключевской группы вулканов // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. — Владивосток, 1976. — С. 17–28.
14. *Мелекесцев И. В., Курбатов А. В.* Частота крупнейших палеосейсмических событий на северо-западном побережье и в Командорской котловине Берингова моря в позднем плейстоцене-голоцене // Вулканология и сейсмология. — 1997. — № 3. — С. 3–11.
15. *Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 г.: существует ли плита Берингия?* / А. В. Ландер, Б. Г. Букчин, Д. В. Дроздин А. В. Кирюшкин // Вычислительная сейсмология. — 1994. — Вып. 26. — С. 103–122.
16. *Леонов В. Л., Егоров О. Н.* Обвалы и оползни на территории Корякского автономного округа, связанная с ними опасность и факторы, ее определяющие // Вопр. географии Камчатки. — 1998. — Вып. 11.
17. *Леонтьев И. О.* Расчет волн, течений и вдольбереговых потоков наносов в прибрежной зоне // Океанология. — 1994. — Т. 33. — С. 429–434.
18. *Мороз Ю. Ф.* Глубинное строение юго-западной части Корякского нагорья // Советская геология. — 1987. — № 5. — С. 118–123.

** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 97-05-96628.

19. Мороз Ю. Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. — М.: Наука, 1991. — 181 с.
20. Следы доисторических цунами на восточном побережье Камчатки / Т. К. Пинегина, И. В. Мелекесцев, О. А. Брайцева [и др.] // Природа. — 1997. — № 4. — С. 103–106.
21. Поротов А. В., Селиванов А. О. Возможное развитие берегов России в условиях ожидаемого подъема уровня океана на побережье Корякии // Развитие морских берегов России и их изменения при возможном подъеме уровня Мирового океана. — М.: МГУ, 1997. — С. 220–243.
22. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР. — М.: Наука, 1979. — 192 с.
23. СНиП II-7-81. Строительство в сейсмических районах. — М.: Стройиздат, 1982. — 40 с.
24. Соловьев С. Л. Основные данные о цунами на тихоокеанском побережье СССР 1737–1976 гг. // Изучение цунами в открытом океане. — М.: Наука, 1978. — С. 61–136.
25. Предварительное цунамирайонирование Курило-Камчатского побережья на основе гидродинамических расчетов / С. Л. Соловьев, А. В. Некрасов, В. Г. Бухтеев, Р. В. Пясковский // Теоретические и экспериментальные исслед. по проблеме цунами. — М.: Наука, 1977. — С. 131–139.
26. The identification of tsunami deposits in coastal sediment sequences / A. G. Dawson, I. D. Foster, S. Shi [et al.] // Science of Tsunami Hazards. — 1991. — Vol. 9. — № 1. — P. 73–82.
27. The First Version of the $A_{\max}(M_w, R)$ Relationship for Kamchatka / A. A. Gusev, E. I. Gordeev, E. M. Guseva [et al.] // Pure appl. Geophys. — 1997. — Vol. 149. — P. 299–312.
28. Gusiakov V. K., Marchuk An. G. Estimation of tsunami risk: case study of the Bering coast of Kamchatka // Tsunami Migration and Risk Assessment, Proceedings of the International Tsunami Workshop, Petropavlovsk-Kamchatsky, August 21–24, 1996. — Novosibirsk: Computing Center SD PAS, 1997. — P. 33–46.
29. Gusiakov V. K., Marchuk An. G., Osipova A. V. Expert tsunami database for the Pacific: motivation, design, and proof-of-concept demonstration // Perspectives on Tsunami Hazard Reduction. — Kluwer Academic Publishers: Printed in the Netherlands, 1997. — P. 21–34.
30. Tsunami sedimentation associated with the 1923 Kamchatka earthquake / K. Minoura, V. K. Gusiakov, A. Kurbatov [et al.] // Sedimentary Geology. — 1996. — Vol. 106. — P. 145–154.
31. Minoura K., Nakaya S. Origin of intertidal lake and marsh environments in and around Lake Jusan. Tsugaro // Geol. Soc. Japan. Mem. — 1990. — Vol. 36. — P. 71–87 (in Japanese).
32. Porotov A., Vikulin A. The Natural Hazards assessment on coastal zone of the Koryak region // Partnership in Coastal Zone Management. Supl. Iss. / eds. J. Tausik, J. Mitchel. — Univ. Portsmouth, 1996. — P. 1–6.
33. Potapova O. V., Chernysheva G. V., Shumilina L. S. Seismicity of Koryak region // 5th Zonenshain Conference on the plate tectonics, Moscow, November 22–25, 1995. — Moscow: IO RAS, 1995. — P. 131.
34. Ranguelov B. Tsunami Hazard Methodology — a Case for the Black Sea / Стихия. Строительство. Безопасность. — Владивосток: ДальНИИС, 1997. — С. 89–90.
35. Zobin V., Melekestsev I., Vikulin A. Seismic zonation of the Western coast of the Bering Sea // Proceedings of the First International Conference on Seismic Zonation, October 17–19, 1995. — France: Nice, 1995. — P. 1432–1439.
36. Уточнение карты общего сейсмического районирования территории Корякского автономного округа. Этап накопления и обработки полученных данных: отчет о работе в 1994 г. Т. 2. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1994. — 585 с.

А. В. Викулин

Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН

РОЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА*

Долгосрочный сейсмический прогноз на Камчатке

Возможно, нет ни одного другого региона в мире, для которого, как для Камчатки, было бы построено такое большое число схем сейсмического прогноза. Долгосрочные прогнозы, составленные камчатскими учеными [1–4, 7], представлены в таблице.

Эти данные можно разбить по смыслу прогнозируемого временного интервала на две группы. К первой группе будем относить прогнозы [1–4, 6] (правая часть таблицы). В прогнозах этой группы предсказываемые временные интервалы возникновения землетрясений оценены статистически. Поэтому данные прогнозы с определенной достоверностью предсказывают наиболее вероятные временные интервалы, в течение которых в будущем следует ожидать землетрясения. Ко второй группе относятся прогнозы [7], которые в соответствии с используемыми методиками с той или иной степенью достоверности дают прогнозную оценку возникновения сильных землетрясений для текущего временного интервала.

Приведенные в каждой из групп прогнозы не противоречат друг другу. При этом прогнозы первой группы в отличие от прогнозов второй группы можно считать взаимно дополняющими и уточняющими друг друга. Поясним это анализом данных в таблице.

«Непротиворечивость» прогнозов во второй группе — чисто формальная, и связана она с достаточно неопределенным «пороговым» значением P_n , величина которого, согласно работе [7], $P_n \gg 5\%$. Это значение является величиной достаточно неопределенной и не пригодной для практических оценок, так как возможное значение вероятности прогноза расположено в больших пределах: $5 \leq P_n \leq 100\%$. Действительно, если для Южной Камчатки и Авачинского залива пороговые значения совпадают и в обоих случаях $P_{n1} > 50\%$, то тогда оба прогноза будут совпадающими для Авачинского залива и Северной Камчатки и противоречивыми для Южной Камчатки. С другой стороны, если пороговое значение $P_{n2} < 50\%$, то в этом случае оба прогноза будут совпадающими для Южной Камчатки и противоречивыми для Авачинского залива и Северной Камчатки. В этой связи непонятен результат объединения двух методик прогноза: методики С. А. Федотова и М8.

Такое внутреннее противоречие между прогнозами второй группы формально может быть снято, если для Южной Камчатки (юк) и Авачинского залива (аз) положить разными пороговые значения, например: $P_{n, аз} = P_{n1}$ и $P_{n, юк} = P_{n2}$. Однако в этом случае расхождение между обеими группами прогнозов, представленных в таблице, будет, очевидно, наибольшее.

Такой вывод вполне закономерен. Непротиворечивости между обеими группами прогнозов и не может быть, так как методика С. А. Федотова, по сути, не позволяет прогнозировать время землетрясения [9]. Как видим, «временные» различия между двумя группами прогнозов находят свое отражение и в их внутренней противоречивости.

Большая достоверность прогнозов первой группы объясняется тем обстоятельством, что они опираются на динамические закономерности сейсмического процесса. Покажем это на примере прогноза, построенного автором [2].

* 21 (138). Опыт прогнозирования сейсмической опасности на Камчатке в 1995–1996 гг. (по материалам работы Межведомственного научно-технического совета при Камчатском центре мониторинга сейсмической и вулканической активности). Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. С. 25–31.

Таблица

Долгосрочный сейсмический прогноз для Камчатки по данным на 1996 г.

| Район | Прогнозы | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--|------------|---------|---|------------|---------|--|--------------|----------|--|----------------------|----------------------|-------------------------------------|----|
| | С. А. Федотов, С. Д. Чернышев, А. В. Соломагин, 1996 | | | М8, С. А. Федотов, Ю. В. Магвиенко и др., 1996 г. | | | А. В. Викулин, 1989 г., 1992 г. | | | В. А. Широков, 1977 г., 1978 г., 1980 г. | | | А. А. Гусев, А. Г. Петухин, 1991 г. | |
| | $\Delta \tau$ [годы] | ΔM | P [%] | $\Delta \tau$ [годы] | ΔM | P [%] | ΔT [годы] | ΔM | P [%] | Район | ΔT [годы] | $I(\Delta I), H$ [м] | P [%] | |
| Южная Камчатка | 1996–2000 | 7,8–8,0 | >> 5 | Отсутствие ППВ VII.1993–VII.1998 | $\geq 7,6$ | 50–70 | 2008 \pm 10 | ≥ 7 | 80 | г. Петропавловск-Камчатский | VII.2008–IX.2011 | 8 (7–9) | 25 | |
| | | | | | | | 2008 \pm 14 | | | | X.2014–XI.2017 | | 70 | |
| Авачинский залив | 1996–2000 | 7,8–8,0 | >> 5 | Наличие ППВ | $\geq 7,6$ | < 5 | До 2040 | 7 \div 7,4 | 5 | Камчатка | IV.2033–VI.2036 | 5 (2–20) | 20 | |
| | | | | | | | 2058 \pm 20 | $\geq 7,5$ | ~ 0 | | | | | |
| Северная Камчатка | 1996–2000 | 7,8–8,3 | > 5 | VII.1993–VII.1998 | $\geq 7,6$ | 95 | После землетрясения на юге Камчатки не позднее, чем через 21 год | 7 \div 7,4 | 80 | п. Усть-Камчатск | X.2014–XI.2017 | 8 (7–10) | 40 | |
| | | | | | | | | $\geq 7,5$ | ~ 0 | | | | | |
| Командорские острова | — | — | — | — | $\geq 7,6$ | 95 | | — | — | | II.2027–III.2030 | 5 (0,5–11) | < 10 | |
| | | | | | | | | | | | | | IV.2033–VI.2036 | 20 |

Примечание. Символ ΔT — время ожидаемых землетрясений; $\Delta \tau$ — временные интервалы прогнозирования; ΔM — диапазоны прогнозируемых магнитуд; P — вероятностная оценка прогноза; ППВ — период повышенной вероятности возникновения землетрясений; $I(\Delta I)$ — ожидаемая балльность (по шкале MSK-64); H — высота цунами.

Прогноз и сейсмический процесс

Оптимизм 60–70-х относительно возможности решить проблему прогноза сменился в конце 80-х — начале 90-х гг. глубоким пессимизмом. Это произошло по следующей причине [11].

К концу 60-х гг. уже были разработаны теоретические модели землетрясения: теория лавинно-неустойчивого трещинообразования (в нашей стране) и теория дилатации (за рубежом). Они описывали основные стороны процесса и давали качественное объяснение большинству известных предвестников землетрясений. Казалось бы, для надежного предсказания землетрясений осталось решить чисто технические задачи: повысить плотность сейсмических станций и оснастить их хорошими приборами. При этом предполагалось получить «количественную» привязку предвестников к конкретным землетрясениям.

Однако эксперименты, проведенные как у нас, так и на зарубежных сейсмологических полигонах, показали, что распределение предвестников представляет собой мозаичную картину. Иными словами, увеличение плотности наблюдательной сети (повышение точности наблюдений) привело не к локализации предвестников в пространстве и во времени, а к их «размыванию».

Полученный результат имеет, на наш взгляд, фундаментальное значение. Предвестники существуют — это факт. Но связаны они, по-видимому, не с конкретными землетрясениями, как предполагалось, а с их совокупностями, т. е. с некоторым общим физическим процессом, иногда завершающимся землетрясениями.

Так что же такое прогноз землетрясения как отдельно взятого события?

Многочисленными исследованиями доказано, что землетрясения в пространстве и во времени распределены не случайным образом. На разных магнитудных уровнях показано, что эпицентры землетрясений мигрируют как вдоль, так и вкрест простирания сейсмической зоны [8, 9, 18]. Стадии закономерного изменения сейсмической активности — афтершоковая, стабилизации и форшоковая — выделены в очагах сильнейших землетрясений [7, 12, 22], являющихся «элементарными» сейсмофокальными блоками [14, 15]. Все эти данные указывают на то, что достаточно сильные землетрясения являются взаимосвязанными и их можно считать взаимодействующими [12].

Каким же образом такой ансамбль взаимодействующих событий и, следовательно, соответствующую ему совокупность взаимосвязанных и «размазанных» как по пространству, так и во времени предвестников можно «разбить» на отдельные землетрясения и соответствующие только каждому из них предвестники? Очевидно, что задача такого разбиения, т. е. построение прогноза отдельно взятого землетрясения, далеко не тривиальна, что подтверждается «мозаичной картиной» пространственно-временного поля предвестников.

В этой связи имеет смысл поискать новые подходы к изучению закономерностей сейсмического процесса, которые бы имели выход на прогноз землетрясений.

Модель сейсмического процесса

Геофизические блоки и самоподобие процесса. В последнее время достаточно убедительно показано, что геофизическая среда относительно данных очаговой сейсмологии (энергия, сбрасываемая в очаге, пропорциональна его объему) хорошо описывается в рамках так называемой блочно-иерархической модели [19]. В рамках такой модели намечается схема построения теории сейсмического процесса, в основу которой закладываются представления о самоподобной фрактальной структуре [20, 21]. Таким образом, логика построений подводит авторов такого подхода к выводу, что сейсмический процесс неустойчив во времени [21] и потому «точный долгосрочный прогноз... в принципе невозможен» [21]. Впрочем, термин «точный долгосрочный прогноз» в контексте обсуждаемой в настоящей работе проблемы нуждается в комментарии.

Мы полагаем, что имеющиеся данные инструментальных сейсмологических наблюдений позволяют с высокой оправдываемостью предсказывать не только место расположения очагов землетрясений [7], но и интервалов времени, в течение которых такие землетрясения следует ожидать [2–4, 6].

Феноменологическая волновая модель [12]. На основании анализа закономерностей пространственного, временного и энергетического распределений землетрясений северо-западной окраины Тихого океана было показано существование класса землетрясений, названного нами сильнейшими, очаги которых взаимодействуют друг с другом [13–15]. Проявлением такого взаимодействия являются волны миграции сейсмической активности, которые распространяются на большие расстояния — тысячи и десятки тысяч километров [16–18].

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что взаимодействие очагов сильнейших землетрясений друг с другом является, по сути, дальнедействующим. Экспериментальные данные о высокой оправдываемости долгосрочного прогноза, которая, как показал 30-летний опыт проведения работ такого рода в масштабе тихоокеанского кольца [7, 22, 23], составляет не менее 0,8–0,9, дают основания считать доказанным дальнедействующий характер взаимодействия между очагами сильнейших землетрясений.

Анализ сейсмологических и геофизических данных показывает, что сейсмофокальную зону можно разбить на блоки, границы которых фиксированы во времени, и каждый из блоков можно отождествить с очагом сильнейшего землетрясения. Такой подход, по сути, близок модели геофизической среды, разрабатываемой школой М. А. Садовского [19–21]. Отличие заключается в том, что в рамках наших построений под геофизической средой мы понимаем конкретную среду — сейсмофокальный объем, а под сейсмическим процессом — его волновую «составляющую», отвечающую особенностям распределения в пространстве и во времени очагов класса сильнейших землетрясений.

Сейсмотектонические волны [10, 24]. Основанные на принципе упругой отдачи Рейда дислокационные модели, в которых напряжения накапливаются внутри очага, в принципе не могут объяснить дальнедействующий характер взаимодействия между очагами сильнейших землетрясений. Поэтому приведенные ранее данные указывают на необходимость разработки такой модели очага сильнейшего землетрясения, которая позволила бы дать объяснение дальнедействующему характеру их взаимодействия в пределах тихоокеанского кольца.

Геологические данные указывают на то, что сейсмофокальные блоки могут двигаться как целое (вращаться), а это может происходить в результате относительного движения тихоокеанской плиты и окружающих ее материковых плит.

С учетом данных физики твердого тела, опирающихся на инерционные эффекты, связанные с вращением тел, разрабатывается новая модель очага сильнейшего землетрясения. В такой модели напряжения возникают в окружающем сейсмофокальный блок (очаг будущего землетрясения) пространстве при его повороте в условиях вращающейся планеты. Проводятся энергетические оценки, обосновывающие ротационную модель. Впервые получается аналитическое выражение для энергии взаимодействия очагов сильнейших землетрясений (сейсмофокальных блоков). Показывается, что дислокационные модели являются предельным случаем ротационной модели в случае отсутствия взаимодействия между очагами землетрясений.

Результатом обобщения феноменологической модели сейсмического процесса и ротационной модели очага сильнейшего землетрясения явилось построение ротационной модели сейсмотектонического процесса. В рамках модели оказалось возможным теоретически объяснить эффект парных событий, который заключается в том, что сильнейшие землетрясения практически одновременно происходят в разных участках окраины Тихого океана. В рамках модели получил свое объяснение и дальнедействующий характер миграционных волн сейсмической активности как имеющий тектоническую природу. Наконец, в рамках модели объединены описания сейсмических, деформационных и тектонических волновых процессов, происходящих в пределах Тихого океана, и собственные колебания Земли. Возможность объединения таких процессов в рамках единой концепции указывает на то, что все процессы имеют одну природу и, следовательно, в равной степени определяют особенности движения планеты.

Таким образом, в последнее время получены принципиально новые данные о строении геофизической среды и возможности построения новой модели очага сильнейшего землетрясения, которые удалось связать воедино в рамках модели сейсмического процесса, опирающегося на особенности энергетического, пространственного и временного распределений землетрясений. Эти результаты позволяют на качественно новом уровне подойти к решению проблемы прогноза землетрясений.

О практике и теории сейсмического прогноза

В рамках волновой модели сейсмического процесса для сильнейших землетрясений северо-западной окраины Тихого океана были построены схемы долгосрочного сейсмического прогноза, включающие указание как места расположения их очагов, так и интервалов времени, в течение которых такие землетрясения следует ожидать [1, 2, 13, 14]. Сильнейшие землетрясения 1994 г. (4 октября с $M=8$ вблизи о. Шикотан и 25 декабря с $M=7,9$ вблизи о. Хонсю) подтвердили правильность новой долгосрочной прогнозной схемы [8, 25]. В соответствии с такой схемой ближайшее сильнейшее землетрясение на Камчатке с вероятностью около 70 % должно произойти в 2008 ± 10 г. (с вероятностью около 95 % в 2008 ± 14 г.). Его очаг будет располагаться в пределах Южной Камчатки между мысами Поворотный и Лопатка (см. табл.) [2].

Долгосрочный прогноз С. А. Федотова, который, по сути, может предсказывать только место расположения очагов будущих сильнейших землетрясений, вошел составной частью в новую схему прогноза. Поэтому можно считать, что оправдываемость новой (пространственно-временной) схемы прогноза сильнейших землетрясений также не хуже 0,8–0,9 [8].

Кроме того, в рамках волновой модели сейсмического процесса оказалось возможным дать теоретическое объяснение бухтообразным среднесрочным (земные токи, электросопротивление, уровень и дебит источников подземных вод) и краткосрочным (атмосферное электричество, деформации) предвестникам землетрясений [9].

Далее по аналогии с новой долгосрочной схемой была разработана и среднесрочная схема прогноза сильных ($M \geq 7$) курило-камчатских землетрясений [8, 9], которая, как уже отмечалось, также оправдала себя.

Таким образом, с учетом последних данных о закономерностях сейсмического процесса оказалось возможным для долгосрочного сейсмического прогноза без уменьшения его оправдываемости научно обосновать наряду с пространственной и временную компоненту. При этом оказалось, что среднесрочный и краткосрочный прогнозы с несколько меньшей оправдываемостью содержат в себе элементы долгосрочного прогноза.

Выводы

Полученные данные указывают на то, что в основе долгосрочного сейсмического прогноза заложены практически детерминированные закономерности сейсмического процесса. Поэтому роль и значение долгосрочного сейсмического прогноза как основы будущей теории прогноза землетрясений представляются очень важными [11, 12]. Заложенные в его основе представления могут быть использованы в том числе для выработки концепции построения теоретических основ среднесрочного и краткосрочного прогнозов землетрясений.

В частности, такие концепции должны учитывать взаимодействие сейсмофокальных блоков — очагов будущих сильнейших землетрясений. Другими словами, наличие предвестников, регистрируемых, например, в районе Петропавловска-Камчатского, не обязательно является свидетельством того, что очаг будущего сильного землетрясения будет расположен именно в Авачинском заливе или вблизи него.

Литература

1. Викулин А. В. Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана // Геофизические исслед. при решении геологических задач. — Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1989. — С. 43–57.
2. Викулин А. В. Прогноз времени сильнейших землетрясений у берегов Камчатки и Северных Курил // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 62–69.
3. Широков В. А. Влияние космических факторов на геодинамическую обстановку и ее долгосрочный прогноз для северо-западного участка Тихоокеанской тектонической зоны // Вулканизм и геодинамика. — М.: Наука, 1977. — С. 103–115.
4. Широков В. А. Влияние 19-летнего лунного прилива на возникновение больших камчатских извержений и землетрясений и их долгосрочный прогноз // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 164–170.

5. *Копылова Г. Н., Жалыева Ю. К.* О работе экспертной группы секции прогноза землетрясений Межведомственного научно-технического экспертного совета при Камчатском центре мониторинга сейсмической и вулканической активности в 1995–1996 гг. // Опыт прогнозирования сейсмической опасности на Камчатке в 1995–1996 гг. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. — С. 4–21.
6. *Гусев А. А., Петухин А. Г.* Об опасности сильных землетрясений и цунами в 1992–2060 гг. на Камчатке: 56-летний лунный цикл. — М.: Ин-т вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, 1991.
7. *Продолжение работ по долгосрочному сейсмическому прогнозу для Камчатки и Курильских островов и прогноз вероятного развития роя опасных предшествующих и последующих толчков при сильнейших курило-камчатских землетрясениях: науч.-техн. отчет о НИР / С. А. Федотов, А. В. Соломагин, Ю. Д. Матвиенко [и др.].* — Х/д № 18–95 от 30 марта 1995 г. — Петропавловск-Камчатский, 1996.
8. *Викулин А. В.* Долгосрочный прогноз, миграция и пары землетрясений / Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1996. — 31 с. — Препринт № 1.
9. *Викулин А. В.* О возможности построения теории сейсмического прогноза / Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1996. — 34 с. — Препринт № 3.
10. *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Ротационная модель сейсмического процесса / Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1996. — 41 с. — Препринт № 2.
11. *Викулин А. В.* Физика волнового сейсмического процесса // *Природа*. — 1992. — № 7. — С. 11–19.
12. *Викулин А. В.* Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // *Докл. АН СССР*. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–825.
13. *Викулин А. В.* Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана / Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1987. — 54 с. — Препринт.
14. *Викулин А. В., Викулина С. А.* Закономерности размещения очаговых областей сильнейших землетрясений в районе желоба Нанкай. — Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ АН СССР, 1989. — 44 с. — Препринт № 5.
15. *Викулин А. В.* Миграция очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений и их повторяемость // *Вулканология и сейсмология*. — 1992. — № 1. — С. 46–61.
16. *Mogi K.* Migration of seismic activity // *Bulletin of Earthquake Research Institute*. — 1968. — Vol. 46. — P. 53–74.
17. *Касахара К.* Механика землетрясений. — М.: Мир, 1985. — 264 с.
18. *Вилькович Е. В., Шнирман М. Г.* Волны миграции эпицентров (примеры и модели) // *Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений. Вычислительная сейсмология*. — Вып. 14. — М.: Наука, 1982. — С. 27–37.
19. *Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. — М.: Наука, 1987. — 101 с.
20. *Дискретные свойства геофизической среды*. — М.: Наука, 1989. — 175 с.
21. *Садовский М. А., Писаренко В. Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. — М.: Наука, 1991. — 96 с.
22. *Федотов С. А.* О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии // *Тр. ИФЗ АН СССР*. — 1965. — № 36 (203). — С. 66–93.
23. *Proceedings of Conference VI Methodology for Identifying Seismic Gaps and Soonto-Break Gaps*. — California, 1978. — 924 p.
24. *Викулин А. В.* Миграция сейсмичности, тектонические волны и собственные колебания планеты. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1997. — 19 с. — Препринт № 4.
25. *Викулин А. В.* Южно-Курильское землетрясение 4 октября 1994 г. как предвестник сильнейшего землетрясения на юге Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. — 1996. — № 5. — С. 106–112.

А. В. Викулин, И. В. Мелекесцев

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга*

УРОКИ ХАИЛИНСКОГО 1991 г. ($M = 7,0$) И ОЛЮТОРСКОГО 2006 г. ($M = 7,8$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ*

В работе дан обзор результатов комплексного исследования 1991–1996 гг. территории Северной Камчатки, проведенного после Хаилинского землетрясения 8 марта 1991 г. с $M = 7$ сотрудниками Институтов РАН (Петропавловск-Камчатский, Москва, Новосибирск) и учеными Японии и Норвегии по изучению сейсмичности, цунамиопасности, устойчивости береговой линии и термальных источников. Приводятся краткие предварительные макросейсмические и инструментальные данные о сейсмичности очага Олюторского землетрясения 21 апреля 2006 г. с $M = 7,8$. Формулируются выводы сравнительного анализа последствий этих двух сильнейших землетрясений региона.

LESSONS OF KCHAILINO 1990 ($M = 7$) AND OF OLUTORSKOE 2006 ($M = 7,8$) EARTHQUAKES

The review of complex 1991–1996 investigation North Kamchatka results is gave, Preliminary macroseismic and instrumental data about Olutorskoe April, 21 2006, $M = 7,8$ earthquake are gave, Conclusions of comparative analysis of two strong earthquakes are formulated.

Предисловие

Когда один из авторов (А. В. Викулин) в 1983 г. впервые прилетел в пос. Тиличики и пришел в Олюторский райисполком, то председатель, делая соответствующую отметку в его командировочном удостоверении, с недоумением спросил: «У нас не бывает землетрясений. Зачем вы сюда прилетели?» А. В. Викулин, конечно, долго объяснял ему, что на Камчатке нет мест, где бы не было землетрясений. Приводил аргументы, на его взгляд, убедительные, но при расставании понял, что председатель так и не поверил ему. Вообще-то основания для такого утверждения у председателя были, так как практически вся территория Северной Камчатки на карте общего сейсмического районирования 1978 г. (ОСР-78) в то время была отнесена к 5–6-балльной (рис. 1).

Введение

Землетрясения в пределах Северной Камчатки (теперь КАО — Корякского автономного округа) происходили и происходят нередко (рис. 2). Не так часто, как вблизи тихоокеанского побережья Камчатской области, в Петропавловске-Камчатском или Усть-Камчатске, и не такой интенсивности, но происходят периодически. Подтверждением тому являются следующие данные. Так, события с интенсивностью колебаний до 8 баллов имели место в 1969 г. в районе залива Озерной с цунами высотой до 10–15 м и в 1976 г. на о. Карагинский в месте, где было расположено с. Ягодное. В 1985 г. 5–6-балльное землетрясение случилось в Пахачах, в 1988 г. сильное землетрясение (в эпицентре, возможно, до 6–7 баллов) произошло в центральной части Корякского нагорья (рис. 2, а). Поэтому 8-балльное землетрясение с очагом вблизи пос. Хаилино 8 марта 1991 г. в 23 ч 30 мин по местному времени было вполне ожидаемым событием. Вместе с тем оно оказалось для всех нас неожиданным, так как имело слишком большую для этого региона магнитуду, близкую к $M = 7$.

Следует отметить, что Хаилинское землетрясение произошло в районе, в котором согласно действующей на тот момент карте ОСР-78 «разрешались» землетрясения с интенсивностью не более 5 баллов (рис. 1; 2, а). Близкая ситуация имела место и в районе 9-балльного Нефтегор-

* 22 (206). Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2006. № 1. С. 36–49.

ского землетрясения 1995 г., происшедшего в 6-балльной зоне. Ошибка карты в 3 балла считается очень значительной. Именно по этой причине Хаилинскому 1991 г. и особенно Нефтегорскому 1995 г. землетрясениям было придано такое большое «научное» значение (во втором случае вследствие многочисленных жертв и гигантских материальных потерь).

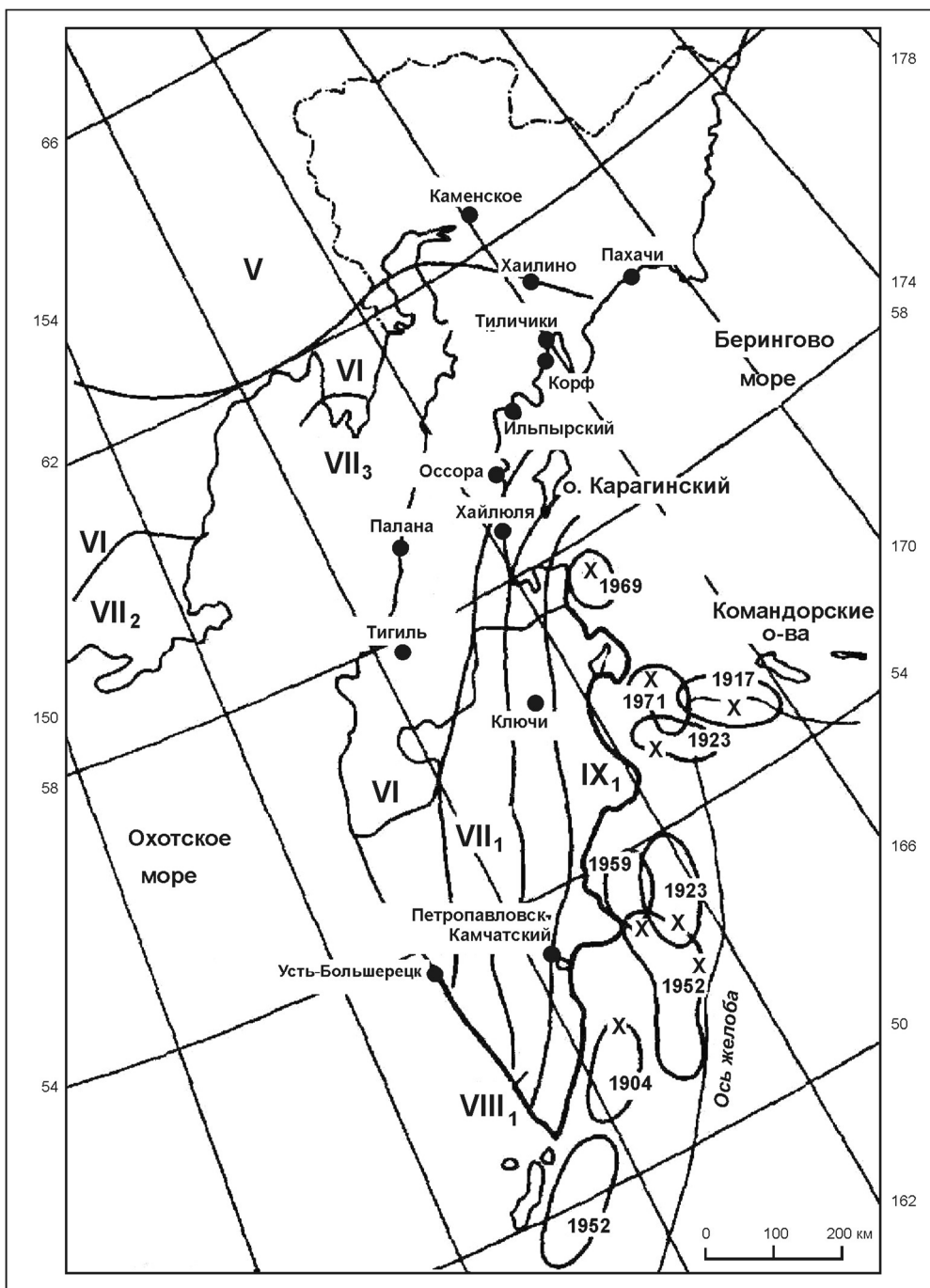
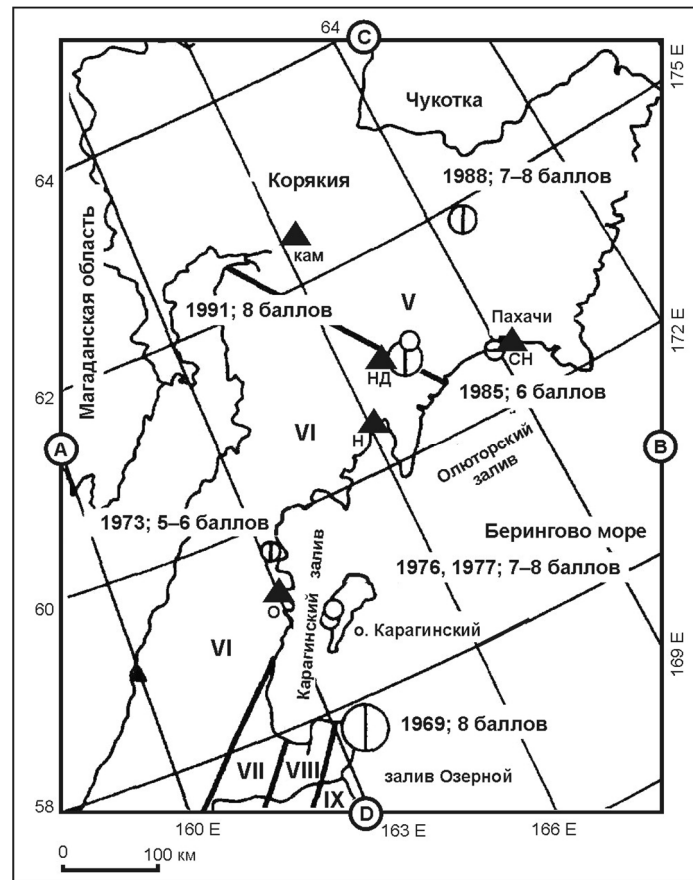
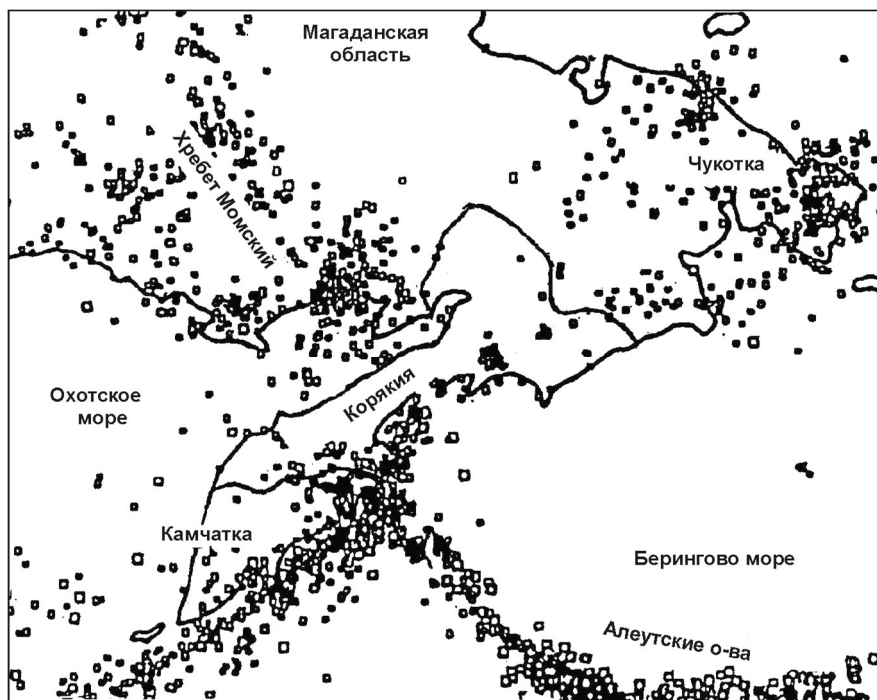


Рис. 1. Карты общего сейсмического районирования ОСР-78 [Сейсмическая..., 1979; СНИП..., 1982] и цунамирайонирования [Соловьев, 1978; Соловьев и др., 1977] Камчатки:

римскими цифрами обозначены зоны, имеющие балльность по шкале MSK-64 [Сейсмическая..., 1979]; часть береговой линии, обозначенная жирной линией, является цунамиопасной с высотой волн 5 м и более; крестами обозначены эпицентры сильнейших землетрясений в XX в., арабскими цифрами — годы землетрясений; границы очагов сильнейших землетрясений проведены по работе [Викулин, 1992]



a



б

Рис. 2. Сейсмичность Корьякии в соответствии с картой ОСР-78 (*a*) и прилегающих регионов по каталогу сильных ($M \geq 5$) землетрясений в 1960–2000 гг. (*б*):

римскими цифрами обозначены зоны, имеющие балльность по шкале MSK-64, арабскими — годы землетрясений и их интенсивность; треугольниками обозначены места установки стационарных сейсмических станций

Основные результаты исследований 1991–1996 гг.

После Хаилинского землетрясения с $M = 7$ (по каталогу NEIC $M = 6,6$), происшедшего 8 марта 1991 г. и сопровождавшегося в населенных пунктах колебаниями с интенсивностью до 8 баллов, Администрация КАО выступила с инициативой проведения сейсмологических исследований в регионе. Исследование территории Корякии осуществлялось в течение ряда лет (1991–1996 гг.) и с самого начала как комплексное [Викулин, 1998]. Исполнителем работ являлась Камчатская ОМСП ГС РАН (Камчатский филиал ГС РАН). Общее руководство работами осуществлял А. В. Викулин.

Сейсмологические и полевые исследования. Уже на следующий день после землетрясения, 9 марта, по договоренности между Администрацией Камчатской области и Институтом вулканологии ДВО РАН сотрудником КОМСП ГС РАН В. С. Борисенко в пос. Тиличики была установлена полевая сейсмическая станция и совершен облет эпицентральной зоны. Такая же станция была установлена 10 марта в пос. Пахачи. В эпицентральной области были выявлены две системы трещин, образовавшиеся при главном толчке Хаилинского землетрясения 8 марта 1991 г. Одна была расположена в 18 км восточнее пос. Хаилино, в месте слияния рек Тылгаваям и Малерваям, другая — в 6 км северо-восточнее Хаилино, на берегу реки Вывенка. По протяженности трещины достигали 100–300 м при ширине до 50 см. Размер области, подвергшейся 7–8-балльным колебаниям при землетрясении 8 марта, составил около 20 км [Викулин, Дроздук, Семенец, Широков, 1997; Зобин и др., 1997].

Отметим, что обнаружить эту систему трещин в ходе полевых исследований эпицентральной зоны летом 1992 г. не удалось.

В ходе работ 1991–1993 гг. на территории КАО была создана сеть сейсмических станций, которая включала 5 стационарных сейсмических станций, расположенных в Палане, Тиличиках, Хаилино, Пахачах, Каменском (рис. 2, а) и до 4–5 временных станций, работавших в течение летних полевых сезонов 1992–1995 гг. Цифровая сейсмическая станция японского производства «Посейдон» в с. Каменское была установлена совместно со специалистами из университетов Токио и Нагоя.

В результате анализа полученного материала выяснилось [Ландер и др., 1994], что землетрясения на территории КАО приурочены к двум поясам, являющимися продолжениями Курило-Камчатской и Алеутской сейсмофокальных зон соответственно на северо-восток, в сторону Чукотки, и на северо-запад, в сторону Момского хребта (Магаданская область) (рис. 2, б). Оказалось, что территория КАО на уровне энергетических классов $K > 7-8$ ($M > 2$) не имеет фоновой сейсмичности [Potarova, Chernyshova, Shumilina, 1995; Зобин, 1997].

Было показано, что свойства очагов сильных землетрясений на территории Корякии (рис. 3) близки свойствам очагов таких же землетрясений других регионов [Зобин и др., 1997; Ландер, 1994; Zobin, Melekestsev, Vikulin, 1995]. Действительно, Хаилинское землетрясение предварялось четырьмя зарегистрированными мировой сетью форшоками с $3,9 \leq M \leq 5,3$, первый из которых случился примерно за две недели до главного толчка, а последний, наиболее сильный, с $M = 5,3$, ощущавшийся населением до 4 баллов — за 2,5 ч. Афтершоковая активность на уровне $M \geq 4,5$ быстро «затухала»: в течение первого, второго, ..., седьмого дней недели произошло 20, 0, 3, 4, 1, 1 и 0 землетрясений. В течение первой, второй, третьей и четвертой недель — 29, 1, 2 и 0 толчков, в течение первого — четвертого месяцев их количество составило соответственно 32, 8, 1 и 3. Очаг землетрясения, включающий все зарегистрированные форшоки ($N = 4$) и афтершоки первого года ($3,7 \leq M \leq 5,9$, $N = 68$), имел овальную форму с размерами осей примерно 50×30 км² и был вытянут в северо-западном направлении (вдоль азимута простирания 320°), «пересекая» горные структуры вкрест их простирания (рис. 3). Афтершоки с наибольшими магнитудами $M = 5,7-5,9$ наблюдались в течение первого часа после главного толчка. Следующий по значению магнитуды афтершок с $M = 5,5$ произошел через 50 дней после главного толчка. После него афтершоковый процесс уже слабыми землетрясениями, не ощущаемыми населением, практически закончился в течение двух месяцев.

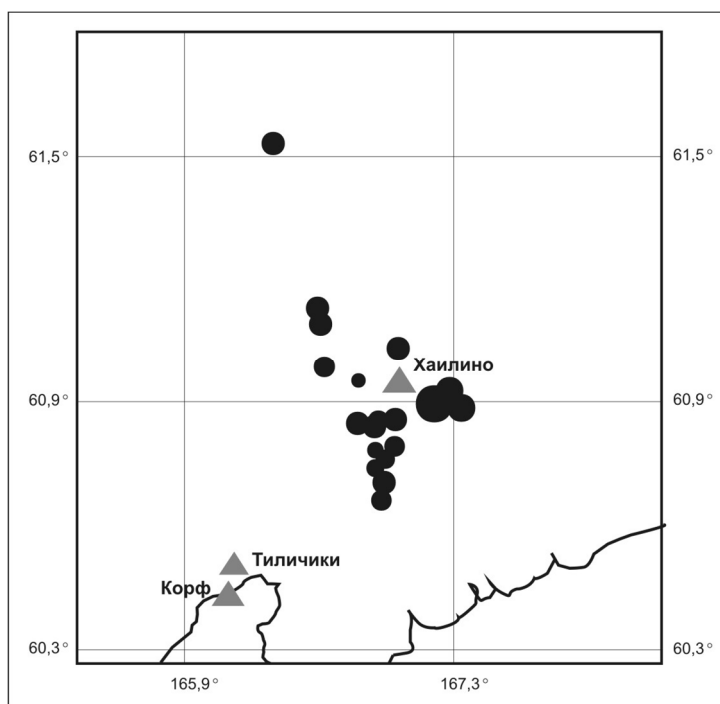


Рис. 3. Сейсмичность очага Хаилинского землетрясения 8 марта 1991 г. с $M = 7,0$:

самым большим кружком обозначено положение эпицентра главного толчка; кружком меньшего диаметра — эпицентр землетрясения 17.07.1992 г. с $M = 5,4$; самыми малыми кружками — эпицентры первого года афтершоков с $M \geq 4,5$ [Викулин, 1998]

Примерно через полтора года, 17 июля 1992 г., на краю очаговой области основного толчка произошло ощущавшееся населением до 6 баллов землетрясение с $M = 5,4$ (рис. 3), в результате которого на поверхности Земли в ходе полевых исследований была выявлена трещина общей протяженностью около 2 км при ширине до 50 см. Механизм этого землетрясения отличался от механизма главного толчка, что позволило считать его не афтершоком, а «самостоятельным» землетрясением [Ландер и др., 1994].

Анализ всех полученных сейсмологических данных, а также данных полевых обследований, проведенных А.В. Ландером (МИТП РАН), позволил сделать вывод о том, «...что Хаилинское землетрясение 1991 г. не явилось результатом вспарывания существовавшего прежде крупного разлома и снятия напряжений на нем. В интенсивном процессе сходные по типу с главным толчком афтершоки продолжались только в пределах первоначально порожденного им разрыва. Вне этой области соответствующий тип движения не наблюдался. Афтершоки, происшедшие в тылу главного толчка на его северо-восточном фланге, не являются продолжением движений по главному разрыву, а инициированы вторичным наведенным полем напряжений, внешним по отношению к главному очагу. Последний вывод показывает, что Хаилинское землетрясение 1991 г. *не привело к снятию тектонических напряжений в данном районе*» [Ландер и др., 1994]. Этот вывод имел важное прогностическое значение, поскольку вполне определенно указывал на *начало перестройки тектонических напряжений в регионе*.

Сейсмическое районирование. Отсутствие фоновой сейсмичности и ее относительно низкий уровень в очагах сильных землетрясений не позволили применить для целей сейсмического районирования принятую ранее в СССР методику [Сейсмическая..., 1979], в которой расчет сотрясаемости осуществляется на основе линейной экстраполяции в область максимальных энергий графика повторяемости землетрясений, построенного по данным о фоновой сейсмичности.

Новая для России методика расчета сотрясаемости была предложена А. А. Гусевым и в ходе работ доведена до практического применения [Гусев, Шумилина, 1995; Гусев, Петухин, 1996; Gusev et al., 1997]. Разработанная методика развивает принятую идеологию составления карт ОСР [Сейсмическая..., 1979] и преодолевает слабые стороны такого подхода. В первую очередь,

это использование как коротких рядов сейсмических наблюдений для описания долговременных характеристик сейсмического режима, так и гипотезы линейности графика повторяемости землетрясений при его экстраполяции в область максимально возможных магнитуд; использование в расчетах представлений об очаге как о точечном объекте; неучет разброса балла при заданных магнитуде и расстоянии и др. При построении карты проводилось разбиение территории на условно-однородные зоны и использовались полученные в ходе работ данные полевых геологических работ, результаты дешифрирования аэрофотоснимков, космических снимков и изображений. Это позволило объединить как выявленные в ходе геологических камеральных и полевых работ сейсмодислокации и сейсмообвалы [Егоров, 1996, 2008; Леонов, Егоров, 1998], так и полученные ранее данные гравиметрических исследований [Зубин, Таракановский, 1976], глубинного строения [Мороз, 1987] и электропроводности [Мороз, 1991].

Следует отметить, что наличие разнопрофильных данных не обязательно приводит к уточнению конфигурации блоков, слагающих земную кору. В частности, используемые в работе гравиметрические данные, а также данные глубинного строения и электропроводности из-за их крупномасштабности не привели к уточнению ранее установленных границ блоков, но позволили на карте сейсморайонирования проконтролировать общую протяженность зон одинаковой балльности.

Новая для территории КАО и всей Камчатки карта ОСР-97 представлена на рис. 4. Как можно видеть, практически вся территория КАО из 5–6-балльной переместилась в 6–9-балльную зону. В работах по составлению карты приняло участие большое количество сотрудников, работающих в ИФЗ РАН, МИТП РАН (Москва), КОМСП ГС РАН, ИВ ДВО РАН, ИВГиГ ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский). Руководство сейсмологическими работами осуществлялось А. В. Викулиным (КОМСП ГС РАН), А. А. Гусевым (ИВГиГ ДВО РАН) и Л. С. Шумиловой (ИФЗ РАН).

Отработанная на камчатском материале новая методика ОСР была использована при составлении карты ОСР-97, авторский коллектив которой в 2003 г. был удостоен Государственной премии РФ.

Цунамирайонирование. До середины 60-х гг. для берингоморского побережья Камчатки отсутствовали данные о цунами, что позволяло относить этот район к нецунамиопасному [Соловьев, 1978; Соловьев, Некрасов, Бухтеев, 1977]. Даже после землетрясения 22.11.1969 г. с $M = 7,7$ (см. рис. 1, а), сопровождавшегося на побережье залива Озерной цунами до 10–15 м [Заякин, 1996], отношение к проблеме цунамиопасности берингоморского побережья Камчатки в целом не изменилось. Считалось, что источники цунами по-прежнему могут располагаться только в юго-западной части Берингова моря, в районе Камчатского пролива и залива Озерной [Заякин, 1996]. В результате на побережьях Карагинского и Олюторского заливов ожидалось цунами высотой не более 2–3 м при времени прихода волны 1–2 часа после сейсмического толчка [Заякин, 1988].

Выявление на севере Камчатки двух поясов сейсмичности и приуроченность к ним эпицентров сильных землетрясений (см. рис. 2, б, 3.) позволило высказать предположение о том, что эти пояса могут быть цунамигенными, включая и акваторию северной части Охотского моря [Викулин, 1998].

Работы по поиску и датировке следов цунами на берингоморском побережье КАО были начаты летом 1992 г. Они проводились под руководством И. В. Мелекесцева (ИВГиГ ДВО РАН). Такие следы цунами были установлены вблизи пос. Хайлуля (1530 г.), на о. Карагинский (720, 820 и 940 гг.) и на мысе Крещенный Огнем (1220–1230 гг.), расположенном вблизи пос. Пахачи. При этом анализ результатов бурения 191-й скважины «Гломар Челенджер» в юго-восточной части подводного хребта Ширшова показал следующее. В течение последних нескольких десятков тысяч лет наблюдается следующая закономерность: после 3–5 тысяч лет покоя с интервалом в первые сотни лет на дне Берингова моря имеет место серия мутьевых потоков, которые могут быть ассоциированы с последствиями цунамигенных землетрясений. По-видимому, выявленные на берингоморском побережье КАО следы цунами скорее всего связаны с местными сильными ($M > 7$) землетрясениями [Мелекесцев, Курбатов, 1997].

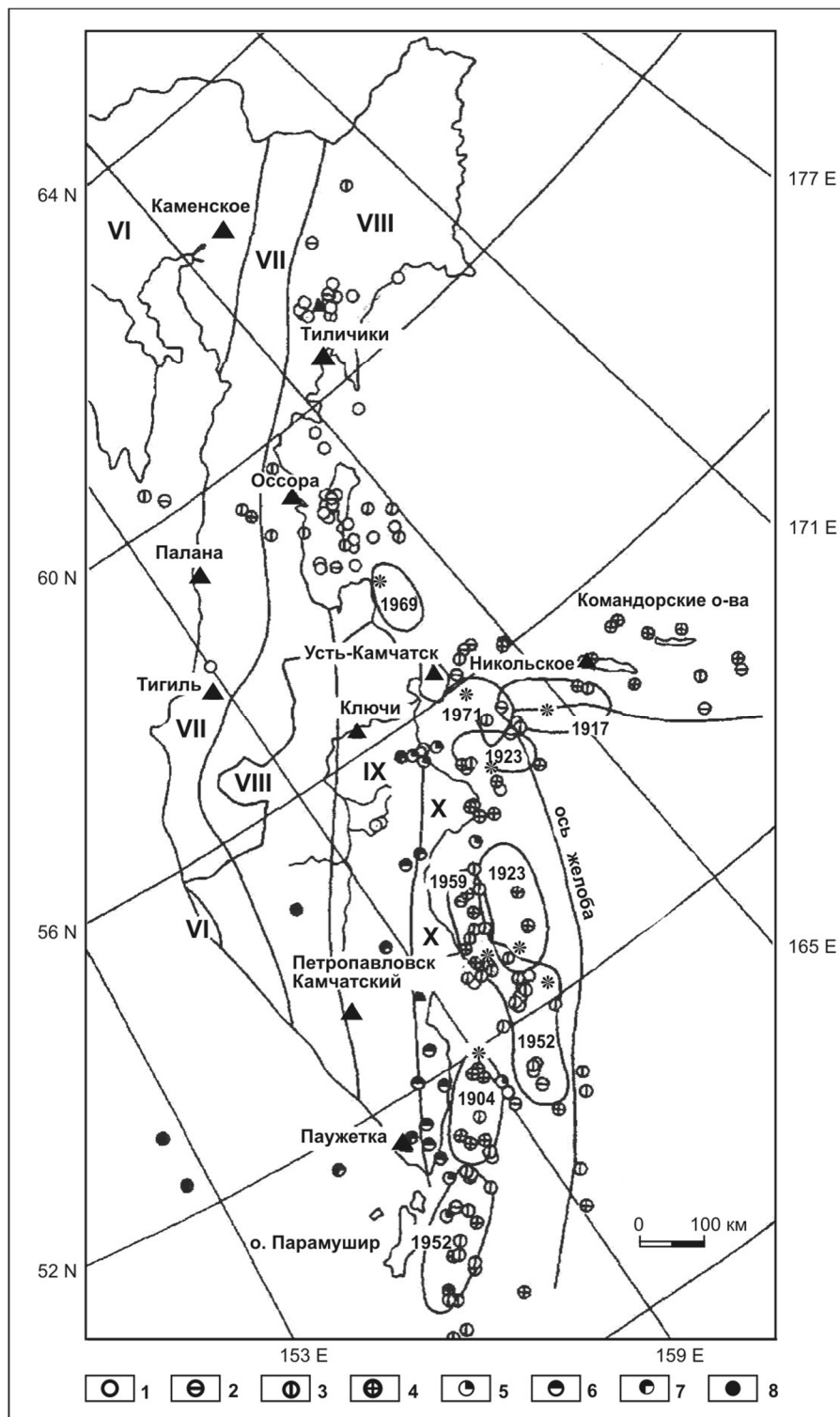


Рис. 4. Последняя карта общего сейсмического районирования (ОСР-97) территории Корякского автономного округа (КАО) и всей Камчатки [Викулин, 1998; Строительство..., 2000; Уломов, Шумилина, 1998]

Глубины гипоцентров (в км): 0–10 (1), 11–20 (2), 21–40 (3), 41–70 (4), 71–100 (5), 101–150 (6), 151–300 (7), > 300 (8). Проведены изолинии баллов VI–X (по шкале MSK-64), значения которых с 90%-ной вероятностью не будут превышены в течение 50 лет. Сейсмичность представлена эпицентрами землетрясений (кружки) энергетических классов $K = 13$ и более ($M > 5,5$) с $\varphi < 54^\circ N$, $K \geq 10$ и более ($M \geq 3$) с $\varphi > 54^\circ N$, зарегистрированными в 1962–1993 гг. Отмечены (звездочками) очаги и эпицентры сильнейших ($M = 7,6$ и более) землетрясений, происшедших у тихоокеанских берегов Камчатки в XX в. (цифры обозначают год землетрясения, треугольники — сейсмические станции)

Совместно со специалистами из университетов г. Тохоку (Япония) и г. Берген (Норвегия) в течение двух полевых сезонов 1993 и 1994 гг. на камчатском материале проводились работы по отработке методики [Dawson et al., 1991; Minoura, Nakaya, 1990] выявления в прибрежных осадках следов палеоцунами и определения их параметров. Первые результаты, полученные в 1994–1995 гг. [Gusiakov, Marchuk, Osipova, 1997; Minoura et al., 1996], показали следующее. С помощью разработанной методики, дополненной тефрохронологическим методом датировки следов палеоцунами [Брайцева и др., 1994], оказалось возможным составлять достаточно представительные списки цунами, а впоследствии, возможно, и сильных землетрясений в течение последних нескольких тысяч лет [Gusiakov, Marchuk, Osipova, 1997].

Для определения высоты возможных цунами в результате местных сильных землетрясений В. К. Гусяковым с сотрудниками (ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск) проведены модельные расчеты [Gusiakov, Marchuk, 1997], в основу которых были положены сейсмологические данные о параметрах очагов сильных землетрясений региона, установленных на примере Хаилинского (1991 г.) землетрясения. Математическое моделирование показало, что после достаточно сильного местного землетрясения с очагом, расположенным в акваториях Карагинского и Олюторского заливов, на их побережья может обрушиться цунами высотой до 4–6 м (рис. 5). Прилив, штормовой нагон или обвал на морском дне в зоне очага землетрясения могут привести к существенному увеличению этого значения. При этом время прихода волны может составить 15–20 мин после сейсмического толчка (рис. 5, б).

Полученные данные [Мелекесцев, Курбатов, 1997; Gusiakov, Marchuk, 1997] и более поздние исследования Т. К. Пинегиной (ИВГиГ ДВО РАН) с коллегами [Bourgeois et al., 2006], на наш взгляд, убедительно показывают, что цунами представляет весьма серьезную угрозу для берингоморского побережья КАО. Действительно, населенные пункты КАО, как правило, расположены на песчаных косах или в устьях рек на отметках, не превышающих 2–3 м над уровнем моря. При этом малый интервал времени между сейсмическим толчком и приходом цунами на побережье накладывает очень жесткие ограничения на проведение мероприятий по эвакуации жителей населенных пунктов, построенных на длинных песчаных косах, таких как Корф, Пахачи и Ильпырский.

Работы по поиску следов цунами, которые могли быть следствиями землетрясений с очагами в пределах северо-западной, протягивающейся в сторону Магаданской области сейсмической зоны, и их моделирование для Охотоморского побережья не проводились.

Известно, что на Черном море, являющемся внутренним и расположенном в пределах сравнительно слабого активного пояса сейсмичности, генерируются цунами [Ranguelov, 1997]. Поэтому было сделано предположение, что и пояс сейсмичности, протягивающийся от Камчатки в сторону Магаданской области, в своей части, проходящей по акватории Охотского моря, также может являться цунамигенным [Викулин, 1998]. Б. П. Важенин (СВКНИИ ДВО РАН, Магадан) в 2005 г. сообщил А. В. Викулину, что он обнаружил следы цунами после Хаилинского землетрясения 1991 г. на охотоморском побережье Магаданской области. В случае подтверждения этих данных можно будет сделать вывод о цунамиопасности не только южной [Соловьев, 1978; Соловьев, Некрасов, Бухтеев, 1977], но и северной частей Охотского моря.

Устойчивость береговой линии. Со стороны моря имеется еще одна угроза находящимся на побережье, особенно на песчаных косах, населенным пунктам КАО — значительная неустойчивость береговой линии. Например, поселок Корф, в котором расположены крупнейшие в КАО аэродром (прекративший свое существование после Олюторского землетрясения 21 апреля 2006 г.) и портпункт, за время своего существования (с 30-х гг. нашего столетия) в результате размыва береговой линии «потерял» уже не одну улицу. Поэтому проблема устойчивости береговой линии по отношению к процессам, происходящим в прибрежных акваториях, имеет для КАО важное значение.

Работы по исследованию устойчивости береговой линии КАО проводились под руководством А. В. Поротова (МГУ, географический факультет). Методика исследований описана в работах [Развитие..., 1997; Поротов, Селиванов, 1997; Porotov, Vikulin, 1996].

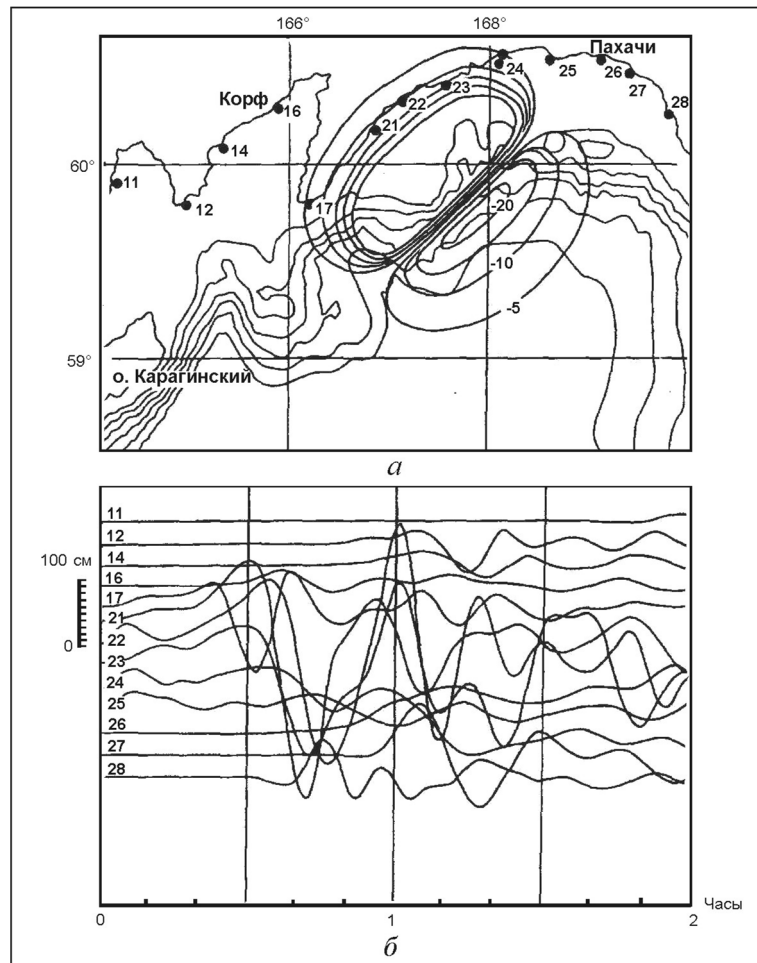


Рис. 5. Остаточные смещения в очаге гипотетического землетрясения в Олюторском заливе (а) и рассчитанные мареграммы для различных пунктов (точки 11–28) побережья (б) [Gusiakov, Marchuk, 1997]

Полевые исследования и имеющийся фактический материал (опубликованный преимущественно в ведомственных отчетах) показали, что в целом для побережий КАО характерна приуроченность зон геоморфологического риска к наиболее освоенным и заселенным участкам побережий. Для трех песчаных кос — Корфской, Пахачинской и Милютынын — с населенными пунктами Корф, Пахачи и Ильпырский оказалось возможным количественно оценить изменчивость береговой линии. Значение скорости, с которой отступает берег, достигает там 1 м/год. Суммарные потери сыпучего материала на участках берега протяженностью 1–2 км составляют $(30–50) \cdot 10^3 \text{ м}^3$ в год. В районе возведения волнозащитной стенки (Пахачинская коса) вблизи рыбоконсервного завода скорость отступления берега в 1,5 раза больше, чем на незащищенной части берега. Более сложно изменяется береговая линия Корфской косы, что, по-видимому, связано с более интенсивным освоением ее территории.

С целью определения механизма, способного объяснить изменчивость береговой линии, на примере косы Милютынын (пос. Ильпырский) проводилось численное моделирование волновых процессов, протекающих в прибрежной акватории. Модель позволяла производить расчет рефракции, трансформации и диссипации волн, определять функцию тока и скорости течений, вычислять расход сыпучего материала и давать оценку величине деформации дна [Леонтьев, 1994]. Анализ показал, что исследуемая прибрежная акватория характеризуется наличием крупномасштабных вихрей, которые выявляются практически при любых волновых режимах. Эти вихри и обуславливают перенос воды (и, следовательно, материала) в сторону берега на более глубоких участках подводного склона и отток от берега в более мелководных областях. Максимальные скорости движения воды (приток, отток и вдоль берега) достигают значений

~ 1 м/с. Такой волновой механизм обеспечивает вдольбереговой расход материала, максимальное значение которого составляет около 300 г/с · м. При этом суммарные продольные расходы, интегрированные по всей ширине прибрежных участков, измеряются сотнями м³/ч. Пиковые значения поперечных расходов концентрируются в относительно узкой прибрежной полосе шириной несколько сот метров, где они в 1,5–2 раза могут превышать вдольбереговые расходы.

Модельные расчеты скорости отступления береговой линии и расхода сыпучего материала оказались близкими реально наблюдаемым для Корфской, Пахачинской и Милютынинской кос. Это позволяет наработанные модельные представления о механизме течений в прибрежных акваториях закладывать в основу разработок практических мероприятий по защите береговой линии этих песчаных кос от размыва.

Термальные источники на территории КАО. Термальные воды являются субповерхностными индикаторами, отражающими особенности неотектонического, в том числе сейсмотектонического, развития отдельных регионов. Проявление землетрясений и формирование трещинных систем циркуляции термальных вод связано с единым геологическим процессом развития трещиннообразования в земной коре. Изучение масштабов распространения термальных вод и характера их разгрузки в виде термальных источников позволяет использовать полученные данные в качестве дополнительного показателя неотектонической активизации региона при проведении сейсмического районирования. Исследование гидротермального режима территории КАО приобретает особое значение в связи с ее слабой сейсмотектонической и гидрогеологической изученностью.

Изучение термальных вод на территории КАО проводилось на протяжении последних нескольких десятков лет. Полученные данные в основном изложены в большом количестве отчетов и еще требуют своего научного анализа и обобщения. В 1994 г. под руководством В. М. Сугробова и Г. Н. Копыловой (ИВ ДВО РАН) были проведены широкомасштабные полевые работы и сделана первая попытка анализа всего имеющегося материала по термальным источникам на территории КАО. Главные результаты проведенной работы в контексте проблемы риска можно сформулировать следующим образом:

1. Области распространения термальных вод на территории КАО пространственно соответствуют двум выявленным сейсмически активным поясам. Основные выходы термальных вод на севере исследуемого региона приурочены к ограниченной глубинными разломами зоне северо-западного простирания, фиксирующей на поверхности область повышенной тектонической трещиноватости, пространственно соответствующей относительно слабо выраженному в структуре и сейсмичности фрагменту границы между Охотской и Северо-Американской плитами.

2. Использование некоторых параметров термальных вод (максимальная температура воды источников, суммарная тепловая мощность группы источников и др.) позволяет оценить степень развития по площади и относительную глубину открытой тектонической трещиноватости.

Кроме того, показано, что по тепловому потенциалу и величине геотермальных ресурсов ряд месторождений термальных вод на территории КАО может использоваться для теплоснабжения населенных пунктов и в бальнеологических целях.

Основные результаты работ 1992–1995 гг. Начало полевого геологического и инструментального сейсмологического исследований эпицентральной области было начато оперативно, уже на следующий день после главного толчка. Проведенные сейсмологические исследования показали, что Хаилинское землетрясение не «сняло» напряжения в очаге, а скорее явилось свидетельством начала их «перестройки» в регионе. Такой вывод требовал обязательного продолжения сейсмического мониторинга территории КАО с целью прогноза будущего сильного землетрясения.

Построенная новая карта общего сейсмического районирования территорий России ОСР-1997, куда составными частями вошли карты ОСР-97 для Камчатской области и КАО, законодательно утверждена [Гусев, 2002, 2003; Гусев, Шумилина, 1995; Уломов, Шумилина, 1998] и тем самым стала нормативным строительным документом [Строительство..., 2000].

В ходе комплексных исследований 1991–1996 гг. было показано, что территория КАО является зоной высокого комплексного риска. Для нее характерны сильные (до 7–8 баллов и более) землетрясения, большие (до 4–6 м) цунами, которые могут обрушиться на берингоморское

побережье через 15–20 мин после сейсмического толчка, и значительный (до 1–1,5 м в год) размыв береговой линии песчаных кос. Предпринятое изучение термальных вод КАО и проведенный анализ всех имеющихся данных, накопленных в течение более чем десятилетнего периода наблюдений, позволил сформулировать, кроме чисто научных выводов, и практические заключения о высоком тепловом и бальнеологическом потенциале термальных вод региона.

Следует отметить, что такого рода комплексные работы в масштабе значительного по площади региона в рамках единой программы в течение продолжительного времени проводились впервые.

В 1997 г. постановлением губернатора В. Т. Броневиц в КАО была создана геофизическая обсерватория, основной задачей которой являлся сейсмический мониторинг региона с целью анализа и прогноза как сейсмической обстановки, так и угрозы цунами. Но инициатива губернатора не была поддержана КОМСП ГС РАН. Отсутствие средств у Администрации КАО и Камчатской ОМСП ГС РАН не позволили в дальнейшем сохранить созданную в ходе работ 1991–1996 гг. сеть сейсмических станций и мощную инфраструктуру и тем самым исключили возможность получения для территории КАО текущих прогнозных оценок сейсмической обстановки, создания службы оповещения об угрозе цунами, продолжения начатых научных исследований и доведения их до методических и практических разработок.

Олюторское землетрясений 21 апреля 2006 г.

(предварительные данные)

Макросейсмические данные. 21 апреля 2006 г. на территории Олюторского района произошло сильное землетрясение с $M = 7,8$ (по каталогу NEIC $M = 7,6$; по бюллетеню сейсмостанции «Петропавловск-Камчатский» $M = 7,9$) и с эпицентром вблизи пос. Хаилино (рис. 6). Форшоки его не были отмечены населением и не зарегистрированы инструментально. Землетрясение сопровождалось в поселках Хаилино и Тилички колебаниями с интенсивностью 8–9 баллов, в Корфе — до 10 баллов. В эпицентральной зоне при отмеченном значении инструментальной магнитуды землетрясения и глубине залегания его гипоцентра 20–30 км интенсивность колебаний должна была достигать 10 и, возможно, более баллов. В результате в поселках Тилички и Корф серьезно пострадали многие здания и сооружения, часть которых, включая все четыре четырехэтажных и один пятиэтажный дома в Тиличках, получившие повреждения 3–4 степени по шкале MSK-64, не подлежат восстановлению. Жилые здания пос. Хаилино, расположенного вблизи эпицентра, представляют собой в основном одноэтажные деревянные здания, которые, по предварительным данным, пострадали мало.

По имеющимся сегодня сведениям (середина мая 2006 г.), общее число зданий, состояние которых признано аварийным, составляет примерно 14%. Мелкоблочные 2–3-этажные здания, из которых построен соцкультбыт (школы, детские сады, больницы), получили большие повреждения 2,5–3,5 степени вследствие отсутствия антисейсмических мероприятий и неблагоприятных грунтовых условий. Кроме того, в Корфе выведена из строя взлетно-посадочная полоса аэропорта, который является главной «перевалочной базой» всего автономного округа, что в значительной степени затрудняет проведение спасательных и восстановительных работ.

Сотрудники ИВиС ДВО РАН Т. Г. Константинова и Т. К. Пинегина, сотрудник института «Камчатгражданпроект» В. Н. Дроздук для обследования пострадавших в результате землетрясения зданий и сооружений в поселках КАО и изучения эпицентральной зоны главного толчка вылетели из Петропавловска-Камчатского в Оссору на третий день после землетрясения. Группа сейсмологов с сейсмическими станциями смогла вылететь в эпицентральной зону лишь через две недели после главного толчка.

Афтершоки. Использовался каталог Геологической службы США NEIC. Наибольшее значение магнитуды $M = 6,1–6,2$ имели три афтершока. Два из них произошли в течение первого дня (через 4,5 и 11,5), а самый сильный в середине мая) афтершок случился на 9-й день после главного толчка (30 апреля) и имел пока наибольшую среди всех афтершоков магнитуду $M = 6,2$ (рис. 6). Этот афтершок в населенных пунктах сопровождался колебаниями до 7 баллов.

В результате были снова повреждены некоторые из уже частично восстановленных зданий в Корфе. Афтершоки, как видно из данных, представленных на рис. 6, распределены в пределах овальной области северо-восточного простирания, имеющей, как и «полагается» землетрясение с $M \approx 8$, протяженность около 200 км.

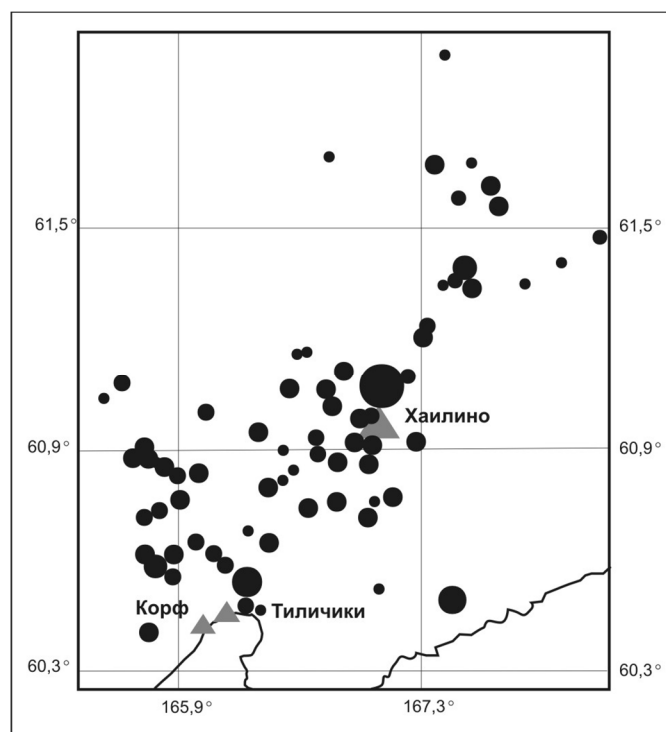


Рис. 6. Сейсмичность очага Олюторского землетрясения 21 апреля 2006 г. с $M = 7,8$ (по данным об афтершоках двух недель после главного толчка):

самым большим кружком обозначен эпицентр главного толчка, кружками меньшего диаметра — эпицентры афтершоков с $M \approx 6$, маленькими кружками — эпицентры афтершоков с $4,5 \leq M < 6$ в течение первых двух недель; данные о координатах использовались из Каталога землетрясений геологической службы США NEIC

Распределение афтершоков с $M \geq 4,5$ во времени в течение первого, второго, ..., седьмого дней следующее: 33, 5, 3, 0, 0, 1 и 1. Таким образом, в первую неделю было отмечено 43 таких афтершоков, во вторую неделю — 8.

В целом афтершоки в течение первых двух недель после Хаилинского (1991 г.) и Олюторского (2006 г.) землетрясений распределены примерно в равных долях при их суммарно большем количестве для второго события. Отличие заключается в том, что после Олюторского землетрясения отсутствовала явная концентрация наиболее сильных афтершоков сразу после главного толчка. На основании этих данных можно предположить, что афтершоковый процесс после Олюторского землетрясения 21 апреля 2006 г. в его достаточно интенсивной фазе будет продолжаться в течение гораздо более длительного периода, чем после Хаилинского землетрясения 1991 г., когда он длился около полутора месяцев. Впрочем, такой вывод очевиден и определяется значением магнитуды второго толчка.

Следует заметить, что наиболее сильный афтершок с $M = 7$, разрушивший пос. Жупаново, произошел после основного толчка 04.05.1959 г. с $M = 7,6$, с очагом в Кроноцком заливе, через полтора месяца. Аналогичная ситуация возможна и в КАО.

Сравнение простираний афтершоковых областей Хаилинского и Олюторского землетрясений показывает следующее. Сформулированный в результате первого землетрясения (1991) вывод о том, что Хаилинское землетрясение не привело к снятию накопленных напряжений и началу перестройки тектонических напряжений в регионе, оправдался и, по сути, реализовался вторым землетрясением в 2006 г.

Выводы и уроки

1. В результате выполнения работ в 1991–1996 гг. убедительно показано, что территория КАО является зоной высокого комплексного риска, и землетрясение 21 апреля 2006 г. лишней раз подтвердило это. Для этой зоны характерны сильные, до 9–10 баллов, землетрясения; мощные, до 4–6 м высотой, цунами, которые могут обрушиться на берингоморское побережье через 15–20 мин после сейсмического толчка; значительный, до 1 м в год, размыв береговой линии песчаных кос.

Распределение величины опасности по территории КАО неравномерно. Из приведенных в настоящей работе данных следует: наибольшему риску в результате воздействия природных катастроф подвержены населенные пункты, расположенные в пределах 8-балльной зоны вдоль берингоморского побережья и особенно в его прибрежной части, подверженной воздействию цунами и размыву береговой линии — это территории Олюторского и Карагинского районов КАО, прилегающие к одноименным заливам (см. рис. 4).

Цунамигенные землетрясения вблизи берингоморского побережья происходят сериями. Повторяемость событий в серии составляет первые сотни лет, временной интервал между сериями — первые тысячи лет. По-видимому, такая же закономерность характеризует повторяемость и наиболее сильных землетрясений в пределах всей территории Северной Камчатки.

Как видно из полученных результатов, высокая природная опасность территории КАО определяется весьма интенсивными глубинными процессами в сейсмической зоне северо-восточного простирания, служащей, по-видимому, границей тектонических плит [Ландер и др., 1994], и вихревыми течениями в ее прибрежных морских акваториях [Поротов, Селиванов, 1997; Porotov, Vikulin, 1996]. Дальнейшие исследования позволят как уточнить тектоническое строение региона и волновую структуру морских течений в прибрежных акваториях в условиях повышения уровня Мирового океана, так и обосновать возможности практического использования гидротермальных ресурсов (теплоснабжение, электроэнергия).

Полученные результаты позволяют рассматривать проблему риска прибрежных территорий, расположенных в сейсмически активных регионах, с принципиально иной позиции, которая позволила бы в рамках единой концепции учесть все составляющие комплексной природной опасности [Викулин и др., 1997; Porotov, Vikulin, 1996; Викулин, 1998]. Действительно, суммарная оценка величины природного риска прибрежной территории, например берингоморского побережья КАО, должна в совокупности определяться сейсмической (до 9–10 баллов), цунамигенной (с высотой волны до 4–6 м) и штормовой компонентами. При этом наличие волнения поверхности моря в момент сильного землетрясения может привести к значительному увеличению высоты цунами. Известно, что сильные землетрясения часто сопровождаются извержениями вулканов. Поэтому для таких регионов, как, например, восточное побережье Камчатки, которое расположено в 9–10-балльной зоне (см. рис. 4), к этим компонентам следует добавить опасность подвергнуться воздействию извержения.

Таким образом, суммарный риск, очевидно, будет превышать величину каждого из его составляющих в отдельности. Однако величина риска не будет являться простой суммой всех его компонент, поскольку не каждое землетрясение сопровождается цунами и вулканическими извержениями, не каждое цунами происходит при штормовых условиях и т. д.

Для определения величины такой комплексной оценки риска прибрежной территории, расположенной в пределах сейсмоопасной зоны (и зоны действия вулканов), необходимо проведение дальнейших исследований, целью которых должно быть установление корреляционных зависимостей между всеми составляющими природной опасности.

2. Необходимо помнить, что из 24 населенных пунктов КАО, внесенных в «Список населенных пунктов РФ, расположенных в сейсмоопасных районах» [Строительство..., 2000], 16 расположены в 8-балльной зоне. К таким относятся и крупные населенные пункты. Кроме уже печально известных Тиличик и Корфа можно назвать Оссору — районный центр (см. рис. 4), застройка которого включает большое количество многоэтажных железобетонных зданий. С точки зрения цунамиопасности Оссора также является уязвимым населенным пунктом, так

как ее прибрежное расположение затрудняет эвакуацию жителей из опасной зоны. Все здания и сооружения 8-балльных поселков необходимо обследовать и при необходимости приступить к их сейсмоусилению. Для всех цунамиопасных населенных пунктов необходимо разработать схемы эвакуации населения.

3. После окончания работ 1991–1996 гг. у Администрации КАО и Камчатской ОМСП (ныне Камчатский филиал Геофизической службы РАН) не хватило средств и сил для продолжения сейсмических (и геофизических) наблюдений. Времена, конечно, были сложные, это понятно. А когда они были простыми? Сеть станций на территории КАО прекратила свое существование — осталась только станция в Каменском, построенная по совместному российско-японскому проекту. Теперь ясно, что мы упустили уникальнейшую возможность путем проведения непрерывного сейсмического мониторинга связать сильное Хаилинское землетрясение 1991 г. с катастрофой 21 апреля 2006 г., а возможно, и спрогнозировать ее.

21 апреля практически в том же месте (см. рис. 3, б) произошло теперь уже второе сильное землетрясение — Олюторское, которое в эпицентре ощущалось с интенсивностью до 9 и, возможно, больше баллов. Наиболее зрелищные для публики (потерявшие кров и ночующие у костров жители, разрушенные здания, трещины на взлетной полосе и т. д.), а по сути, трагические последствия этого землетрясения достаточно подробно представлены в средствах массовой информации. Однако многие очень важные для сейсмологии и геологической науки детали этого события были безвозвратно утеряны, так как по существующей «дурной» традиции своевременно (до нового снега) не была проведена аэрофотосъемка района землетрясения. Такую аэрофотосъемку совершенно необходимо было выполнить и для объективной оценки нанесенного землетрясением материального ущерба, ведь наверняка у МЧС РФ есть средства и оборудованный соответствующей аппаратурой самолет АН-30, который мог бы за короткое время провести аэрофотосъемку всего пострадавшего района.

Но главное, «испуг» 1991 г., который, как теперь уже ясно, был фактически «доброжелательной» подсказкой Природы о возможности в регионе более сильного землетрясения, через 15 лет, в 2006 г., в результате общего бездействия обернулся катастрофой. Природу и логику бездействия такого рода, думается, правильно подметил публицист М. Веллер [2004, с. 171]: «Россия, милая Россия, аршином индивидуальным давай тебя мерить. Каким образом две тысячи чеченских бандитов могут подчинить себе десятиллионную столицу? А таким, что они храбры, наглы и люди чести. Или подкупят, или убьют, но не покорятся. А может, дешевле будет перестрелять без суда их всех? Вы что, вообще? Фашисты. Мы лучше убьем сто тысяч детей и женщин в Чечне. Но так, нечаянно. Никто не виноват».

Слава богу, что землетрясение 21 апреля обошлось без человеческих жертв, но материальный ущерб, который еще предстоит оценить и который невозможно выразить только в рублях или долларах, для этого региона гигантский. Последствия катастрофы будут ощущаться в течение продолжительного времени, и не факт, что они когда-нибудь будут ликвидированы. Достаточно вспомнить брошенные в этом районе многочисленные рыбоконсервные заводы — это «местный» пример. Возьмем «общероссийский» — события, связанные с Нефтегорским землетрясением 1995 г. Вспомните, как долго и трудно принимались и реализовывались по ним решения, как мы позволяли себе вытеснять из жизни эти болезненные для нашего общества события другими явлениями. Конечно, события середины 90-х гг. прошлого века тоже не были простыми для нашей страны. Но повторимся еще раз: а когда они были простыми?

Перечисленные следствия сильных землетрясений 1991 и 2006 гг. — одни из главных. Теперь ясно, что «большой удачей» можно считать расположение очага землетрясения 21 апреля на суше, а не в море. Иначе последствия могли быть более трагичными и по местным меркам сравниться с трагедией 2004 г., происшедшей на побережье Индонезии. Необходимо помнить, что если в Тиличихах после землетрясения жители достаточно быстро могут подняться на сопки, что они и делали при обоих землетрясениях, то жителям Корфа (Пахачей и Ильпырского) с песчаной косы, на которой они проживают, бежать некуда, и в случае цунами они были бы обречены на гибель. Землетрясение 21 апреля — второе и уже не такое «доброжелательное» предупреждение Природы. Об этом необходимо постоянно помнить!

Сейсмические наблюдения на территории Северной Камчатки должны быть восстановлены как можно быстрее, и также быстро должна быть создана служба предупреждения об угрозе цунами. При этом совместно с Госкомиссией, в настоящий момент осуществляющей оценку ущерба землетрясения 21 апреля и последующих афтершоков, необходимо принять такие меры, чтобы эти наблюдения не прекратились. Очевидно, после землетрясения 21 апреля снова необходимо будет провести комплекс работ с целью нового уточнения сейсмичности территории Северной Камчатки и цунамиопасности ее берингоморского побережья.

4. Еще одно следствие сильных землетрясений 1991 и 2006 гг. имеет прямое отношение к территории всей Камчатки, особенно к ее восточному побережью и в частности к Петропавловску-Камчатскому.

Вспомним, что построение новой методики и, как следствие, составление на ее основе новой карты общего сейсмического районирования привело не только к повышению «разрешенного» картой уровня сейсмичности для территории Корякии с 5 до 9 баллов (см. рис. 1, 4). Такое большое изменение уровня «разрешенной» картой ОСР-97 сейсмичности территории Корякии стало возможным в результате того, что произошло изменение положения всех изолиний, разделяющих территорию Камчатки на зоны с разной балльностью. При этом изолинии, разделяющие 10-, 9-, 8-, 7- и 6-балльные зоны Камчатской области, «переместились» в сторону западного побережья. Это привело к увеличению «поперечного» (поперек Камчатки) размера каждой из зон за счет исчезновения достаточно «широкой» 6-балльной зоны, ранее протягивающейся вдоль западного побережья Камчатской области, и, как следствие, перевода г. Петропавловск-Камчатский из 9-балльной зоны фактически в 10-балльную (см. рис. 1, 4). Ярким примером 10-балльного толчка, возможного в Петропавловске-Камчатском, может служить не такое уж и далекое по времени землетрясение 17.10.1737 г. [Викулин, Мелекесцев, 1989].

Конечно, новая методика сейсмического районирования, как и другие методики, обладает рядом недостатков. Например, она, по-видимому, учитывает в полной мере влияние всех сильных землетрясений, происходящих в Тихом океане, но недостаточно — воздействие на сейсмичность территории Камчатской области и КАО слабых землетрясений, происходящих повсеместно на суше и вблизи вулканов. Эти и другие вопросы будут обсуждаться учеными и со временем, несомненно, найдут свое разрешение в виде новых научных разработок, методик и будут реализованы на практике. Однако несомненно и то, что имеющиеся данные убедительно показывают: вопросы сейсмической опасности для территории Камчатки и г. Петропавловска-Камчатского были и остаются важнейшими. Их игнорирование или пренебрежительное к ним отношение рано или поздно приведут к трагедии.

Нельзя утверждать, что вопросы сейсмической опасности в нашем регионе замалчиваются. Нет, эта тематика постоянно обсуждается. Наверное, немногие земляки знают, что 8 июня 2005 г. Советом народных депутатов Камчатской области принят Закон «О сейсмической безопасности в Камчатской области», определяющий правовые и экономические основы обеспечения сейсмической безопасности населения, производственной и социальной инфраструктур Камчатской области.

Однако следует признать, что наши действия, направленные на практическое решение вопросов уменьшения сейсмического риска на территории Камчатки, во многом отстают от уровня современных требований. Например, на протяжении многих лет не решаются первоочередные задачи, которые поставлены перед городом и регионом 7-балльным землетрясением 25 ноября 1971 г.:

– создание новых территориальных строительных норм (ТСН), которые будут включать в себя региональные сейсмические воздействия на здания и сооружения с учетом специфики проявлений сильных землетрясений на Камчатке; уточненные расчеты интенсивности сотрясений для средних грунтовых условий с дифференциацией по районам Петропавловска-Камчатского и его окрестностям; указания и рекомендации по сейсмоусилению существующих зданий, внедрению новых конструкций сейсмоизоляции с учетом применения местных строительных материалов;

– корректировка проведенного в 1973 г. сейсмического микрорайонирования (СМР) территории города с учетом результатов всех последних геофизических, сейсмологических и инженерно-геологических работ, уточнением (выбором) средних грунтов и учетом влияния рельефа на интенсивность сотрясений;

– проведение на современном уровне инженерно-сейсмологических наблюдений с созданием сети станций для регистрации сильных землетрясений в пунктах с характерными для Петропавловска-Камчатского грунтовыми условиями и модернизацией инженерно-сейсмометрических наблюдений на зданиях и сооружениях Петропавловска-Камчатского.

Эти вопросы многократно обсуждались на различных уровнях — от «узких» профессиональных на научно-технических советах институтов до «широких» в соответствующих отделах, департаментах и управлениях Администраций Петропавловска-Камчатского и Камчатской области. Но только воз и ныне там. Вывод очевиден: на Камчатке по-прежнему отсутствуют механизмы, которые могли бы запустить решение этих задач «изнутри». Остается только сожалеть, что на строительство большого количества супермаркетов средства находятся, а на проведение мероприятий по защите наших жизней — нет. Мы не можем или не хотим употребить власть!

Справедливости ради следует заметить, что кратковременная вспышка интереса к решению этих «сейсмических» вопросов имела место со стороны Администрации Петропавловска-Камчатского в начальный период ее становления. С этой целью между городской администрацией и Технопарком КамГУ был заключен в 2005 г. договор, цель которого — консолидация усилий всех заинтересованных институтов и специалистов Камчатки для решения обозначенных «сейсмических» вопросов. Но после предоплаты и подписания промежуточного отчета, в котором определена проблема и сформулированы основные стоящие перед регионом задачи, активность городской администрации заметно убавилась. Складывается впечатление, что как важные «сейсмические» проблемы, так и Технопарк, ответственный в настоящее время за их решение, администрацией города или некоторыми ее чиновниками были использованы и продолжают использоваться отнюдь не для решения важных задач, а в совершенно других целях. Думается, что спекулировать такими важными вопросами на Камчатке, иными словами, играть жизнями проживающих на ее территории людей недопустимо.

Следующее сильное землетрясение в городе, которое неминуемо, в очередной раз напомнит об этом. И мы в очередной раз будем совершать героические усилия и тратить гигантские средства на восстановление и ликвидацию...

Литература

1. *Возраст действующих вулканов Курило-Камчатского региона* / О. А. Брайцева, И. В. Мелекесцев, В. В. Пономарева [и др.] // *Вулканология и сейсмология*. — 1994. — № 4-5. — С. 5-35.
2. *Веллер М.* Представления. — СПб., 2004. — 585 с.
3. *Викулин А. В.* Природный риск Северной Камчатки // *Тихоокеанская геология*. — 1998. — Т. 17. — № 2. — С. 85-92.
4. *Викулин А. В.* Миграция очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений и их повторяемость // *Вулканология и сейсмология*. — 1992. — № 1. — С. 46-61.
5. *К землетрясению без риска* / А. В. Викулин, В. Н. Дроздук, Н. В. Семенец, В. А. Широков. — Петропавловск-Камчатский: СЭТО-СТ, 1997. — 120 с.
6. *Викулин А. В., Мелекесцев И. В.* О вероятности и повторяемости 10-балльных землетрясений в Петропавловске-Камчатском // *Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке*. — Владивосток: ДальНИИС Госстроя СССР, 1989. — С. 66-67.
7. *Гусев А. А.* О сейсмологической основе норм сейсмостойкого строительства в России // *Физика Земли*. — 2002. — № 12. — С. 56-70.
8. *Гусев А. А.* Некоторые вопросы сейсмологического обоснования норм сейсмостойкого проектирования // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. — 2003. — № 1. — С. 32-36.

9. Гусев А. А., Петухин А. Г. Методика построения региональной прогнозной зависимости между параметрами сейсмических колебаний грунта, магнитудой и расстоянием при небольшом числе инструментальных записей на примере прогноза максимального ускорения для Камчатки // *Bulgarian Geophysical Journal*. — 1996. — Vol. XXII. — № 4. — С. 40–49.
10. Гусев А. А., Шумилина Л. С. Некоторые вопросы методики сейсмического районирования // *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. — Вып. 2–3. — М.: ОИФЗ РАН, 1995. — С. 289–299.
11. Егоров О. Н. Оценка сейсмичности горных регионов при отсутствии наблюдаемых инструментальных данных // *Сейсмическая безопасность урбанизированных территорий: материалы 1-й Междунар. конф., Петропавловск-Камчатский, 12–16 февраля 1996 г.* — Петропавловск-Камчатский, 1996. — С. 19.
12. Егоров О. Н. Геодинамика и палеосейсмичность фланговых областей северо-западного сектора зоны перехода Тихий океан — континент. — М.: Наука, 2008. — 186 с.
13. Заякин Ю. А. Цунами на Дальнем Востоке. — Петропавловск-Камчатский: Камшат, 1996. — 86 с.
14. Заякин Ю. А. Возникновение и распространение цунами в западной части Берингова моря // *Метеорология и гидрология*. — 1988. — № 2. — С. 66–73.
15. Корякское землетрясение 8 марта 1991 г. / В. М. Зобин, В. Ф. Бахтиаров, В. Н. Борисенко [и др.] // *Землетрясения в СССР в 1991 г.* — М.: Наука, 1997. — С. 76–88.
16. Зубин М. И., Таракановский А. А. Тектоника и особенности поля силы тяжести района Ключевской группы вулканов // *Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов*. — Владивосток, 1976. — С. 17–28.
17. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 г.: существует ли плита Берингия? / А. В. Ландер, Б. Г. Букчин, Д. В. Дроздин, А. В. Кирышкин // *Вычислительная сейсмология*. — Вып. 26. — М.: Наука, 1994. — С. 103–122.
18. Леонов В. Л., Егоров О. Н. Обвалы и оползни на территории Корякского автономного округа, связанная с ними опасность и факторы, ее определяющие // *Вопр. географии Камчатки*. — 1998. — Вып. 11.
19. Леонтьев И. О. Расчет волн, течений и вдольбереговых потоков наносов в прибрежной зоне // *Океанология*. — 1994. — Т. 33. — С. 429–434.
20. Мелекесцев И. В., Курбатов А. В. Частота крупнейших палеосейсмических событий на северо-западном побережье и в Командорской котловине Берингова моря в позднем плейстоцене-голоцене // *Вулканология и сейсмология*. — 1997. — № 3. — С. 3–11.
21. Мороз Ю. Ф. Глубинное строение юго-западной части Корякского нагорья // *Сов. геология*. — 1987. — № 5. — С. 118–123.
22. Мороз Ю. Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. — М.: Наука, 1991. — 181 с.
23. Следы доисторических цунами на восточном побережье Камчатки / Т. К. Пинегина, И. В. Мелекесцев, О. А. Брайцева [и др.] // *Природа*. — 1997. — № 4. — С. 103–106.
24. Поротов А. В., Селиванов А. О. Возможное развитие берегов России в условиях ожидаемого подъема уровня океана на побережье Корякии // *Развитие морских берегов России и их изменения при возможном подъеме уровня Мирового океана*. — М.: МГУ, 1997. — С. 220–243.
25. *Развитие морских берегов России и их изменение при возможном подъеме уровня Мирового океана*. — М.: МГУ, 1997. — 306 с.
26. *Сейсмическая сотрясаемость территории СССР*. — М.: Наука, 1979. — 192 с.
27. *СНиП II-7-81. Строительство в сейсмических районах*. — М.: Стройиздат, 1982. — 40 с.
28. Соловьев С. Л. Основные данные о цунами на тихоокеанском побережье СССР 1737–1976 гг. // *Изучение цунами в открытом океане*. — М.: Наука, 1978. — С. 61–136.
29. *Предварительное цунамирайонирование Курило-Камчатского побережья на основе гидродинамических расчетов* / С. Л. Соловьев, А. В. Некрасов, В. Г. Бухтеев, Р. В. Пясковский // *Теорет. и эксперим. исслед. по пробл. цунами*. — М.: Наука, 1977. — С. 131–139.
30. *Строительство в сейсмоопасных районах. СниП II-7-81*. — М.: Госстрой России, 2000. — 44 с.
31. Уломов В. И., Шумилина Л. С. Комплект новых карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации // *Сейсмостойкое строительство*. — 1998. — № 4. — С. 30–34.

32. *Holocene* tsunamis in the Southwestern Bering Sea, Russia Far East and their tectonic implications / J. Bourgeois, T. K. Pinegina, V. V. Ponomareva, N. E. Zaretskaia // *The Geol. Soc. Amer. Bull.* — 2006. — № 11 (3/4). — P. 449–463.
33. *The identification* of tsunami deposits in coastal sediment sequences / A. G. Dawson, I. D. Foster, S. Shi [et al.] // *Science of Tsunami Hazards.* — 1991. — Vol. 9. — № 1. — P. 73–82.
34. *The First Version* of the $A_{\max}(M_w, R)$ Relationship for Kamchatka / A. A. Gusev, E. I. Gordeev, E. M. Guseva [et al.] // *Pure appl. Geophys.* — 1997. — Vol. 149. — P. 299–312.
35. *Gusiakov V. K., Marchuk An. G.* Estimation of tsunami risk: case study of the Bering coast of Kamchatka // *Tsunami Migration and Risk Assessment: Proceedings of the International Tsunami Workshop, Petropavlovsk-Kamchatsky, August 21–24, 1996.* — Novosibirsk: Computing Center SD PAS, 1997. — P. 33–46.
36. *Gusiakov V. K., Marchuk An. G., Osipova A. V.* Expert tsunami database for the Pacific: motivation, design and proof-of-concept demonstration // *Perspectives on Tsunami Hazard Reduction.* — Kluwer Academic Publishers: Printed in the Netherlands, 1997. — P. 21–34.
37. *Tsunami* sedimentation associated with the 1923 Kamchatka earthquake / K. Minoura, V. K. Gusiakov, A. Kurbatov [et al.] // *Sedimentary Geology.* — 1996. — Vol. 106. — P. 145–154.
38. *Minoura K., Nakaya S.* Origin of intertidal lake and marsh environments in and around Lake Jusan, Tsugaro // *Geol. Soc. Japan. Mem.* — 1990. — Vol. 36. — P. 71–87 (in Japanese).
39. *Porotov A., Vikulin A.* The Natural Hazards assessment on coastal zone of the Koryak region // *Partnership in Coastal Zone Management. Supl. Iss.* / eds. J. Tausik, J. Mitchel. — Univ. Portsmouth, 1996. — P. 1–6.
40. *Potapova O. V., Chernysheva G. V., Shumilina L. S.* Seismicity of Koryak region // *5th Zonenshain Conference on the plate tectonics, Moscow, November 22–25, 1995.* — Moscow, 1995. — P. 131.
41. *Ranguelov B.* Tsunami Hazard Methodology — a Case for the Black Sea / Стихия. Строительство. Безопасность: сб. докл. Междунар. конф., Владивосток, 8–12 сентября 1997 г. — Владивосток: ДальНИИС, 1997. — С. 89–90.
42. *Zobin V., Melekestsev I., Vikulin A.* Seismic zonation of the Western coast of the Bering Sea // *Proceedings of the First International Conference on Seismic Zonation, October 17–19, 1995.* — France: Nice, 1995. — P. 1432–1439.

ЧАСТЬ III

**ВУЛКАНИЧЕСКИЙ
ПРОЦЕСС**

А. В. Викулин¹, С. А. Викулина², Е. И. Гордеев³

¹ *Институт физики Земли АН СССР*

² *Томский государственный университет*

³ *Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР*

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ВУЛКАНИЧЕСКОГО ДРОЖАНИЯ НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ЮЖНОГО ПРОРЫВА ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ *

На Толбачинском полигоне в 1975–1976 гг. были выполнены работы по определению направления на источник вулканического дрожания [Гордеев и др., 1978; Фарберов, Гаретовская, 1978]. Однако они проводились в дальней зоне и дали довольно большую область локализации источника. В предлагаемой статье на основании наблюдений за вулканическим дрожанием в ближней зоне заключительной стадии Южного прорыва проводится качественное построение источников и обсуждается вопрос их возможной локализации.

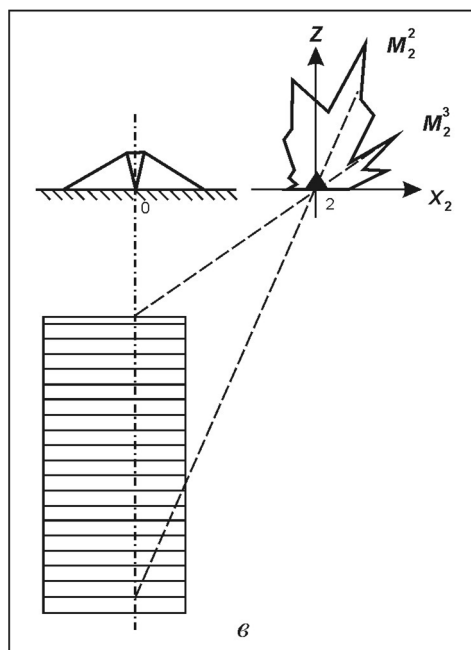
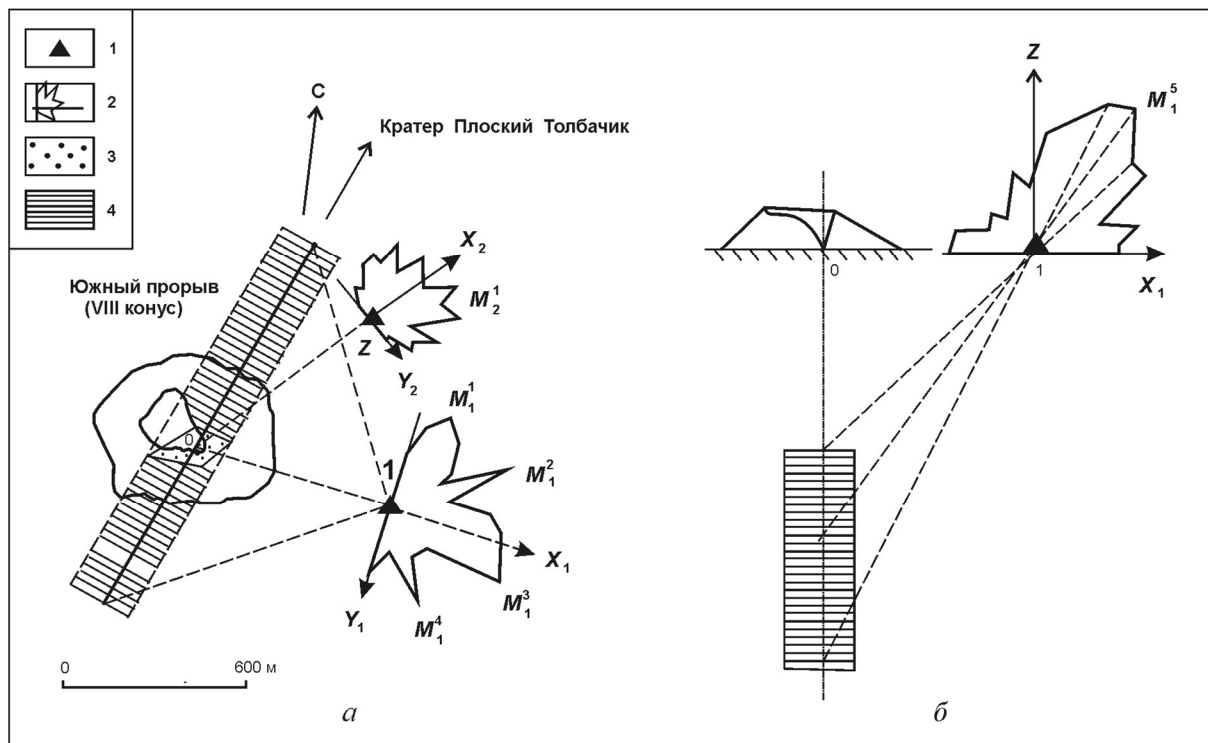
В ноябре 1976 г. в районе Южного прорыва в течение двух дней (9 и 10 ноября) проводилась регистрация вулканического дрожания трехкомпонентной автономной сейсмической станцией ПСР-СМ 3]. Район Южного прорыва и места постановки станции показаны на рисунке (а). В каждой точке дрожание записывалось непрерывно в течение 2 часов.

Деятельность вулкана по внешним признакам в эти дни оставалась без изменений. Наблюдались взрывы в кратере и умеренное истечение лавы. По данным сейсмической станции «Левый Толбачик», расположенной в 18 км от Южного прорыва, уровень и характер вулканического дрожания за эти дни также не менялись. Следовательно, можно считать, что основные характеристики источника за время проведения эксперимента оставались без изменения. К основным характеристикам источника следует отнести его местоположение и характер излучения. Так как мы находились в ближней зоне источника, можно попытаться оценить его «первичную» волновую структуру.

Следует отметить, что ориентация сейсмоприемников выбиралась таким образом, что один горизонтальный маятник записывал смещения, перпендикулярные направлению на кратер Южного прорыва (ось Y), другой — параллельные (ось X). Анализ траектории проводился в двух плоскостях для каждого пункта: горизонтальной плоскости YX и вертикальной XZ . Для анализа выбирались реализации длительностью около 40 с. Как показано в работе Е. И. Гордеева, В. Д. Феофилактова и В. И. Чеброва [1978], вулканическое дрожание Южного прорыва на таких интервалах можно считать стационарным. Выборочные реализации цифровались с шагом порядка 0,06 с, затем для последующих пар значений в выбранной плоскости определялись длина радиус-вектора и угол наклона одной из осей. Все радиус-векторы с углами наклона, попадающими в десятиградусный интервал, суммировались, и для каждой из трех плоскостей строилась гистограмма смещений поверхности грунта.

Полученные гистограммы приведены на рисунке. Получена статистическая картина, отображающая суммарное движение частиц поверхности за интервал длительностью около 40 с. На гистограммах достаточно уверенно выделяются главные максимумы. Так как мы находимся в ближней зоне, то, вероятно, эти максимумы отвечают объемным волнам, имеющим линейную поляризацию. Под главными максимумами мы понимаем максимумы в направлениях $M_1^1 \div M_1^5$ — для гистограмм точки 1; $M_2^1 \div M_2^3$ — для гистограмм точки 2. Геометрические построения (см. рисунок) для главных максимумов позволяют оценить область генерации вулканического дрожания. При построении источника все кажущиеся углы выхода сейсмической радиации приведены к истинным [Саваренский, 1972] в предположении, что величины отношения скоростей продольных и поперечных волн равны 1,85.

* 23 (1). Вулканология и сейсмология. 1980. № 1. С. 79–81.



Гистограммы азимутов смещений и геометрические построения для локализации источника вулканического дрожания заключительной стадии Южного прорыва:

a — в плане; *б, в* — в вертикальных плоскостях, проходящих через пункты регистрации (соответственно точки 1 и 2); 1 — пункты регистрации вулканического дрожания, 2 — гистограммы азимутов разностей смещений в плоскостях X_1Y_1 , X_2Y_2 , X_1Z , X_2Z ; 3 — возможное расположение центра тяжести источника вулканического дрожания; 4 — область возможной локализации источника вулканического дрожания (все схемы даны в одном масштабе)

В плане источник, по всей видимости, локализован в вытянутой области, центр тяжести которой лежит на пересечении M_1^3 и M_2^1 , а направление простираения параллельно M_1^1 (см. рис.). Тогда в направлении M_1^3 излучалась продольная волна, в направлении M_1^1 — поперечная. Если

ошибку в определении азимута направления принять равной $\pm 5^\circ$ и считать направления M_1^3 и M_2^1 основными, то центр тяжести источника в плане должен быть расположен внутри неправильного четырехугольника с центром вблизи точки 0.

Глубина расположения источника, определенная по главному максимуму M_1^5 точки 1 (см. рисунок), лежит в пределах 700–1500 м, а по главным максимумам M_2^2 и M_2^3 точки 2 (рисунок, в) — в пределах 500–1800 м. Интересно отметить, что при работе Северного прорыва глубина, с которой выносились ксенолиты, лежит в таких же пределах [Шанцер, 1978].

И. Танака [Tanaka, 1970] при исследовании деятельности вулкана Михара-Яма в 1965–1969 гг. обнаружил два источника вулканического дрожания под кратером на глубинах 300 и 500 м от кромки кратера. В рассматриваемый период наблюдались постоянные вспышки активности вулкана. Данные И. Танаки указывают на то, что источники вулканического дрожания могут находиться в каналах, питающих вулкан, или в непосредственной близости от них.

Все шлаковые конусы ареальной Толбачинской зоны (и конусы извержения 1975–1976 гг. в том числе) приурочены к трещинам, которые имеют преимущественное простирание на кратер Плоского Толбачика [Ермаков, Важеевская, 1973]. Наши построения дают возможные варианты простирания источника, согласующиеся с таким направлением. Поэтому можно предполагать, что построенный нами источник вулканического дрожания заключительной стадии Южного прорыва расположен внутри дайки, питающей VIII конус.

Литература

1. Гордеев Е. И., Феофилактов В. Д., Чебров В. Н. Исследование вулканического дрожания Толбачинского извержения // Геол. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 151–163.
2. Аппаратура для регистрации сейсмической информации / А. А. Дергачев, С. М. Жданов, В. В. Жадин, А. А. Савинов // Геофизическая аппаратура. — 1974. — Вып. 54. — С. 21–24.
3. Ермаков В. А., Важеевская А. А. Вулканы Острый и Плоский Толбачик // Бюл. вулканол. станций. — 1973. — № 49. — С. 43–53.
4. Саваренский Е. Ф. Сейсмические волны. — М.: Недра, 1972. — 292 с.
5. Фарберов А. И., Гаретовская Н. В. Исследование вулканического дрожания с помощью сейсмо-разведочной аппаратуры в районе Толбачинского извержения // Геол. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 234–244.
6. Краткое описание хода трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. / С. А. Федотов, А. М. Чирков, В. Н. Андреев [и др.] // Бюл. вулканол. станций. — 1977. — № 53. — С. 3–12.
7. Шанцер А. Е. Ксенолиты фундамента в продуктах извержения Новых Толбачинских вулканов и проблема формирования подводных магматических каналов в верхней части земной коры // Геол. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 56–63.
8. Tanaka Y. A seismometrical study of Izu-Oshima (III) // Meteorology and Geophysics. — 1970. — Vol. 21. — № 2. — P. 24–36.

А. В. Викулин¹, В. С. Смирнов²

¹ Институт физики Земли АН СССР

² Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР

ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭФФЕКТАХ И ВУЛКАНИЧЕСКОМ ДРОЖАНИИ НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ СЕВЕРНОГО ПРОРЫВА ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ 1975 г.*

В период окончания деятельности Северного прорыва — начала Южного прорыва в сентябре 1975 г. были зарегистрированы сравнительно высокочастотные (1 Гц) электромагнитные возмущения с помощью аппаратуры типа МТЛ-62. Регистрировались пять компонент: три магнитных и две электрических (рис. 1, *a*).

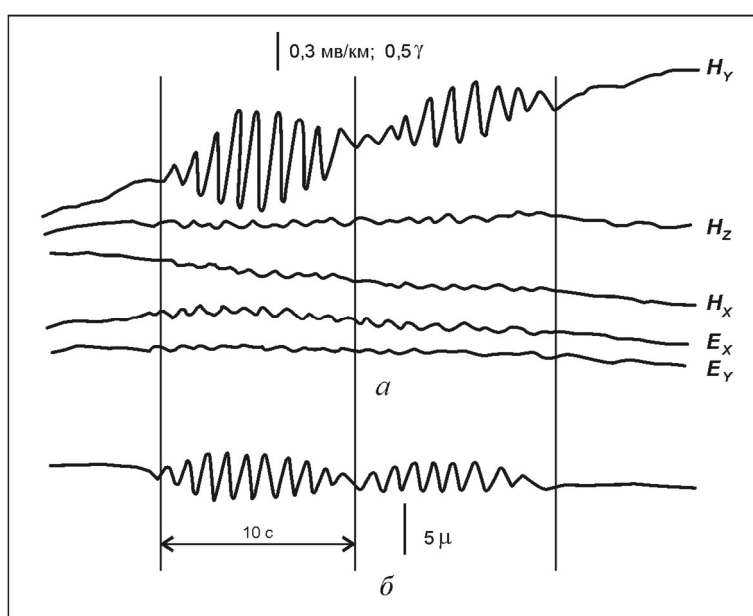


Рис. 1. Фрагменты записи электромагнитных возмущений и вулканического дрожания:

a — широтные (H_y , E_y), меридиональные (H_x , E_x) и вертикальная (H_z) компоненты электромагнитного поля; *б* — вулканическое дрожание

При достаточно строгой временной увязке с материалами сейсмологических наблюдений выяснилось, что одиночные возмущения — двойные цуги колебаний в широтной компоненте магнитного поля (рис. 1, *a*), происходившие в перерыве между деятельностью Северного и Южного прорывов, — однозначно идентифицируются сейсмическими сигналами (рис. 1, *б*). При этом начала возмущений с точностью до секунды совпадают с рассчитанными временами вступлений сейсмических волн в точку электромагнитных наблюдений.

Проведенные оценки угловых смещений датчиков магнитного поля позволяют утверждать, что наблюдаемые цуги на частоте ~ 1 Гц могут быть обусловлены угловыми колебаниями всей платформы магнитометров. Таким образом, хотя собственно магнитные возмущения и не исключены полностью, выделить их на фоне механических помех при регистрации компонентами датчиками представляет достаточно сложную техническую проблему.

* 24 (20). Сейсмические процессы на Северо-Востоке СССР. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 157–161.

Относительно возмущений в электрических компонентах может быть принята следующая дилемма: либо эти возмущения связаны с локальным пьезоэлектрическим эффектом в месте расположения приемных линий, либо они обусловлены распространением электромагнитных волн от удаленного источника. Механическое воздействие на гальванометры исключено. Модель электромагнитной волны наиболее предпочтительна для длительных цугов, наблюдавшихся в спокойный период 17 сентября практически синхронно в двух точках, отстоящих друг от друга на расстоянии ≈ 40 км (рис. 2). При этом наблюдался слабовыраженный вторичный эффект в меридиональном магнитном поле. В то же время коррелируемых сейсмических явлений не наблюдалось. Внешние эффекты ионосферного происхождения здесь исключены. Соотношение векторов E и H однозначно указывает на внутренний источник в отличие от регулярных короткопериодных колебаний магнитотеллурического диапазона. Природа этих возмущений остается до сих пор неясной.

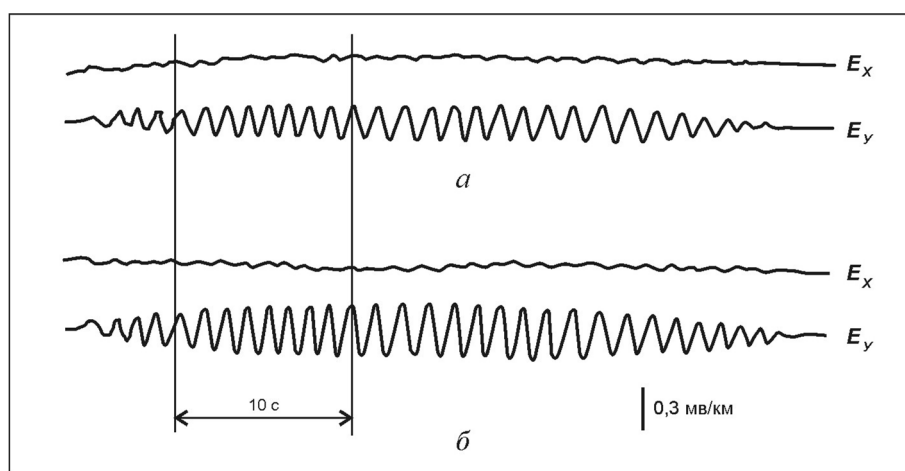


Рис. 2. Фрагменты записи длительных цугов колебаний в электрическом поле: цуги в более (а) и менее (б) удаленных от извержения точках

По-видимому, при проведении в дальнейшем целенаправленных экспериментов необходимо создание более полных систем электромагнитных наблюдений по аналогии с сейсмическими на базе совершенной аппаратуры, у которой соответствующие частотные характеристики регистрирующих каналов — модульные высокочастотные датчики магнитного поля — не подвержены механическим воздействиям.

Оценим величину электрического поля, создаваемого упругими волнами, слагающими вулканическое дрожание.

Волновой состав излучаемого при извержении вулканического дрожания достаточно сложен [1, 2]. Однако большое удаление пункта регистрации электромагнитных волн от места извержения (≈ 7 км) позволяет с достаточной степенью точности считать приходящие сейсмические волны поверхностными. Упругая энергия поверхностной волны заключена в тонком приповерхностном слое. В зонах сжатия и растяжения на расстоянии $\approx \lambda/2$ друг от друга за счет пьезоэффекта будут наводиться заряды противоположных знаков. Здесь λ — длина неоднородной волны, которая, очевидно, определяется как $\lambda = V/\nu \lambda$, где V — скорость неоднородной волны, ν — ее частота.

Величина наводимого заряда q будет определяться из формулы $q = e \cdot A$, где e — константа электромеханической связи; A — амплитуда колебаний в сейсмической волне. Тогда величина поля E в «средней» точке определится из уравнения

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q}{(\lambda/4)^2},$$

где ϵ — диэлектрическая постоянная горных пород; ϵ_0 — константа.

Величина электромеханической связи e для кварца равна $e_{\text{кв}} \approx 0,1$ к/м [3]. Однако электромеханическая константа для различных пород может быть на несколько порядков меньше и для песчаников достигать величины $e_{\text{песч}} \approx 10^{-5}$ к/м [4]. Считая, что

$$A \approx (1 \div 10) \mu = (10^{-5} \div 10^{-6}) \text{ м}, V \approx 10^3 \text{ В/с}, \nu \approx 1 \text{ Гц}, \varepsilon_0 = (36 \cdot 10^9 \pi)^{-1} \text{ К}^2/\text{н} \cdot \text{м}^2,$$

для песчаников $\varepsilon \approx 5$ [4], получим величину поля $E \approx 0,03 \div 0,3$ мВ/км.

Амплитуда зарегистрированных во время заключительной стадии деятельности Северного прорыва возмущений $E_{\text{изм}}$ лежала в пределах $E_{\text{изм}} \approx (0,1 \div 1,0)$ мВ/км. Таким образом, может оказаться, что величина регистрируемого поля E превышает локальный пьезоэлектрический эффект. Следовательно, при излучении вулканического дрожания одновременно может излучаться и электромагнитная волна той же частоты. Однако для уверенных выводов необходимы детальные наблюдения.

Литература

1. Гордеев Е. И., Феофилактов В. Д., Чебров В. Н. Исследование вулканического дрожания // Геол. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 151–163.
2. Викулин А. В., Викулина С. А., Гордеев Е. И. Исследование источника вулканического дрожания на заключительной стадии Южного прорыва Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. — 1980. — № 1. — С. 79–81.
3. Мак-Фи Дж. Распространение и усиление волн в пьезоэлектрических полупроводниках // Физическая акустика. Ч. 4А. — М.: Мир, 1969. — С. 13–62.
4. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. — М.: Недра, 1975. — 279 с.

А. В. Викулин

Институт физики Земли АН СССР

О ДЛИНЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ, ЧЕРЕЗ КОТОРУЮ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ПИТАНИЕ КОНУСОВ СЕВЕРНОГО ПРОРЫВА*

Для понимания динамики движения магмы в верхних горизонтах коры важно уметь оценивать геометрические параметры магматических подводящих каналов и их вариации с глубиной.

В работе [23] были введены понятия глубинной и поверхностной трещин. В данной статье будет исследовано изменение формы питающей трещины в некотором промежуточном интервале глубин. Для этого интервала глубин нами введен новый термин — «приповерхностная трещина».

Длина приповерхностной трещины на сейсмической границе

Изменение геометрии питающих трещин с глубиной рассматривалось С. А. Федотовым [19]. Предполагалось, что внедрение магмы сопровождается главным образом упругим сжатием вмещающих пород, при котором отношение ширины ω к длине l трещины линейно зависит от величины избыточного давления магмы ΔP :

$$\frac{\omega}{l} = \frac{2(1-\nu^2)}{E} \Delta P, \quad (1)$$

где ν — коэффициент Пуассона; E — модуль Юнга ($E = 2(1+\nu)\rho V_S^2$); ρ — плотность вмещающих пород; V_S — скорость поперечных волн в них. Переход через границы сред вследствие скачкообразного изменения E должен сопровождаться скачкообразным изменением формы трещины.

В ходе формирования конусов Северного прорыва Толбачинского извержения 1975 г. был выполнен комплекс работ по измерению деформаций земной поверхности [23]. Это позволило оценить ширину питающей трещины на поверхности в момент ее появления ($\omega \approx 1$ м) и длину глубинной питающей трещины (не менее $l_r \approx 4$ км).

Методами ГСЗ был получен скоростной разрез изучаемого района, из которого видно, что на глубине $h_0 \approx 1,2-1,3$ км имеется граница раздела со скачком скорости $\Delta V = 2,5-4,4$ км/с [2]. Поэтому из равенства (1) отношение $(\omega/l)_{2,5}$ для верхней границы раздела составит:

$$\left(\frac{\omega}{l}\right)_{2,5} = \left(\frac{\omega}{l}\right)_{4,4} \cdot \frac{E_{4,4}}{E_{2,5}}, \quad (2)$$

где индексы 2,5 и 4,4 отвечают соответственно верхней и нижней границам раздела.

Принимаем, что плотность пород ρ и величина отношения продольной скорости к поперечной на границе раздела меняются слабо, ширина трещины в верхней части постоянна: $\omega_{2,5} \approx 1$ м, длина глубокой трещины $l_{4,4} \approx 4$ км. Тогда получим следующее выражение для трещины на глубине h_0 : $l_{2,5} = 91\,300 / \omega_{4,4}$ м.

Мощность даек в Толбачинской ареальной зоне лежит в пределах ($9\omega_0 = 1-5$ м [9, 14]). Считая, что $\omega_{4,4}$ не превышает ω_0 , получим теоретическую оценку длины трещины: $l_{\Delta V} = l_{2,5} = 0,3-1,3$ км.

* 25 (21). Вулканология и сейсмология. 1984. № 3. С. 82-87.

Длина приповерхностной трещины по величине давления в канале

Зная величину избыточного давления в канале ΔP , коэффициенты Юнга E и Пуассона ν , можно непосредственно определить длину трещины по формуле (1).

Принимаем ширину трещины $\omega \approx 1$ м [23], величину давления $\Delta P = 500$ атм [16], $V = 2,5$ км/с [2], коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$, отношение продольной скорости к поперечной $V_P/V_S = 1,73$, плотность пород $\rho \approx 2,5$ г/см³. Тогда по формуле (1) получаем длину трещины: $l_{\Delta P} = 1,3$ км.

Точность, с которой получена данная величина, по-видимому, равна первым десяткам процентов. Если скорость вылета газопепловой струи определена с точностью 20% [16], то значение давления — с точностью 40%. Отсюда получаем следующий диапазон значений: $l_{\Delta P} = 0,7-1,9$ км.

В работах [23, 24] при других значениях величин ρ , V , E на основании геодезических данных из формулы (1) было получено несколько меньшее значение для величины избыточного давления в канале $\Delta P = 100-250$ атм. Видим, что это значение давления отличается от используемого нами в 2–5 раз. Считая, что породы под извергающимися конусами Северного прорыва представлены туфами, алевролитами и песчаниками [25], получаем вероятный диапазон значений модуля Юнга: $4 \cdot 10^4 \leq E \leq 10^6$ г/см² (1,5 порядка) [11]. Можно считать, что оба значения для величины избыточного давления не противоречат друг другу. В данном случае важным обстоятельством является то, что значение $\Delta P = 500$ атм было получено в работе [16] не на основании геодезических данных.

Длина приповерхностной трещины по сейсмическим данным

В результате сейсмологических наблюдений, проводимых вблизи извергавшихся конусов, было показано, что источник вулканического дрожания мог быть расположен внутри канала, питающего конус [5]. Вулканическое дрожание, сопровождавшее Толбачинское извержение, можно считать стационарным сигналом [8], основная частота которого находилась в достаточно узких пределах: $\nu_0 = 0,8-1,3$ Гц [7]. Поэтому расположение источника и его размеры можно считать слабоменяющимися.

Породы, слагающие Толбачинскую ареальную зону, неоднородны и представлены переслаивающимися слоями пирокластики и лав предыдущих извержений. При этом длина питающей трещины заведомо больше предельного значения (в смысле Гриффитса). Поэтому можно считать, что на устье трещины приходятся минимумы избыточного акустического давления, а в центре канала реализуется максимум. Тогда между длиной источника дрожания $l_{др}$ и основной частотой ν_0 должно быть справедливо простое соотношение $l_{др} = C/2\nu_0$, где C — скорость звука в магме.

Согласно данным работы [18], скорость звука в расплавах эффузивов $C_{эф} = 2100-2400$ м/с. Считая $C_{эф} = C$, $\nu_0 = 0,8-1,3$ Гц, для длины источника вулканического дрожания получим: $l_{др} = 0,8-1,3$ км.

Длина приповерхностной трещины по расходу материала

Считая расход вещества равномерным и размеры канала слабоменяющимися, после несложных вычислений можно получить следующее выражение для длины канала:

$$l_n = \frac{V_n + P_n / \rho_n}{TV\omega}, \quad (3)$$

где P_n — вес выброшенной пирокластики. После подстановки численных значений ($\omega \approx 1$ м, скорость подъема магмы $V = 3-10$ см/с [22, 15], время извержения $T = 72$ дня, объем излившейся лавы $V_n = 0,2$ км³ [20], $P_n = 1,1 \cdot 10^9$ т [4], плотность жидкой лавы равна плотности магмы: $\rho_n = 2,5$ г/см³ [1]) получаем: $l_n = 0,8-4,0$ км.

Этот диапазон значений длины трещины больше, чем в предыдущих случаях, что, вероятно, указывает на меньшую точность данной оценки.

О механизме извержения Северных конусов

Все четыре диапазона полученных ранее значений длин приповерхностной трещины имеют один общий интервал 0,8–1,3 км. По-видимому, можно считать, что справедлива следующая система приближенных равенств: $l_i = l_j$ ($i \neq j$), где i и j — суть индексы $\Delta V_{др}$, $\Delta P_{л}$. Важным обстоятельством является то, что все значения l_i были получены независимым образом и для разных состояний вулканического материала в канале — вязкой магмы и газопепловой смеси. Поэтому полученная система равенств может указывать на существование генетической взаимосвязи между жидкой магмой и газопепловой смесью в питающем канале в период извержения.

Кроме того, оказывается, что глубины залегания трещин l_i близки друг другу и равны примерно h_0 . Действительно, скачок продольной скорости $\Delta V = 2,5\text{--}4,4$ км/с расположен на глубине $h_0 \sim 1,2\text{--}1,3$ км [2], источник вулканического дрожания [5] и «область интенсивного дробления стенок питающего канала» [25] — на глубине 0,5–1,8 км, область газоотделения — на глубине 1–2 км [10]. Поэтому полученная система равенства может указывать не просто на существование генетической взаимосвязи между жидкой магмой и газопепловой смесью в канале, но и на то, что превращение магмы в газопепловую смесь происходит в достаточно узком диапазоне глубин.

Извержение конусов Северного прорыва носило преимущественно эксплозивный характер, причем эксплозии были предельно интенсивными — скорость материала в них, как правило, равнялась первым сотням м/с [16], а иногда превышала скорость звука в воздухе [20]. Поэтому в области превращения магмы в газопепловую смесь должен иметь место скачок скорости вертикального движения материала.

Действительно, нетрудно показать, что вязкая ($10^4\text{--}10^8$ Пз) магма Северного прорыва при достаточно малых избыточных давлениях (100–500 атм) и обычных размерах канала ($1 \cdot 1000$ м²) не может двигаться со скоростью газопепловой эксплозии. И наоборот, невозможно существование газопепловой эксплозии при малых скоростях движения магмы (при параметрах, указанных ранее в скобках, максимальное значение скорости ≈ 10 м/с). Поэтому для понимания механизма извержения конусов Северного прорыва необходимо объяснить существование внутри питающего канала на глубине h_0 особого слоя, в котором скорость вертикального движения материала изменяется достаточно быстро.

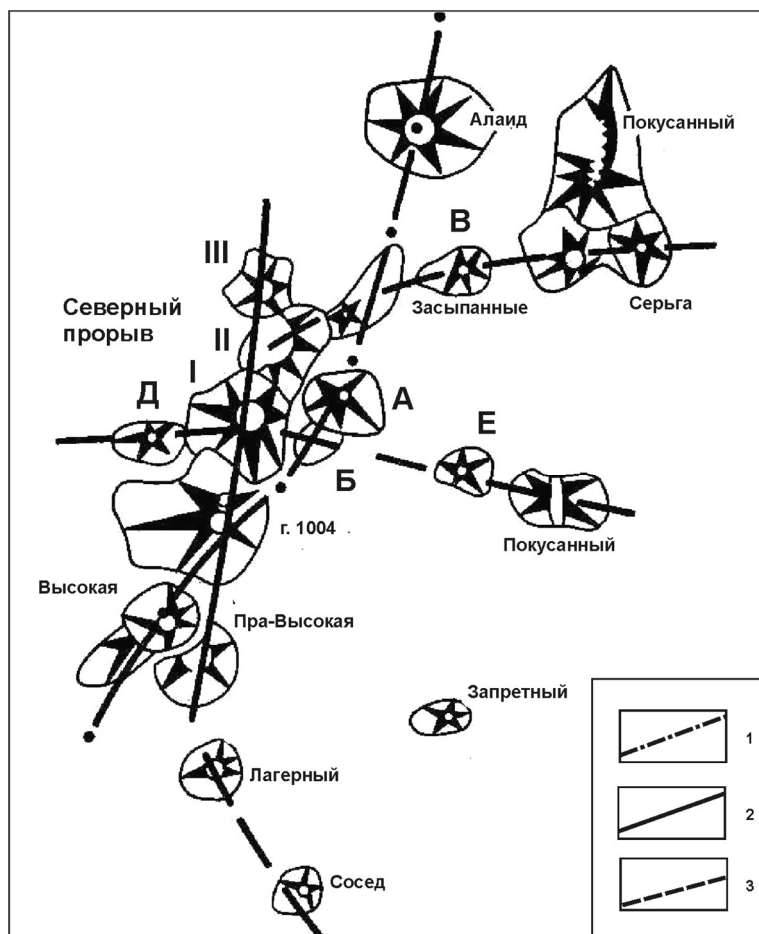
К сожалению, экспериментальный материал по кинетике газовой выделения в силикатных расплавах отсутствует. Поэтому для анализа процессов, происходящих в пределах особой области, воспользуемся аналогией между кипением чистых жидкостей и процессами газовой выделения в вулканическом канале при извержении.

Из теории кипения чистых жидкостей известно, что интенсивность кипения прямо зависит от степени перегрева жидкости, которая, в свою очередь, определяется ее однородностью [14]. При этом чем меньше размер неоднородности, тем с большей интенсивностью будет протекать процесс кипения. Нечто аналогичное происходило при извержении конусов Северного прорыва. Действительно, наиболее интенсивные эксплозии имели место при извержении серого пепла, который из всех продуктов извержения являлся самым мелкодисперсным материалом [13]. Поэтому можно считать, что аналогия между извержением конусов Северного прорыва и кипением чистых жидкостей в известной степени имеет место. Тогда, если учесть, что магма на глубину ~ 1 км поступала гомогенной и перегретой [10], а сам процесс газоотделения носил «резкий» характер [6], скачок скорости вертикального движения вулканического материала в области газоотделения становится очевидным и отвечает режиму достаточно интенсивного газоотделения.

Таким образом, механизм извержения конусов Северного прорыва можно сформулировать следующим образом. Внутри питающего канала на глубине залегания сейсмической границы и источника вулканического дрожания в достаточно тонком по вертикали слое происходило интенсивное выделение летучих с обособлением их в самостоятельную фазу, вследствие чего магма преобразовывалась в газопепловую смесь. Предложенный механизм позволяет достаточно просто объяснить некоторые особенности извержения Северных конусов [26]. Рассмотрим один из них.

Максимум акустического давления в источнике вулканического дрожания, как уже отмечалось, приходился скорее всего на центр питающей трещины. Следовательно, над центром трещины должен был формироваться канал центрального типа. В случае эксплозивного извержения на заключительной его стадии при некоей критической высоте конуса, когда кинетической энергии газопепловой струи уже недостаточно для преодоления давления сыпучего конуса, энергетически более выгодным становится образование нового центра извержения, которое должно происходить аналогичным образом. Поэтому расстояния между центрами эксплозивных конусов в ходе извержения должны быть равны длине приповерхностной трещины.

Расположение шлаковых конусов в районе Северного прорыва представлено на рисунке.



Район Северного прорыва:

1 — голоценовая трещина растяжения [23]; 2 — глубинная питающая дайка [23];
3 — вероятное положение глубинных субширотных разломов

Из представленного рисунка видно, что расстояния между I и II, II и III конусами составили соответственно 0,8 и 1,3 км. Эти значения не выходят за пределы общего интервала значений, полученных ранее, что можно рассматривать как подтверждение правильности предложенной модели процессов в верхней части вулканического канала.

Расстояние между конусами в районе Северного прорыва

Район Северного прорыва представлен группой мощных шлаковых конусов от горы Алаид на севере до гор Высокая и Пра-Высокая на юге (см. рисунок). Конусы по возрасту относятся ко второй фазе ареального вулканизма, когда имело место увеличение коэффициента эксплозивности [9, 21]. Объемы тefры этих конусов сопоставимы с объемом тefры конусов Северного прорыва [3].

В субмеридиональном направлении через район Северного прорыва проходят два разлома: голоценовая трещина растяжения от горы Алаид до горы Высокая (через конусы Засыпанные, А, Б и гору 1004) и глубинная трещина, на которой расположены конусы Северного прорыва и гор 1004 и Пра-Высокая [23]. Все конусы в районе Северного прорыва, как видно из приведенных данных, обнаруживают ряд общих свойств как по характеру активности, так и по расположению.

В начале и конце извержения III конуса на поверхности наблюдалось образование двух систем трещин, сначала меридионального, а затем широтного простирания, причем длина меридиональных трещин оценивалась в 0,7–1,2 км [21], т.е. не выходила за пределы общего интервала значений для приповерхностной трещины. Поэтому общность свойств конусов в районе Северного прорыва по характеру активности и расположению позволяет предположить, что в рассматриваемом районе внедрение магмы перед образованием каждого прорыва происходит одинаковым образом. Для доказательства этого предположения проанализируем представленное в таблице расположение шлаковых конусов в районе Северного прорыва вдоль меридионального и широтного простираний (см. таблицу).

Расстояния между шлаковыми конусами в районе Толбачинского извержения 1975 г.

| № п/п | Простирание глубинных разломов | Расстояния, км | | | | | | | | | | n | L | σ |
|-------|-----------------------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| 1 | Субмеридиональное | 0,8 | 0,5 | 1,2 | 1,2 | 0,5 | 0,8 | 0,1 | 1,4 | — | — | 8 | 0,93 | 0,31 |
| | | 0,8 | 0,5 | 1,2 | 1,2 | 0,5 | 0,8 | 0,1 | 1,4 | 1,2 | 1,4 | 10 | 1,00 | 0,32 |
| 2 | Субширотное | 0,8 | 1,3 | 1,2 | 0,6 | 1,1 | 0,7 | 1,5 | 1,0 | | | 8 | 1,03 | 0,29 |
| 3 | Среднее по всем данным | | | | | | | | | | | 18 | 1,0 | 0,3 |

Примечание. В графе 1 даны расстояния с севера на юг между конусами: 1–4 — вдоль голоценовой трещины растяжения от конусов Засыпанные до горы Высокая; 5–8 — вдоль глубинной питающей дайки от конуса III до горы Пра-Высокая; 9, 10 — между горой Пра-Высокая и конусами Лагерный и Сосед. В графе 2 даны расстояния с запада на восток между конусами: 1–4 — от конуса II до конуса Серьга; 5–8 — от конуса Д до конуса Покусанный. Символ n обозначает число используемых при подсчете данных, \bar{L} — среднее расстояние между центрами конусов, σ — среднеквадратичное отклонение.

Вдоль субмеридионального направления от горы Алаид до горы Пра-Высокая расположено девять шлаковых конусов (не считая горы Алаид). Среднее расстояние L вдоль субмеридионального направления между центрами шлаковых конусов в районе Северного прорыва, как видно из таблицы, практически совпадает с длиной приповерхностной трещины. Расстояния между горой Пра-Высокая и конусами Лагерный и Сосед находятся в тех же пределах. Вычисленное среднее L и среднеквадратичное отклонение σ по значениям n = 10 практически не отличается от случая n = 8, что, вероятно, связано с тем, что конусы Лагерный и Сосед лежат на продолжении разлома, проходящего через горы Пра-Высокая, 1004 и конусы I, II, III Северного прорыва.

Расстояние от конусов Засыпанные до горы Алаид составляет более 2 км, что превышает полученное значение для L более чем на 3σ. Поэтому это расстояние не использовалось нами при анализе. Таким образом, в субмеридиональном направлении в районе Северного прорыва обнаруживается периодичность в расположении шлаковых конусов с периодом, лежащим в пределах $\bar{L}_{см} = 1,0 \pm 0,3$ км.

В субмеридиональном направлении можно выделить две цепочки конусов. Первая протягивается от II конуса до двух конусов Серьга через конусы Засыпанные и В. Вторая цепочка протягивается от конуса Д, расположенного к западу от конуса I, до конуса Покусанный через конусы I, Б, Е (соответствующие длины представлены в таблице). Следует заметить, что вторая цепочка конусов, возможно, как и первая, начинается со II конуса, но проходит через конус А.

Это обстоятельство не влияет на конечный результат, однако некоторые особенности извержения II–IV конусов и группы лавовых котлов объясняются, возможно, пересечением в районе II конуса субмеридиональной (см) и субширотной (сш) цепочек конусов. В субширотном направлении для района Северного прорыва также характерна периодичность в расположении шлаковых конусов с периодом, равным периоду вдоль субмеридионального направления: $\bar{L}_{\text{сш}} = \bar{L}_{\text{см}} = 1,0 \pm 0,3$ км. Таким образом, в расположении эксплозивных центров извержений в районе Северного прорыва вдоль глубинных разломов обнаруживается периодичность. Это, вероятно, может служить подтверждением предположения о том, что внедрение магмы перед образованием каждого конуса в районе Северного прорыва происходит одинаковым образом. Видимо, эти свойства долговременные и являются отражением характерного для данного района поля напряжений, которое возникает при внедрении магмы.

На север от горы Алаид расположены мощные шлаковые конусы, однако положение центров извержения здесь далеко не очевидно. Еще далее на север центры извержений представлены ярко выраженными трещинами. К югу от горы Высокая извержения носили преимущественно эффузивный характер. Поэтому периодичность в расположении центров извержений может быть характерна для значительно большей площади ареальной зоны. Наиболее явно она проявляется для района Северного прорыва, который в настоящее время можно ограничить с севера горой Алаид, с юга — горой Высокой и, возможно, горой Сосед, с запада и востока — соответственно конусами Д и Покусанный.

Выводы

1. Несколькими независимыми способами определена длина приповерхностной трещины, питавшей эксплозивные конусы Северного прорыва. Диапазоны значений длины во всех случаях имеют общий интервал 0,8–1,3 км.

2. Предложена модель процессов, протекающих в верхней части канала во время стационарного эксплозивного извержения. Предполагается, что в теле питающего канала на сейсмической границе с большим скачком скорости продольных волн на глубине $h_0 = 1,2 - 1,3$ км существует тонкий по вертикали слой, внутри которого имеет место интенсивное выделение летучих из магмы.

3. Показано, что в районе Северного прорыва в субмеридиональном и субширотном направлениях обнаруживается пространственная периодичность шлаковых конусов с периодом, равным длине приповерхностной трещины. Видимо, это является отражением характерного для данного района поля напряжения, которое возникает при внедрении магмы.

Литература

1. Андреев В. И., Гусев Н. А., Ковалев Г. Н., Слезин Ю. Б. Динамика лавовых потоков Южного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. // Бюл. вулканол. станций. — 1978. — № 55. — С. 18–26.
2. Балеста С. Т., Каргапольцев А. А., Григорян Г. Б. Строение Новых Толбачинских вулканов по сейсмическим данным // Геолог. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 225–233.
3. Брайцева О. А., Мелекесцев В. И., Пономарева В. В. Возрастное расчленение голоценовых вулканических образований Толбачинского дола // Геолог. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 64–72.
4. Будников В. А., Мархинин Е. К., Овсянников А. А. Количество, распространение и петрохимические особенности пирокластики Большого трещинного Толбачинского извержения // Геолог. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 32–43.
5. Викулин А. В., Викулина С. А., Гордеев Е. И. Исследование источника вулканического дрожания на заключительной стадии Южного прорыва Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. — 1980. — № 1. — С. 79–82.
6. Волынец О. Н. Первые результаты изучения вещественного состава пород трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. / О. Н. Волынец, А. П. Хренов, Г. Б. Флеров, В. А. Ермаков // Бюл. вулканол. станций. — 1977. — № 53. — С. 13–26.

7. Горельчик В. И., Степанов В. В., Ханзунтин В. П. Вулканическое дрожание при Большом трещинном Толбачинском извержении 1975 г. // Геолог. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 146–150.
8. Гордеев Е. И., Феофилактов В. Д., Чебров В. И. Исследование вулканического дрожания Толбачинского извержения // Геолог. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 151–163.
9. Ермаков В. А., Ваджеевская А. А. Вулканы Острый и Плоский Толбачик // Бюл. вулканол. станций. — 1973. — № 49. — С. 43–53.
10. Ермаков В. А., Генишафт Ю. С. Механизм извержения Северного прорыва в региональной зоне шлаковых конусов Толбачинского дола // Докл. АН СССР. — 1980. — Т. 255. — № 5. — С. 1076–1080.
11. Справочник физических констант горных пород. — М.: Мир, 1969.
12. Малеев Е. Ф., Ванде-Кирков Ю. В. Особенности пирокластики Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения и генезис светло-серого пепла // Геолог. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 44–55.
13. Несис Е. И. Кипение жидкостей. — М.: Наука, 1973.
14. Сирин А. И. О соотношении центрального и ареального вулканизма. — М.: Наука, 1968.
15. Слезин Ю. Б. Условия возникновения дисперсного режима течения при вулканическом извержении // Вулканология и сейсмология. — 1979. — № 3. — С. 69–76.
16. Токарев П. И. Расчет расхода магмы, роста высоты насыпного конуса и размеров подводящего канала первого кратера Большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // Геолог. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 23–27.
17. Трубников Б. А. К теории глубинного вулканического дрожания / Б. А. Трубников, Ю. Б. Слезин, Б. И. Самойленко, А. В. Сторчеус // Докл. АН СССР. — 1981. — Т. 256. — № 6.
18. Экспериментальные исследования скорости и затухания ультразвука в частично и полностью расплавленных эффузивах / А. И. Фарберов, Л. Н. Соколов, А. И. Левыкин [и др.] // Докл. АН СССР. — 1975. — Т. 220. — № 2. — С. 342–345.
19. Федотов С. А. О подъеме основных магм в земной коре и механизме трещинных базальтовых извержений // Изв. АН СССР. Сер. Геологическая. — 1976. — № 10. — С. 5–23.
20. Федотов С. А., Хренов А. П., Чирков А. М. Большое трещинное Толбачинское извержение 1975 г. Камчатка // Докл. АН СССР. — 1976. — Т. 228. — № 5.
21. Краткое описание хода трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. / С. А. Федотов, А. М. Чирков, В. Н. Андреев [и др.] // Бюл. вулканол. станций. — 1977. — № 53. — С. 3–12.
22. Развитие Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. по сейсмологическим данным / С. А. Федотов, В. Н. Горельчик, В. В. Степанов, В. Т. Гарбузова // Геолог. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 135–145.
23. Деформации земной поверхности вблизи Новых Толбачинских вулканов (1975–1976 гг.) / С. А. Федотов, В. В. Энман, М. А. Магуськин [и др.] // Геолог. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 189–199.
24. Внедрение базальтов и образование питающих трещин Большого Толбачинского извержения 1975 г. по геодезическим данным / С. А. Федотов, В. В. Энман, М. А. Магуськин [и др.] // Докл. АН СССР. — 1976. — Т. 229. — № 1. — С. 170–173.
25. Шанцер А. Е. Ксенолиты фундамента в продуктах извержения Новых Толбачинских вулканов и проблема формирования подводящих магматических каналов в верхней части земной коры // Геолог. и геофиз. данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. — М.: Наука, 1978. — С. 56–63.
26. Викулин А. В. О закономерностях расположения шлаковых конусов в районе Северного прорыва // Современные движения земной коры. — М.: Радио, 1983.

А. В. Викулин, Д. Р. Акманова, Н. А. Осипова

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

ВУЛКАНИЗМ КАК ИНДИКАТОР ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ*

Введение

К числу важнейших геодинамических процессов Земли относятся землетрясения, активный вулканизм, тектонические деформации, являющиеся основными источниками современных движений земной коры. Наиболее интенсивно геодинамические процессы происходят в местах взаимодействия тектонических плит. Именно здесь наблюдаются сильные землетрясения и катастрофические извержения вулканов. Одним из таких мест является окраина Тихого океана, в пределах которой происходят практически все перечисленные события. Исследователями не раз отмечалось, что вулканизм и сейсмичность, как процессы планетарного масштаба, взаимосвязаны и причины, приводящие к движению изливающейся при извержениях вулканов магмы и накоплению сбрасываемых при землетрясениях напряжений имеют общий генетический корень.

С целью изучения закономерностей вулканического и сейсмического процессов в едином формате была создана электронная база данных, включающая все опубликованные данные о вулканах ($N = 607$) и их извержениях ($n = 6415$) за последние 12 тыс. лет ($\Delta T = 9850$ г. до н. э. — 2006 г.) и сильных ($M \geq 6$) землетрясениях ($\Delta T = 2150$ г. до н. э. — 2007 г., $n = 12\,145$) планеты. Все вулканические извержения в базе классифицировались нами по величине $W = 1, 2, \dots, 7$, соответствующей объемам изверженного ювенильного материала ($10^5, 10^6, \dots, 10^{11}$ м³) и предлагаемой нами в качестве энергетической характеристики извержения [Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007].

Повторяемость и энергия вулканических извержений

Распределение чисел извержений по величинам W изучалось для разных по масштабу регионов (рис. 1). Видно, что вулканические извержения распределены по своей величине, независимо от масштаба рассмотрения, одинаковым образом.

Графики повторяемости извержений, независимо от масштаба рассматриваемого региона, имеют примерно одинаковый наклон и, как для землетрясений, могут рассматриваться в качестве «энергетической» характеристики. Полученные нами данные подтверждают результаты, полученные П. И. Токаревым [1987, 1991] и Г. С. Голицыным [2003]. Таким образом, параметр W (как и магнитуда M землетрясения) можно предложить в качестве энергетической характеристики вулканического процесса. Как следует из табл. 1, составленная нами база с достаточной полнотой содержит данные об извержениях с $W \geq 2-3$.

Таблица 1

Значения углов наклонов графиков повторяемости извержений вулканов

| № п/п | Регион | Число вулканов N | Число извержений n | Диапазон W | Временной интервал извержений ΔT | Углы наклона графиков повторяемости |
|------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------|--------------|--|-------------------------------------|
| 1 | Планета в целом | 607 | 6415 | 1 ÷ 7 | 9850 г. до н. э. — 2006 г. | $-0,51 \pm 0,04$ |
| 2 | Окраина Тихого океана | 503 | 5498 | 1 ÷ 7 | 9850 г. до н. э. — 2006 г. | $-0,51 \pm 0,04$ |
| 3 | Полуостров Камчатка | 38 | 443 | 1 ÷ 7 | 8050 г. до н. э. — 2006 г. | $-0,47 \pm 0,04$ |
| 4 | Ключевской вулкан, п-ов Камчатка | 1 | 94 | 1 ÷ 4 | 1697–2005 г. | $-0,67 \pm 0,02$ |
| Среднее значение | | | | | | $-0,50 \pm 0,10$ |

* 26 (245). Вулканизм и геодинамика. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 46–49.

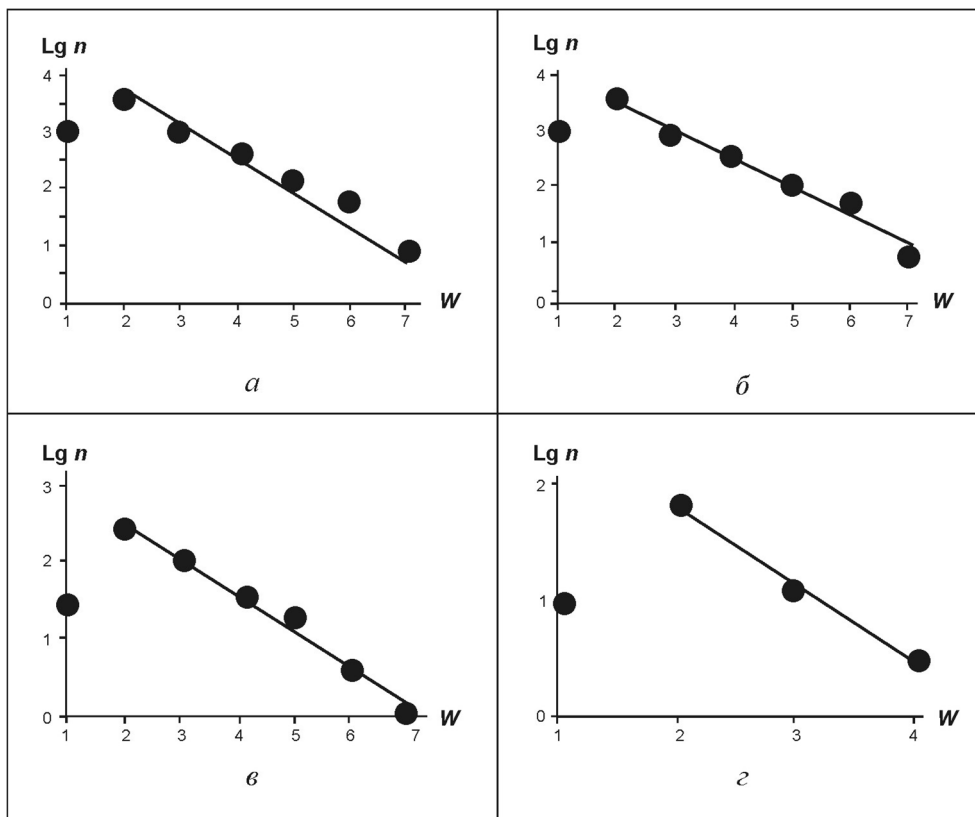


Рис. 1. Графики повторяемости извержений вулканов в 9850 г. до н. э. — 2006 г.:

a — извержения вулканов мира; *б* — извержения вулканов окраины Тихого океана; *в* — извержения вулканов п-ва Камчатки; *г* — извержения вулкана Ключевской (1697–2005 гг.); *n* — число извержений (значения углов наклона графиков повторяемости приведены в табл. 1)

Периодичность вулканического процесса

Методом Фурье исследовалось распределение чисел (*n*) вулканических извержений по временным интервалам между ними. Для мирового каталога (*n* = 6415) были определены периоды 1600 и 2400 лет [Викулин и др., 2007; Акманова, 2008]. Детальный анализ данных на разных масштабных уровнях показал, что значения вулканических периодов заключены в большем диапазоне: 170–2700 лет. При этом наиболее часто выделяются периоды, продолжительности которых составляют: $T_1 = 198 \pm 17$ лет, $T_2 = 376 \pm 12$ лет, $T_2 \approx 2T_1$, $T_3 = 762 \pm 17$ лет, $T_3 \approx 4T_1$. Известны примеры вулканических извержений отдельно взятых вулканов, времена которых близки выявленным периодам. Так, например, с интервалом около $2T_3 = 1402$ лет извергнулся вулкан Кракатау в 416 и 1883 гг. Через такие же интервалы времени извергались вулканы Амбрим в 50 г. и Кувае в 1452 г. ($\Delta T = 1497$ лет), Кагуяк в 415 г. и Новарупта в 1912 г. ($\Delta T = 1497$ лет). Интервал между извержениями вулканов Ксудач в 240 г. и Опала в 610 г. составил 370 лет ($\approx \Delta T_2$).

Миграция вулканических извержений вдоль окраины Тихого океана

Для исследования закономерностей миграции вулканической активности нами были выбраны вулканы с наиболее сильными извержениями ($W \geq 6$, объем выброшенного материала $\geq 1 \text{ км}^3$). Исследование свойств распределения вулканических извержений в пространстве и во времени проводилось на плоскости с осями: по вертикали — расстояние вдоль окраины Тихого океана *L*, по горизонтали — время извержения *t* (рис. 2).

Из данных, представленных на рис. 2, видно, что все вулканические извержения группируются вдоль двух примерно параллельных друг другу достаточно узких областей (I, II), которые определяют скорость миграции 5 ± 2 км/год. Была предпринята попытка выявления

миграции сильных вулканических извержений в пределах окраины Тихого океана с большими скоростями. При этом все извержения ($W \geq 6$, $n = 30$) оказалось возможным разместить вдоль узких, имеющих примерно одинаковый наклон линий, скорости миграции вдоль которых составляют около 60 км/год (табл. 2) [Викулин и др., 2007; Акманова, 2008]. Полученные данные подтверждают сделанный ранее вывод о волновом характере вулканического процесса в пределах окраины Тихого океана [Викулин, 2003, 2008].

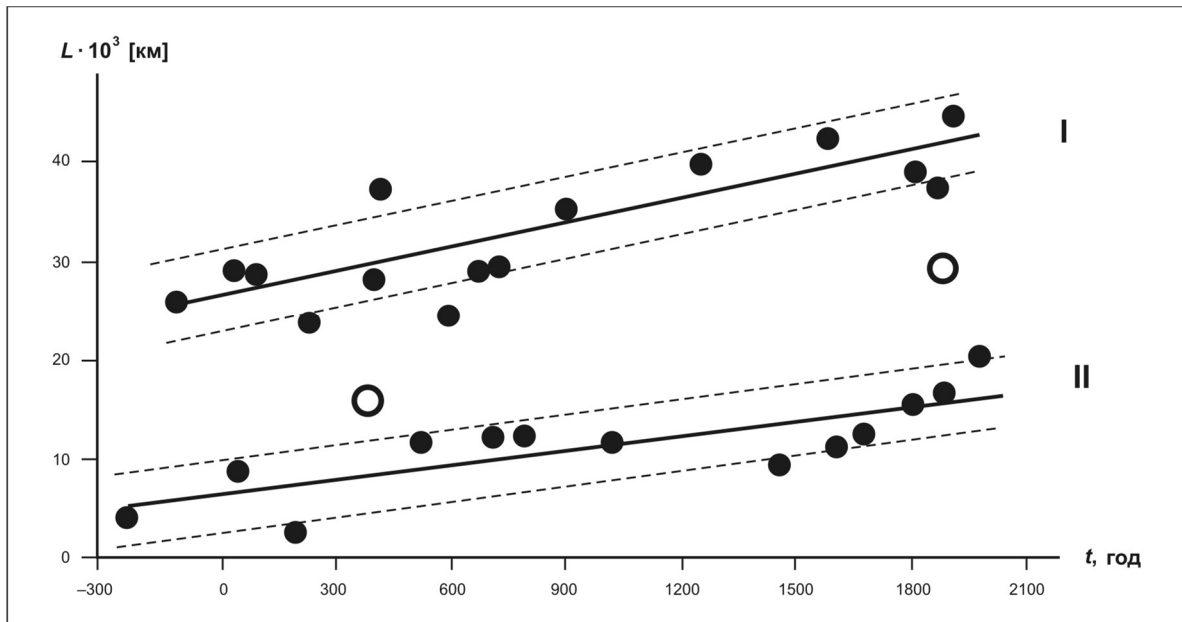


Рис. 2. Пространственно-временное расположение вулканических извержений с $W \geq 6$ ($N = 26$, $n = 30$, $\Delta T = 250$ до н. э. — 1991 г.) вдоль окраины Тихого океана протяженностью $L \approx 45 \cdot 10^3$ км от вулкана Бакл Айленд (Антарктика) до вулкана Десепшен (Южные Шетландские острова)

Таблица 2

Характеристика миграции вулканических извержений в пределах окраины Тихого океана

| p | k | a , км/год | T_a , год |
|---------|-----------|--------------|--------------------------|
| 1 | 4 | 63 ± 24 | 302 |
| 2 | 4 | 61 ± 12 | 375 |
| 3 | 7 | 44 ± 7 | 351 |
| 4 | 3 | 51 ± 8 | 273 |
| 5 | 4 | 50 ± 5 | 418 |
| 6 | 8 | 80 ± 10 | 278 |
| 7 | 6 | 50 ± 40 | |
| Среднее | 5 ± 2 | 57 ± 9 | $T_a \approx 333 \pm 49$ |

Примечание: Символ p — число выявленных миграционных цепочек; k — число извержений в отдельно взятой миграционной цепочке; a — скорость миграции извержений в цепочке; T_a — период следования цепочек друг за другом ($T_a \approx T_2$).

В работах [Викулин, 2003, 2008] приведен обзор мировых данных по повторяемости сильных землетрясений в одном месте через определенные интервалы времени. Для нескольких регионов оказалось возможным определить периоды повторяемости. Например, сильнейшие землетрясения в одном месте происходили в Японии (1498–1944 г.), Перу (1513–1942 г.), Авачинском заливе (1737–1952 г.) — в среднем один раз соответственно в 130 ± 50 лет, 110 ± 50 лет,

107 ± 4 лет. В среднем в пределах окраины Тихого океана повторяемость сильных землетрясений в одном месте можно принять равной 100 ± 50 лет. Фурье-анализ мировой базы данных землетрясений подтвердил такой вывод и показал наличие других периодов, продолжительности которых близки характерным периодам вулканического процесса (в годах): $\frac{1}{2}T_0 = 116 \pm 1$, $\frac{1}{2}T_0 \approx T_1/2$; $T_0 = 195 \pm 6$, $T_0 \approx T_1$; $2T_0 = 388 \pm 4$, $2T_0 \approx T_2$; $4T_0 = 786 \pm 9$, $4T_0 \approx T_3$.

Выводы

Построены графики повторяемости вулканических извержений планеты, которые по своему «энергетическому» содержанию оказались близки графикам повторяемости землетрясений. Характерные продолжительности периодов и их структура сейсмического и вулканического процессов планеты оказались близки. Близкими оказались также характерные особенности миграции сильных землетрясений и катастрофических извержений. Все приведенные данные однозначно свидетельствуют о наличии общих физически прозрачных (волновых) свойств у сеймотектонического и вулканического процессов. Другими словами, волны миграции сейсмической и вулканической активности являются, по сути, разными проявлениями единого геодинамического процесса Земли.

Литература

1. Акманова Д. Р. Особенности вулканической активности окраин Тихого океана за последние 12 тыс. лет // Геофиз. мониторинг и пробл. сейсм. безопасности Дальнего Востока России: тр. регион. науч.-техн. конф., Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. — Т. 2. — С. 151–155.
2. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. — 150 с.
3. Викулин А. В. Физика Земли и геодинамика: учеб. пособие. — Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. — 463 с.
4. Моделирование геодинамических процессов окраины Тихого океана / А. В. Викулин, Г. М. Водинчар, И. В. Мелекесцев [и др.] // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: сб. докл. IV Междунар. конф., Петропавловск-Камчатский, 14–17 августа 2007 г. — Петропавловск-Камчатский: ИКИРР ДВО РАН, 2007. — С. 275–280.
5. Голицын Г. С. Объяснение зависимости частота — объем извержений вулканов // Докл. РАН. — 2003. — Т. 390. — № 3. — С. 394–396.
6. Токарев П. И. Характеристика и повторяемость вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. — 1987. — № 6. — С. 110–118.
7. Токарев П. И. Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в XX в. и ее долгосрочный прогноз // Вулканология и сейсмология. — 1991. — № 6. — С. 52–58.
8. Хаин В. Е., Халилов Э. Н. О возможном влиянии солнечной активности на сейсмическую и вулканическую активность: долгосрочный прогноз // Transactions of the International Academy of Science H & E. — Vol. 3. — Innsbruck: SWB, 2008. — 18 p.
9. Хаин В. Е., Халилов Э. Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической и вулканической активности. — Бургас: SWB, 2007. — 304 с.
10. Sauer J. The westward migration of geophysical events in the Aleutians // Cycles. — 1986. — № 9. — P. 203–204.

ЧАСТЬ IV

ГЕОДИНАМИКА

А. В. Викулин¹, И. В. Мелекесцев²

¹ Камчатская опытно-методическая партия Геофизической службы РАН

² Институт вулканической геохимии и геологии ДВО РАН

СЕЙСМИЧНОСТЬ, ВУЛКАНИЗМ ТИХОГО ОКЕАНА И ВРАЩЕНИЕ ПЛАНЕТЫ*

A. V. Vikulin, I. V. Melekestsev

SEISMICITY, VOLCANISM OF PACIFIC OCEAN AND THE PLANETS' ROTATION

A contemporary geodynamic situation and seismicity of the circum Pacific Ocean are determined by the dynamics of formation and destruction of the gigantic Darwin Uplift (DU) (according to G. U. Menard) at the end of the Cretaceous — beginning of the Pliocene (70–60 mln years) under conditions of the rotating planets. It is supposed that DU is the result of intrusion of the magmatic super-diapir in the lithosphere. In the paper the formation of weakened zones along the Pacific Ocean periphery, the formation of many regional magmatic diapirs and deep-water trenches at the peripheral seas are connected with DU growth and destruction under rotating planets conditions.

Введение

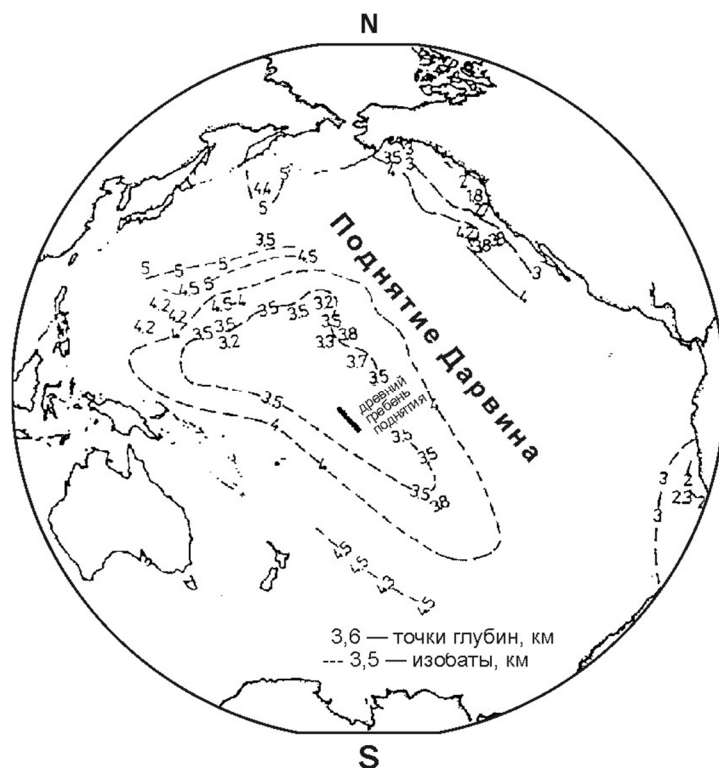
Практически почти все сильнейшие землетрясения, в очагах которых выделяется более 80% всей сейсмической энергии Земли, происходят по окраинам Тихого океана. То же относится и к современному вулканизму: большая часть всех действующих вулканов нашей планеты сосредоточена в пределах акватории Тихого океана и на его периферии — знаменитом Тихоокеанском «огненном кольце». Концентрация процессов такого масштаба в пределах одного даже очень крупного региона, конечно, неслучайна. Между сейсмичностью и вулканизмом, характерными для этой части Земли, несомненно, должна существовать тесная взаимосвязь. Однако модели, в рамках которых такая взаимосвязь устанавливается, пока еще весьма неоднозначны. Поэтому целью настоящей работы является обоснование новой гипотезы, по нашему мнению, лучше объясняющей подобную взаимосвязь. Суть ее состоит в том, что сейсмичность и вулканизм, характерные в кайнозой для акватории и окраин Тихого океана как процессы планетарного масштаба, начались или резко активизировались одновременно, примерно 60–70 млн лет назад, в качестве реакции на существенные изменения режима и скорости вращения Земли, связанные с ростом и разрушением гигантского поднятия Дарвина в центре Тихого океана. Реконструкция поднятия Дарвина представлена на рисунке.

Результаты работы докладывались на 5-й Международной конференции по тектонике плит, проходившей в Москве в ноябре 1995 г. [1]. Настоящая статья является основой представленного там доклада.

Волновая модель сейсмического процесса в пределах окраины Тихого океана

Анализ пространственного, временного и энергетического распределений землетрясений северо-западной окраины Тихого океана показал, что существует класс землетрясений, названных нами сильнейшими, очаги которых взаимодействуют друг с другом. При этом взаимодействие проявляется в виде миграции очагов вдоль окраины Тихого океана. Миграционные цепочки сильнейших землетрясений северо-западной окраины оказалось возможным продлить вдоль всей окраины Тихого океана и проинтерпретировать их феноменологическим путем как волны сейсмической активности, имеющие, по-видимому, геодинамическую природу [2].

* 27 (108). Bulgarian Geophysical Journal. 1997. Vol. XXIII. № 1–2. P. 62–69.



Реконструкция поднятия Дарвина в Тихом океане [5]

Другими словами, было показано, что совокупность окраинных сейсмофокальных тихоокеанских землетрясений, рассматриваемых в пространстве и во времени, может быть описана в рамках единого процесса, названного нами сейсмическим. И такой процесс оказалось возможным представить в рамках волновой модели планетарного масштаба, в которой взаимодействие очагов сильнейших землетрясений, рассматриваемых как элементарные объемы сейсмофокальной зоны, является, по сути, дальнедействующим.

Сейсмичность и вращение планеты

Волновой характер сейсмического процесса позволяет объяснить геометрическую форму островных дуг и дать ответ на вопрос «Когда начался современный сейсмический процесс?» [3, 4].

1. В системе координат с началом в центре Земли миграционная волна сейсмичности, распространяющаяся вдоль окраины Тихого океана, может быть описана в рамках простой модели двух колебательных процессов, протекающих в перпендикулярных направлениях. В такой модели грузик каждого из маятников — очаг сильнейшего землетрясения — подвешен в центре планеты и движется вдоль окраины Тихого океана. Тогда в силу вращения Земли на грузик такого маятника будет действовать сила Кориолиса. Это приведет к тому, что траектория движения грузика-очага будет представлять собою гипоциклоиду — линию, состоящую из следующих друг за другом дуг, расположенных по периферии окраины Тихого океана и выгнутых к его центру. По форме такая модельная траектория движения маятника близка к реальной траектории, по которой «перемещаются» мигрирующие очаги сильнейших землетрясений.

2. Как известно, в принципе возможны два типа движения маятника на вращающемся диске. Первый, как уже отмечалось, — это гипоциклоида, простирающаяся вдоль края диска и никогда не проходящая через его центр. Второй — архимедова спираль с началом в центре диска. Эти предельные типы движений относительно друг друга отличаются лишь начальными условиями. В первом случае вращение диска и колебательный процесс из точки максимальной амплитуды, расположенной на его краю, начинаются одновременно. Во втором случае диск изначально вращается, а маятник в некий нулевой момент выводится из положения равновесия в его центре резким ударом.

Между вращающимся диском и тихоокеанской плитой, движущейся по поверхности вращающейся Земли, существует вполне определенная аналогия. Поэтому можно принять, что из двух возможных путей развития сейсмического процесса в пределах окраины Тихого океана природой реализован первый вариант. Это, на наш взгляд, может указывать на то, что оба наблюдаемых в настоящее время процесса — и режим вращения Земли, и высокая сейсмичность в пределах окраины Тихого океана — начались одновременно.

Как видно, волновой характер сейсмического процесса в пределах окраины Тихого океана и режим вращения планеты оказываются тесно взаимосвязанными.

Таким образом, сейсмологические данные позволяют предположить, что современная сейсмичность в пределах окраины Тихого океана могла возникнуть вследствие геологической катастрофы, сопровождающейся изменением величины угловой скорости вращения Земли.

Поднятие Дарвина как индикатор проявления на поверхности гигантского суперплюма мантийного диапира

Поднятие Дарвина в Тихом океане было впервые выделено Г. У. Менардом [5]. По его данным, это обширное (длина 10 000 км, ширина около 4 000 км) возвышение в центре Тихого океана. Предполагается, что около 100 млн лет назад оно поднималось над окружающим дном не менее чем на 2 км, имело объем более 20 млн км³ и было приурочено к широтному выступу мантии. В ходе формирования и разрушения поднятия обильные излияния лав образовали на океанском дне слой вулканических пород мощностью 2–3 км. Возникновение поднятия Дарвина Г. У. Менард объясняет с помощью конвекционной гипотезы, которая хотя и не является, по его мнению, полностью доказанной, но оказалась просто наиболее приемлемой в то время.

Более молодым аналогом поднятия Дарвина Г. У. Менард считает сходное с ним по масштабам Восточно-Тихоокеанское поднятие, отчетливо выраженное сейчас в рельефе дна Тихого океана. По современным представлениям [6], Восточно-Тихоокеанское поднятие — результат проявления на поверхности Южно-Тихоокеанского суперплюма (мантийного диапира).

Независимо от выбора гипотезы, с которой связывается возникновение такого рода поднятий, важно то, что деформация океанической литосферы с образованием гигантского сводобразного вздутия есть следствие подъема наверх огромных масс сильно нагретого мантийного вещества. Большая часть этого вещества не доходит до поверхности океанического дна, а внедряется в литосферу, что является непосредственной и, вероятно, главной причиной роста подобных поднятий. Еще одним фактором, способствующим росту поднятий, может служить увеличение объема мантийного вещества из-за его нагрева и разуплотнения при подъеме и внедрении.

В условиях быстровращающейся Земли центробежное движение магматического вещества от места его подъема должно было иметь вихревой характер. Поскольку поднятие Дарвина располагалось к северу и к югу от экватора, предполагается, что в его пределах могли возникнуть две гигантских вихревых структуры: в северном полушарии с вращением против часовой стрелки, в южном — по часовой. По закону взаимодействия вихрей оба они перемещались в восточном направлении, в сторону материков Северной и Южной Америки.

Точное время формирования поднятия Дарвина пока не установлено. Можно предполагать только то, что рост поднятия начался с альбского века (по [7]: 113–97,5 млн лет назад), а наиболее интенсивно он протекал в поздне меловую эпоху. Вполне вероятно, что именно рост внутриокеанического поднятия Дарвина послужил причиной одной из наиболее крупных в истории Земли регрессий (изменения уровня Мирового океана), развивавшейся в течение почти всей поздне меловой эпохи. Если это так, то прерывистый ход трансгрессии мог быть связан с пульсационным характером роста поднятия Дарвина.

Разрушение поднятия Дарвина, по-видимому, произошло в конце мелагена — начале палеогена, когда в этой части Тихого океана произошли гигантские по объему базальтовые излияния, а дно океана опустилось на 1–3 км.

Возможные последствия роста и разрушения поднятия Дарвина

Глобальный геодинамический эффект, обусловленный возникновением поднятия Дарвина, кардинально различался в зависимости от стадии его развития.

1. В период роста поднятия Дарвина происходило увеличение эффективного радиуса Земли и, как следствие, замедление скорости ее вращения. Это было результатом образования как самого поднятия Дарвина, относительная высота свода которого над дном Тихого океана составляла 2–3 км, так и связанной с этим обширной морской трансгрессии, когда его рост привел к вытеснению за пределы океанической впадины соответствующего огромного (около 20 млн км³) объема морской воды. Кроме того, в течение всего периода рост поднятия Дарвина привел также к уменьшению скоростей раздвига в существовавших тогда зонах спрединга.

2. Наоборот, разрушение поднятия Дарвина, сопровождавшееся массовыми базальтовыми излияниями на дне океана, оттоком магматического вещества под азиатский и американский материки, а также регрессией моря, привело к уменьшению радиуса Земли и увеличению скорости ее вращения. Преобладавшее на периферии Тихого океана сжатие должно было смениться растяжением. Последнее способствовало возникновению здесь многочисленных зон разломов, по которым на поверхность стали поступать огромные объемы вулканических продуктов. Резко активизировались зоны спрединга. В свою очередь, реакцией на это явилось усиление субдукционных процессов по периметру Тихого океана. Не исключено, что именно в то время зоны субдукции приобрели главные черты своего современного строения. Вместо двух гигантских вихрей в центре Тихого океана возникло множество более мелких вихревых структур на его периферии.

Предполагается, что разрушение поднятия Дарвина в кульминационную фазу носило катастрофический характер. Как и все катастрофы, такой процесс, по-видимому, должен был произойти весьма быстро: в течение отрезка времени продолжительностью порядка 1 млн лет или еще меньше — за сотни тысяч лет. Об этом, в частности, свидетельствует краткость проявления глобальной иридиевой аномалии, которая, возможно, была индикатором [8] пароксизма базальтового вулканизма на границе верхнего мела — палеогена около 65 млн лет назад.

Естественно, что столь катастрофический и кардинальный характер должна была иметь и структурно-тектоническая перестройка всей периферии Тихого океана. Поэтому происходившие там эндогенные процессы (вулканизм, тектонические движения, сейсмичность) тоже носили катастрофический характер. Мы допускаем также, что именно тогда была создана в близком к современному виде единая, но еще более динамичная, чем теперь, переходная зона обрамления Тихого океана, в пределах которой, несмотря на мозаичность и неоднородность ее строения, эндогенные процессы протекают взаимосвязанно, взаимодействуя между собой.

Обсуждение результатов

1. Можно рассчитать влияние роста и разрушения поднятия Дарвина на величину момента инерции планеты и, следовательно, вследствие сохранения момента количества движения земли, на величину угловой скорости ее вращения.

Учитывая приведенные данные, можно показать, что в результате опускания возвышенности с такими размерами на 2–3 км момент инерции планеты уменьшится и на столько же увеличится величина угловой скорости вращения планеты. При этом линейная скорость движения поверхности Земли для низких и умеренных широт по порядку величины увеличится на 0,1–1,0 м/с.

Такое значительное изменение режима вращения планеты, произошедшее в течение достаточно короткого отрезка времени, неизбежно должно было привести к накоплению в ее упругой части — литосфере — значительных напряжений. При этом специфика напряжений, возникающих при неравномерном вращении планеты, заключается в следующем. Поверхность Земли неоднородна. Большое количество слагающих ее относительно однородных блоков сцеплены между собой по разделяющим их границам. Любое изменение режима вращения планеты

должно приводить к тому, что все в первом приближении однородные блоки будут стремиться повернуться относительно друг друга. При этом наибольшей амплитуды такое движение должно было бы достигнуть именно в зоне перехода от Тихого океана к материкам.

Таким образом, мы показали, что в результате опускания поднятия Дарвина на границе Тихого океана имели место условия, необходимые для возникновения здесь уровня сейсмичности даже более высокого, чем современный. Вместе с тем произошло существенное изменение режима вращения планеты.

Разрушение и опускание поднятия Дарвина — это пока самая молодая в истории Земли катастрофа такого масштаба. Следовательно, можно считать, что геологические данные подтверждают сформулированную нами гипотезу.

2. На основе комплекса сейсмологических, геологических, геофизических тектонических и механических данных была предложена модель очага сильнейшего сейсмофокального землетрясения, в основе которой заложены представления о вращающемся сейсмофокальном блоке [9]. Модель позволяет аналитически рассчитать поле упругих напряжений и оценить величины смещения и сбрасываемой упругой энергии, которые хорошо соответствуют экспериментальным данным.

Отличительной особенностью «ротационной» модели является не просто сжатие или растяжение, а их комбинация с вращением сейсмофокального блока. В условиях вращающейся Земли сохранение момента вращения блока обеспечивается появлением поля упругих напряжений, возникающих вокруг очага будущего землетрясения. Именно по этой причине весь комплекс соприкасающихся между собой сейсмофокальных блоков образует единую систему взаимосвязанных блоков, активно взаимодействующих друг с другом, что и объясняет эффект дальнего действия очагов сильнейших землетрясений в пределах окраины Тихого океана.

Более того, в рамках «ротационной» модели сильно взаимодействующих очагов землетрясений относительно просто объясняется генерация собственных колебаний Земли при сильнейших землетрясениях, т. е. перекачка части запасенной в сейсмофокальной зоне упругой энергии в энергию собственных колебаний планеты. Такая перекачка энергии возможна в обе стороны. Это позволяет предположить, что не только геологическая катастрофа, сопровождающаяся достаточно резким изменением скорости вращения Земли, может привести к образованию активного сейсмического пояса (что, как мы полагаем, имело место при разрушении поднятия Дарвина), но и наоборот, достаточно большое количество сильнейших землетрясений, происшедших в течение сравнительно короткого отрезка времени, могут, раскачав планету, привести к геологической катастрофе.

Литература

1. *Vikulin A. V., Melekestev I. V.* Earth rotation, magmatism and seismicity of Pacific rim. // 5th Zonenshain Conference on Plate Tectonics, Moscow, November 22–25, 1995. — М.: IO RAS, 1995. — P. 131–132.
2. *Викулин А. В.* Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–824.
3. *Викулин А. В.* Физика волнового сейсмического процесса // Природа. — 1992. — № 7. — С. 11–12.
4. *Викулин А. В.* Сейсмичность и вращение Земли // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1. — С. 124–130.
5. *Менард Г. У.* Геология дна Тихого океана. — М.: Мир, 1996. — 274 с.
6. *Maryama S., Kumazava M., Kawakami S.* Towards a new paradigm of the Earth's dynamics // J. the Geol. Soc. Japan. — 1994. — Vol. 100. — № 1. — P. 1–3.
7. *Шкала геологического времени* / У. Б. Харланд, А. В. Кокс, П. Г. Левслии [и др.]. — М.: Мир, 1985. — 140 с.
8. *Мелекесцев И. В.* Вулканизм как альтернатива космической катастрофы // Природа. — 1986. — № 1. — С. 65–66.
9. *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Ротационная модель сейсмического процесса в пределах окраины Тихого океана // Закономерности строения и эволюции геосфер. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 1994. — С. 49–50.

А. В. Викулин¹, В. Г. Быков², М. Н. Лунева²

¹ Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН

² Институт тектоники и геофизики ДВО РАН

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ В РОТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА*

A mathematical model has been considered of the deformation wave propagation in a block chain of the lithosphere allowing for inhomogeneity of the block rotation and the friction on their boundaries. The results of the numerical calculation of the wave propagation velocity and the medium deformation rate have been presented.

Гипотеза о существовании глобальных деформационных волн и их связи с сейсмичностью основывается главным образом на результатах исследований пространственно-временного распределения очагов землетрясений. Количественно это выражается в миграции эпицентров землетрясений со скоростями 10–100 км/год, зафиксированными в различных регионах Земли [1–3]. Поиск причин возникновения и распространения волн деформации (или тектонических волн) привел к построению модели диффузии напряжений в литосфере, подстилаемой вязкоупругой астеносферой [4, 5]. Дополнение этого механизма эффектом изгиба литосферной плиты [6] позволило описать незатухающие в течение длительного времени волны тектонических напряжений, являющиеся триггером землетрясений. Автоволновой режим генерирования таких волн осуществляется за счет поступления энергии из астеносферного потока.

Модель, в которой источник энергии волн деформации имеет планетарную природу, т. е. связан непосредственно с вращением Земли вокруг собственной оси, предложена в работе [7]. Предполагается, что деформация земной коры осуществляется без нарушения сплошности среды при повороте сейсмофокальных блоков относительно друг друга.

В настоящей работе представлено дальнейшее развитие математических аспектов ротационной модели [7] с учетом неоднородности вращения блоков (микрофлуктуации вращения) и трения на границах соседних блоков, а также описание возникающих при этом эффектов.

Математическая модель

В работе [7] предложена ротационная модель сейсмического процесса, основой которой является представление о связанном с вращением Земли повороте сейсмофокального блока, сопровождающемся формированием волн деформации в виде кинка. Уравнение движения сейсмофокального блока сводилось к известному уравнению синус-Гордона [7]

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = k_0^2 \sin \theta, \quad (1)$$

$$\theta = \frac{\beta}{2}, \quad k_0^2 = \frac{3\pi\Omega}{WV} \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{4/3} \left(\frac{\rho G}{15} \right)^{1/2}, \quad \frac{1}{c_0^2} = \frac{I}{WV},$$

где β — угол поворота блока; Ω — угловая скорость вращения Земли; ρ , G — плотность и модуль сдвига материала блока;

$$I = \frac{8}{15} \pi \rho R_0^5, \quad V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{R_0}{2} \right), \quad R_0 —$$

соответственно момент инерции, объем и размер блока; W — средняя линейная плотность упругой энергии цепочки блоков; z — направление вдоль цепочки блоков; t — время. При переходе к независимым координатам $\zeta = k_0 z$, $\eta = c_0 k_0 t$ из формулы (1) следует стандартный вид уравнения синус-Гордона

* 28 (146). Вычислительные технологии. 2000. Т. 5. № 1. С. 31–39.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta, \quad (2)$$

решением которого является функция

$$\theta = 4 \operatorname{arctg} \left[\exp \left(\frac{X - u \eta}{(1 - u^2)^{1/2}} \right) \right], \quad (3)$$

$$X = \zeta - \zeta_0, \quad u = U/c_0, \quad c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \Omega R_0,$$

где U — скорость распространения уединенной волны деформации (поворота).

В ротационной модели сейсмического процесса предельная волновая скорость распространения поворотных колебаний c_0 при характерных параметрах земной коры и размерах блоков R_0 имеет величину порядка $10\text{--}10^2$ м/с. При фиксированных физических параметрах (G, ρ, R_0) блока земной коры c_0 зависит только от угловой скорости вращения Земли, т. е. причиной возникновения данного типа волн деформации на самом деле является вращение Земли. Волновая скорость c_0 может быть также определена как среднее геометрическое скоростей поперечной сейсмической волны v_s , возникающей при повороте блока, и приведенной линейной скорости блока v_{LB} относительно оси вращения Земли $c_0 \sim \sqrt{v_s v_{LB}}$, где $v_s = \sqrt{G/\rho}$, $v_{LB} = q R_0 \Omega$, $0 \leq q \leq R_3 / R_0 \approx 10^2$, где R_3 — радиус Земли.

Физически более информативной для описания деформационного процесса является не величина угла поворота блока (3), а ее производная по времени, т. е. скорость поворотного деформирования, определяемая как

$$\dot{\epsilon} = \frac{\partial \beta}{\partial t} = \frac{8 c_0 k_0 u}{\sqrt{1 - u^2}} \operatorname{sech} \left(\frac{X - u \eta}{(1 - u^2)^{1/2}} \right),$$

или

$$\dot{\epsilon} = 20\sqrt{\Omega} \sqrt{\frac{\sqrt{G/\rho}}{R_0}} \frac{u}{\sqrt{1 - u^2}} \operatorname{sech} \left(\frac{X - u \eta}{(1 - u^2)^{1/2}} \right). \quad (4)$$

Скорость поворотного деформирования есть функция угловой скорости вращения Земли и скорости распространения волны поворота, которая представляет собой уединенную поперечную волну, поляризованную перпендикулярно к направлению распространения.

В модели движения среды, описываемой уравнением (2), блоки равномерно поворачиваются относительно друг друга и скорость распространения волны вдоль цепочки постоянна во времени. Для описания более реальной ситуации дополним данную модель эффектами микрофлуктуаций вращения блока и трения на границах блоков.

Неоднородность вращения блока характеризуется величиной отклонения вектора момента сил от равновесного положения и формально может быть представлена как $\mu \sin \theta$. Сила трения при относительном смещении блоков, как и в большинстве моделей неустойчивого скольжения в разломах, принимается пропорциональной скорости $\delta \theta / \delta \eta$. Поэтому динамику уединенной поворотной волны деформации при фиксированных значениях коэффициента трения α и неоднородности вращения μ будем моделировать возмущенным уравнением синус-Гордона

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta + \alpha \frac{\partial \theta}{\partial \eta} + \mu \sin \theta, \quad (5)$$

которое в отличие от уравнения (2) аналитического решения не имеет. В уравнении (5) скорость U распространения уединенной волны уже не является величиной постоянной, а зависит от вариации угловой скорости Ω вращения Земли, коэффициентов трения и неоднородности вращения.

Метод расчета

Расчеты по уравнению (5) осуществлялись методом возмущений МакЛафлина — Скотта [8], суть которого заключается в том, что при использовании функции Грина решение возмущенного уравнения синус-Гордона структурно совпадает с функцией (3), но координата и скорость u зависят от времени и определяются соотношениями

$$X = 0 \int_0^t u(t') dt' + x_0(t), \quad \frac{dX}{dt} = u(t) + \frac{dx_0(t)}{dt}. \quad (6)$$

Подстановка формул (3), (6) в уравнение (5) даст систему уравнений [8]:

$$\frac{du}{d\eta} = -\alpha u(1-u^2) + \frac{\mu}{2}(1-u^2) \operatorname{sech}^2 \left(\frac{X}{(1-u^2)^{1/2}} \right) \operatorname{th} \left(\frac{X}{(1-u^2)^{1/2}} \right), \quad (7)$$

$$\frac{dX}{d\eta} = u - \frac{\mu}{2} u X \operatorname{sech}^2 \left(\frac{X}{(1-u^2)^{1/2}} \right) \operatorname{th} \left(\frac{X}{(1-u^2)^{1/2}} \right). \quad (8)$$

Безразмерные координаты X и скорости u рассчитывались по уравнениям (7–8) методом Рунге — Кутты, а затем подставлялись в формулу (4).

Начальные условия $\eta_0 = 0$, $X_0 = 0$, $u_0 = 10^{-10}$ задавались таким образом, чтобы скорость деформирования $\dot{\epsilon}$ в момент $t = 0$ не превышала 10^{-13} с^{-1} , что соответствует средней скорости деформации в сейсмоактивных областях [9] и заметно отличается от глобальной средней скорости деформации (вращения отдельных блоков) в различных регионах Земли, оцениваемой величиной $5,5 \cdot 10^{-16} \text{ с}^{-1}$ (1–2 град/млн лет) [10]. Скорость распространения уединенной поворотной волны $U = uc_0$, скорость деформации $\dot{\epsilon}$ и расстояние Z были вычислены при использовании характерных для земной коры физических параметров: $\rho = 3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $G = 5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $R_0 \cong 10^5 \text{ м}$, $\Omega = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Необходимо отметить, что максимальное значение U не зависит от значения начальной скорости u_0 , но с увеличением u_0 максимальное значение U достигается при меньших значениях времени. Величина коэффициента трения α изменялась в пределах 0,4–0,8, соответствующих реальным разломам [11], а величина коэффициента неоднородности μ — в пределах 10^{-4} – 10^{-2} . Результаты расчетов характеристик деформационного процесса представлены на рис. 1, 2.

Численные примеры и интерпретация

График движения волны деформации имеет характерный вид. В начальный момент происходит быстрое продвижение, затем процесс замедляется, идет плавное увеличение расстояния Z . В соответствии с этим скорость распространения волны резко увеличивается в начальный интервал времени, достигая своего максимального значения (пика), а затем плавно уменьшается, приближаясь к асимптоте. Начиная с некоторого времени волна деформации входит в стационарный режим, в котором волновые характеристики практически не изменяются.

Время, необходимое для достижения максимальной скорости распространения волны, пропорционально коэффициенту трения и в зависимости от параметра неоднородности составляет 4–752 суток. Причем максимальное значение скорости волны деформации с увеличением параметра неоднородности возрастает по нелинейному закону (рис. 3). Например, при $\alpha = 0,6$, $\mu = 0,0005$ кривая скорости имеет ярко выраженный пик $U = 10^{-2} \text{ м/с}$ (примерно 300 км/год), который приходится на момент времени $t = 150$ суток, а затем скорость медленно выходит на квазистационарный режим, принимая значение $3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ (примерно 10 км/год) при $t = 2$ года (см. рис. 2, I, б). При этом возмущение перемещается на расстояние около 100 км. Из многочисленных наблюдений известно [1, 3, 12], что скорость деформационных волн или миграции очагов землетрясений меняется в значительных пределах 10– 10^4 км/год. Результаты вычислений входят в этот интервал.

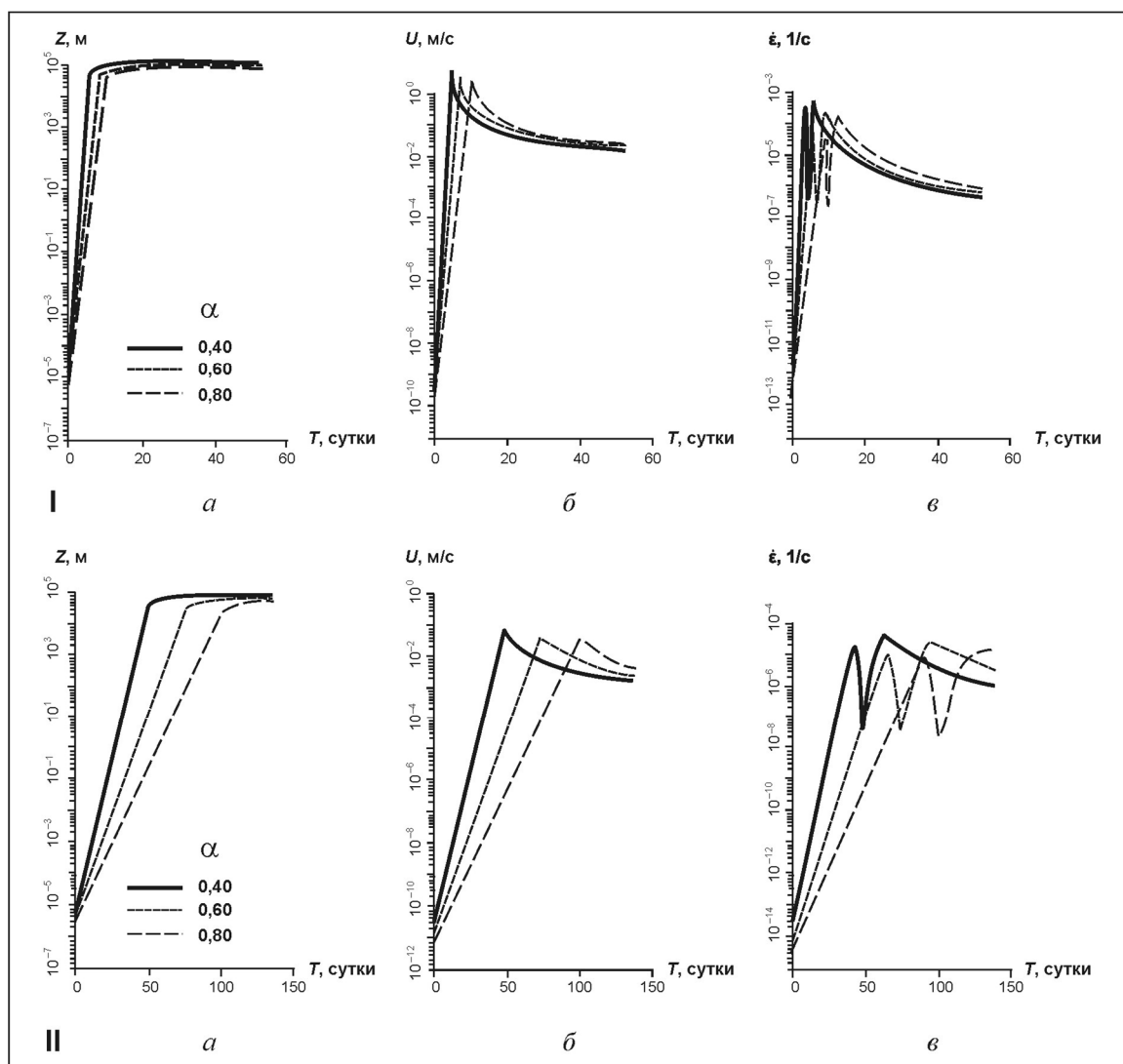


Рис. 1. Зависимость временного изменения расстояния Z , пройденного волной (а), скорости распространения волны U (б) и скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ (в) от коэффициентов трения α при $\mu = 0,01$ (I) и $\mu = 0,001$ (II)

График изменения скорости деформации со временем (см. рис. 1, I, в; II, в; 2, I, в; 2, II, в) имеет вид двух связанных «горбов», положение которых во времени соответствует области максимальных значений скорости распространения волны поворота. Причем амплитуда опережающего пика $\dot{\epsilon}$ в 2–2,5 раза меньше амплитуды последующего. Физически это, по-видимому, означает, что при максимальных значениях скорости поворотной волны среда либо не успевает реагировать на возмущение, вносимое волной, и скорость деформации резко падает, либо происходит разрушение среды. Затем амплитуда $\dot{\epsilon}$ вновь возрастает и имеет второй максимум, превышающий первый и в зависимости от значений μ и α отстающий по времени от U_{\max} на 2–220 суток (см. рис. 1, 2). Из опытов по деформированию образцов горных пород [13] следует, что «пикообразные выбросы скорости деформаций соответствуют ускорению деформации» и сбросу нагрузки, т. е. локализации неустойчивой деформации (рис. 4).

Рассмотрим более детально ситуацию, представленную на рис. 1, II. Начиная с момента $t = 44$ суток дальнейшее увеличение скорости поворотной волны (см. рис. 1, II, б) сопровождается падением скорости деформации до минимума при $t = 50$ суток, что означает неустойчивость процесса. После этого временной ход скорости деформации повторяется, и к $t = 65$ суток $\dot{\epsilon}$ принимает максимальное значение. Временной интервал между двумя «горбами» составляет около 20 суток. Величина U , наоборот, при $t = 50$ суток принимает максимальное значение, а затем начинает уменьшаться, т. е. фиксируется начало торможения уединенной волны поворота.

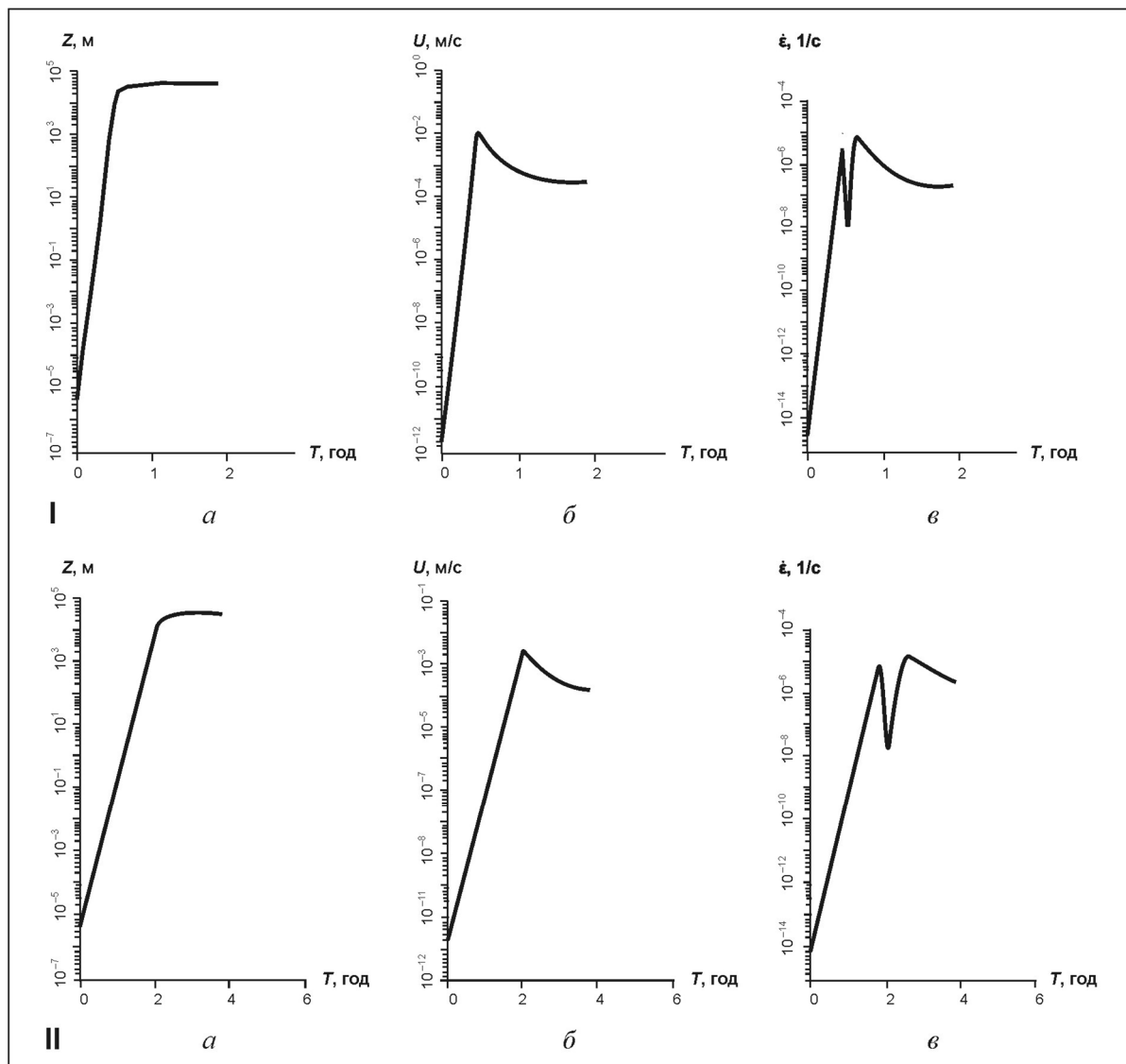


Рис. 2. Зависимость временного изменения расстояния Z , пройденного волной (a), скорости распространения волны U (b) и скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ ($в$) при $\alpha = 0,6$, $\mu = 0,0005$ (I) и $\mu = 0,0001$ (II)

Расчетные значения максимумов скорости деформации составляют $(0,02-3,1) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ и согласуются с наблюдениями перед сильными землетрясениями [14]. Минимальные значения кривых $\dot{\epsilon}$ фиксируются на уровне значений $10^{-9}-10^{-7} \text{ с}^{-1}$, при которых изменение скорости деформирования практически не влияет на прочность горных пород. Временной интервал Δt между двумя «горбами» в зависимости от α и μ составляет от 3 до 310 суток (рис. 5). Можно предположить, что именно величина скорости деформации $\dot{\epsilon}$ является в данной модели критерием разрушения и может быть интерпретирована как разрыв сплошности земной коры.

Увеличение коэффициента неоднородности μ вызывает уменьшение промежутка времени между максимумами кривой $\dot{\epsilon}(t)$, соответствующими локализованной деформации (рис. 5, a) и росту скорости деформирования. Ослабление величины начальной флуктуации вращения блока (уменьшение μ) приводит к значительному замедлению развития сейсмического процесса во времени при фиксированном значении коэффициента трения (см. рис. 5, a). Скорость распространения поворотной волны связана с величиной μ — амплитудой флуктуации вращения блока (см. рис. 5), что и подтверждает нелинейность процесса. При более прочном зацеплении границ взаимодействующих блоков, т. е. при увеличении коэффициента трения α , для получения максимально возможной скорости деформации требуется существенно больший интервал времени (рис. 5, b).

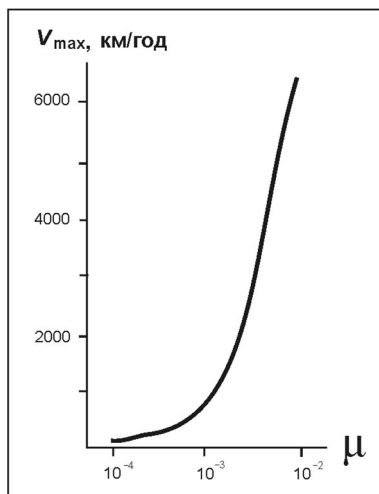


Рис. 3. Зависимость максимальной скорости поворотной волны от коэффициента неоднородности μ при $\alpha = 0,6$

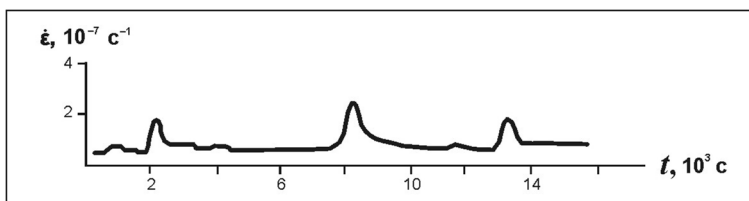


Рис. 4. Изменение во времени скорости локальной деформации в зоне формирования макроразрыва в образце горной породы [8]

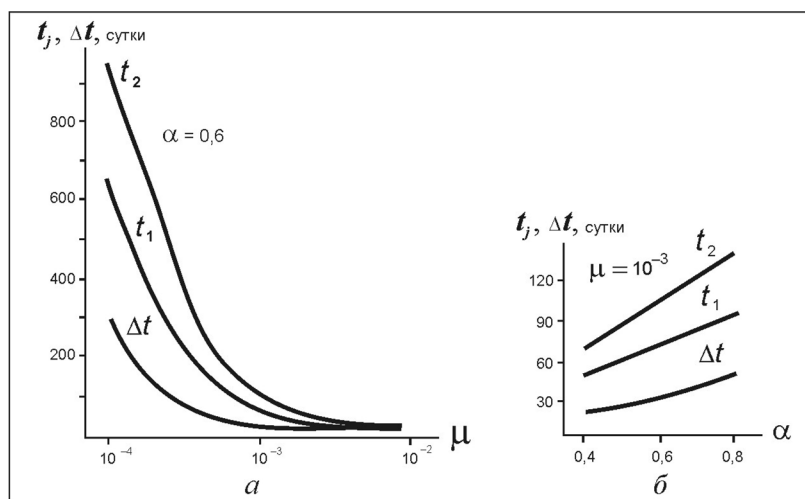


Рис. 5. Зависимость времени максимумов скорости деформирования (t_1, t_2) и временного интервала между ними (Δt) от коэффициентов неоднородности (a) и трения (b)

Таким образом, в статье предложена математическая модель взаимодействия в цепочке блоков с учетом трения на границах блоков и флуктуации оси вращения блока относительно равновесного положения. Численное моделирование характеристик нелинейных волн деформации, образующихся в результате взаимодействия блоков, при различных значениях коэффициента трения и параметра неоднородности позволяет сделать следующие выводы:

1. Значения скорости распространения волны деформации согласуются с экспериментальными данными о скоростях миграции очагов землетрясений. Скорость распространения волны при заданных параметрах трения и неоднородности вращения блока изменяется в области ее максимальных значений в пределах $30-6 \cdot 10^3$ км/год, а в стационарной области на больших временах — в пределах 3–60 км/год.

2. Полученные оценки предельных значений скорости деформирования среды $(0,02-3) \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ согласуются с экспериментальными данными по измерению деформации в областях перед сильными землетрясениями. В стационарном режиме значения скорости деформирования лежат в пределах $10^{-8}-10^{-6} \text{ с}^{-1}$.

3. Наблюдается общая тенденция увеличения значений скорости распространения волны поворота и скорости деформирования среды с увеличением значений коэффициента трения на границе блоков и степени неоднородности вращения блока.

4. Время нарастания скорости распространения волны деформации и положение максимумов скорости деформирования во времени изменяются от нескольких дней до нескольких месяцев и лет в зависимости от значений коэффициентов трения и неоднородности вращения. С увеличением значения коэффициента трения время выхода в стационарный режим увеличивается, а с увеличением значения параметра неоднородности, наоборот, уменьшается.

Литература

1. *Mogi K.* Migration of seismic activity // Bull. of Earthquake Research Institute. — 1968. — № 46. — С. 53–74.
2. *Касахара К.* Механика землетрясений. — М.: Мир, 1985. — 264 с.
3. *Кузнецов И. В., Кейлис-Борок В. И.* Взаимосвязь землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса // Докл. РАН. — 1997. — № 3. — С. 389–393.
4. *Elsasser W. H.* Convection and stress propagation in the upper mantle // In “Appl. of Modern Phys. to Earth and Planet Interior”. — Wiley: NY, 1969. — С. 223–246.
5. *Райс Дж.* Механика очага землетрясения. — М.: Мир, 1982. — 217 с.
6. *Николаевский В. Н.* Механика геоматериалов и землетрясения // Механика деформируемого тела. Т. 15. — М.: ВИНТИ, 1983. — С. 149–230.
7. *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Модель сейсмического процесса // Вычислительные технологии. — 1997. — № 2. — С. 20–25.
8. *Perturbation theories for sine-Gordon solution dynamics / M. Salerno, M. P. Soerensen, O. Skovgaard, P. L. Christiansen // Wave Motion. — 1983. — № 1. — С. 49–58.*
9. *Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М.* Основы геомеханики. — М.: Недра, 1986.
10. *England P., Molnar P.* The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults // Geophys. J. Int. — 1997. — № 3. — С. 551–582.
11. *Nur A., Ron H., Scotti O.* Fault mechanics and kinematics of block rotations // Geology. — 1986. — № 14. — С. 746–749.
12. *Николаевский В. Н.* Геомеханика и флюидодинамика. — М.: Недра, 1996. — 447 с.
13. *Соболев Г. А.* Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука, 1993. — 313 с.
14. *Долгосрочные предвестники серии сильных землетрясений / В. К. Кулагин, А. С. Маламуд, В. И. Старков, М. В. Кулагина // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1980. — № 9. — С. 110–117.*

А. В. Викулин¹, А. Н. Кролевец²

¹ Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН

² Камчатский государственный педагогический университет

ЧАНДЛЕРОВСКОЕ КОЛЕБАНИЕ ПОЛЮСА И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС*

Статья опубликована в разделе «Дискуссия»

В работе в рамках ротационной модели сейсмического процесса исследуется природа взаимосвязи сильных землетрясений с прецессией полюса планеты. Получены следующие результаты: 1) прецессия полюса планеты вызывается «нулевыми» колебаниями, генерируемыми сейсмотектоническим процессом в пределах верхней части литосферы; 2) чандлеровская частота «расщепляется» на две $f_{ch1} = 0,835 \text{ год}^{-1}$ и $f_{ch2} = 0,860 \text{ год}^{-1}$, что определяется различием значений нулевых частот для меридионально (Тихоокеанского) и широтно (Альпийско-Гималайского) ориентированных сейсмических поясов; 3) распределение значений радиусов траекторий движения полюса по их числу имеет регулярную составляющую $0,05$, что в пересчете на энергию нутации по порядку величины равно сейсмотектонической энергии, сбрасываемой в очагах сильнейших землетрясений. Формулируется гипотеза, согласно которой взаимосвязь солнечной активности с сейсмотектоническим процессом обеспечивается взаимодействием годовой компоненты прецессии полюса с чандлеровскими частотами f_{ch1} и f_{ch2} .

Ключевые слова: прецессия, нутация, чандлеровское колебание полюса, сейсмический процесс, тектонический процесс, квант сейсмотектонической активности

A.V. Vikulin, A.N. Krolevets

CHANDLER WOBBLE AND SEISMOTECTONIC PROCESS

Investigation of relationship between strong earthquakes and the planetary precession within the limits of the rotational earthquake model yielded the following results: (1) The planetary precession is caused by zero oscillations generated by the seismotectonic process in the upper lithosphere. (2) Chandler's frequency splits into $f_{ch1} = 0,835 \text{ year}^{-1}$ and $f_{ch2} = 0,860 \text{ year}^{-1}$, as the values of zero frequencies for the N-S (Pacific) and W-E (Alps — Himalayas) oriented seismic belts are different. (3) The distribution of radius values of pole paths according to their number has a regular component $0,05$, which is equal to the seismotectonic energy released in the foci of strongest earthquakes. The relation between the solar activity and the seismotectonic is hypothesized to be the result of interconnection between the yearly precession component and two Chandler's frequencies.

Key words: recession, nutation, Chandler wobble, seismic process, tectonic process, quantum of seismotectonic activity

Введение

Земля испытывает свободную нутацию. В геофизической литературе ее обычно называют свободной нутацией Эйлера или, по имени ее первооткрывателя в 1891 г., «чандлеровское колебание полюса». Такие колебания возникают вследствие того, что ось вращения Земли слегка наклонена к оси наибольшего момента инерции. Полный момент количества движения планеты остается постоянным и по величине, и по направлению, а Земля движется так, что полюс описывает на ее поверхности траекторию, названную полодией. За достаточно продолжительное время траектория — полодия располагается в пределах площадки примерно круговой формы, с центром в точке пересечения оси наибольшего момента инерции с поверхностью Земли. Ось вращения Земли практически фиксирована в пространстве и чандлеровское колебание полюса выражается в периодических вариациях широты с периодом 430–435 суток и переменной амплитудой, составляющей в среднем $0,14$ [1]. Прецессия полюса происходит в сторону, обратную вращению Земли.

* 29 (151). Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 6. С. 996–1009.

Согласно работе [1] существуют два вопроса, по которым исследователи к настоящему времени не пришли к полному согласию: какова ширина чандлеровской полосы и существует ли вековое изменение средней широты? В свете последних данных [2] вторую проблему можно считать решенной: вековое изменение средней широты происходит со скоростью около $0'',003$ в год в направлении $70-80^\circ W$.

Дискуссионной является и сама проблема возбуждения и затухания чандлеровского колебания полюса. Большинство исследователей считают, что требуемая добротность таких колебаний может быть обеспечена за счет процессов, протекающих в ядре и мантии [1, 3]. Согласно работам [3–5] данные по чандлеровским колебаниям подтверждают и уточняют модель Земли с жидким ядром. В работе [6] показывается, что энергетика чандлеровских колебаний может быть объяснена движениями твердого ядра Земли, вызываемыми возмущениями в системе Солнце — Земля — Луна. Однако обосновать конкретный механизм, использующий взаимосвязь такого рода, будет достаточно сложно по «частотным» соображениям: величина периода такого движения ядра на несколько порядков превышает период чандлеровских колебаний. Некоторые исследователи полагают, что эта проблема не может быть решена за счет процессов, протекающих в мантии [7], атмосфере [8] и магнитосфере [9]. Более того, согласно работе [9] механизм возбуждения и затухания колебаний полюса до сих пор остается невыясненным. По-видимому, по этой причине в литературе, насколько нам известно, не обсуждался вопрос о взаимосвязи нутации полюса с другими собственными колебаниями планеты.

Пожалуй, у большинства исследователей не вызывает сомнения положение о том, что чандлеровские колебания «определяются внутренним (по отношению к Земле. — **А.В., А.К.**) перераспределением момента количества движения; внешние воздействия несущественны» [9, с. 51].

В качестве основы одной из возможных моделей, с помощью которой можно было бы объяснить возбуждение чандлеровских колебаний, как и других собственных колебаний планеты, неоднократно предлагалось использовать процессы в очагах сильных землетрясений [1, 9]. По-видимому, априори предполагая существование взаимосвязи между этими планетарными явлениями, в атласе [10] на графическом представлении временных рядов вариаций параметров вращения Земли представлены и сильные сейсмические события.

Согласно данным работ [1, 9–11] в настоящее время вопрос о существовании взаимосвязи между сейсмичностью и чандлеровским колебанием полюса Земли также можно считать дискуссионным. Действительно, с одной стороны, гипотезы о существовании взаимосвязи между такими планетарными процессами в течение последних десятилетий неоднократно предлагались различными исследователями. Однако последующие исследования и расчеты, выполненные в рамках известных модельных представлений, их не подтверждали [1, 9]. С другой стороны, анализ, проведенный в работе [11], позволил авторам сделать предположение о возможности синхронизации вариаций с 10-летним периодом в геодинамических и гелиофизических процессах. Согласно введению к атласу [10] имеет место «короткоинтервальная корреляция землетрясений с опережающими их девиациями показателей вращения» планеты при «триггерной модели взаимосвязи сейсмических событий с ротационными процессами».

На наш взгляд, такой, на первый взгляд, противоречивый ход событий может являться следствием того, что имеет место дефицит механических моделей, описывающих сейсмичность как динамический процесс планетарного масштаба. Под сейсмическим процессом мы понимаем совокупность взаимодействующих очагов землетрясений, рассматриваемых в пространстве и во времени [12].

Следует отметить, что в науках о Земле проблема чандлеровских колебаний, как и проблема вращения Земли вообще, является не просто важной, но и фундаментальной. По мнению некоторых авторов, «...разнообразие предмета чудовищно. Он затрагивает все разделы геофизики» [1, с. 10]. В частности, исследуя чандлеровские колебания и возбуждающие их механизмы, можно уточнять геофизические параметры процессов, протекающих в пределах как всей Земли, так и отдельно взятых ее частей. Кроме того, проблема чандлеровских колебаний, по мнению Ю. Н. Авсюка, является весьма поучительной и с точки зрения корректности ведения научной дискуссии, имевшей место на рубеже XIX–XX вв. и в последующие годы в науках о Земле [13].

В последние годы нами разработана ротационная модель сейсмического процесса [12, 14]. В рамках такой модели сейсмофокальный объем, протягивающийся вдоль окраины Тихого океана, которая является самым сейсмически активным в XX столетии поясом планеты, имеет широкий спектр собственных колебаний [15, 16]. В настоящей работе показывается, что определенный частотный диапазон этого спектра приходится на чандлеровские колебания, которые, таким образом, вызываются изменением формы Земли вследствие тектонического процесса, протекающего в пределах сейсмически активных поясов планеты [17].

Характеристика исходного материала

Экспериментальные определения положения полюса планеты начались в 1846 г. Все накопленные включительно до 1989 г. данные содержатся в двух обстоятельных монографиях [10, 18]. Эти данные представлены мгновенными значениями координат оси вращения планеты.

В работе [18] представлены данные с 1846 по 1969 гг. Информация за 1846–1889 гг. с дискретностью 0,1 года получена по наблюдениям на трех обсерваториях (Пулково, Гринвич, Вашингтон) и имеет точность данных $0'',08-0'',09$. Точность данных за 1890–1969 гг. по данным пяти станций Международной службы широты с дискретностью 0,05 года не лучше $0'',03-0'',04$ [19]. Данные в работе [18] представлены за весь период наблюдений в единой системе среднего полюса эпохи.

В атласе [10] представлены данные за 1897–1989 гг., как и в монографии [18], с дискретностью 0,05 года. Их точность в периоды 1962–1979 гг., 1980–1983 гг., 1984 г. и в последующие годы составляет $0'',010-0'',015$, около $0'',001$ и лучше $0'',0002$ [19]. Однако в отличие от работы [18] данные в атласе за разные интервалы наблюдений представлены в разных системах координат. Для совмещения этих систем начиная с 1903 г. необходимо использовать поправки, величины которых для разных лет различны [10].

Приведенный обзор показывает, что наиболее однородным материалом, который в течение продолжительного отрезка времени характеризует движение полюса в единой системе координат, являются данные за 1890–1969 гг., приведенные в работе [18]. Данные за этот период наблюдений в основном и использовались нами в настоящей работе. Они представлены 1581 парой значений мгновенных координат оси вращения Земли. Существует более современная переработка результатов наблюдений широт на станциях Международной службы широты (см., например, [20]). Однако в рамках нашей работы различие между данными в работах [18] и [20] несущественно.

Данные за 1890–1969 гг. приведены на рис. 1, *a*, где ось *OX* направлена по Гринвичскому меридиану, ось *OY* — в восточном направлении. Начало системы координат (*O*) расположено в точке, соответствующей положению среднего полюса в течение всей эпохи наблюдений. Данные за короткие отрезки времени, демонстрирующие основные виды траекторий движения полюса, приведены на рис. 1, *б*, *в*, *г*. Видно, что практически в течение всего исследуемого периода наблюдений движение полюса происходит вдоль достаточно гладких траекторий, имеющих формы «раскручивающихся» или «закручивающихся» окружностей, эллипсов или овалов в сторону, обратную вращению Земли (рис. 1 *a*, *г*). Такое направление, вслед за авторами работы [1], будем считать положительным, движение в обратном направлении — отрицательным. В течение некоторых достаточно непродолжительных отрезков времени траектория движения полюса планеты имеет «изломы» (рис. 1, *в*) или даже направлена в отрицательном направлении (рис. 1, *б*). Более подробно динамику изменения траекторий движения полюса планеты можно проследить, например, с помощью графического материала в работе [10], представленного данными, охватывающими последовательные 1–2-летние интервалы наблюдений.

Из данных, приведенных в работах [10, 18], можно видеть, что все траектории движения полюса в 1890–1989 гг. заключены в пределах круговой площадки с радиусом, который можно считать максимальным значением амплитуды колебаний полюса планеты в течение всего периода наблюдений в 1846–1989 гг.: $\Delta\alpha_{ch, \max} \approx 0'',40 \approx 12,3 \text{ м} \approx 2 \times 10^{-6} \text{ рад}$. При этом, как уже отмечалось, долговременное среднее значение амплитуды колебаний полюса планеты (чандлеровских колебаний полюса) $\Delta\alpha_{ch, \text{cp}} \approx 0'',14 \approx 4,3 \text{ м} \approx 7 \times 10^{-7} \text{ рад}$.

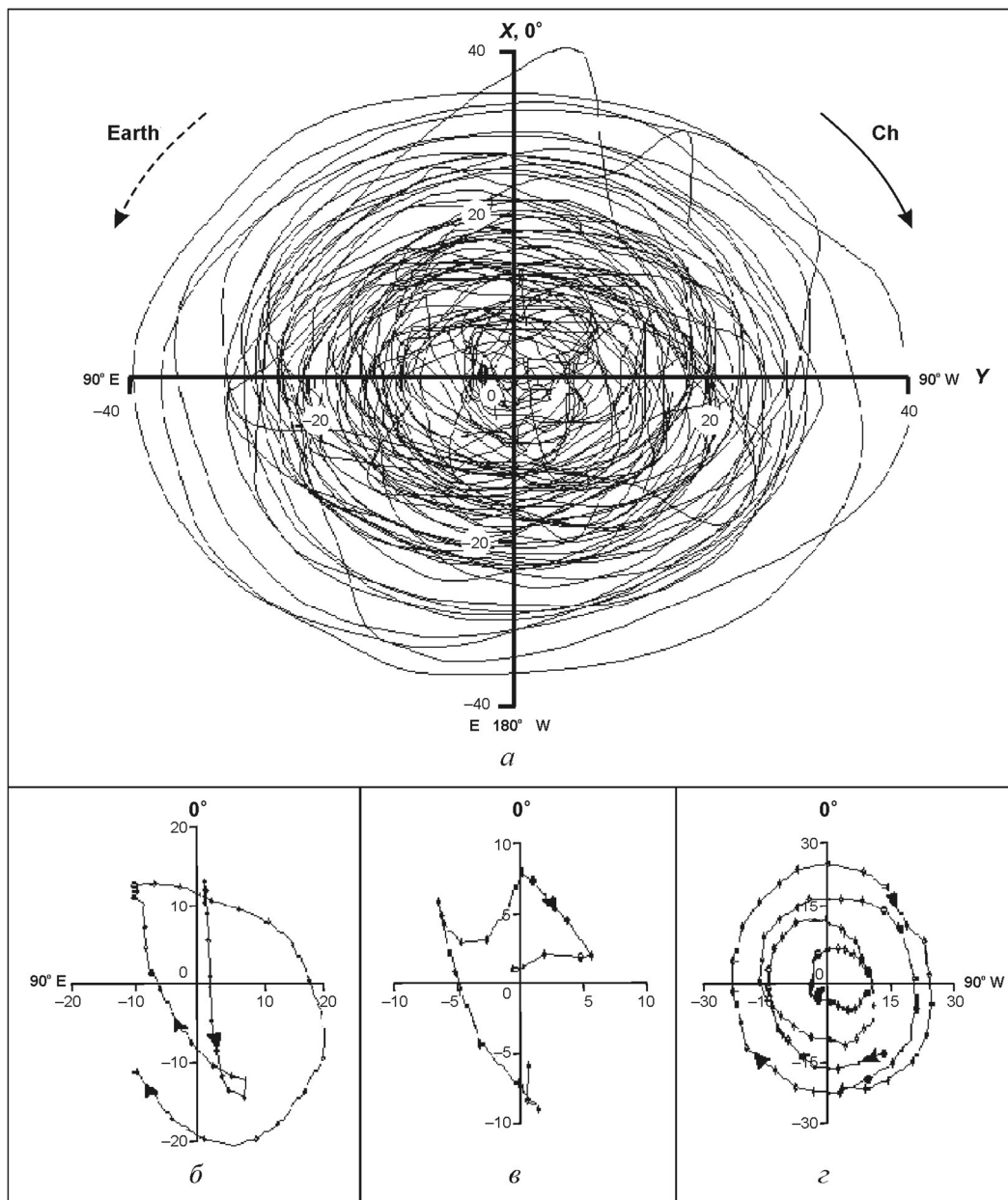


Рис. 1. Траектории нутации полюса планеты, построенные по данным работы [21] в течение 1890–1969 гг. (а) и периодов 1895–1896 гг. (б), 1926 г. (в) и 1960–1964 гг. (г)

Значение амплитуды колебаний приведено в сотых долях угловой секунды; стрелками показано направление нутации (*Ch*), пунктирной стрелкой — направление вращения Земли (*Earth*). Оси *OX* и *OY* направлены соответственно вдоль меридианов Гринвичского и 90° E

Спектр колебаний широты, полученный по наблюдениям в течение 1891–1945 гг. с дискретностью данных 0,1 года, представлен в работе [1]. В соответствии с результатами этой работы авторами сделаны следующие выводы:

1. Подавляющая часть всей энергии ($\approx 99\%$) приходится на колебания, происходящие в положительном направлении (на колебания с положительными частотами).
2. Большая часть энергии колебаний (около 90%) приходится на два диапазона частот. Первый заключен в пределах чандлеровской полосы частот, «центрированной» на значение $f_{ch} = 0,85 \text{ год}^{-1}$ ($T_{ch} = 430 \text{ суток} \approx 1,2 \text{ года}$) и имеющей заметную полосчатую структуру, представленную одним главным и двумя (примерно на порядок меньшими по амплитуде) боковыми максимумами; второй представлен годовой гармоникой $f_1 = 1 \text{ год}^{-1}$ ($T_1 = 1 \text{ год}$).

Длиннопериодные колебания окраины Тихого океана

Анализ сейсмологических данных позволил установить, что сейсмический процесс, протекающий в пределах окраины Тихого океана, имеет волновую природу [12]. При этом оказалось, что существует класс землетрясений (названных нами сильнейшими), очаги которых взаимодействуют друг с другом. Показано, что такой сейсмический процесс планетарного масштаба связан с вращением планеты [21] и может быть описан нелинейными волновыми уравнениями [15, 22].

С учетом большого числа факторов, включающих как геологические данные о повороте сейсмофокальных блоков с течением времени, так и экспериментальные и теоретические данные из области физики твердого тела о вращающихся макрообъемах в нагруженных поликристаллических материалах, была разработана ротационная модель сейсмического процесса, протекающего в пределах окраины Тихого океана [14]. В основе такой модели заложены представления о вращающихся (как целых) «элементарных» сейсмофокальных блоках — очагах сильнейших землетрясений. Вокруг поворачивающихся блоков вследствие вращения Земли возникают поля упругих напряжений. Эти поля напряжений приводят к сильному взаимодействию сейсмофокальных блоков друг с другом. В результате в рамках ротационной модели движение сейсмофокальных блоков оказалось возможным описать с помощью нелинейного волнового уравнения синус-Гордона (*SG*)

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = k_0^2 \sin \Theta, \quad (1)$$

где Θ — половина угла, на который в результате подготовки сильнейшего землетрясения поворачивается сейсмофокальный блок; z — расстояние вдоль сейсмофокальной зоны; t — время; c_0 и k_0 — постоянные, определяемые из соотношений

$$k_0^2 = 9\Omega R_0 (\rho G/15)^{1/2} / w, \quad c_0^2 = 5w/2\rho R_0^2, \quad (2)$$

где Ω — угловая скорость вращения планеты; ρ — плотность среды, в которой реализуется сейсмический процесс; G — модуль сдвига; R_0 — характерный размер сейсмофокального блока; w — линейная плотность упругой энергии цепочки сейсмофокальных блоков.

С помощью уравнения (1) удалось объяснить спектр скоростей миграции землетрясений [14, 16] и подтвердить ее (миграции) тектоническую природу [21, 22].

Дисперсионное соотношение, характерное для линеаризованного уравнения *SG* (1), как известно, записывается в виде $\omega^2 = \omega_0^2 (1 + \lambda_0^2 / \lambda)$, где значение наименьшей («нулевой») частоты колебаний и соответствующего ей периода распространяющихся по цепочке взаимодействующих сейсмофокальных блоков волн определяются из соотношений

$$\omega_0 = 2\pi c_0 / L_0, \quad L_0 = L_0 / c_0, \quad (3)$$

где $L_0 \approx \lambda_0 (\approx 2R_0)$ — протяженность элементарного сейсмофокального блока. Скорость c_0 определяется из соотношений (2).

Физически очевидно, что в модели взаимодействующих (например, связанных друг с другом пружинами) сейсмофокальных блоков частота ω_0 достигается при очень большой длине волны, в пределе $\lambda \rightarrow \infty$, когда соседние блоки поворачиваются на один и тот же угол как твердое тело. При этом пружины, моделирующие взаимодействие блоков друг с другом, настолько слабо должны деформироваться, что их как бы и не должно быть вовсе. В рамках ротационной модели сейсмического процесса такое движение соответствует повороту всего сейсмофокального объема тихоокеанского кольца как целого в плоскостях, перпендикулярных сечению кольца, когда $\lambda \rightarrow \infty$ равносильно $\lambda \rightarrow \Lambda$, где $\Lambda \approx 4 \cdot 10^4$ км — протяженность кольца.

Такое вращательное движение сейсмофокального кольца, расположенного в пределах переходной зоны и упруго связанного как с тихоокеанской плитой, так и с окружающими ее материковыми плитами, очевидно, должно сопровождаться вертикальными (относительно поверхности Земли) колебаниями вполне определенного объема примерно тороидальной формы и, следовательно, вследствие изменения формы Земли должно приводить к прецессии полюса планеты с частотой ω_0 [16].

Покажем, что прецессия полюса с «нулевой» частотой ω_0 является колебаниями, соответствующими частоте Чандлера f_{ch} .

Будем считать:

1) что параметры колеблющейся кольцевой области одинаковы на всем ее протяжении вдоль окраины Тихого океана;

2) кольцевая область имеет тороидальную форму и расположена в плоскости кольца, имеющего субмеридиональное простирание;

3) кольцо расположено на расстоянии $R_1 = R_3 \cos \varphi$ от центра Земли, R_3 — ее радиус, $\varphi \approx 50^\circ$ — половина угла, под которым кольцо «видно» из центра Земли: вдоль меридиана — от Алеутских островов и Аляски ($\varphi \approx 50-60^\circ N$) на севере до линии, соединяющей о. Веллингтон ($\varphi = 50^\circ S, \lambda = 75^\circ W$) с о-вами Окленд ($\varphi = 60^\circ S, \lambda = 170^\circ E$), на юге; вдоль экватора — от Соломоновых о-вов ($\lambda = 160^\circ E$) на востоке до Центральной Америки ($\lambda = 80^\circ W$) на западе (см. рис. 1 в работе [15]). Тогда изменение момента инерции Земли вследствие таких колебаний будет определено по формуле

$$\Delta I = \Delta(R_1^2 m) = 2 R_1 d m \Delta I = 2 R_3 d m \cos \varphi,$$

где $d = \delta H$ — амплитуда колебаний кольцевого объема с вертикальным размером H ; m — масса колеблющегося объема.

Имеющиеся сейсмологические (с) данные позволяют определить порядок величины периода «нулевых» колебаний сейсмофокального кольца. При протяженности элементарного сейсмофокального блока $L_0 = 150 - 300 \approx 200$ км и предельном значении скорости таких волн $c_0 \approx 200$ км/год [16, 22] для периода нулевых колебаний всего кольца как целого получаем из соотношений (3) $T_{0,c} \approx 1,2$ года.

Согласно геодезическим (г) данным, полученным на геодинимическом полигоне вблизи Петропавловска-Камчатского в течение непрерывных наблюдений, проводимых уже более 20 лет [24], изменение длин базовых линий l_i происходит с характерным периодом $T_r = 1-1,5$ года при амплитуде изменения длин линий $\delta_r = \Delta l_i / l_i = (1 \div 5) \cdot 10^{-6} \approx 3 \cdot 10^{-6}$.

Петропавловск-Камчатский расположен в непосредственной близости от сейсмофокального объема, удаление базовых линий от которого не превышает 100 км. Поэтому полученные в работе [24] геодезические данные указывают на то, что амплитуда вертикальных колебаний сейсмофокального объема и прилегающей к нему части вблизи Камчатки с периодом T_r имеет тот же порядок величины. Тогда, полагая сечение колеблющегося кольцевого объема тороидальной формы $HD \approx (300 \div 400)(300 \div 400)$ км², $m = \rho HDA$, $\rho \approx 3$ г/см³ — плотность, $\delta \approx \delta_r$, для величины изменения момента инерции Земли получим $\Delta I_r = 10^{36} - 10^{37}$ г · см², что, в свою очередь, согласно работе [9], должно вызвать нутацию полюса с периодом T_r и амплитудой $\Delta \alpha_r = \Delta I / (C - A) \approx 10^{-6}$ рад, где $C - A = 2,6 \cdot 10^{42}$ г · см² — разность между полярным и экваториальными моментами инерции Земли.

Таким образом, проведенный анализ показал, что значения модельных и экспериментально измеренных величин по порядку величины близки параметрам, характеризующим чандлеровские колебания: $T_{0,c} \approx T_r \approx T_{ch}$, $\Delta \alpha_r \approx \Delta \alpha_{ch}$. Как видим, «нулевые» колебания окраины Тихого океана, имеющие сейсмотектоническую природу, могут рассматриваться в качестве возможной причины, приводящей к нутации полюса Земли на частоте Чандлера. Другими словами, в рамках ротационной модели сейсмического процесса чандлеровское колебание полюса следует считать в большей степени взаимосвязанным с процессами взаимодействия сейсмофокальных блоков в цепочке, чем с процессами в очаге отдельно взятого землетрясения, пусть даже с предельной магнитудой и протяженным очагом.

Расщепление частоты Чандлера

Тихоокеанская окраина является не единственным сейсмическим поясом планеты. Вторым по интенсивности и протяженности является Альпийско-Гималайский сейсмический пояс, в субширотном направлении протянувшийся вдоль поверхности Земли примерно на 150° [25]. Уровень сейсмической активности вдоль этого пояса значительно ниже активности тихоокеанского кольца. Однако, как следует из ротационной модели, значение «нулевого» периода сейсмотектонического процесса, определяемого из соотношений (2), не зависит от плотности упругой

энергии в поясе: $T_0 = k_0/c_0 \neq f(w)$. Далее нетрудно показать, что амплитуда нутации полюса планеты, которая могла бы быть вызвана «нулевыми» сеймотектоническими движениями в пределах Альпийско-Гималайского пояса, при тех же параметрах колеблющегося объема совпадает по порядку величины с той, которая, как было показано ранее, генерируется, по сути, такими же движениями Тихоокеанского пояса. На основании этих данных в рамках ротационной модели можно предложить гипотезу, согласно которой чандлеровский максимум должен быть представлен двумя «нулевыми» частотами, каждая из которых соответствует процессу, протекающему в пределах Тихоокеанского или Альпийско-Гималайского пояса. При этом в соответствии с эффектом Доплера «нулевая» частота $\omega_{0, A-\Gamma}$, отвечающая Альпийско-Гималайскому поясу вследствие его субширотного простираения, должна соотноситься с такой же частотой $\omega_{0, T-O}$ для Тихоокеанского пояса, имеющего в основном субдолготное простираение, следующим образом:

$$\frac{\omega_{0, T-O}}{\omega_{0, A-\Gamma}} = 1 - V/V_{кр},$$

где $V = R_3 \Omega = 0,465$ км/с — линейная скорость движения поверхности планеты в районе экватора; Ω — угловая скорость вращения Земли; $V_{кр}$ — скорость крутильных колебаний, ответственных за взаимодействие сейсмофокальных блоков друг с другом [23]: $V_{кр} = (0,1 - 1) V_S \approx 0,5 V_S$ [26]; $V_S \approx 4,4$ км/с — скорость поперечных волн в литосфере.

Положение полюса в каждый момент времени определяется координатами точки на плоскости XOY (рис. 1) или комплексным числом $z = x + iy$. Другими словами, вместо двух временных рядов $\{x\}$ и $\{y\}$ действительных чисел нами рассматривался один временной ряд комплексных чисел $\{z\}$. Такой временной ряд может быть записан в виде

$$z(t) = \sum_{l=-(N-1)}^{N-1} C_l \exp(2\pi i l t / T),$$

где $N = 1581$ — полное число значений $\{z\}$; $T = 79,05$ лет — продолжительность интервала наблюдений (1890-е — начало 1969-х гг.); t — текущее время в юлианских годах, отсчитываемое от 1890 г.; C_l — коэффициенты гармоник с частотами $f_l = l/T$; l — целое число, принимающее значения от $-(N-1)$ до $N-1$. Как видим, временной ряд $\{z\}$ может быть однозначным образом представлен в виде суммы гармоник $C_l \exp(i 2\pi f_l t)$ с положительными и отрицательными частотами. Здесь, как и в работе [1], полагаем, что положительные частоты описывают вращательное движение полюса в положительном направлении (в направлении от оси OX к оси OY), а отрицательные — в противоположном направлении. Коэффициенты гармоник C_l вычислялись по формулам

$$C_l = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} z_j \exp(-2\pi i l j / N).$$

Рассчитанный спектр нутации полюса планеты $S = \text{mod}(C_l)$, измеряемый в сотых долях угловой секунды, как функция частот f_l представлен на рис. 2, а, из которого видно, что, соответствуя данным предыдущих исследователей [1], движение полюса планеты в основном происходит в положительном направлении и характерные частоты такого движения также заключены в пределах двух интервалов: в области чандлеровского максимума f_{ch} и годовой гармонике. С амплитудами, на несколько порядков меньшими по величине, выделяются и другие гармоники, в том числе имеющие периоды 14 суток, 6–7 лет и т. д., отмеченные другими исследователями.

Движение полюса, как видно из данных, представленных на рис. 2, а, характеризуется спектром, огибающая которого в области чандлеровских колебаний имеет два максимума. Одному из них, большему по амплитуде, соответствует частота $f_{ch, 1} = 0,835$ год⁻¹ ($T_{ch, 1} = 437$ дней), второму, меньшему — $f_{ch, 2} = 0,860$ год⁻¹ ($T_{ch, 2} = 425$ дней).

С целью проверки эффекта расщепления частоты Чандлера был проведен спектральный анализ с использованием фильтра Хэмминга [27]. Как следует из рис. 2, б, в этом случае эффект расщепления частоты Чандлера f_{ch} на две — $f_{ch, 1}$ и $f_{ch, 2}$ — стал еще более очевидным. При этом амплитуды обеих частот $f_{ch, 1}$, $f_{ch, 2}$ оказались примерно равными.

Таким образом, спектральный анализ показал, что нутация полюса на частоте Чандлера представлена двумя процессами с близкими частотами $f_{ch, 1}$ и $f_{ch, 2}$.

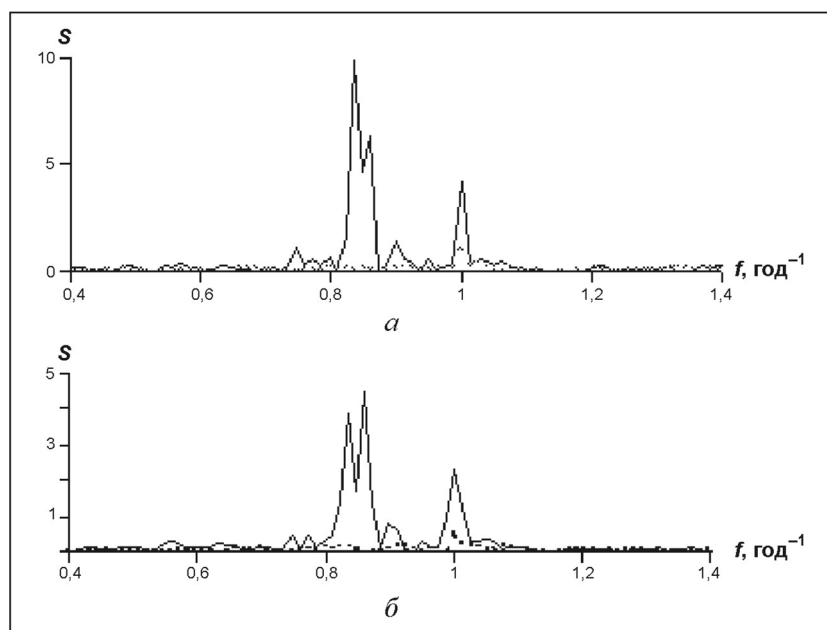


Рис. 2. Огибающие спектров для положительных и отрицательных (обозначены пунктиром) частот, построенные по данным работы [18] с помощью Фурье-анализа (а) и окна Хэмминга (б). Спектральная плотность S выражена в сотых долях угловой секунды

Многочастотный характер чандлеровских колебаний отмечался в работе [28]. Однако в ней его «многочастотная» природа определяется «неупругостью» мантии, в результате чего вследствие вариаций мгновенной оси вращения, инерционности и углового момента и возникает многочастотное чандлеровское движение.

Покажем, что расположение Тихоокеанского и Альпийско-Гималайского поясов соответствует особенностям распределения амплитуд «нулевых» колебаний на частотах $f_{ch,1}$ и $f_{ch,2}$ протекающих в их пределах сейсмотектонических процессов. Наличие такого соответствия можно попытаться установить, например, с помощью сравнительного анализа, при котором из исходного ряда значений $\{z\}$ «исключается» та или иная гармоника. С этой целью проводилось построение полярных диаграмм, для чего между всеми последовательными парами значений $\{x_i, y_i\}$, $\{x_{i+1}, y_{i+1}\}$ определялись амплитуды и углы, характеризующие перемещение полюса в течение интервалов длительностью 0,05 года. Соответствующие полярные диаграммы строились для исходного ряда $\{z\}$ (рис. 3, а), рядов $\{z_1\}$ (рис. 3, б) и $\{z_2\}$ (рис. 3, в), в которых исключались соответственно частоты $f_{ch,1}$ и $f_{ch,2}$. При вычислении рядов $\{z_1\}$ и $\{z_2\}$ коэффициенты C_i , стоящие при «исключаемых» гармониках, полагались равными нулю. Представляется, что, по сути, близкий описанному в этом разделе способ анализа был использован ранее в работе [29] при исследовании взаимосвязи сейсмичности Тихоокеанского пояса с изменениями пространственного положения оси вращения Земли.

Из данных, представленных на рис. 3, можно видеть, что гистограмма $\{z\}$, построенная по всей совокупности исходных данных (рис. 3, а), является «изотропной», т. е. не имеющей выделенных направлений, в то время как гистограммы с исключенными гармониками (рис. 3, б, в) такие направления имеют. Действительно, амплитуды отклонения оси вращения Земли имеют наибольшие значения на гистограмме $\{z_1\}$ (рис. 3, б) вдоль долготы I ($30^\circ \text{ W} - 150^\circ \text{ E} (\pm 20^\circ)$) и на гистограмме $\{z_2\}$ (рис. 3, в) вдоль долготы II ($10^\circ \text{ W} - 170^\circ \text{ E} (\pm 10^\circ)$). При этом угол γ между азимутами I и II оказался близким углу β между направлениями на «центры тяжести» сейсмических поясов (1) и (2): $\gamma \approx \beta \approx 20^\circ$.

Как видим, данные анализа спектрального и пространственного (долготного) распределений подтверждают вывод ротационной модели о расщеплении чандлеровской частоты $f_{ch} = 0,85 \text{ год}^{-1}$ на две $f_{ch,1} = 0,83 \text{ год}^{-1}$ и $f_{ch,2} = 0,86 \text{ год}^{-1}$, которые могут соответствовать «нулевым» частотам сейсмотектонических процессов, протекающих в пределах Тихоокеанского и Альпийско-Гималайского поясов.

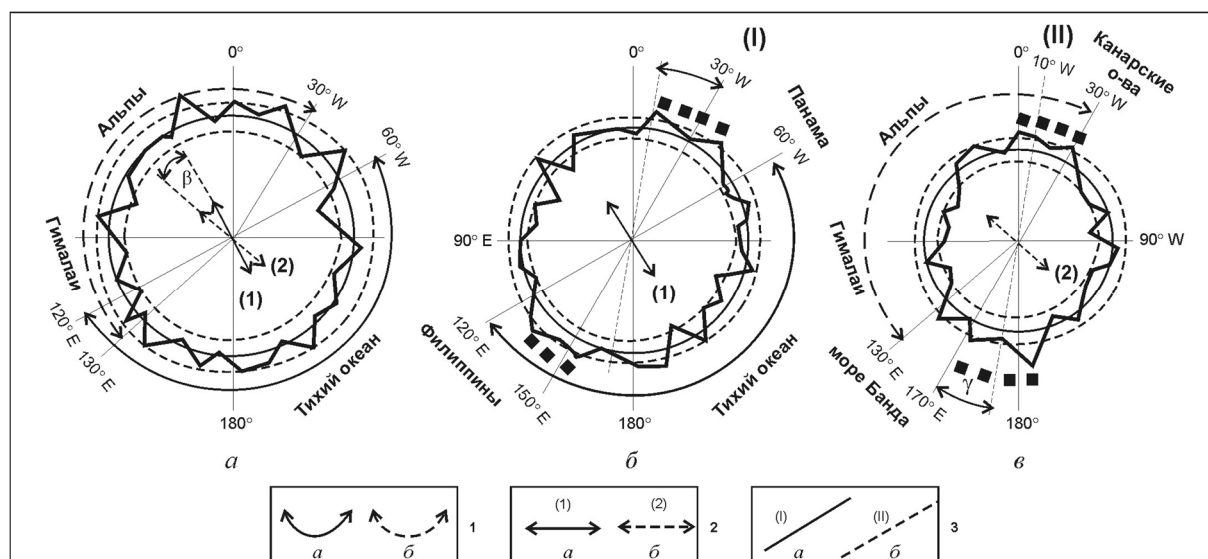


Рис. 3. Полярные диаграммы, построенные по всей совокупности данных работы [18] (а) и с исключенными гармониками $f_{ch,2}$ (б), $f_{ch,1}$ (в):

1 — пределы простираения Тихоокеанского (а) и Альпийско-Гималайского (б) сейсмических поясов; 2 — направления (1) и (2) на их «центры тяжести», β — угол между этими направлениями; 3 — направления (I) и (II), вдоль которых «вытянуты» полярные диаграммы с исключенными соответственно гармониками $f_{ch,1}$ (б) и $f_{ch,1}$ (в); γ — угол между этими направлениями

Сравнительный анализ (см. рис. 3) не позволяет каждому из поясов однозначным образом поставить в соответствие ту или иную из расщепленных частот. Однако согласно требованиям, накладываемым эффектом Доплера, можно принять, что частоты $f_{ch,1} = 0,83 \text{ год}^{-1}$ и $f_{ch,2} = 0,86 \text{ год}^{-1}$ соответствуют Тихоокеанскому и Альпийско-Гималайскому поясам.

Квант сейсмотектонической активности?

Итак, мы привели достаточно веские, на наш взгляд, аргументы, подтверждающие предположение, высказанное в работе [16], о том, что чандлеровское колебание полюса взаимосвязано не с отдельно взятыми землетрясениями, пусть даже с предельными по значению магнитудами и большими по протяженности очагами, а с сейсмическим процессом, т.е. с совокупностью очагов землетрясений. Впрочем, отсутствие достаточно «прозрачной» взаимосвязи между чандлеровскими колебаниями и отдельно взятыми землетрясениями иллюстрируется и данными, представленными на рис. 1. Действительно, траектория движения полюса планеты в 1960–1964 гг., когда произошли два из самых сильных на планете землетрясения XX в., очаговые области каждого из которых достигали по протяженности около 1000 км: 22.05.1960 г. с $M = 8,3$ у берегов Чили и 28.04.1964 г. с $M = 8,3$ у берегов Аляски [30] — является «обычной», т.е. достаточно плавной и средней по амплитуде (рис. 2, з), в то время как значительные «изломы» траектории в 1895–1896 гг. (рис. 2, б) и в 1926 г. (рис. 2, в) не сопровождались на планете достаточно сильными землетрясениями, очаги которых имели бы значительную протяженность [31]. Отсутствие достаточно «прозрачной» взаимосвязи между геометрией траектории, характеризующей нутацию полюса, и временами отдельно взятых сильных землетрясений иллюстрируется также и тем фактическим графическим материалом, который представлен в работе [10].

Тем не менее из данных, представленных на рис. 1, а, можно видеть, что траектории движения полюса планеты на плоскости XOY располагаются с разной плотностью: имеются интервалы ΔR , в пределах которых траектории располагаются с большей плотностью, в то время как между этими интервалами — с меньшей. Это позволяет предположить, что, возможно, существуют выделенные значения радиусов траекторий, вдоль которых полюс планеты движется более часто.

Выбор способа выявления такого рода закономерностей значительно облегчается тем обстоятельством, что экспериментальные значения каждой из координат $\{x, y\}$ в отдельности подчиняются в целом нормальному распределению. При этом среднеквадратичные отклонения каждого из таких распределений оказались достаточно близкими: $\sigma_x \approx \sigma_y \approx 0'',13 \approx R_{cp}$. Отсюда получаем для теоретической зависимости плотности вероятности, характеризующей распределение значений амплитуд движения полюса планеты, следующее выражение:

$$P_0(R) = (R/\sigma^2) \exp(-R^2/2\sigma^2), \quad R^2 = x^2 + y^2, \quad \sigma = (\sigma_x + \sigma_y)/2 \approx \sigma_x \approx \sigma_y \approx R_{cp}.$$

Свойства распределения $P_0(R)$ хорошо известны: нулевая плотность траекторий при $R = 0$, затем ее монотонное увеличение до значения $R_{cp} = \sigma$, в окрестности которого плотность траекторий максимальна, после чего опять монотонное уменьшение до нуля при больших R . Как можно видеть из данных, представленных на рис. 1, а, экспериментальное распределение заметно отличается от теоретически ожидаемого.

Исследовались свойства экспериментальных распределений, которые строились для разных наборов исходных данных: $\{z\}$ — совокупность всех исходных данных; $\{z_i\}$ — с исключенной одной гармоникой, где $i = (1, 2, 3)$ суть индексы ($ch_1, ch_2, 1$ — годовая гармоника) соответственно; $\{z_{ij}\}$ — с двумя и $\{z_{123}\}$ тремя исключенными гармониками. Из данных, представленных на рис. 4 и в табл. 1, видно, что для всех без исключения проанализированных совокупностей данных имеет место заметное отклонение экспериментального распределения P от теоретического P_0 . Это отличие проявляется в том, что существует такое значение R^* , при котором $P < (\leq) P_0$ при $R < R^*$ и $P > (\geq) P_0$ при $R > R^*$.

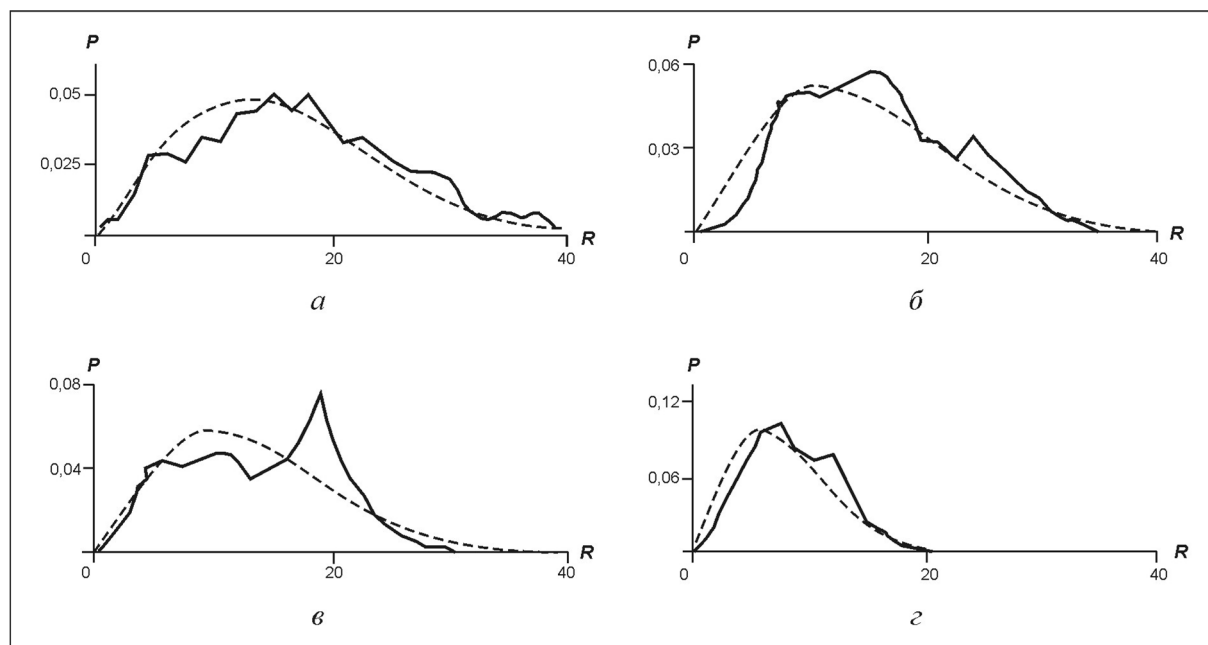


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические (обозначены пунктиром) распределения чисел траекторий P как функции их радиусов R (в сотых долях угловой секунды), построенные по всей совокупности данных $\{z\}$ (а), по данным с исключенной годовой гармоникой f_1 (б), с исключенными двумя $f_{ch,2}$ и f_1 (в), тремя $f_{ch,1}, f_{ch,2}, f_1$ (г) гармониками

Физика выявленной закономерности, как представляется, имеет весьма общий характер и заключается в существовании такого механизма, который перераспределяет «нутационную» энергию между колебаниями с различной амплитудой (между траекториями с разными радиусами). Именно такой механизм увеличивает число траекторий с большими ($R > R^*$) радиусами за счет уменьшения их числа с малыми ($R < R^*$) радиусами.

Величина такого эффекта S пропорциональна площади фигуры, ограниченной сверху теоретическими P_0 , снизу — экспериментальными P -распределениями в области $R < R^*$. Проведенные оценки показывают, что величина эффекта

$$S = \int_0^{R^*} |P_0(R) - P(R)| dR \approx \bar{\delta} \frac{\Delta P}{R_{\max}},$$

где ΔR — область значений, при которых $\Delta P = P_0 - P > 0$, R_{\max} — максимальный радиус, $\bar{\delta} = \frac{\Delta P}{P_0}$ — средняя для интервала ΔP амплитуда отклонения экспериментального распределения от теоретического, невелика ($S = (6 \pm 2)\%$) и слабо зависит от частотного состава анализируемой выборки (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметры, характеризующие величины отклонений экспериментальных распределений от теоретических

| Выборка данных | $\sigma, 10^{-2}c$ | $R^*, 10^{-2}c$ | $S, \%$ | $R, 10^{-2}c$ $\delta(1)$ | $R, 10^{-2}c$ $\delta(2)$ | $R, 10^{-2}c$ $\delta(3)$ | $R, 10^{-2}c$ $\delta(4)$ | $R, 10^{-2}c$ $\delta(5)$ | $R, 10^{-2}c$ $\delta(6)$ | $R, 10^{-2}c$ $\delta(7)$ | $\Delta R_0 \pm \delta R, 10^{-2}c$ |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| {z} | 11,7 | 14,8 | 6 | (7,5) (0,31) | 10,5 0,28 | (13,5?) (0,06) | 18 0,11 | 23,5 0,18 | 29 0,50 | 37,5 1,0 ? | 5,0 $\pm 1,8$ |
| {z ₁ } | 9,7 | 8,0 | 5 | 4,5 0,28 | 9 0,24 | | 18,5 0,34 | 25,5 0,71 | | | |
| {z ₂ } | 12,0 | 10,8 | 8 | 4,5 0,30 | (12) (0,13) | 15* 0,19* | (18) (0,24) | 26,5 0,88 | | 34,5 ? 0,31 | |
| {z ₃ } | 11,7 | 12,4 | 6 | 3,5 0,65 | | 16,5 0,24 | | 24 0,6 | | | |
| Среднее по {z _i } | 11,1 $\pm 1,0$ | 10,4 $\pm 1,8$ | 6 ± 1 | | | | | | | | |
| {z ₂₃ } | 10,6 | 16,5 | 9 | (7,5) (0,30) | 10,5* 0,23* | (13,5) (0,34) | 19,5 1,35 | | | | 4,0 $\pm 1,4$ |
| {z ₁₃ } | 7,9 | 13,1 | 3 | | 10,5 0,19 | | 18,5 0,94 | | | | |
| {z ₁₂ } | 8,4 | 11,4 | 5 | | 10,5 0,16 | 15 0,42 | | | | | 4,5 |
| Среднее по {z _{ij} } | 9,0 $\pm 1,2$ | 13,4 $\pm 2,1$ | 6 ± 2 | | | | | | | | |
| {z ₁₂₃ } | 6,2 | 6,0 | 4 | 7,5 0,11 | 12 0,66 | | | | | | |
| Среднее | 10 ± 2 | 12 ± 3 | 6 ± 2 | 5 $\pm 1,2$ | 10 $\pm 0,8$ | 15 $\pm 0,5$ | 20 $\pm 1,3$ | 25 $\pm 1,1$ | 30 $\pm 1(?)$ | 35 $\pm 1,5$ | 5,0 $\pm 1,0$ |

Примечание. Символы $(R, \delta)_{1-7}$ — последовательные значения радиусов $R [10^{-2}c]$ и амплитуд δ , соответствующие значимым минимумам (при $R < R^*$) и максимумам (при $R > R^*$) экспериментальных распределений, построенных по разным выборкам данных; значения в скобках соответствуют локальным минимумам и максимумам; значения, помеченные (*), характеризуют «центр тяжести» минимума или максимума; определение параметров $\sigma, R^*, S, \Delta R_0, \delta R, \delta$ и описание данных в выборках приведены в тексте.

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что значимые максимумы (при $R > R^*$) и минимумы (при $R < R^*$), характеризующие величину отклонения экспериментального распределения от теоретического, имеют тенденцию группироваться в пределах интервалов, центры которых кратны значению $\Delta R_\omega (\pm \delta R) \approx 0'',05 \approx 1,5$ м. При этом величина среднеквадратичного отклонения максимумов и минимумов от центральных значений значительно меньше ΔR_ω и в среднем $\delta R = 0'',01$ ($n = 23$, $\delta R_{\min} = 0$, $\delta R_{\max} = 0'',025$).

Другими словами, проведенный анализ показал, что траектории, по которым перемещается полюс планеты при нутации, имеют тенденцию «разряжаться» и «сгущаться» в окрестностях определенных значений радиусов, кратных величине ΔR_ω . Согласно работе [9] такой регулярной составляющей экспериментального распределения $P(R)$ соответствует вполне определенное изменение величины количества момента инерции Земли $\Delta I = (C - A)/\Delta R_\omega$ и, следовательно, энергии ее вращения $\Delta W = \frac{1}{2} \Delta (I \Omega^2) = \frac{1}{2} \Omega^2 \Delta I \approx 10^{20}$ Дж. Значение ΔW по порядку величины близко тектонической (сеймотектонической) энергии $E_{ST} = \eta E_S$, где, как известно, $\eta \approx 10^{-6} - 10^{-2}$ — сейсмический коэффициент полезного действия (*seismic efficiency*); $E_S \approx 10^{16-18}$ Дж — сейсмическая энергия, сбрасываемая в очагах сильнейших ($M \approx 8$) землетрясений [31].

Нам представляется, что близость порядков значений таких величин энергий не является случайной. Примерное равенство значения ΔW , определяющего величину энергии «перехода» полюса с одной «регулярной» траектории на другую, и значения $E_{ST} = \eta E_S$, соответствующего энергии, выделяемой при сильнейших землетрясениях, указывает на то, что в рамках развиваемой нами ротационной модели сильнейшие землетрясения могут рассматриваться как определенные «кванты» энергии, соответствующие «регулярным» изменениям режима вращения планеты.

По-видимому, впервые «квантовые» вопросы предметно обсуждались в нескольких докладах на Всероссийской конференции по проблемам сейсмичности Дальнего Востока России (Петропавловск-Камчатский, 6–9 апреля 1999 г.), что позволило впоследствии объединить их в трудах конференции [32] в один раздел под названием «Квантовая сеймотектоника».

О ширине чандлеровской полосы

Данные, приведенные на рис. 4 и в табл. 1, также показывают, что с увеличением числа исключаемых из расчета гармоник (как уже отмечалось, при практически неизменном значении параметра S) число максимумов экспериментальных распределений в области значений $R > R^*$ уменьшается. При этом амплитуды максимумов распределений $\{z_{23}\}$, $\{z_{13}\}$ и $\{z_{12}\}$ с двумя исключенными гармониками $R_4 = 19,5$ ($\{z_{23}\}$) $>$ $R_4 = 18,5$ ($\{z_{13}\}$) $>$ $R_3 = 15$ ($\{z_{12}\}$) соотносятся друг с другом примерно так же, как и средние амплитуды частот $f_{ch,1}$, $f_{ch,2}$ и f_1 , определенные по данным, представленным на рис. 2, а: $S_{f_{ch,1}} > S_{f_{ch,2}} > S_{f_1}$. Отсюда можно предположить, что особенности каждого из распределений $\{z_{ij}\}$ в основном определяются амплитудно-частотной характеристикой соответствующей гармоники: $\{z_{23}\} \equiv P_{f(ch,1)}$; $\{z_{13}\} \equiv P_{f(ch,2)}$ и $\{z_{12}\} \equiv P_{f(1)}$. Каждой из этих гармоник соответствует определенное значение радиуса нутации (см. табл. 1): $R_{ch,1} = 19,5 \cdot 10^{-2}$ с (рис. 4, в), $R_{ch,2} = 18,5 \cdot 10^{-2}$ с и $R_1 = 15 \cdot 10^{-2}$ с. В таком случае значения радиусов, соответствующие максимумам распределений $\{z\}$ и $\{z_i\}$, должны являться их простой «суперпозицией».

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что все значения радиусов $R_4 - R_7$, отвечающие максимумам распределения $\{z\}$, построенного по всей совокупности исходных данных, могут быть представлены как «суперпозиция» значений радиусов, отвечающих гармоникам Чандлера $f_{ch,1,2}$ и годовой гармонике f_1 . Более того, таким же образом могут быть проинтерпретированы и все максимумы $R_2 - R_7$ распределений $\{z_1\}$ и $\{z_2\}$, построенных по данным, из которых исключались чандлеровские гармоники соответственно $f_{ch,1}$ и $f_{ch,2}$. Как видим, большая ($0,83 = 10/12$) часть всех максимумов распределений $\{z\}$ и $\{z_i\}$, кроме двух (R_3 и R_5), отвечающих распределению $\{z_3\}$ (см. табл. 2), может быть проинтерпретирована в соответствии с принципом суперпозиции. Полученный результат показывает, что выявленные ранее спектральные особенности распределения числа траекторий по величинам их радиусов действительно находят объяснение в рамках модели, в которой нутация полюса планеты представляет собой суперпозицию трех колебательных процессов, имеющих собственные частоты $f_{ch,1}$, $f_{ch,2}$ и f_1 .

Таблица 2

«Спектральные» особенности процесса нутации полюса планеты

| Выборка данных | $R_1 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ c}$ | $R_2 = 10 \cdot 10^{-2} \text{ c}$ | $R_3 = 15 \cdot 10^{-2} \text{ c}$ | $R_4 = 20 \cdot 10^{-2} \text{ c}$ | $R_5 = 25 \cdot 10^{-2} \text{ c}$ | $R_6 = 30 \cdot 10^{-2} \text{ c}$ | $R_7 = 35 \cdot 10^{-2} \text{ c}$ |
|---------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|
| {z} | | | | f_{ch} | $f_{ch} + \Delta$ | $f_{ch} + 2\Delta$ | $f_{ch} + f_1$ ($f_{ch} + 3\Delta$) |
| {z ₁ } | | $f_{ch,2} - 2\Delta_2$ | | $f_{ch,2}$ | $f_{ch,2} + \Delta_2$ | | |
| {z ₂ } | | | $f_{ch,1} - \Delta_1$ (f_1) | | $f_{ch,1} + \Delta_1$ | | $f_{ch,1} + 3\Delta_1$ $f_{ch,1} + f_1$ |
| {z ₃ } | | | ? | | ? | | |
| {z ₂₃ } | | | | $f_{ch,1}$ | | | |
| {z ₁₃ } | | | | $f_{ch,2}$ | | | |
| {z ₁₂ } | | | f_1 | | | | |
| {z ₁₂₃ } | ? | ? | | | | | |

Примечание. Символ $R_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ — осредненные в соответствии с данными табл. 1 значения радиусов, соответствующие максимумам в различных выборках данных (распределениях); $f_{ch} = f_{ch,1}$ и (или) $f_{ch,2}$; $\Delta_{1(2)} = f_{ch,1(2)} - f_1$; $\Delta = \Delta_1$ и (или) Δ_2 .

Из данных, представленных на рис. 2, а, видно, что движение полюса с отрицательными частотами в основном определяется гармоникой $f_1 = 1 \text{ год}^{-1}$, $T_1 = 1 \text{ год}$. В то же время наиболее значительные изломы траектории движения полюса имеют место при полном отсутствии на планете достаточно сильных сейсмических событий (см. рис. 1). Эти данные позволяют принять, что движения полюса, отвечающие гармонике f_1 , в основном связаны с крупномасштабными сезонными климатическими движениями, происходящими на планете.

Ранее достаточно убедительно было показано существование взаимосвязи между сильными землетрясениями, с одной стороны, и солнечной активностью [11, 33] и космическими факторами [34] — с другой. В свете сказанного ясно, что взаимосвязь сейсмических событий (сейсмотектонических явлений) с солнечной активностью и космическими факторами не является «прямой». Она обеспечивается в результате взаимодействия (суперпозиции) трех колебательных процессов, протекающих на чандлеровских частотах $f_{ch,1}$, $f_{ch,2}$ и f_1 . При этом только первые два процесса, как уже было показано, «напрямую» взаимосвязаны с сейсмотектоническим процессом, а третий — «напрямую» с явлениями в атмосфере.

В рамках такого приближения спектр движения полюса состоит из трех гармоник $f_{ch,1}$, $f_{ch,2}$, f_1 и их линейных комбинаций. Часть спектра, отвечающая чандлеровским частотам, ответственна за сейсмотектонические движения верхней части литосферы в районах сейсмических поясов.

Заключение

В работе исследовалась в рамках ротационной модели сейсмического процесса природа взаимосвязи сильных землетрясений с прецессией полюса планеты. В результате были получены следующие результаты:

1. Тектонический процесс, протекающий в районах сейсмически активных поясов планеты, характеризуется широким спектром частот. Показывается, что прецессия полюса планеты может происходить вследствие изменения формы Земли, вызываемой колебанием верхней части литосферы, как целой — так называемым «нулевым» колебанием.

2. Следует отметить следующее. С точки зрения механики очевидно, что в рамках ротационной модели возможен и обратный процесс, а именно: перекачка энергии свободных колебаний планеты в сейсмотектоническое движение. Этот вопрос в широких пространственно-временных масштабах явления, включая возможность геологической катастрофы на планете, достаточно подробно обсуждался в работе [35] и выходит за рамки настоящей публикации.

3. Формулируется теоретический вывод модели, согласно которому субмеридионально (Тихоокеанский) и субширотно (Альпийско-Гималайский) ориентированные пояса вследствие эффекта Доплера, связанного с вращением планеты, должны иметь различные значения нулевых частот. Этот вывод подтверждается результатами анализа чандлеровской частоты, которая, как показывается в работе, «расщепляется» на две: $f_{ch,1} = 0,835 \text{ год}^{-1}$ и $f_{ch,2} = 0,860 \text{ год}^{-1}$.

4. Анализируется распределение значений радиусов траекторий движения полюса по их числу. Показывается, что такое распределение имеет «регулярную» составляющую $\Delta R = 0'',05$. Изменение значения энергии нутации при изменении радиуса траектории на ΔR по порядку величины близко сейсмотектонической энергии, сбрасываемой в очагах сильнейших ($M \approx 8$) землетрясений.

5. В ряде последних работ [36–38] отмечено, что эффект от землетрясений, сравнимых с Чилийским 20.05.1960 г. ($M = 8,3$), может быть зафиксирован в современных высокоточных данных о координатах полюса. Более старые данные, полученные в основном с помощью астрономических наблюдений, имеют для этого недостаточную точность. Эти данные, на наш взгляд, подтверждают вывод работы о достаточно малой величине квантового эффекта ($S = 5\text{--}8\%$, см. табл. 1) и открывают принципиально новые возможности исследования в рамках ротационной модели с использованием данных Международной службы широты как свойств сейсмического процесса, так и процессов в очагах сильнейших землетрясений, включая их прогноз.

6. Полученные данные позволили сформулировать гипотезу, согласно которой взаимосвязь солнечной активности и других космических факторов с сейсмотектоническим процессом не является «прямой», а обеспечивается взаимодействием годовой компоненты прецессии полюса с чандлеровскими частотами $f_{ch,1}$ и $f_{ch,2}$.

Конкретные и предметные замечания С. Ю. Хомутова помогли авторам обратить внимание на ряд важных деталей, учет которых значительно дополнил работу. Авторы также признательны В. А. Широкову за полезное обсуждение работы.

Литература

1. Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. — М.: Мир, 1964. — 384 с.
2. McCarthy D.D., Luzum B.J. Part of the mean rotational pole from 1899 to 1994 // *Geophys. J. Int.* — 1996. — 125. — P. 623–629.
3. Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. — М.: Недра, 1965. — 380 с.
4. Молоденский М. С. Упругие приливы, свободная нутация и некоторые вопросы строения Земли // *Тр. Геофиз. ин-та АН СССР.* — 1953. — № 19.
5. Парийский Н. Н. Земные приливы и внутреннее строение Земли // *Изв. АН СССР. Сер. Геофизическая.* — 1963. — № 2.
6. Авсюк Н. О движении внутреннего ядра Земли // *Докл. АН СССР.* — 1973. — № 5. — С. 1103–1104.
7. Rochester M. G., Smylie D. E. Geomagnetic core-mantle coupling and the Chandler wobble // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* — 1965. — № 289.
8. Munk W. H., Hassan E. S. M. Atmospheric excitation of the Earth's wobble // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* — 1961. — № 339.
9. Стейси Ф. Физика Земли. — М.: Мир, 1972. — 342 с.
10. Котляр П. Е., Ким В. И. Положение полюса и сейсмическая активность Земли. — Новосибирск, 1994. — 124 с.
11. Статистическая взаимосвязь десятилетних вариаций в среднегодовых данных об изменении некоторых геодинамических, геофизических и гелиофизических параметров / Г. С. Курбасова, А. А. Корсунь, Л. В. Рыхлова [и др.] // *Астроном. журн.* — 1997. — Т. 74. — № 1. — С. 139–145.
12. Викулин А. В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // *Докл. АН СССР.* — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–824.
13. Авсюк Ю. Н. Приливные силы и природные процессы. — М.: ОИФЗ РАН, 1996. — 188 с.
14. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Ротационная модель сейсмического процесса // *Тихоокеанская геология.* — 1998. — Т. 17. — № 6. — С. 95–103.

15. Викулин А. В. Сейсмичность и вращение Земли // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1. — № 3. — С. 124–130.
16. Викулин А. В. Миграция сейсмичности, тектонические волны и собственные колебания планеты. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1997. — 19 с. — Препринт № 4.
17. Викулин А. В., Кролевец А. Н. Колебания Чандлера и сейсмотектонический процесс // Закономерности строения и эволюции геосфер: тез. IV Междунар. междисциплинарного науч. симп., Хабаровск, 23–28 сентября 1998 г. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 1998. — С. 77–78.
18. Движение полюса Земли с 1890.0 по 1960.0. / Е. П. Федоров, А. А. Корсунь, С. П. Майор [и др.]. — Киев: Наук. думка, 1972.
19. 1998 IERS Annual Report. — Paris, 1999.
20. Yumi S., Yokoyama K. Results of the International Latitude Service in a homogeneous system 1899.9–1979.0. — Mizusawa: Central Bureau of the IPMS, 1980. — 199 p.
21. Викулин А. В. О природе австралийских землетрясений // Вулканология и сейсмология. — 1994. — № 2. — С. 99–108.
22. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. — М.: Недра, 1996. — 448 с.
23. Викулин А. В., Быков В. Г., Лунева М. Н. Ротационная геодинамическая модель // Методы изучения, строения и мониторинг литосферы. — Новосибирск: СО РАН, 1998. — С. 163–165.
24. Бахтияров В. Ф., Левин В. Е. Светодальномерные измерения из обсерватории «Мишенная». Анализ результатов наблюдений // Вулканология и сейсмология. — 1991. — № 3. — С. 85–89.
25. Шейдеггер А. Основы геодинамики. — М.: Недра, 1987. — 384 с.
26. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. — М.: Наука, 1965. — 204 с.
27. Марпл С. П. (мл.). Цифровой спектральный анализ и его приложения. — М.: Мир, 1990. — 584 с.
28. Pan Chen. The multiple-frequency Chandler wobble // J. Phys. Earth. — 1982. — № 5. — P. 389–419.
29. Котляр П. Е. Связь сейсмичности Тихоокеанского пояса с изменениями пространственного положения оси вращения Земли // Геол. эволюция и строение Азиатского континента и окраинных морей северо-западной части Тихого океана: тез. 7-го сов.-яп. симп. Ч. 2. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1991. — С. 29–31, 63–65.
30. Duda S. Secular seismic energy release in circum-pacific belt // Tectonophysics. — 1965. — № 2 (5). — P. 409–452.
31. Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. — М.: Иностран. лит., 1962.
32. Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. — 318 с.
33. Сытинский А. Д. О связи сейсмичности Земли с состоянием межпланетной среды и атмосферными процессами // Докл. АН СССР. — 1987. — Т. 295. — № 2. — С. 338–341.
34. Широков В. А. Влияние космических факторов на геодинамическую обстановку и ее долгосрочный прогноз для северо-западного участка тихоокеанской тектонической зоны // Вулканизм и геодинамика. — М.: Наука, 1977. — С. 103–115.
35. Vikulin A. V., Melekestsev I. V. Seismicity, volcanism of the Pacific Ocean and the planets' rotation // Bulgarian Geophys. J. — 1997. — Vol. XXIII. — № 1. — P. 62–68.
36. Sourian A., Cazenave A. Reevaluation of the Chandler wobble seismic excitation from recent data // Earth and Planet. Sci. Lett. — 1985. — Vol. 75. — № 4. — P. 410–416.
37. Gross R. S., Chao B. Fong. The global geodynamic effect of the Macquarie ridge earthquake // Geophys. Res. Lett. — 1990. — Vol. 17. — № 7. — P. 1009–1012.
38. Preisig J. R. Polar motion, atmospheric angular momentum excitation and earthquakes — correlations and significance // Geophys. J. Int. — 1992. — Vol. 108. — № 1. — P. 161–178.

А. В. Викулин¹, С. Дуда²

¹ Камчатская ОМСП ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

² Гамбургский университет, г. Гамбург, Германия

ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ*

1. Впервые движения с периодом около $T \approx 1$ час были выделены на записях Большого Камчатского землетрясения 04.11.1952 г. с $M_S = 8,5$, $M_W = 9,0$. Данные инструментальных наблюдений, полученные при регистрации последующих землетрясений с размерами очагов около 1000 км (Чилийского 20.05.1960 г., $M_S = 8,3$, $M_W = 9,5$, Аляскинского 28.03.1964 г., $M_S = 8,3$, $M_W = 9,0$ и др.), позволили выделить движения с периодами $1 \text{ мин} < T < 1 \text{ ч}$ и отождествить их с собственными колебаниями планеты.

Введение в практику инструментальных наблюдений регистрирующих приборов нового типа STS-1 и STS-2 позволило при двух сильных глубоких ($H \approx 600$ км) землетрясениях в 1994 г. (9.03, Тонга, $M_W = 7,6$; 9.06, Боливия, $M_W = 8,2-8,3$) выделить колебания с периодами $T \approx 100-500$ с.

Приведенные данные позволяют предположить, что движения, возникающие при землетрясениях, характеризуются периодами в большом диапазоне $(0,1-1,0) \text{ с} \leq T < 1 \text{ ч}$.

2. Использовались широкополосные записи, полученные на Центральной сейсмологической обсерватории Германии, расположенной в г. Эрланген. Данные о выборочных землетрясениях 1978–1986 гг. отфильтровывались и представлялись в виде периодических движений в пределах 10 октав (в с): $0,18 \leq T_1 (T_1^0 = 0,25) \leq 0,35 \leq T_2 (T_2^0 = 0,5) \leq 0,71 \leq T_3 (T_3^0 = 1,0) \leq 1,41 \leq T_4 (T_4^0 = 2,0) \leq T_5 (T_5^0 = 4,0) \leq 5,66 \leq T_6 (T_6^0 = 8,0) \leq 11,3 \leq T_7 (T_7^0 = 16) \leq 22,6 \leq T_8 (T_8^0 = 32) \leq 45,3 \leq T_9 (T_9^0 = 64) \leq 90,5 \leq T_{10} (T_{10}^0 = 128) \leq 181$, T_n^0 — средний период в n -октаве, $1 \leq n \leq 10$. По сейсмограмме каждой октавы определялись значения магнитуды (спектральная магнитуда). Оказалось, что каждое землетрясение характеризуется своим набором спектральных магнитуд (распределением значений магнитуд по номерам октав). В то же время распределение чисел землетрясений по октавам, для которых значения магнитуд максимальны, имеет вполне устойчивый (закономерный) вид «несимметричного» колокола с максимумом при $n = 4$: при уменьшении и увеличении номера октавы число таких землетрясений уменьшается соответственно быстро и достаточно плавно.

Следует отметить, что максимум сейсмического излучения в пределах 9-й октавы (9-октавные землетрясения) наблюдался для достаточно большого количества ($N = 38$) событий в широком магнитудном диапазоне $4,3 \leq M_S \leq 7,7$. Очаги таких землетрясений отмечены практически во всех сейсмоактивных регионах планеты. Их распределение по магнитудам достаточно равномерное: $5 \leq M_S < 6$, $N = 9$; $6 \leq M_S < 7$, $N = 16$; $7 \leq M_S$, $N = 10$. Малое число таких землетрясений при меньших магнитудах ($4 \leq M_S < 5$, $N = 3$), по-видимому, может быть объяснено удаленностью сейсмической сети Германии от сейсмически активных регионов планеты. В среднем число 9-октавных землетрясений на планете отмечалось в год 4–5, мини-максимум — 0–10.

Как видим, 9-октавные землетрясения, как и землетрясения с максимальными магнитудами в пределах других октав, являются достаточно закономерным явлением, характеризующим сейсмический процесс, протекающий в пределах границ тектонических плит.

3. Приведенные статистические данные и результаты выполненного анализа позволяют предположить, что между короткопериодными ($T \leq 10-20$ с) и длиннопериодными ($T > 20$ с) землетрясениями не существует резкой границы. Следовательно, модель очага землетрясения должна давать адекватное описание движений во всем диапазоне периодов — коротких, длинных и, по-видимому, сверхдлинных ($T \geq 1-10$ мин).

* 30 (152). Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. С. 24–26. Работа выполнена при поддержке Немецкой службы академических обменов — Deutscher Akademischer Austauschdienst, Bundesrepublik, Deutschland (DAAD).

Характерный масштаб движений, возникающих при 9-октавных землетрясениях, как видно из уже приведенных данных, слабо зависит от значения их магнитуд и может составлять многие сотни километров: $T_9 V_p \approx 640$ (450–900) км, где $V_p \approx 10$ км/с — скорость продольных сейсмических волн. Как видим, движения, возникающие при длиннопериодных землетрясениях, захватывают несколько «элементарных» блоков — очагов сильных землетрясений, которые, очевидно, следует считать взаимосвязанными. Другими словами, физическая модель, описывающая процессы в очагах землетрясений, должна опираться и на представления об их взаимодействии друг с другом. Так что же такое очаг землетрясения?

Приложения**

Приложение 1

Литература, которая использовалась при написании статьи

1. *Duda S.J., Gupta H.K.* Spectral magnitudes and seismograms measure radiatuin from seismic sources // *Eos, Transactions, Am. Geophys. Un.* V. — 1997. — № 39. — P. 417, 421, 423.
2. *Duda S.J., Kaiser D., Fastoff S.* Broad-band seismograms, band-pass seismograms and spectral magnitudes for selection of 1984 and 1986 earthquakes in Alpide-Himalayan belt // *Ins. Fur Geophys. Univ.* — Hamburg, 1989. — 240 p.
3. *Kumar M.R., Sarkar D., Duda S.J.* On the theory and unity of spectral seismograms // *Current Science.* — 1997. — Vol. 72. — P. 585–590.
4. *Tatsuhiko H., Keiko K.* The determination of moment tensor of the 1994 Bolivia deep earthquake using various data sets waves at very broadband frequency // *AGU 1994 Fall Meeting. December 5–9, 1994.* — San Francisco, California, 1994. — P. 465.

Приложение 2

Типичными длиннопериодными землетрясениями являются толчки, отмеченные, например, на Камчатке 18–30 января 1917 г. и ощущавшиеся с интенсивностью до 8 баллов по XII-балльной шкале MSK-64. По свидетельствам очевидцев и наблюдениям сейсмической станции в Петропавловске-Камчатском, располагавшейся на удалении 510 км от эпицентра наиболее сильного толчка с $M = 8,1$ этой серии, колебания носили «медленный волнообразный характер» [4, с. 14] и при каждом из толчков продолжались по несколько часов с периодом от 10 до 30 секунд [3]. В пос. Ключи на эпицентральной расстоянии 300 км, по свидетельству епископа Камчатского и Петропавловского Нестора, «люди в испуге выбежали на улицу... некоторые падали на колени и молились... коровы и собаки беспокоились. На расстоянии более 400 верст по восточному побережью... ощущалось сильное землетрясение, сопровождавшееся вышеописанными мною явлениями» [2]. Более полные данные об очаге землетрясения 30.01.1917 г. с $M = 8,1$ и его форшоках и афтершоках приведены в статье [1].

Литература

1. *Викулин А. В.* Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова // *Вулканология и сейсмология.* — 1986. — № 3. — С. 72–83.
2. *Викулин А. В., Семенец Н. В., Широков В. А.* Землетрясение будет завтра. — Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ АН СССР, 1989. — 84 с.
3. *Предварительный отчет о сейсмическом районировании участка строительства Кроноцкой ГЭС на Камчатке.* — Петропавловск-Камчатский: ИФЗ АН СССР, 1968. — 144 с.
4. *Пурин А. А.* О землетрясениях на Камчатке и их регистрация: краткий очерк. — Петропавловск-Камчатский, 1917. — 23 с.

** Приложения написаны автором при подготовке настоящего сборника к печати.

А. В. Викулин*Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН***УЕДИНЕННЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ ПОВОРОТНОЙ
ДЕФОРМАЦИИ КАК РЕЗУЛЬТАТ ВРАЩЕНИЯ ПЛАНЕТЫ***

В работе представлена модель волнового сейсмического процесса, опирающаяся на представления о ротационной природе упругих напряжений. В рамках модели рассмотрены следствия, касающиеся спектра скоростей миграции землетрясений, чандлеровского качания полюса Земли и процессов в очаге землетрясения. Показано, что сильное землетрясение является результатом взаимодействия тектонической волны кручения с соответствующим сейсмофокальным блоком. Обосновывается вывод, согласно которому на вращающейся планете тектонические волны кручения, рассматриваемые в совокупности, представляют собой упругое поле, являющееся результатом самосогласованного взаимодействия блоков геофизической среды.

**SOLITARY TECTONIC WAVE OF REVOLVING DEFORMATION
AS RESULT OF EARTH ROTATION**

A wave seismic model backed up by the idea about the rotary nature of the elastic strain is presented. Within the model framework the effects concerning the spectrum of the velocities of the earthquake migration, Chandler wobble and the processes in the earthquake sources are considered. It is shown that the strong earthquake is the result of the interaction of the solitary revolving wave with corresponding seismofocal block. The conclusion according to which the tectonic torsional waves on the rotating planet are the energizations of elastic field is motivated. Such a field is the result of the solitary interaction of the geophysical blocks of the geophysical medium.

Введение

Название статьи и ее содержание в определенном смысле были стимулированы выходом в свет работы [1], в которой содержится критический обзор публикаций по тектоническим волнам поворотной деформации. С целью объяснения волнового характера процесса, протекающего в местах стыка тектонических плит и прилегающих к ним областях, было создано много моделей [2–5]. В настоящее время накоплено достаточно геофизических данных, указывающих на волновой характер движений, возникающих при тектонических процессах. Однако прямых фактических данных о таких движениях имеется крайне мало. При этом прямые фактические данные о тектонических волнах поворотной деформации (о тектонических волнах кручения), по-видимому, отсутствуют вовсе. Поэтому проблема, обсуждаемая в работе [1], несомненно, является актуальной. В данной статье рассматривается вопрос о том, что волны кручения играют важную роль в тектонической жизни вращающейся планеты.

Ротационная модель сейсмического процесса [6–9]

Явление группируемости землетрясений и наличие закономерностей в расположении их очагов позволили предложить концепцию сейсмического процесса — совокупность землетрясений определенного магнитудного диапазона, рассматриваемую в пространстве и во времени с учетом взаимодействия их очагов [6]. Повторяемость землетрясений, их миграция, существование эффекта D -волн и возможность построения механических моделей, в рамках которых закономерности сейсмичности удалось связать с параметрами, характеризующими движение тектонических плит, указывают на то, что такой процесс имеет волновую тектоническую природу. Эффект удаленных форшоков и афтершоков; миграция землетрясений на большие расстояния в пределах протяженных зон, включая сейсмические пояса в целом; наличие тесной взаимосвязи между землетрясениями, с одной стороны, и вариациями вращения Земли, нутацией ее полюса, солнечной активностью, гелиофизическими параметрами, космическими факторами, процессами в атмосфере, количеством осадков, колебаниями уровня моря — с другой,

* 31 (164). Геофизический журнал. 2002. Т. 24. № 4. С. 90–101.

указывают на планетарный масштаб такого процесса, в котором взаимодействие очагов землетрясений имеет, по сути, дальнедействующий характер. Другими словами, очаги землетрясений или соответствующие им блоки земной коры, располагающиеся друг от друга на расстояниях, много бóльших их размеров, взаимодействуют между собой.

Был установлен блоковый характер геофизической среды, доказано, что Земля обладает сильно выраженными нелинейными свойствами, показано, что закономерности сейсмичности могут быть описаны аналитическими методами с помощью нелинейных волновых уравнений. Идея блокового строения геофизической среды неоднократно использовалась при построении моделей сейсмического процесса. Согласно данным обзора [10] отличительной особенностью таких моделей является их иерархичность, что, по сути, приводит к сильной нелинейности дифференциальных уравнений, с помощью которых описывается сейсмический процесс. Важным является вывод, который можно сделать на основании работы [11]: нелинейные волновые свойства геофизической среды, имеющей блоковое строение, как правило, оказывается возможным описать с привлечением уравнения \sin -Гордона (СГ). При этом динамические возмущения имеют солитонный характер и образуют некую упорядоченную структуру [12]. Вывод о том, что уравнение СГ описывает движение блоковой среды, с позиции моментной теории упругости является тривиальным. Действительно, антисимметричная часть тензора напряжений, связанная с микровращениями блоков, по определению, пропорциональна векторному произведению возвращающей силы, приложенной к поверхности блока, на его характерный размер (радиус), т. е., как показано в работе [13], синусу угла поворота блока.

Известные механические модели процессов, протекающих как в очагах землетрясений, так и в пределах тектонических поясов, основанные на представлениях о поступательном движении, не в состоянии описать эффекты дальнего действия очагов землетрясений. Анализ созданных со времен Рейда механических моделей очага землетрясения (по сути, локальных), проведенный в работе [14], убедительно показывает, что такие модели не объясняют некоторые важные закономерности реального сейсмического процесса, в частности такие, как процессы, протекающие в очагах так называемых замедленных, безмолвных и многократных (мультиплетных) землетрясений, и процессы, ответственные за излучение при землетрясениях как длиннопериодных (до 200 с и более), так и сверхдлиннопериодных (до 57 мин) колебаний — собственных колебаний планеты. В то же время известно, что взаимодействие микрообъемов твердого тела, движение которых имеет вихревой характер (дисклинаций), имеет дальнедействующий характер [15, 16]. Данные большого количества работ [17–20] указывают на поворотный характер движения блоков земной коры, являющихся частями сейсмически активной окраины Тихого океана и имеющих размеры в пределах первых сотен километров (сейсмофокальных блоков). С целью количественного определения эффекта дальнего действия была поставлена и решена задача расчета полей упругих напряжений вокруг поворачивающихся блоков геофизической среды.

В рамках классической теории упругости были найдены соответствующие сосредоточенному моменту аналитические решения для полей смещения и напряжения, возникающих вокруг поворачивающегося шарового радиуса R_0 объема, который является частью вращающегося твердого тела [7–9]. Для этого решалось уравнение упругого равновесия с нулевыми граничными условиями на бесконечности, с действующей на блок силой, равной нулю, и с моментом силы, не зависящим от размера блока. Основная идея заключалась в том, что изменение момента поворачивающегося объема, упруго связанного с окружающей его вращающейся средой (матрицей), приводит к появлению вокруг объема поля упругих напряжений, момент силы которого определяется законами сохранения механики. В результате для смещений U , напряжений σ , момента силы \vec{K} и энергии W упругого поля, сосредоточенного вокруг ($r \geq R_0$) поворачивающегося блока, в сферической системе координат (r, φ, θ) с началом в центре блока, углом φ , отсчитываемым в плоскости, перпендикулярной оси поворота блока, получены следующие решения:

$$U_\varphi = R_0^4 r^{-2} \Omega \sqrt{\frac{\rho}{15G}} \sin \theta \sin \beta / 2, \quad \sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = \frac{3}{2} R_0^4 r^{-3} \Omega \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \theta \sin \beta / 2, \quad (1a)$$

$$K = -6\pi^2 \Omega R_0^4 \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \beta / 2, \quad W = \frac{16}{15} \pi \rho \Omega^2 R_0^5 \sin^2 \beta / 2, \quad (16)$$

где β — угол поворота блока. Остальные компоненты смещений и напряжений в выбранной системе координат равны нулю. Появление множителя $\sin \beta/2$ в соотношениях (1а, 1б) является «геометрическим» следствием решаемой задачи. Действительно, момент силы поля упругих напряжений, который определялся как разность $\vec{K} = \vec{K}_1 - \vec{K}_2$ между его начальным и конечным положениями, в неинерциальной системе координат для блока шаровой формы не зависит от положения оси поворота ($|\vec{K}_1| = |\vec{K}_2|$) и в соответствии с теоремой косинусов $\vec{K} = 2|\vec{K}_1| \sin \beta/2$. При размере блока, равновеликого очагу сильнейшего землетрясения $R_0 \approx 50\text{--}100$ км, плотности среды $\rho = 3$ г/см³, модуле сдвига $G = 10^{11}$ н/м² и скорости вращения планеты $\Omega = 7,3 \cdot 10^{-5}$ рад/с для любых трех из четырех величин (смещения, напряжения, момента силы и энергии) из выражений (1а, 1б) получаем значения $U \sim 10$ м, $\sigma \sim 100$ бар, $K \sim 10^{29}$ дин·см, $W \sim 10^{17}$ Дж, которые по порядку величины близки величинам, наблюдаемым при таких землетрясениях. Одно из таких значений требуется для определения угла поворота блока, величина которого, как можно убедиться, $\beta \approx U/R_0 \approx 10^{-4}$ град, т. е. в рамках предлагаемого подхода углы поворота блоков невелики. Проведенные оценки показали, что полученные решения с точностью до численных коэффициентов, близких единице, справедливы для блоков овальной или эллиптической формы [9].

Для модели двух поворачивающихся блоков аналитически определялась энергия взаимодействия возникающих вокруг них упругих полей. При вычислениях был применен прием, который сводится к определению «перекрестного» слагаемого в выражении для полной упругой энергии. В соответствии с законом Гука в выражении для упругой энергии, представляющей квадрат суммы тензоров деформации, создаваемых каждым из двух поворачивающихся блоков в отдельности, слагаемое, соответствующее энергии взаимодействия, равно удвоенному произведению тензоров деформации. В результате для энергии взаимодействия получено следующее выражение:

$$W_{int} = \frac{3}{2} \pi \rho R_0^8 \Omega^2 l^{-3} \cos \phi,$$

где ϕ — угол между направлениями моментов сил полей напряжений, создаваемых вокруг каждого из блоков. При расстояниях между блоками $l = 4R_0$, характерных для сильнейших землетрясений-дуплетов, минимаксная ($\phi = 0, \pi$) величина энергии взаимодействия $W_{int, \min \max} \approx 10^{16}\text{--}10^{18}$ Дж по порядку величины близка упругой энергии, сбрасываемой при сильнейших землетрясениях. Это, по сути, указывает на самосогласованный характер полей упругих напряжений, возникающих вокруг поворачивающихся блоков на вращающейся планете.

Дальнейший характер взаимодействия блоков позволил в рамках ротационной модели перейти к задаче о движении цепочки поворачивающихся блоков. Рассмотрен случай цепочки равномерно поворачивающихся шаровых блоков. Уравнение движения блока, являющегося частью такой цепочки, в соответствии со вторым законом Ньютона можно записать в виде

$$I \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2} = \vec{K}_1 + \vec{K}_2,$$

где \vec{K}_1 — момент силы поля упругих напряжений, появляющихся вокруг блока в результате его поворота на угол β , выражение для которого дается первым соотношением в формуле (1б); \vec{K}_2 — момент силы, отвечающий за взаимодействие рассматриваемого блока с остальными блоками в цепочке; $I = 8/15 \pi \rho R_0^5$ — момент инерции блока. В соответствии с дальнедействующим характером взаимодействия сейсмофокальных блоков друг с другом (например, по аналогии с полями дисклинаций [15]) ясно, что величина момента \vec{K}_2 должна быть пропорциональна как упругой энергии рассматриваемого блока, равной $V \partial^2 \beta / \partial x^2$, так и упругой энергии, соответствующей всем остальным блокам цепочки. В качестве последней была выбрана величина, равная средней линейной плотности упругой энергии цепочки блоков w . Здесь $V = 4/3 \pi R_0^3$ — объем блока, x — координата вдоль цепочки блоков. Окончательно движение блока оказалось возможным описать уравнением СГ:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta, \quad (2)$$

где $\xi = k_0 x$, $\eta = c_0 k_0 t$ — безразмерные координаты; $\theta = \beta/2$; t — время; c_0 и k_0 — по сути, характерная скорость и волновое число процесса, определяемые параметрами модели

$$c_0^2 = \frac{wV}{I}, \quad k_0^2 = \frac{3\pi\Omega R_0^4}{wV} \sqrt{\frac{\rho G}{15}}.$$

Анализ показал [6, 13], что физически оправданно допущение, согласно которому длины тектонических волн по порядку величины соизмеримы с размерами блоков (тектоническое приближение):

$$k_0 = 2\pi/\lambda_0, \quad \lambda_0 \approx 2R_0. \quad (3)$$

В таком случае для величины характерной скорости процесса получаем выражение

$$c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \Omega R_0 \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (4)$$

Подставляя в выражение (4) приведенные параметры модели для величины скорости, характерной для сейсмического процесса, описываемого в рамках ротационной модели (как, например, скорость звука для обычных линейных задач теории упругости), получаем:

$$c_0 \approx 1 \text{ см/с}. \quad (5)$$

Значение характерной скорости, как видно из соотношения (4), можно переписать в виде $c_0^2 \sim V_R V_S$, где $V_S = \sqrt{G/\rho}$ — скорость поперечных сейсмических волн; $V_R = \Omega R_0$ — центробежная скорость, откуда следует, что упругие поля, возникающие вокруг поворачивающихся блоков, определяются величиной угловой скорости вращения планеты. Отсюда и название модели, данное ей авторами: ротационная модель сейсмического процесса.

Следует отметить, что задача о поле напряжений вокруг поворачивающегося объема, являющегося частью вращающегося тела, была решена в рамках классической теории упругости, в которой тензор напряжений является симметричным. Поэтому при формулировке задачи и ее решении нами не использовались представления моментной теории упругости. Более подробно этот аспект проблемы освещен в нашей статье [43], посвященной критическому анализу работы [1].

В рамках ротационной модели сейсмического процесса нашли естественное объяснение следующие явления.

Спектр скоростей миграции сейсмичности. Известный фактический материал о скоростях миграции сейсмичности, о волновых движениях земной коры и сопровождавших их сейсмических явлениях, включающий данные из более чем 100 публикаций разных авторов, собран в работе [21]. Данные о скоростях миграции тихоокеанских землетрясений представлены на рис. 1. Из графического материала этого рисунка можно сделать следующее заключение: все поле значений скоростей V в диапазоне семи порядков $10^{-2} \text{ см/с} \leq V \leq 1 \text{ км/с}$ на плоскости $(M_0 - \lg V)$, где M_0 — наименьшие значения магнитуд землетрясений, в анализируемых выборках землетрясений изменяется в пределах $1 \leq M_0 \leq 8$, достаточно отчетливо разбивается на две области, разделенные значением

$$V_0 = (10^2 - 10^3) \text{ км/год} \approx 1 \text{ см/с}. \quad (6)$$

В области с большими значениями ($V_2 > V_0$, $N_2 = 11$) расположены скорости миграции форшоков и афтершоков в очагах землетрясений, в области с меньшими значениями ($V_1 < V_0$, $N_1 = 26$) — скорости, определяющие миграцию в больших пространственно-временных пределах, включая сейсмический пояс в целом. Такие диапазоны скоростей будем называть соответственно областями локальной и глобальной миграции. В пределах каждой обозначенной области были рассчитаны методом наименьших квадратов зависимости $M_0 = a \lg V + b$. Полагая, что магнитуда землетрясения с величиной упругой энергии E , сбрасываемой при сейсмических толчках, определяется соотношением Гутенберга — Рихтера, полученные зависимости оказалось возможным переписать следующим образом:

$$E_1 \approx V_1^5, \quad V_1 < V_0, \quad (7)$$

$$E_2 \approx V_2^2, \quad V_2 > V_0. \quad (8)$$

Данные для других сейсмических поясов в совокупности ($N_1 = 20$, $N_2 = 4$) соответствуют соотношениям (6)–(8) [21].

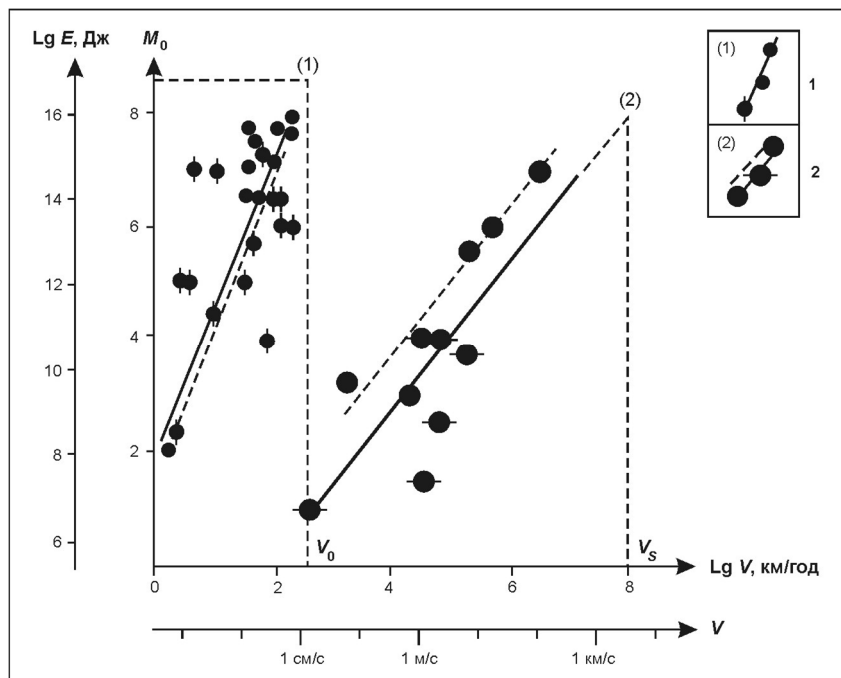


Рис. 1. Значения скоростей миграции тихоокеанских землетрясений и определенные по ним зависимости $M_0 = a \lg V + b$ [21]:

1, 2 — зависимости $M_0(V)$ соответственно для «локального» и «глобального» полей, определенные методом наименьших квадратов; пунктиром проведены такие же зависимости, полученные в работе [9] с использованием меньшего (примерно в два раза) количества данных, которые отмечены знаком (●); V_0 — значение скорости, разделяющее «глобальное» и «локальное» поля и являющееся предельным значением для «глобального» поля; V_S — предельное значение для «локального» поля, численно равно скорости поперечных волн

Следует отметить, что каждое из решений (7), (8), согласно данным работы [22], качественно является близким — что характерно для уравнения СГ (2) — солитонному (для которого энергия возбуждения $E = 0$ при скорости волны $U = 0$) и экситонному ($E > 0$ при $U = 0$) ветвям решений. Эти решения обозначены на рис. 2 соответственно кривыми (I) и (II). При этом предельное значение скорости солитонной ветви решения U_0 является характерной скоростью процесса, определяющей природу волновых возмущений.

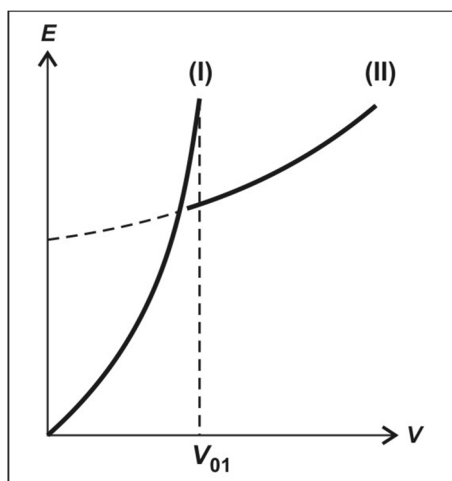


Рис. 2. Волновые решения уравнения синус-Гордона в осях «скорость V — энергия E » [22]:

I — солитоны; II — экситоны; V_{01} — характерная скорость процесса

Как видно, и смысловое $V_{01} \approx V_0$, и численное $V_0 \approx c_0$ равенства справедливы. Это позволяет сделать вывод, согласно которому соотношения (7) и (8), описывающие спектр скоростей миграции сейсмичности, являются решениями модельного уравнения ротационного сейсмического процесса.

Колебания Чандлера. Земля испытывает свободную нутацию, названную по имени ее первооткрывателя в 1891 г. как чандлеровское качание полюса, природа которого до сих пор не установлена. В рамках ротационной волновой модели сеймотектоническая природа такого колебания очевидна [23].

Отличительной особенностью экситонного решения уравнения СГ, как уже отмечалось, является наличие ненулевого решения при равном нулю значении скорости волнового возмущения (кривая II на рис. 2). Аналитический вид такого решения неизвестен, однако физика его особенности в «нуле» может быть исследована на примере дисперсионного соотношения линеаризованного уравнения СГ: $\omega^2 = \omega_0^2 (1 + \lambda_0^2 / \lambda)$. Здесь значение наименьшей (нулевой) частоты колебаний определяется из выражений (3) и (4) при помощи соотношения $\omega_0 = \pi c_0 / R_0$.

Физически очевидно, что в модели взаимодействующих сейсмофокальных блоков частота ω_0 достигается при длине волны $\lambda \rightarrow \infty$, когда все соседние блоки цепочки поворачиваются на один и тот же угол как твердое тело. В рамках ротационной модели сейсмического процесса такое движение соответствует повороту всего сейсмофокального объема тихоокеанского кольца как целого в плоскостях, перпендикулярных сечению кольца. При этом предельный переход $\lambda \rightarrow \infty$ равносильен $\lambda \rightarrow \Lambda$, где $\Lambda \approx 4 \cdot 10^4$ км — протяженность кольца, $\Lambda \gg R_0$. Вращательное движение сейсмофокального кольца, расположенного в пределах переходной зоны и упруго связанного как с тихоокеанской плитой, так и с окружающими ее материковыми плитами, очевидно, должно сопровождаться вертикальными колебаниями вполне определенного объема примерно тороидальной формы. Такое движение кольца вследствие изменения формы Земли должно приводить к прецессии полюса планеты с частотой ω_0 . Количественно описанный ранее сеймотектонический механизм нутации полюса планеты с привлечением сейсмологического и геодезического материала окраины Тихого океана в рамках ротационной модели сейсмического процесса обосновывается в работе [23].

Полученные по чандлеровскому колебанию полюса новые результаты в совокупности с данными других работ позволили заложить основы нового направления — квантовой сеймотектоники [24].

Землетрясение — как предельный экситон? Данные об очагах 20 мультиплетных землетрясений планеты магнитудного диапазона $4,4 \leq M \leq 8,5$, позаимствованные из 19 публикаций разных авторов, собраны в [21]. Как оказалось, скорость миграции толчков в мультиплете — по сути, скорость «вспарывания» — не зависит от магнитуды землетрясения и составляет $\bar{V} \approx 3 \pm 1$ км/с. Экстраполяция зависимости (8) в область предельных магнитуд $M_{\max} \approx 8-8,5$ для скорости миграции дает близкое значение, равное $V_{2, \max} (M_0 \rightarrow M_{\max}) \approx 108$ км/год $\approx 1-10$ км/с $\approx \approx V_S \approx V$. Полученные данные показывают, что модельное уравнение ротационного сейсмического процесса может иметь такое предельное экситонное решение, которое описывает процесс выделения упругой энергии в очаге землетрясения.

Землетрясение как результат взаимодействия тектонической волны кручения с сейсмофокальным блоком

Взаимодействие тектонической волны с сейсмофокальным блоком. Введение в ротационную модель эффектов неравномерного поворота блоков, слагающих сейсмофокальную зону сейсмического пояса, и диссипации приводит к уравнению их движения в виде возмущенного уравнения синус-Гордона (ВСГ) [9]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = [1 + \mu \delta(\xi)] \sin \theta + \alpha \frac{\partial \theta}{\partial \eta}, \quad (9)$$

где μ — параметр, определяющий силу, возвращающую блоки в режим равномерного поворота; α — коэффициент трения; $\delta(\xi)$ — дельта-функция.

Уравнение (9) решалось численно [25]. Решения для пройденного волной расстояния X , величины ее скорости U и величины угловой скорости поворота блока $\delta(t) = \partial\theta/\partial t$ при близких реальным разломам [26] значениях параметров $\alpha \approx 0,1-1$ и $\mu \approx 10^{-4}-10^{-2}$ как функции времени приведены на рис. 3. При вычислениях начальные условия выбирались следующими: при $t = 0$ и $X = 0$ значение скорости удовлетворяло условию $\delta_0 \leq 10^{-13} \text{ с}^{-1}$, что соответствует средней скорости деформации в сейсмоактивных [27] и вулканических [28] областях.

Из данных, представленных на рис. 3, можно сделать следующий вывод. Зависимости $X(t)$ представляют собой монотонные функции, имеющие «излом» в точках t_x и затем плавно выходящие на асимптотику X_a (рис. 3, а). Зависимости $U(t)$ имеют точки $t_{U_{\max}}$, в которых скорость волны достигает своего максимального значения U_{\max} , после чего плавно выходит на асимптотику U_a . Зависимости $\delta(t)$ имеют два четко выраженных максимума $\delta_{\max 1}(t_{\theta \max 1}) < \delta_{\max 2}(t_{\theta \max 2})$, которые разделены минимумом $\delta_{\min}(t_{\theta \min}) \ll \delta_{\max 1}$, $t_{\theta \max 1} < t_{\theta \min} < t_{\theta \max 2}$; затем зависимость $\delta(t)$ плавно выходит на асимптотику $\delta(t)_a$, $\delta_{\min} < \delta_a < \delta_{\max 1}$.

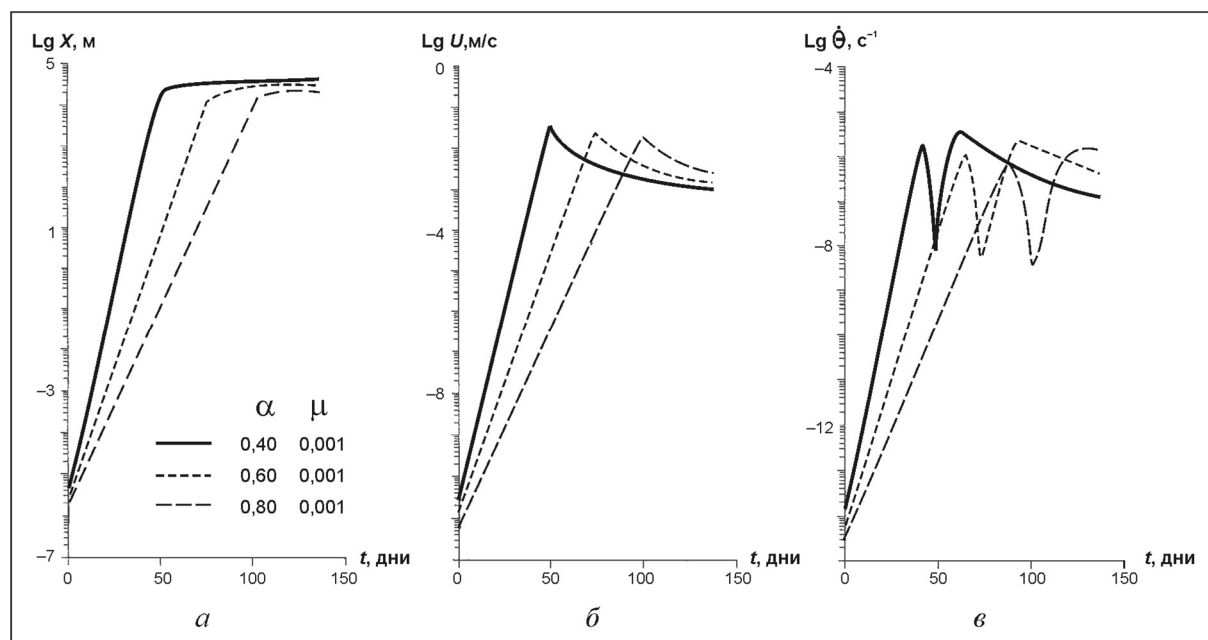


Рис. 3. Решения возмущенного уравнения синус-Гордона для расстояния X ($10^{-7} \div 10^5$ м), пройденного волной (а), скорости волны поворота U ($10^{-12} \div 10^0$ м/с) (б) и скорости деформирования δ ($10^{-4} \div 10^{-4}$ с $^{-1}$) (в) как функции времени при разных значениях параметров α и μ

Анализ полученных решений показывает следующее [25]. Скорости $U_a \div U_{\max} = (10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-2}) \text{ м/с} \approx 1 \div 10^3 \text{ км/год}$ изменяются в значительных пределах и включают весь «глобальный» диапазон значений скоростей уединенных волн миграции и деформации. Значения максимумов скоростей деформации составляют $(0,02-3,1) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ и согласуются с наблюдениями в очагах сильных землетрясений [26]. При этом минимальные значения δ_{\min} фиксируются на уровне $10^{-9}-10^{-7} \text{ с}^{-1}$, на котором изменение скорости деформирования практически не влияет на прочность горных пород. Как видим, модельные решения не противоречат физическим условиям, определяющим течение сейсмического процесса. Следует отметить, что значения U_{\max} не зависят от величины начальной скорости и с увеличением последней достигаются при меньших временах $t_{U_{\max}}$.

Все три решения — $X(t)$, $U(t)$ и $\delta(t)$ — обнаруживают такие свойства, которые позволяют установить физически прозрачные взаимосвязи между движениями сейсмофокальных блоков и распространением тектонических волн.

Во-первых, все три зависимости при малых временах изменяются по одному экспоненциальному закону

$$X \approx X_0 e^{at}, U = U_0 e^{at} \approx a X_0 e^{at}, \delta = \delta_0 e^{at} \quad (10)$$

и при больших временах выходят на асимптотику. Причем выход кривых $U(t)$ и $\delta(t)$ на асимптотику происходит примерно по одному и тому же закону. Эти данные указывают на то, что распространение тектонической волны, описываемое зависимостями $X(t)$ и $U(t)$, и движение сейсмофокального блока, характеризуемое зависимостью $\delta(t)$, по сути, представляют одно явление — процесс их взаимодействия. При этом значение X_a оказывается близким размеру модельного блока $X_a \approx R_0$, что позволяет конкретизировать взаимодействие и интерпретировать его как результат «захвата» тектонической волны сейсмофокальным блоком.

Три стадии взаимодействия. Во-вторых, отношения продолжительностей максимумов $\Delta t_{\theta \max 1, 2}$ и их амплитуд $\delta_{\max 1, 2}$ являются постоянными величинами:

$$\Delta t_{\theta \max 2} / \Delta t_{\theta \max 1} = 6 \pm 2, \quad (11)$$

$$\delta_{\max 2} / \delta_{\max 1} = 2 - 2,5. \quad (12)$$

Особенности распределения форшоков и афтершоков в очагах сильнейших курилокамчатских и японских землетрясений исследовались в работе [29]. Согласно данным, полученным в этой работе и представленным в таблице, интервалы времени, в течение которых форшоки и афтершоки происходят относительно сильнейших толчков, соотносятся в пропорции $\Delta t_a / \Delta t_\phi = 69 / 11 = 6,3$, близкой отношению продолжительностей максимумов скорости деформации δ (11).

Данные о временах наиболее сильных форшоков (ф) и афтершоков (а) с магнитудами $M \geq 7$, происшедших в очагах сильнейших северо-западно-тихоокеанских землетрясений в 1900–1980 гг.

| Сильнейшее землетрясение | | Форшок | | Афтершок | | Регион |
|------------------------------------|-----|-----------------|--------------------------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------|
| Дата | M | M | $\text{Lg } \Delta t_\phi [h]$ | M | $\text{Lg } \Delta t_a [h]$ | |
| 25.06.1904 | 7,7 | 7,7 | 0,78 | 7,3 | 1,43 | Южная Камчатка |
| 03.02.1923 | 8,5 | 7,0 | 1,54 | — | — | Кроноцкий залив, Камчатка |
| 24.02.1923 | 7,7 | — | — | 7,3 | 3,07 | Камчатский залив, Камчатка |
| 04.11.1952 | 8,5 | — | — | 7,0 | 3,17 | Авачинский залив, Камчатка |
| 04.05.1959 | 7,6 | — | — | 7,0 | 3,04 | Кроноцкий залив, Камчатка |
| 04.03.1952 | 8,3 | — | — | 7,2 | 2,13 | о. Хоккайдо, Япония |
| 04.11.1952 | 8,5 | — | — | 7,0 | 3,17 | Северные Курилы |
| 06.11.1958 | 8,2 | — | — | 7,4 | 2,15 | о. Итуруп, Южные Курилы |
| 13.10.1963 | 8,0 | 7,2 | 1,26 | 7,4 | 2,21 | о. Уруп, Южные Курилы |
| 11.08.1969 | 8,2 | 7,4 | -2,60 | 7,8 | -2,85 | о. Шикотан, Южные Курилы |
| 17.06.1973 | 7,9 | — | — | 7,4 | 2,22 | Малые Курилы |
| 24.03.1978 | 8,0 | 7,8 | 1,61 | — | — | о. Итуруп, Южные Курилы |
| 01.09.1923 | 8,2 | 7,1 | — | 7,3 | 1,38 | Канто, Япония |
| 05.11.1938 | 7,7 | | 3,60 | 7,5 | 1,08 | о. Хонсю, Япония |
| 07.12.1944 | 8,0 | | — | 7,1 | 2,94 | Тонанкай, Япония |
| 16.05.1968 | 7,9 | | — | 7,5 | 1,00 | о. Хонсю, Япония |
| Число толчков $N_{a, \phi}$ | | 6 | | 14 | | |
| Магнитуда $\overline{M}_{\phi, a}$ | | $7,4 \pm 0,3$ | | $7,3 \pm 0,2$ | | |
| Среднее $[h]$, ч | | $1,03 \pm 1,84$ | | $1,84 \pm 1,49$ | | |
| Интервал $\Delta [h]$, ч | | 11 | | 69 | | |

Примечание. Символы $\Delta t_\phi [h]$, $\Delta t_a [h]$ — интервалы времени между главным толчком и соответственно форшоком (ф) и афтершоком (а).

При равенстве магнитуд наиболее сильных форшоков и афтершоков $M_{\phi} = M_a$ их числа, а следовательно, и суммарные сейсмические энергии E_{ϕ} и E_a , выделяемые в течение форшоковой и афтершоковой стадий в очагах сильнейших землетрясений, соотносятся между собою в пропорции $N_a/N_{\phi} = E_a/E_{\phi} = 2,3$, близкой отношению величин максимумов скоростей деформации δ (12). На наш взгляд, приведенные данные о форшоках и афтершоках в очагах сильнейших землетрясений и результаты проведенного сравнительного анализа являются сильным аргументом в пользу предположения о том, что первый и второй максимумы на кривой $\delta(t)$, по сути, соответствуют форшоковой и афтершоковой стадиям сейсмического процесса.

В-третьих, моменты времени, соответствующие характерным точкам (минимумам $t_{\theta \min}$, максимумам $t_{U \max}$ и «перегибам» t_x) для всех трех решений, т. е. моменты, характеризующие особенности движения блока и распространения волны, оказываются близкими друг другу и (при постоянных ρ , G , R_0 и Ω для всех блоков цепочки) определяются только значениями параметров α и μ :

$$t_x \approx t_{U \max} \approx t_{\theta \min} = \tau_0(\alpha, \mu). \quad (13)$$

Из опытов по деформированию горных пород известно, что «пикообразные выбросы скорости деформаций соответствуют ускорению деформации» и сбросу нагрузки [30]. Тогда соотношения (13) отражают такую особенность взаимодействия, отвечающего за высвобождение накопленных напряжений, как землетрясение, которое соответствует локализации деформации в момент времени τ_0 . Как видим, решения ротационной модели описывают такие характерные стадии сейсмического процесса, которые в полном соответствии с сейсмологическими и лабораторными данными по разрушению горных пород возможно проинтерпретировать как три стадии сейсмического цикла — форшоки, афтершоки и главный толчок между ними.

Деформационная волна кручения. Из соотношений (10) следует, что угол поворота поля упругих напряжений пропорционален расстоянию, пройденному волной: $\theta = \chi X$, где χ — угол кручения. Как видим, «набегающая» на блок тектоническая волна в рамках ротационной модели сейсмического процесса является волной кручения.

Взаимодействие, имеющее волновую природу, согласно законам механики осуществляется в соответствии с вариационными принципами и проявляется в виде определенных закономерностей, которые наблюдаются при изменении определяющих задачу параметров в пределах многих порядков по величине. В одномерном случае уравнение СГ, как известно [31], относится к классу интегрируемых уравнений, для которых в явном виде существует и функция Лагранжа, и интегралы сохранения. Поэтому решения уравнения (9) должны адекватным образом описывать процесс взаимодействия тектонической волны с блоками сейсмофокальной зоны при изменении параметров модели α и μ в пределах многих порядков.

С целью поиска законов такого взаимодействия решения модельного уравнения (9) исследовались в широком диапазоне определяющих задачу параметров $\alpha > 0$ и $\mu > 0$, значения которых изменялись в пределах восьми-девяти порядков, включая рассмотренный диапазон $10^{-5} \leq \alpha \leq 10^{2-3}$, $10^{-5} \leq \mu \leq 10^{2-3}$ [32]. Оказалось, что в пределах всего этого диапазона параметров следующие величины имеют постоянные значения:

$$\delta_{\max 1} t_{\theta \max 1} = \text{const} = \varphi^* = 0,73 \pm 0,06 \text{ рад} = 42^\circ \pm 3^\circ, \quad (14)$$

$$U_{\max} t_{U \max} = \text{const} = R_0. \quad (15)$$

Полагая $t_{U \max} \approx t_{\theta \max 1}$, в соответствии с полученными в работе [32] данными для угла кручения получаем величину

$$\chi = \varphi^*/R \quad (16)$$

для первой, форшоковой стадии ($t \leq t_{U \max} \approx t_{\theta \max 1}$), имеющей смысл постоянной взаимодействия. При размере блока $R_0 = 100$ км ее значение $\chi \approx 10^{-7}$ рад/см.

Оказалось, что продолжительность первого максимума функции $\delta(t)$ не зависит от α : $t_{\theta \min} \neq f(\alpha)$, $t_{\theta \min} \approx 3 \mu^{-0,5}$. Слабая зависимость от α и примерно такая же от μ в том же диапазоне характерна и для значений $t_{U \max}$ [32]. Как видим, решения для $\delta(t)$ и $V(t)$ в окрестностях точек $t_{\theta \min}$ и $t_{\theta \max}$, а в соответствии с формулами (14) и (15) и в пределах всего временного интервала

τ_0 (13), имеют особенность одной природы. Это позволяет принять, что в течение первой стадии взаимодействие тектонической волны с сейсмофокальным блоком происходит без диссипации. Другими словами, в течение форшоковой стадии тектоническая волна кручения взаимодействует не с сейсмофокальным блоком, который остается неподвижным, а с полем упругих напряжений, которое в соответствии с представлениями ротационной модели сосредоточено вокруг блока.

Момент волны. Величина угла кручения, по определению [33], $\chi = M_f / C$, где C — крутильная жесткость объема среды, в пределах которого распространяется волна. Тогда, принимая значение крутильной жесткости, равное жесткости цилиндрического слоя $C = 2\pi GhR_0^3$ с радиусом R_0 и толщиной h , для момента силы M_f , приложенному к этому объему, получим выражение

$$M_f = 2\pi\chi GhR_0^3 = 2\pi Gh\varphi^* R_0^2. \quad (17)$$

Как видим, величина момента силы M_f (17), как и φ^* (14), R_0 (15) и χ (16), также имеет смысл постоянной взаимодействия в течение форшоковой стадии.

Значение φ^* , как хорошо известно [30], равно углу, под которым относительно направления главных напряжений образуется поверхность сдвигового разрушения в опытах по разрушению горных пород в лабораторных условиях. Другими словами, разворот поля упругих напряжений относительно остающегося неподвижным в течение форшоковой стадии блока на такой угол равносильно образованию кольцевой дислокации, вектор Бюргерса которой направлен вдоль оси цепочки блоков и по величине $D = \varphi^* R_0$ [33]. Тогда выражение для момента волны (17) можно переписать в виде

$$M_f = GDS, \quad (18)$$

где $S = 2\pi R_0 h$ — площадь сечения слоя, в пределах которого происходит взаимодействие тектонической волны кручения с полем упругих напряжений вокруг блока.

Полученное в рамках ротационной модели соотношение (18), по сути, совпадает с известным выражением для сейсмического момента M_0 [34]. Более того, при принятых ранее значениях R_0 и G и при $h = 10^{-(5 \div 3)} \cdot R_0$ численное значение для момента силы волны $M_f = 10^{28 \div 30}$ дин · см по порядку величины равно величине сейсмического момента очага для класса сильнейших тихоокеанских землетрясений [34].

Таким образом, в рамках ротационной модели результатом форшоковой стадии взаимодействия является создание таких условий, при которых тектоническая волна, «закручивая» поле упругих напряжений до критического угла φ^* , создает условия для образования вокруг сейсмофокального блока вдоль его поверхности кольцевой дислокации. Другими словами, если края дислокации к моменту ее образования «будут готовы» сместиться относительно друг друга, то в момент времени $t_{U \max} \approx t_{\theta \min}$ согласно представлениям ротационной модели должно произойти землетрясение.

Из физики твердого тела известно, что солитон при достаточно большой его энергии может распадаться на дислокацию и экситон [22]. Тогда очевидно, что условия, при которых в рамках ротационной модели должно происходить сильнейшее землетрясение, определяются тем, насколько тектоническая уединенная волна кручения является устойчивой к распаду на разрыв кольцевой формы (дисклинацию) и афтершоковые (экситонные) движения в очаге землетрясения.

Обсуждение результатов

Полученные в работе результаты показывают, что сейсмический процесс, протекающий в пределах окраины Тихого океана и прилегающих к ней областях, представляет собой результат коллективного взаимодействия всех блоков, слагающих сейсмофокальную зону. Численные оценки показали, что выводы ротационной модели количественно согласуются с реально измеряемыми на практике параметрами сильнейших землетрясений. Ротационный подход оказался плодотворным и позволил дать физически прозрачное объяснение наблюдаемому спектру скоростей миграции землетрясений, природе чандлеровского колебания полюса планеты и предложить новую, соответствующую закономерностям сейсмического процесса модель явлений, проис-

ходящих в очагах сильных землетрясений. Параметры, характеризующие ротационную модель очага, имеют четкий физический смысл и согласуются с экспериментальными данными лабораторных исследований по разрушению горных пород. В рамках такой модели очага теорема о соответствии момента силы упругого поля образующемуся при землетрясении разрыву [34] имеет ясный физический смысл. Для кольцевой дислокации (дисклинации), согласно работе [33], величина смещения при землетрясении, по определению, является вектором Бюргерса, поэтому при выводе теоретического выражения для момента силы упругого поля (сейсмического момента) не требуется никаких дополнительных предположений, которые допускаются в рамках существующих моделей очага [34, с. 78–82].

Коллективное взаимодействие блоков (по сути, дальное действие) в рамках ротационной модели удастся представить в виде «захвата» блоком тектонической волны. Совокупность таких волн представляет собой самосогласованное упругое поле всех блоков цепочки. При этом учет индивидуальностей движений блоков (неравномерностей их поворотов и трения) накладывает вполне определенные условия на поляризацию тектонических волн, которые должны рассматриваться как волны кручения. Такой вывод в рамках ротационного подхода является прямым следствием вращения Земли.

Явления, аналогичные тектоническим процессам на Земле, происходят и на других планетах. Покажем, что интенсивность таких явлений на планетах Солнечной системы находится в прямой (пропорциональной) зависимости от скорости их вращения вокруг своих осей.

Известно, что атмосферные и океанские вихри возникают вследствие вращения Земли. Еще более интенсивная циклоническая деятельность имеет место на Юпитере, период обращения которого вокруг своей оси составляет 10 часов. Это так называемое Большое красное пятно Юпитера, которое представляет собой солитон Россби и непрерывно наблюдается на поверхности планеты в ее средних широтах уже в течение более трехсот лет. В то же время сведения о циклонической деятельности в атмосфере Венеры, период обращения которой вокруг своей оси составляет 243 дня, неизвестны.

Имеются данные о «вихревом» характере движений, происходящих и в веществе твердой сферы вращающихся планет. К их числу относятся растрескавшаяся «ледяная шапка» на полюсе Марса (период вращения, как и у Земли, около суток) и вскрытые эрозией вулканические породы Ичинского вулкана на Камчатке. В обоих случаях наблюдаются «циклонические» структуры, имеющие явно выраженный вид раскручивающихся спиралей. На существование такого же типа движений в твердой мантии Земли указывают и так называемые «вихревые» структуры [28, 35]. На планетах, скорость вращения которых вокруг своей оси много меньше земной, например на Венере и не вращающейся вокруг своей оси Луне, вихревые структуры отсутствуют [28, 36].

Существование вихревых движений в твердой части вращающихся планет вполне закономерно. На больших отрезках времени Землю можно считать каплей вязкой жидкости. Как показано Б. Риманом и П. Дирихле в середине XIX в., капля такой вращающейся жидкости может быть устойчивой только при условии существования внутри нее вихревых движений. Следовательно, именно вращение Земли и является одной из основных постоянно действующих причин, вызывающих внутренние вихревые движения, в том числе и в ее твердой части [37]. Очевидно, что сформулированный вывод должен быть справедливым и по отношению к другим «твердым» планетам, вращающимся вокруг своей оси.

Имеющиеся для планет Солнечной системы данные о кольцевых структурах тектонической природы также можно рассматривать как своеобразный индикатор интенсивности их вращения. Действительно, генетические типы таких структур характерны для основных элементов строения Земли — платформ, щитов, складчатых поясов. Их размеры колеблются от сотен метров до 2000–3000 километров. Большая часть выявленных кольцевых структур возникла в результате тектонического развития Земли в течение последних 3 млрд лет, остальные, в основном имеющие сравнительно небольшие размеры, образовались вследствие падения метеоритов. Кольцевые структуры выявлены и на поверхности Меркурия (период обращения 59 дней), Марса, на большинстве спутников Юпитера. На Венере и Луне кольцевые структуры развиты в значительно меньшей степени [28, 38, 39], и они, по сути, являются другими образованиями, имеющими метеоритное или вулканическое происхождение [28, 36, 40].

Кольцевые структуры Земли «группируются» в цепочки и, возможно, в другие более сложные по геометрии образования. К их числу, например, можно отнести цепочку гигантских морфоструктур, протянувшихся вдоль всей восточной окраины Азиатского континента от Индонезии до Аляски [28, 39]. Такая цепочка, в свою очередь, может являться, по-видимому, частью другого, более протяженного планетарного масштаба образования, объединяющего кольцевые структуры окраины всего Тихого океана и Альпийско-Гималайской системы (до Океании включительно) в два пояса, которые протягиваются ортогонально друг другу по поверхности Земли вдоль двух кругов большого радиуса [41].

Совпадение простирающихся цепочек гигантских кольцевых структур и сейсмоактивных поясов на Земле неслучайно. Оно является отражением единой природы явлений, которые, с одной стороны, формируют такие тектонические структуры, с другой — управляют сейсмическим процессом, протекающим в пределах расположенных рядом поясов. Этот вывод оказалось возможным сформулировать в результате анализа, проведенного на разных масштабных уровнях — планетарном и Солнечной системы в целом, что позволяет считать ротацию планеты вокруг собственной оси «источником» сеймотектонического процесса планеты. Составляющая такого процесса, «регулируемая» сеймотектоническими волнами кручения, играет важнейшую, возможно, фундаментальную роль в жизни планеты.

Тектоническая жизнь Земли, связанная с относительным перемещением плит вдоль ее поверхности, достаточно активна, по крайней мере, в течение последних геологических эпох (десятков и, возможно, сотен миллионов лет). Поступательное движение вдоль поверхности вращающейся планеты всегда (кроме исключительных случаев) имеет ротационную составляющую. Вихревые компоненты, соответствующие всем движущимся тектоническим объектам, как и в случае шельфовых волн в Мировом океане [42, с. 185], могут «захватываться» волновыми свойствами межплитных зон и «конденсироваться» в их пределах; при этом в протяженных зонах возможно их резонансное усиление и перераспределение между разными типами волновых движений, что, в свою очередь, способно приводить в том числе и к перестройке всего тектонического процесса на планете. Примеры того, что такие процессы имеют место в «тектонической» жизни планеты, приведены в книге [35].

Для полного выяснения истинной роли сеймотектонических волн кручения необходимо, очевидно, дополнительно решить следующую задачу. Поворотное движение литосферных плит должно приводить вследствие вращения Земли к появлению вокруг них (как и вокруг поворачивающихся «элементарных» сейсмофокальных блоков) полей упругих напряжений, для расчета которых необходимо решить задачу о повороте «элементарной» плиты на поверхности вращающегося шара. Учитывая полученные в настоящей работе результаты, постановка такой задачи вполне закономерна. Ее решение, как представляется, станет теоретической основой тектонической (сеймотектонической) истории вращающейся планеты.

Литература

1. *Смирнов В. Б.* Уединенные волны поворотных колебаний — переоткрытие Додда? // Геофиз. журн. — 2001. — № 2. — Т. 23. — С. 118–120.
2. *Elsasser W. M.* Convection and stress propagation in the upper mantle // Applications modern physics to the Earth and planetary interiors / ed. S. K. Runcorn. — N. Y.: Wiley Interci, 1969. — P. 223–246.
3. *Savage J. C.* A theory of greep waves propagating along a transform fault // J. Geophys. Res. — 1971. — № 8. — P. 1954–1966.
4. *Лобковский Л. И., Баранов Б. В.* Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // Докл. АН СССР. — 1984. — Т. 275. — № 4. — С. 843–847.
5. *Николаевский В. Н.* Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Докл. РАН. — 1995. — 341. — № 3. — С. 403 — 405.
6. *Викулин А. В.* Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–824.
7. *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Ротационная модель сейсмического процесса // Българско геофизично списание. — 1996. — Т. XXII. — № 3. — С. 36–43.

8. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Модель сейсмического процесса // Вычислительные технологии. — 1997. — Т. 2. — № 2. — С. 20–25.
9. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. — 1998. — Т. 17. — № 6. — С. 95–103.
10. Любушин А. А. (мл.). Иерархическая модель сейсмического процесса // Физика Земли. — 1987. — № 11. — С. 43–52.
11. Быков В. Г. Нелинейные волновые процессы в геологических средах. — Владивосток: Дальнаука, 2000. — 190 с.
12. Михайлов Д. Н., Николаевский В. Н. Тектонические волны ротационного типа с излучением сейсмических сигналов // Физика Земли. — 2000. — № 11. — С. 12–22.
13. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. — М.: Недра, 1996. — 448 с.
14. Гуфельд И. Л., Гусев Г. А. Современное состояние работ по прогнозу землетрясений (Есть ли выход из тупика?) // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов: докл. конф. — М.: ОИФЗ РАН, 1998. — С. 7–25.
15. Лихачев В. А., Волков А. Е., Шудегов В. Е. Континуальная теория дефектов. — Л.: Ленингр. ун-т, 1986. — 232 с.
16. Владимиров В. И., Романов А. Е. Дисклинации в кристаллах. — Л.: Наука, 1986. — 224 с.
17. Geist E. L., Childs J. R., Scholl D. W. The origin of basins of the Aleutian ridge : implications for block rotation of an arc massif // Tectonics. — 1988. — Vol. 7. — № 2. — P. 327–341.
18. Геологическая история территории СССР и тектоника плит / под ред. Л. П. Зоненшайна, Е. И. Приставакиной. — М.: Наука, 1989. — 206 с.
19. Daly M. C. Correlation between Nazka-Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador // Tectonics. — 1989. — Vol. 8. — № 4. — P. 769–790.
20. Nur A., Ron H., Scotti O. Fault mechanics and the kinematics of block rotation // Geology. — 1986. — Vol. 14. — P. 746–749.
21. Викулин А. В. Миграция и осцилляции сейсмической активности и волновые движения земной коры // Пробл. геодинамики и прогноза землетрясений. — Хабаровск: ИГиГ ДВО РАН, 2001. — С. 205–224.
22. Давыдов А. С. Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах // Успехи физических наук. — 1982. — Т. 138. — Вып. 4. — С. 603–643.
23. Викулин А. В., Кролевец А. Н. Чандлеровское колебание полюса и сеймотектонический процесс // Геология и геофизика. — 2001. — Т. 42. — № 6. — С. 996–1009.
24. Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. — 318 с.
25. Викулин А. В., Быков В. Г., Лунева М. Н. Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса // Вычислительные технологии. — 2000. — Т. 5. — № 1. — С. 31–39.
26. Кулагин В. К. Долгосрочные предвестники серии сильных землетрясений / В. К. Кулагин, А. С. Маламуд, В. И. Старков, М. В. Кулагина // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1980. — № 9. — С. 110–117.
27. Радионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М. Основы геомеханики. — М.: Недра, 1986.
28. Мелекесцев И. В. Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Пробл. глубинного вулканизма. — М.: Наука, 1979. — С. 125–155.
29. Викулин А. В., Викулина С. А., Митякин В. П. Сценарий возможного сейсмического воздействия на Петропавловск-Камчатский в результате катастрофического землетрясения. — М.: ИЛ АН СССР, 1991. — 55 с.
30. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука, 1993. — 314 с.
31. Скотт А., Чжу Ф., Маклафлин Д. Солитон — новое понятие в прикладных науках // ТИИЭР. — 1973. — Т. 61. — С. 79–123.

32. Викулин А. В. Землетрясение как результат взаимодействия тектонической волны с сейсмофокальным блоком // Пробл. сейсмичности Дальнего Востока. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. — С. 243–254.
33. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. — М.: Наука, 1965. — 204 с.
34. Касахара К. Механика землетрясений. — М.: Мир, 1985. — 264 с.
35. Ли Сыгуан. Вихревые структуры и другие проблемы, относящиеся к сочетанию геотектонических систем Северо-Западного Китая. — М.: Госгеолтехиздат, 1958. — 132 с.
36. *Maps of part of the Northern hemisphere of Venus. Miscellaneous investigations series.* — U.S.: Geological Survey, 1989.
37. Поплавский А. А., Соловьев В. Н. Гипотеза о макроскопическом дефекте, порождающем землетрясения // Пробл. сейсмичности Дальнего Востока. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. — С. 235–242.
38. Кольцевые структуры Земли: миф или реальность / Я. Г. Кац, В. В. Козлов, А. И. Полетаев, Е. Д. Сулиди-Кондратьев. — М.: Наука, 1989. — 190 с.
39. Кулаков А. П. Морфоструктуры Востока Азии. — М.: Наука, 1986. — 176 с.
40. Галкин И. Н. Геофизика Луны. — М.: Наука, 1978. — 176 с.
41. Шейдеггер А. Основы геодинамики. — М.: Недра, 1987. — 384 с.
42. Волны в пограничных областях. / В. В. Ефимов, Е. А. Куликов, А. Б. Рабинович, И. В. Файн. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 280 с.
43. Викулин А. В., Иванчин А. Г. По поводу статьи В. Б. Спиргуса «Уединенные волны поворотных колебаний — переоткрытие Додда?» // Геофиз. журн. — 2002. — Т. 24. — № 3. — С. 113–117.

А. В. Викулин

Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН

РОТАЦИЯ И ПРОГНОЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НЕДР ЗЕМЛИ*

Показывается, что физика и математическое описание напряженного состояния земной коры в районах и рудников, и активных сейсмостектонических регионов в рамках «ротационного» подхода имеют общие черты и могут быть описаны аналитически.

Вращательное движение как фундаментальное свойство пространства — времени Вселенной

Вращательное движение вещества характерно для всего диапазона масштабов: от галактик и, возможно, их скоплений ($R \sim 10^{25-27}$ м) до элементарных частиц ($R \sim 10^{-15}$ м). При этом время жизни спиралевидных рукавов галактик составляет миллиарды лет ($\tau \sim 10^{17}$ с), а короткоживущие ($\tau \sim 10^{-23}$ с) частицы-резонансы «от рождения» имеют вполне определенный внутренний момент количества движения — спин.

На звездном уровне, например в Солнечной системе, движение планет и прилегающего к ним вещества подчиняется квазипотенциальному вращению [1]. На планетарном уровне вращательные движения проявляются в виде циклонов ($R \sim 10^6-10^7$ м) в атмосферах (Земля, Юпитер, Сатурн, Нептун), течений в Мировом океане (Земля), а также кольцевых [2, 3] и вихревых [4, 5] ($R \sim 10^2-10^6$ м) образований (Земля, Марс, Венера, Луна и другие спутники), объединенных, например, в пределах твердой части литосферы Земли в планетарную систему [6].

Одним из результатов движения блоков твердой среды являются дислокации и дисклинации. Их размеры и характерные времена изменяются в широких пределах: от микротрещин ($R \sim 10^{-8}$ м, $\tau \sim 10^{-8}$ с [7]) до очагов сильнейших землетрясений ($R \sim 10^6$ м, $\tau \sim 100$ лет $\sim 10^9$ с [8]) и, возможно, сейсмических поясов ($R \sim 10^8$ м, $\tau \sim 10^8$ лет $\sim 10^{15}$ с [9]). Эффекты поворота макрообъемов на большие углы, например до 10° и более (эффекты вращения), выявлены в твердых телах в лабораторных экспериментах [10]. Как показали результаты, полученные в последние десятилетия, такие эффекты связаны с перестройкой структуры твердого тела, происходящей на «мезоуровне» ($R \sim 10^{-7}-10^{-3}$ м, $\tau \sim 10^{-8}$ с [11]).

Как видим, вращательные движения характерны для пространственно-временных масштабов в пределах 40 (!) порядков независимо от физического состояния вещества. При этом в любой области Вселенной имеют место вращения всех масштабов, что, по-видимому, позволяет принять гипотезу о «равномерной завихренности» пространства. Такое фундаментальное свойство могло быть «придано» материи, по-видимому, только в момент Большого взрыва.

Ротация и упругость

В последнее время получила всеобщее признание концепция блокового строения геофизической среды. Имеется много независимых геофизических данных, а также данных прямых геодезических и наклономерных измерений, указывающих на поворотный характер движения слагающих земную кору блоков и плит. В этой связи была рассмотрена задача о полях напряжений, возникающих вокруг упруго сцепленных с окружающей средой и поворачивающихся за счет внутренних источников блоков, являющихся частями вращающегося твердого тела. Задача решалась в три этапа [8].

Аналитически решена задача о поле упругих напряжений, возникающих вокруг упруго сцепленного с окружающей средой и поворачивающегося за счет внутренних источников шарового блока, являющегося частью вращающегося твердого тела. Полагалось, что изменение момента количества движения блока компенсируется моментом силы возникающего вокруг него упругого поля. Доказан дальнедействующий характер такого упругого поля, что позволило перейти к рассмотрению цепочки блоков.

* 32 (183). Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2004. С. 19–25.

Феноменологически решена задача об упругом поле, возникающем вокруг цепочки равномерно поворачивающихся блоков. Установлено существование двух классов волновых решений: солитонов и экситонов, с помощью которых оказалось возможным описать весь спектр скоростей миграции тихоокеанских землетрясений как функции сбрасываемой в их очагах упругой энергии (магнитуды). Оказалось, что «нулевые» колебания цепочки, по своим параметрам совпадающей с окраиной Тихого океана, вызывают нутацию полюса планеты с амплитудой и частотой, соответствующей колебанию Чандлера.

Учет трения и неравномерности поворота блоков в цепочке позволил установить класс решений, ответственных за их взаимодействие с уединенными (тектоническими) волнами. В этом классе численными методами выявлено решение, как описывающее форшоковую и афтершоковую стадии, так и содержащее такую неустойчивость, заключенную между ними, которая, по сути, соответствует главному толчку.

Таким образом, в рамках одной модели — ротационного волнового сейсмического процесса — был получен такой набор решений, который, во-первых, объясняет наблюдаемые значения скоростей миграции землетрясений (включая нутацию полюса Земли) или соответствующих им тектонических (сейсмотектонических) волн, во-вторых, описывает и сам процесс землетрясения и его форшоковую и афтершоковую стадии.

Следует отметить, что задача о поле напряжений вокруг поворачивающегося объема, который является частью вращающегося твердого тела, была решена в рамках *классической теории упругости*, в которой тензор напряжений симметричный. Поэтому при формулировке задачи и ее решении нами не использовались представления моментной теории упругости, моментные модули которой и соответствующие им упругие скорости до сих пор не определены экспериментально.

Ротация и тектоника

Проблема вращательных движений в плитовой тектонике не нова [4, 5, 12]. Движение плит, согласно «ротационному» принципу, вследствие вращения Земли должно приводить к появлению вокруг них (как и вокруг поворачивающихся «элементарных» сейсмофокальных блоков) полей упругих напряжений, имеющих соответствующим образом ориентированные моменты сил [8]. С физической точки зрения постановка такой задачи вполне закономерна, и данные по кольцевым и вихревым структурам, выявленным на планетах и их спутниках в Солнечной системе, подтверждают это. Действительно, на планетах и спутниках, скорость вращения которых меньше земной и марсовой, например на Венере и Луне, вихревые структуры отсутствуют, а кольцевые структуры имеют не тектоническое, а вулканическое или метеоритное происхождение [2, 5, 12, 14].

Таким образом, и географические очертания границ тектонических плит и блоков, и их сейсмическая активность на вращающейся планете должны определяться полем «дальнодействующих» упругих напряжений, образующихся в литосфере. При этом сейсмический процесс, как и геофизическая среда, в которой он реализуется, характеризуется сильнонелинейными свойствами. Такие свойства описываются с помощью сильнонелинейных уравнений Кортевега-де-Вриза, синус-Гордона, Бусинеска, Шредингера и др., отличительной особенностью которых является наличие решений в виде уединенных волн (солитонов) и (или) маятниковых волн [8, 12, 15–18].

Геомеханика

Анализ естественных напряжений, выполненный по результатам измерений в рудниках на территории Северной Евразии [19], показал, что весь массив коры, обладая определенной структурой, в каждый момент самоорганизуется, уходит от ситуаций с накоплением энергии за счет перестройки структуры, и только исчерпав эти возможности, резко перестраивается и организует новую структуру, в «одежде» которой ему будет «легче жить» [20]. Описание такой перестройки осуществляется в том числе и с помощью маятниковых волн [16], являющихся, по сути, солитонами.

О возможном механизме напряженного состояния земной коры

Значительное изменение режима вращения планеты (по всей видимости, последний раз оно имело место 50–100 млн лет тому назад вследствие геологической катастрофы, связанной с формированием и разрушением поднятия Дарвина в центральной части Тихого океана [9]) должно было привести к накоплению в ее упругой части литосферы значительных напряжений, специфика которых определяется тем, что в упругую энергию перешла часть кинетической энергии вращения планеты. Механизм такого превращения энергии заключается в следующем. Изменение режима вращения планеты вследствие неоднородности литосферы приводит к повороту ее однородных блоков относительно друг друга. При этом в пределах граничных областей, разделяющих блоки, концентрируются такие напряжения, моменты сил которых в силу сохранения момента количества вращения стремятся скомпенсировать повороты блоков.

«Накачка» напряжений в литосферу продолжалась в течение изменения режима вращения планеты. Очевидно, для релаксации таких напряжений необходимо скомпенсировать соответствующие им моменты сил, для чего требуется изменить режим вращения планеты в обратном порядке. Никаким другим способом напряжения, накопленные в земной коре в результате изменения режима вращения планеты, снять невозможно. По-видимому, с помощью такого механизма можно дать объяснение открытому Л. Н. Рыкуновым с коллегами эффекту напряженного состояния земной коры — сейсмической эмиссии, присущей Земле в широком диапазоне глубин и во всем разнообразии геологических и тектонических условий [21, 22].

Совмещая представления описанной ротационной модели с движением тихоокеанской плиты, можно предположить, что блоки, слагающие сейсмофокальную зону в пределах ее окраины, первоначально были «закручены» в результате процессов, происходящих при росте и разрушении поднятия Дарвина. В таком случае сильнейшие сейсмофокальные землетрясения, рассматриваемые в совокупности, по сути, соответствуют процессу, который является ответственным за диссипацию той части кинетической энергии вращения планеты, которая при разрушении поднятия Дарвина перешла в упругую энергию литосферы.

Сейсмический процесс является составной частью тектонического процесса, протекающего в пределах окраины Тихого океана и всей планеты. По этой причине извержения вулканов «огненного» кольца также можно рассматривать как результат диссипации запасенной в литосфере энергии.

Однако существование сильного взаимодействия между очагами сильнейших землетрясений — сейсмофокальными блоками, а также существование взаимосвязи между сейсмическим и вулканическим процессами указывают на то, что после разрушения поднятия Дарвина процесс выделения сейсмической и вулканической энергии в пределах окраины Тихого океана, по-видимому, «самоорганизовался». Накопленные сейсмологические данные о самоподобии сейсмического процесса [23, 24], его самосинхронизации [17] и автоколебательном характере [18] подтверждают такой возможный вывод модели. Это значит, что в настоящее время имеет место не только диссипация запасенной ранее энергии, но и «подпитка» такого тектонического процесса внешними источниками, которыми, по-видимому, в первую очередь являются как солнечная и космическая энергия, так и энергия, заключенная внутри недр Земли.

Ротация и прогноз

Приведенные результаты позволяют подойти к проблеме прогноза землетрясений с других позиций.

В рамках волновой ротационной модели аналитическими методами выявлена особенность, отвечающая неустойчивому характеру движения сейсмофокальных блоков при их взаимодействии с тектоническими волнами. Согласно данным лабораторных исследований, по сути, такую же неустойчивость должно иметь поле напряжений в очаге землетрясения во временной окрестности главного толчка, включающей его форшоковую и афтершоковую стадии. Другими словами, существование возможности количественного описания фор-афтершоковой стадии сейсмического цикла численными методами позволяет в принципе построить такую теорию прогноза

землетрясений, включающую указание и времени толчков, и мест расположения их очагов, которая, по сути, является в большей степени детерминированной, чем статистической. Как видим, ротационная модель сейсмического процесса открывает новые пути решения проблемы прогноза землетрясений. Для ее решения «центр тяжести» исследований физики процесса необходимо в дальнейшем переносить с очага отдельно взятого землетрясения на совокупность очагов.

Как видим, описание напряженного состояния среды в районах рудников и сейсмических регионов имеет много общих черт, физика и математическое описание которых, по сути, едины. Это позволяет предположить, что объединение ротационно-волнового сеймотектонического [8, 12] и геомеханического [16, 19, 20] способов описания процесса позволит приблизить нас к построению детерминированной теории прогноза напряженного состояния среды.

О природе процессов, протекающих при изменении напряженного состояния геофизической среды

Ранее отмечалось, что в рамках ротационной модели было получено такое решение, которое, по сути, соответствует неустойчивости процесса передачи (перераспределения) деформации или выделению накопленной упругой энергии.

Следует отметить, что в ротационную модель не закладывались *никакие* критические условия (критерии) разрушения вещества. Поэтому существование неустойчивости в процессе передачи (перераспределения) поворотной деформации в системе взаимодействующих блоков заложено в самой природе сеймотектонического процесса. Этот вывод является принципиально новым результатом, который предопределен постановкой задачи и ее решением. Как видим, полученный нами новый результат есть прямое следствие постановки задачи о сейсмическом процессе как задачи статистической, изучающей закономерности распределения большой совокупности сейсмофокальных блоков в их взаимодействии друг с другом. Физика такого процесса, как нам представляется, может заключаться в следующем [25].

Обратная задача для объемного очага землетрясения, как известно, имеет не единственное решение [26]. В работе [27] показано, что для уединенного источника расширения задача имеет два решения: $U_1^* \sim r^{-2}$, $U_2^* \sim f(\vartheta)r^{-2}$. Следовательно, общее решение задачи о ротационном очаге можно записать в виде $T = C_1^*U_1^* + C_2^*U_2^*$, где C_1^* и C_2^* — произвольные константы, значение которых следует находить не из граничных, а из дополнительных условий. В задаче об уединенном источнике кручения (в «ротационной» задаче) два независимых решения, очевидно, будут иметь следующий вид: $U_1 \sim f(\varphi)r^{-2}$, $U_2^* \sim f(\vartheta)r^{-2}$. При этом «энергетические» свойства решения U_1 близки свойствам решения U_1^* и общее решение задачи об уединенном очаге землетрясения запишется в виде $T = C_1U_1 + C_2U_2$. Существование двух решений в принципе указывает на наличие и двух значений энергии $W_{1,2}$, $W_1 \neq W_2$ (энергетических уровней), каждое из которых определяет устойчивое состояние системы.

Как видим, из самых общих соображений следует, что задача об уединенном ротационном очаге имеет как минимум два независимых решения. Следовательно, очаг и окружающая его среда могут находиться на двух энергетических уровнях, каждый из которых соответствует квазиравновесному состоянию. Перечисленные результаты, следующие из анализа решений задачи об уединенном ротационном очаге, позволяют предположить, что неустойчивое решение для скорости поворотной деформации, полученное в рамках ротационной модели, описывает переход блока из одного квазиравновесного состояния в другое с выделением (или, возможно, поглощением) упругой энергии.

Для получения точного решения, описывающего такой переход, необходимо, очевидно, решить динамическую задачу о ротационном очаге.

Проведем некоторые оценки с помощью статической теории [27]. Изменение объема среды для общего решения задачи упругого равновесия о точечном источнике расширения определяется соотношением

$$\Delta V(T) = \int T, dS = 2\pi(2C_1 - C_2(a+3))/3.$$

Отсюда следует, что при $\Delta V = 0$ поле диполя сосредоточенной силы должно определяться соотношением $2C_1 - C_2(a + 3)/3 = 0$ и, следовательно, одна из констант выражается через другую следующим образом: $C_1 = C_2(a + 3)/6$.

Объемные напряжения, являющиеся следом тензора напряжений, записываются следующим образом: $S = \sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{\vartheta\vartheta} = ar^{-3}K(3 \sin^2 \vartheta - 2)$, где K — коэффициент объемного расширения. Максимальное значение этого выражения достигается на поверхности очага ($r = R_0$) в точке $\vartheta = \pm \pi/2$ и при критерии (критическом условии) разрушения, равном энергетической (или объемной) прочности σ_E [28], будет составлять: $a C_2 K R_0^{-3} = \sigma_E$ или $C_2 = a \sigma_E K R_0^3$. Отсюда значение второго коэффициента в случае выделения упругой энергии из объема (о) определится по формуле

$$C_{1(o)} = R_0^3 \sigma_E (a + 3) / 6 a K. \quad (1)$$

Сдвиговая компонента напряжений $\sigma_{r\vartheta} = C_2 G(4a - 3) \sin(2\vartheta) / 4r^3$, где G — модуль сдвига, откуда в случае критерия сдвигового (сд) разрушения значение коэффициента C_2 будет равно $4R_0^3 \sigma_{сд} / G(4a - 3)$ и, следовательно,

$$C_{1(сд)} = 4(a + 3)R_0^3 \sigma_{сд} / 6G(4a - 3). \quad (2)$$

Как видим, уровни, соответствующие объемным (1) и сдвиговым (2) критериям (критическим условиям) выделения упругой энергии, могут значительно различаться. В частности, в задаче об уединенном точечном источнике смещения, по сути, близкой задаче о ротационном очаге землетрясения, отношение значений, соответствующих этим энергетическим уровням при средних параметрах, составляет около 0,7 [27]. При этом уровень «дилатационной» (или, в случае нашей задачи, ротационной) компоненты примерно на 1/3 превышает уровень второй компоненты. Приведенные оценки показывают, что выделение упругой энергии в том или ином конкретном случае может происходить с помощью различных («объемного» или «сдвигового») механизмов.

Таким образом, в результате рассмотрения ансамбля взаимодействующих очагов землетрясений был получен принципиально новый результат. Вещество литосферы, в котором накапливается упругая энергия, может находиться в двух квазиравновесных состояниях, которые определяются самой природой тектонического процесса. Выделение же упругой энергии при сильнейшем землетрясении, т. е. переход вещества окружающего очаг землетрясения из одного состояния в другое, осуществляется с помощью механизма, который определяется величиной скорости вращения планеты и ее вариациями. Механизмы выделения упругой энергии в физике прочности принято обозначать с помощью соответствующих критических условий: энергия либо выделяется из объема, либо «снимается» с поверхности образующейся при землетрясении трещины или системы трещин.

Следует отметить, что механизм диполя сосредоточенной силы в рамках задачи о ротационном очаге не является единственно возможным. Например, в случае, если изменение величины упругих деформаций приводит к изменению объема (что, например, происходит при деформировании твердых тел с инородными включениями), т. е. при $\Delta V \neq 0$ может быть реализован дилатационный механизм напряженного состояния. Это означает, что механизм диполя сосредоточенной силы не является единственным и при некоторых условиях даже преобладающим. В этом случае вследствие появления новых квазиравновесных энергетических уровней, число которых в случае n очагов может составить 2^n , решение задачи становится неоднозначным, что происходит вследствие невозможности определить некоторые из констант C_i ввиду недостаточного для этого количества физических условий.

Литература

1. Шило Н. А., Латкин А. С. Математическая интерпретация вихревой структуры протопланетного облака Солнечной системы // Тихоокеанская геология. — 1987. — № 4.
2. Кац Я. Г. Кольцевые структуры Земли: миф или реальность / Я. Г. Кац, В. В. Козлов, А. И. Полетаев, Е. Д. Сулиди-Кондратьев. — М.: Наука, 1989.
3. Кулаков А. П. Морфоструктуры Востока Азии. — М.: Наука, 1986.
4. Ли Сыгуан. Вихревые структуры Северо-Западного Китая. — М.; Л.: Госгеолтехиздат, 1958.
5. Мелекесцев И. В. Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Пробл. глубинного вулканизма. — М.: Наука, 1979.
6. Шейдеггер А. Основы геодинамики. — М.: Недра, 1987.
7. Вопросы материаловедения: науч.-техн. журн. — СПб., 1996. — № 1 (29).
8. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003.
9. Викулин А. В., Мелекесцев И. В. Сейсмичность, вулканизм Тихого океана и вращение планеты // Българско геофизично списание. — 1997. — Т. XXIII. — № 1.
10. Владимиров В. И., Романов А. Е. Дисклинации в кристаллах. — Л.: Наука, 1970.
11. Рыбин В. В. Закономерности формирования мезоструктур в ходе развитой пластической деформации // Вопр. материаловедения. — 2002. — № 1 (29).
12. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. — М.: Недра, 1996.
13. Галкин И. Н. Геофизика Луны. — М.: Наука, 1978.
14. Maps of part of the Northern hemisphere of Venus. Miscellaneous investigations series. — U.S.: Geological Survey, 1989.
15. Быков В. Г. Нелинейные волновые процессы в геологических средах. — Владивосток: Дальнаука, 2000.
16. Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. 2 // ФТПРПИ. — 2000. — № 4.
17. Николаев А. В. Проблемы нелинейной сейсмологии. — М.: Наука, 1987.
18. Хаврошкин О. Б. Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии. — М.: ОИФЗ РАН, 1999.
19. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: материалы Междунар. конф., Новосибирск, 4–7 октября 1999 г. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1999.
20. Леонтьев А. В. Анализ естественных напряжений по результатам измерений в рудниках на территории Северной Евразии // ФТПРПИ. — 2001. — № 1.
21. Рыкунов Л. Н., Хаврошкин О. Б., Цыплаков В. В. Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1979. — № 11.
22. Высокочастотные сейсмические шумы и вибросигналы: методы, результаты и перспективы / А. В. Николаев, Л. Н. Рыкунов, О. Б. Хаврошкин, В. В. Цыплаков. — М.: ИФЗ АН СССР, 1985.
23. Садовский М. А., Писаренко В. Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. — М.: Наука, 1991.
24. Рыкунов Л. Н., Смирнов В. Б. Сейсмология микромасштаба // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 3.
25. Волновая геодинамика литосферы Земли / А. В. Викулин, В. Г. Быков, М. Н. Лунева, А. Г. Иванчин // Сопряженные задачи механики и экологии. — Томск: ТГУ, 2000.
26. Павлов В. М. О неединственности обратной задачи для объемного очага землетрясения // Физика Земли. — 1996. — № 2.
27. Ivanchin A. G. Spherical asymmetric solution for point defect // J. Mater. Sci. Technol. — 1994. — № 10.
28. Артамонов А. М. Оценка прочностных свойств среды с помощью энергетической модели сейсмического режима // Исслед. по физике землетрясений. — М.: Наука, 1976.

Т. Ю. Тверитинова¹, А. В. Викулин^{2,3}¹ *Московский государственный университет*² *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*³ *Камчатский государственный педагогический университет***ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ
ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ***

Строение границ литосферных плит — зон сдвиговых деформаций — рассматривается как геологическое доказательство «собственного» (не Эйлера) вращения плит. Анализ особенностей структурных рисунков полей деформаций на геологических и тектонических картах подтверждает существование структур вихревого типа. Устанавливается существование имеющих разные характерные времена двух прямо пропорциональных зависимостей между скоростями движения литосферных плит и протяженностями их конвергентных и дивергентных границ. Получает свое дальнейшее развитие гипотеза о взаимосвязи вихревых процессов в тектоносфере с ротационно обусловленными волновыми движениями планетарного масштаба. Приводится обзор вихревых движений и обширная библиография.

**GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL SIGNS
OF VORTEX STRUCTURES IN GEOLOGICAL MEDIUM**

A structure of lithosphere plate boundaries as a zones of shear deformations is considered as geological evidence of «own» (not Euler) rotation of plates. An analyze of features of deformation field structural pictures of geological and tectonic maps confirms existence of vortex-type structures. It is established the existence of two direct proportional relationships between rates of lithosphere plate movement and extents of their convergent and divergent boundaries having different characterized times. It is justified the hypothesis about correlation of vortex processes in tectonosphere with caused by rotation planetary scale wave processes. It are the review of vortex motions and the extensive literature.

Зарождение и развитие концепции вихревых движений

Развитие представлений о вихревых движениях материи достаточно подробно описано в [Борисов и др., 2003; Викулин, 2004а; Вихри..., 2004; Кудрявцев, 1956]. Кратко основные исторические вехи сводятся к следующему.

Гипотезы, с помощью которых пытались объяснить вращательные движения вещества, возникали неоднократно. Первым, по-видимому, был И. Кеплер Он еще в 1609 г. рисовал Солнце в центре мощного вихря, который разбрасывает планеты по их орбитам и заставляет вращаться вокруг Солнца. Идея же вихревых движений *как движений Материи, как система Мира* была высказана Декартом в его главном сочинении «Начала философии», вышедшем в свет в 1644 г. «Мир Декарта — это материальный континуум, протяженная материя, или материальное пространство... Законы природы... достаточны, чтобы заставить части материи распутаться и расположиться в весьма стройный порядок. Декарт полностью разделяет учение о множестве миров и гением своего ума рисует картину возникновения развития и сосуществования этих миров в таких чертах: из первоначального хаоса благодаря взаимодействиям частиц образовались вихри, каждый из которых имеет свой центр... Более массивные частицы вытесняются к периферии, сцепляются и образуют тела планет. Каждая планета вовлекается своим вихрем в круговое движение около центрального светила... Кометы имеют такую же структуру, как и планеты, принадлежат к переходящим, пограничным вихрям, переходя из одного мира в другой» [Кудрявцев, 1956, с. 147–150]. Глубокий анализ проблем вихревой космогонии дал позднее И. Кант, а П. Лаплас построил на этой основе свою небулярную гипотезу (1796 г.), которая, по существу, до сих пор находится в центре космогонических дискуссий, развиваясь и обогащаясь новыми теоретическими идеями и наблюдательными данными.

* 33 (193). Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2005. № 3. С. 59–77.

Задача прогноза погоды и, как следствие, проблема построения теории циклонов в атмосфере привели в середине XIX в. к возрождению интереса к вихревой динамике. Труды Г. Гельмгольца, У. Томсона (лорда Кельвина), Г. Р. Кирхгофа, Б. Римана и других исследователей привели не только к существенно новым гидродинамическим результатам, вихревым атомам Кельвина, но и к созданию наиболее общей *вихревой теории материи* [Борисов и др., 2003].

В XX столетии процесс выдвижения гипотез, объясняющих природу вихревого движения, был продолжен. 20-е гг. — это первые работы Ли Сыгуана по вихревым структурам земной коры [Lee, 1928]. Эти представления в дальнейшем были развиты в работах [Мелекесцев, 1979; Слензак, 1972]. В 50-х гг. Г. А. Гамов, создатель в настоящее время общепризнанной теории горячей Вселенной, показал, что в распределении и движении галактик определенно «присутствуют» следы *догалактической* турбулентности. Относительно их происхождения он высказал предположение, согласно которому вихри имеют ту же природу, что и само космологическое расширение, т. е. существуют во Вселенной *изначально* — по сути, как у Декарта и Канта — Лапласа.

В соответствии с данными, полученными уже в XXI в., как показано в [Потапов и др., 2000], вращательными и вихревыми движениями пронизано все вещество в масштабах «от пули до Солнца». Более 70 % спиральных галактик, большинство которых, согласно [Фридман, 2005], имеют волновую солитонную структуру, и «Млечный путь, который мы видим в безлунную ясную ночь, есть малая область самой большой волны, которую человек способен разглядеть невооруженным глазом». В науках же о Земле на фоне «неуспехов» Новой глобальной тектоники [Пушаровский, 2005; Спорные..., 2002] резко повысился интерес к проблеме вихревых структур в земной коре [Вихри..., 2004; Система..., 2003; Полетаев, 2005; Тектоника..., 2002].

Вихри в геологических процессах

Проблема вихревых структур в геологических процессах была впервые обозначена китайским ученым Ли Сыгуаном в 20-х гг. XX в. [Lee, 1928] и через 30 лет сформулирована им в качестве научной гипотезы в книге [Ли Сыгуан, 1958], в которой на большом фактическом материале обосновывается существование структур, являющихся, по мнению автора, результатом сдвигов, возникающих при вращении отдельных масс земной коры и, видимо, по этой причине названных вихревыми. В последние годы появилось большое количество данных о существовании структур поворотного, крутильного, вихревого типов в геологической среде как Земли [Ван Беммелен, 1991; Кац и др., 1989; Кулаков, 1986; Мелекесцев, 1979, 2004а, 2004б; Мясников, 1999; Система..., 2003; Слензак, 1972; Тектоника..., 2002], так и других планет и их спутников [Мелекесцев, 2004а, 2004б; Maps..., 1989; Whitley, 1979]. В соответствии с данными работ [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Слензак, 1972; Шипов, 2002] вихревые структуры и физические процессы, их объясняющие, должны, по сути, являться краеугольными камнями современной геодинамики.

Проблема происхождения вихревых систем литосферы подробно рассматривается в работе [Слензак, 1972]. В этой же работе, в частности, отмечается, что «сходство вихревых образований атмосферы, гидросферы и литосферы неслучайно, и в факте вращения Земли проблема генезиса вихревых образований имеет прочную основу для своего решения» [Слензак, 1972, с. 76]. Из последних следует отметить работы [Вихри..., 2004; Полетаев, 2005], в которых приводится обзор современного состояния проблемы с описанием большого количества геологических структур вихревого типа.

Анализ полей деформаций на геологических и тектонических картах показывает, что образование таких вихревых структур в земной коре и их генезис являются прямым следствием геодинамических процессов. Совокупность данных: о расположении планетарных структур сжатия и растяжения [Роль..., 1997]; о поле напряжений, по механизмам очагов землетрясений Евразии определенное как мегарегиональное [Гущенко, 1979]; о геодезических [Рикитаке, 1970; Сато, 1984; Hashimoto, Tada, 1988] и светодальномерных [Давыдов и др., 1988] инструментальных измерениях, проведенных на больших базах; о движениях блоков Тихоокеанской сейсмо-

фокальной зоны [Геологическая..., 1989; Daly, 1989; Geist et al., 1988; Nur et al., 1986], тектонических плит [Берсенева, 1964; Викулин, 1994; Жарков, 1983; Мелекесцев, 1979; Forsyth, Uyeda, 1975; Takeuchi, 1985], платформ [Полетаев, 2005] и других более «мелких» геологических образований [Ван Беммелен, 1991; Полетаев, 2005], которые, в свою очередь, «пронизаны» перекрывающимися вихревыми планетарными структурами литосферы [Слензак, 1972] — прямо указывает на вращательный, крутильный и вихревой характер движения геологических структур планеты [Викулин, 2003; Вихри..., 2004; Маслов, 1996; Слензак, 1972].

Анализ большого количества тектонических данных показывает следующее. Согласно А. В. Лукьянову [1999], «если представить себе тектоническое течение в виде векторного поля скоростей (или перемещений) частиц тектоносферы, то самоорганизация приводит это поле к единому, сплошному, непротиворечивому структурному рисунку», в котором «находят свое место не только неоднородные деформации, но и *зоны с ненулевыми дивергенциями и вихрями*». При этом прошло уже почти полвека, как А. В. Пейве отметил [Лукьянов, 1999], что «каждый блок земной коры обладает как бы *самостоятельной „движущей силой“*, заключенной в нем самом» (в цитатах курсив наш. — **А. В.**). В работе [Слензак, 1972, с. 37–38] делается «важный вывод о *самостоятельности крупной вихревой системы* как типа тектонической структуры литосферы, который не может быть создан внешними источниками движения в виде дрейфующих материков или смещений по планетарным разломам». Далее «перекрывание вихревых систем способствует образованию систем меньшего размера, соединяя в новые вихри отрезки больших дуг крупных систем» [Слензак, 1972, с. 43]. При этом «непосредственное изучение пород свидетельствует о формировании вещества», слагающего вихревые системы, «в твердом состоянии на месте и за счет вещества верхней мантии» [Слензак, 1972, с. 98].

Проведенный в работе [Викулин, 2004а] анализ движений, наблюдаемых в природе во всем пространственно-временном масштабе — от элементарных частиц (имеющих спин) до галактик и их скоплений — подтверждает саму суть «геотектонических» наблюдений и обобщений А. В. Пейве и А. В. Лукьянова [Лукьянов, 1999], О. И. Слензака [1972]. Такие наблюдения и обобщения, согласно представлениям Декарта, Канта — Лапласа, Кельвина и Гамова, фактически предписывают структурным элементам геологической среды, как части материи на разных пространственно-временных масштабах, вращающейся независимо от физического состояния слагающего ее вещества, иметь собственный момент количества движения. На основании этих данных поворотные, закрученные, спиралеобразные (по [Ли Сыгуан, 1958], вихревые) структуры, их формирование и развитие в пространстве и во времени, взаимосвязь друг с другом («самоорганизация»), по мнению авторов, основанному на данных Ли Сыгуана [Ли Сыгуан, 1958; Lee, 1928], А. В. Пейве и А. В. Лукьянова [Лукьянов, 1999], О. И. Слензака [1972], А. Н. Дмитриевского с соавторами [1993], А. И. Полетаева [2005], сборников [Вихри..., 2004; Система..., 2003; Тектоника..., 2002] и др., являются следствием «собственных» вращательных движений слагающих геологическую среду блоков, плит и их образований.

Наличие вихревых структур в литосферах Земли, других планет и их спутников естественным образом продолжает и «замыкает» цепочку такого рода движений вещества при разных физических состояниях.

Следует отметить следующее. Согласно данным работы [Викулин, 2003] в понятие «собственное вращательное движение» мы вкладываем смысл, по сути, близкий спину, который имеет любая достаточно малая частица вещества (элементарная частица, атом, молекула) в течение всей своей «жизни». Данные физического плана, подтверждающие такую гипотезу, содержатся в работах [Дмитриевский и др., 1993; Потапов и др., 2000; Шипов, 2002]. Поэтому «самостоятельную движущую силу, заключенную в самом» блоке [Лукьянов, 1999], и «самостоятельность вихревой системы» [Слензак, 1972] мы также связываем с «собственным вращательным моментом». Очевидно, что используемое нами понятие «собственного вращательного движения» в принципе отличается от Эйлера вращающегося поступательному перемещению вдоль сферической поверхности.

Строение границ литосферных плит как зон сдвиговых деформаций

«Закрученные» структуры на геологических и тектонических картах разного масштаба часто проявляются в виде разновозрастных систем сдвиговых деформаций, которые наблюдаются и вдоль границ структур, и в пределах их внутренних областей в виде спиралевидных (кольцевых или дуговых) и вихревых (в том числе радиальных) структурно-кинематических и тектодинамических рисунков.

Повсеместно наблюдающиеся на геологических и тектонических картах чередования разномасштабных структур растяжения или сжатия в виде определенных систем, очевидно, можно рассматривать как региональные, мегарегиональные и планетарные зоны сдвиговых деформаций (рис. 1).

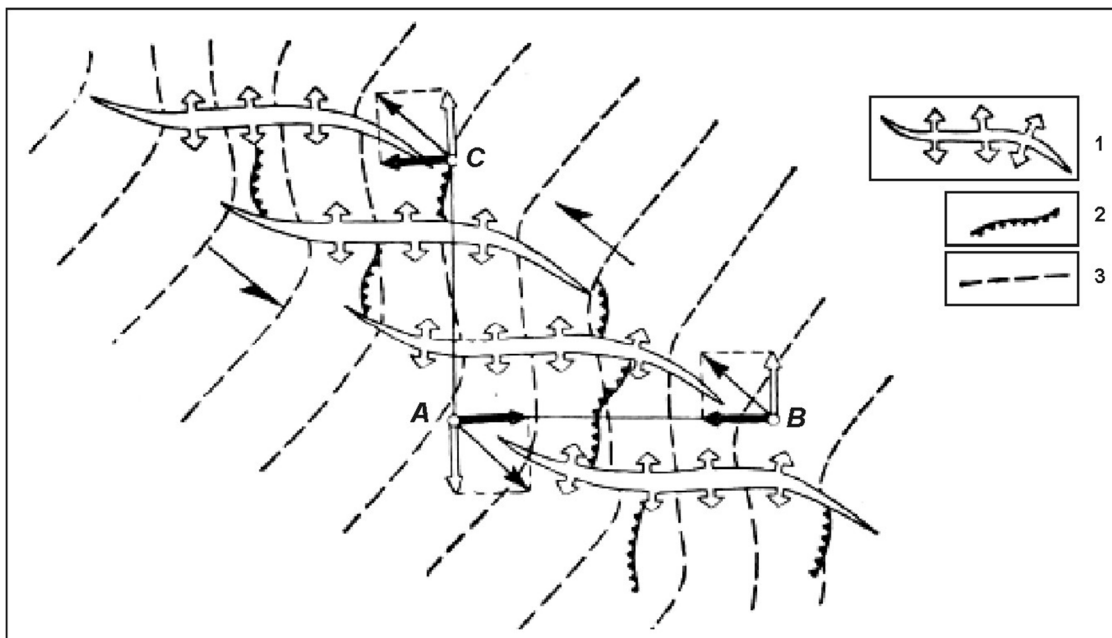


Рис. 1. Схема строения зоны сдвиговых деформаций по [Буртман, Лукьянов, Пейве и др., 1963]:

1 — структуры растяжения; 2 — структуры сжатия; 3 — объекты, бывшие прямолинейными до сдвига. Растягивающие напряжения показаны белыми стрелками, сжимающие — толстыми черными стрелками

К мегарегиональным зонам сдвиговых деформаций по своему строению [Структурная..., 1991; Хаин, Ломизе, 1995; Tveritina, 1995] можно отнести как дивергентные границы литосферных плит (кулисные последовательности рифтовых долин, сочленяющихся посредством трансформных разломов), так и конвергентные границы плит (кулисные последовательности структур сжатия — «элементарных» зон субдукции или горно-складчатых сооружений), сочленяющихся посредством поперечных структур преимущественно сдвигового типа (рис. 2). Наиболее характерным примером глобальной правосдвиговой зоны является рифтовая система Атлантического океана (рис. 2, а). Строение этой системы может быть объяснено вращением против часовой стрелки Северо-Американской и Евразийской плит в северном полушарии, Южно-Американской и Африканской плит — в южном. Такое движение плит подтверждается данными о планетарных вихревых системах литосферы, большая часть которых также «закручена» против часовой стрелки [Слензак, 1972]. Примером левосдвиговой зоны может являться конвергентная система Средиземноморско-Гималайского альпийского складчатого пояса — зона левостороннего Тетического кручения [Кэрри, 1991] (рис. 2, б), строение которой не может быть объяснено только одним поперечным сжатием и требует привлечения механизма левостороннего сдвига или вращения по часовой стрелке плит северного полушария относительно плит южного.

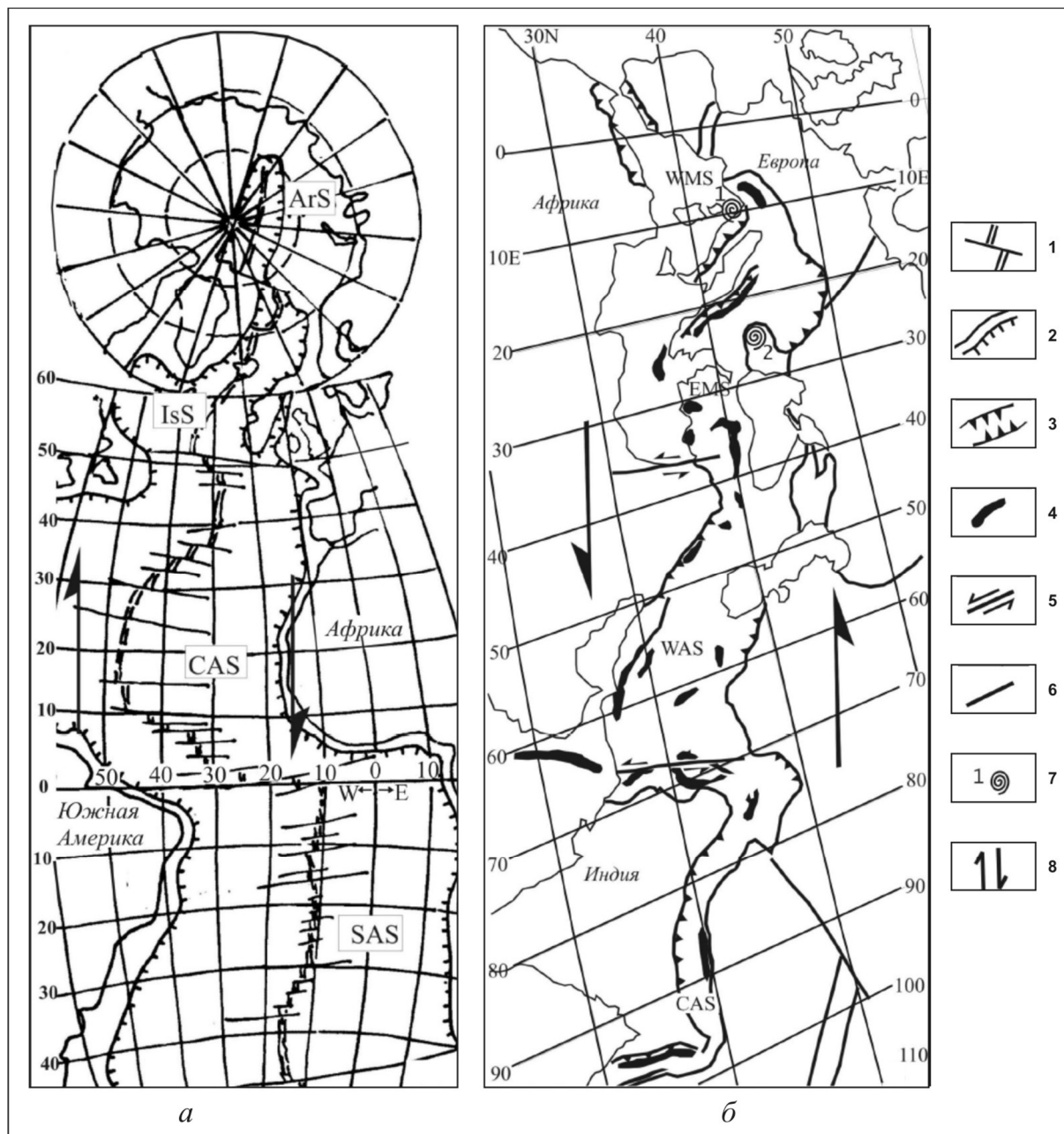


Рис. 2. Срединно-Атлантическая рифтовая зона как планетарная зона правого сдвига (а) и Средиземноморско-Гималайский альпийский пояс как планетарная зона левого сдвига (б):

1 — рифтовая зона и трансформные разломы; 2 — граница континентальной и океанической коры; 3 — краевые надвиги Средиземноморско-Гималайского альпийского пояса; 4 — главные офиолитовые сутуры; 5 — крупные континентальные сдвиги; 6 — прочие крупные разломы; 7 — вихревые складки Генуя (1) и Дунай (2) [по: Ван Беммелен, 1991]; 8 — направление смещения граничных блоков-плит. Буквами обозначены сегменты Срединно-Атлантического пояса: ArS — Арктический, IsS — Исландский, CAS — Центрально-Атлантический, SAS — Южно-Атлантический, EMS — Восточно-Средиземноморский, WAS — Западно-Азиатский, CAS — Центрально-Азиатский

Тип структурных рисунков полей деформаций, характерных для границ литосферных плит, вследствие пространственно-временных неоднородностей структуры литосферы может быть определен не всегда однозначно. Во-первых, наблюдаемые поля деформаций могут быть «локальными» структурами, отражающими «жизнь» данной зоны на всех предшествующих этапах ее развития, что, например, наблюдается для Тихоокеанского подвижного пояса [Вихри...,

2004; Tveritina, 2004]. Во-вторых, в одной и той же зоне в различных сочетаниях одновременно могут проявиться несколько механизмов деформаций геологической среды, которые могут быть связаны как с автономным развитием некоторых отдельных планетарных структур, так и с «глобальными» деформациями, характерными для всей литосферы в целом. Поэтому вдоль одной и той же литосферной границы (например, глобальной конвергентной зоны) мы часто можем видеть одновременное присутствие сходно ориентированных структур и растяжения, и сжатия. Примерами зон с такими полями деформаций могут служить как Тихоокеанский, так и Средиземноморский подвижные пояса. Тип структурных рисунков полей деформаций, наблюдаемых в пределах практически всех крупных планетарных зон (литосферных границ), очень сильно зависит также и от ориентировки этих зон, что связано с влиянием общепланетарного поля напряжений с механизмом полярного меридионального сжатия [Расцветаев, 1980]. На участках северо-восточного (СВ) простирания большинства границ литосферных плит (и любых других дизъюнктивных неоднородностей планетарного масштаба, например внутриконтинентальных складчатых поясов) закономерным является присутствие признаков левосдвиговых смещений, на участках северо-западного (СЗ) простирания — правосдвиговых.

Дивергентные границы плит, т. е. срединно-океанические хребты (СОХ), обнаруживают признаки как правосдвиговых, так и левосдвиговых смещений. На участках СОХ, имеющих СЗ ориентацию, наблюдаются в основном правосдвиговые смещения, на участках СВ ориентации — как левосдвиговые, так и правосдвиговые. Следует отметить, что преобладание в рифтовых зонах правосдвиговых смещений над левосдвиговыми носит достаточно общий характер. Такое поле деформаций может, например, быть результатом общего меридионального латерального сжатия Земли (в условиях которого формируются правые сдвиги СЗ и левые сдвиги СВ ориентаций) и одновременно результатом действия специфичного механизма, который мог бы определять формирование правосдвиговых смещений в участках с различной ориентировкой. Таким механизмом могло бы быть левостороннее кручение, которое наблюдается у большинства литосферных плит в виде вращения внутриконтинентальных блоков литосферы — древних кратонов в качестве их ядер и собственно в виде формирования зон сдвиговых деформаций по их границам.

В условиях меридионального сжатия тип деформаций в конвергентных зонах, в зависимости от ориентировки тех или иных их участков, должен быть различным. Вместе с тем вдоль двух главных конвергентных зон (Тихоокеанского и Средиземноморского подвижных поясов), вне зависимости от существования механизма меридионального сжатия, наблюдаются левосдвиговые смещения. Объяснить наблюдаемую картину деформаций можно, например, с помощью предлагаемой нами гипотезы об общепланетарном правозакрученном полярном вихре (рис. 3).

Наиболее выразительно такая планетарная вихревая структура, на наш взгляд, должна проявляться, во-первых, в виде приэкваториальной зоны левосдвигового Тетического кручения, что подтверждается данными работы [Кэрри, 1991]; во-вторых — в виде левосдвиговых зон широтного простирания в более высоких широтах, например в целом левосдвиговой организацией рифтовых систем Южно-Антарктического (Циркумантарктического) океана; в-третьих — формированием системы меридионально ориентированных структур сжатия (горно-складчатых сооружений, зон субдукции) и растяжения к северу и к югу от приэкваториальной Тетической сдвиговой зоны с преобладанием структур сжатия в северном полушарии и структур растяжения (рифтовых систем) — в южном; в-четвертых — непосредственно в преобладающей северо-западной ориентировке форм поверхности ядра и геоида [Morelli, Dzevonsky, 1987; Reigber et al., 1983]. Имеющиеся тектонические данные Э. Крауса по экваториальным «нарушениям средиземноморья Тихоокеанской и Атлантической зон» в виде двух спиралеобразных траекторий, «вдоль которых имеет место более значительное движение сиала на восток в южном полушарии, чем в северном» [Бондарчук, 1961, с. 343], достаточно убедительно подтверждают нашу гипотезу о правозакрученном планетарном вихре. В рамках такой гипотезы именно правозакрученный полярный вихрь планетарного масштаба и должен вызывать ответное левостороннее кручение ансамбля всех литосферных плит.

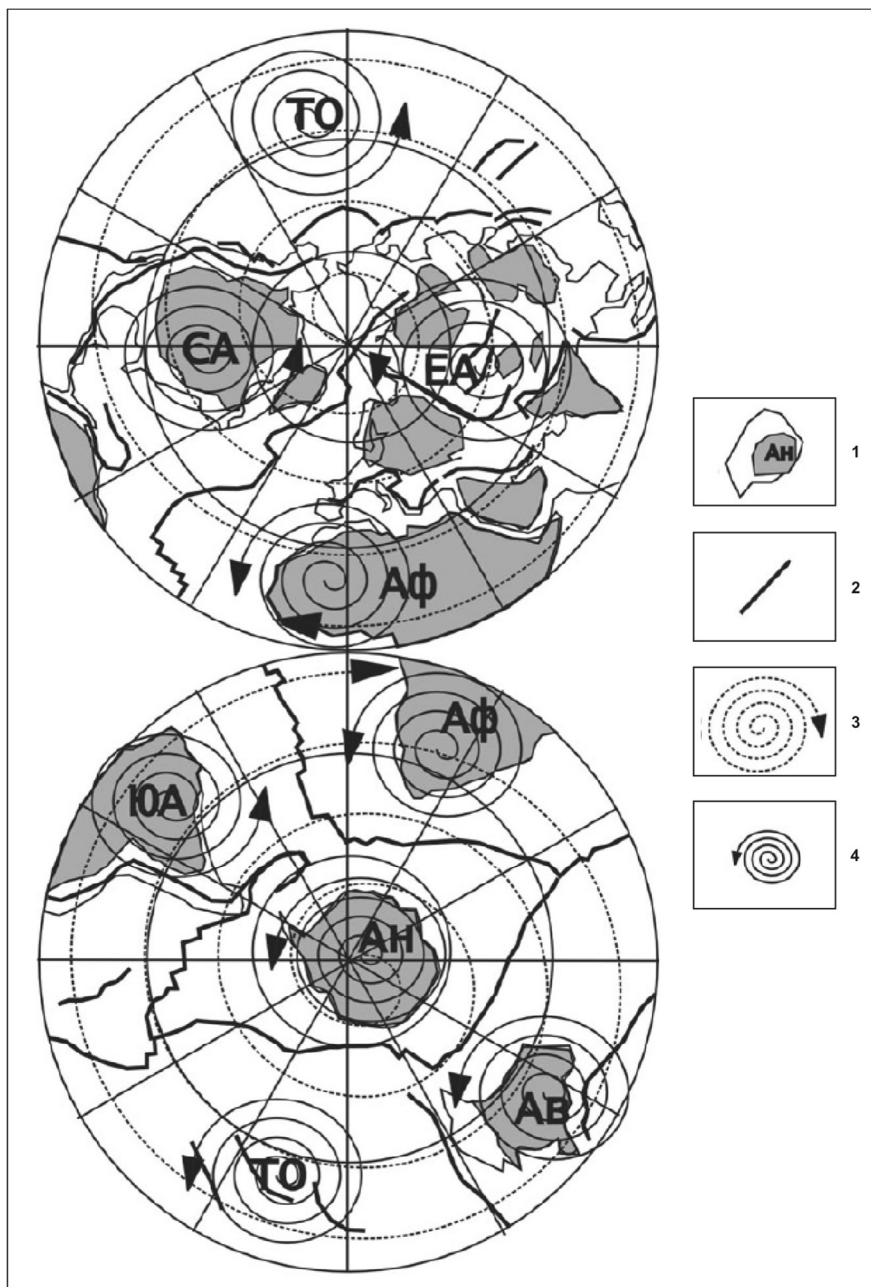


Рис. 3. Система литосферных плит и связанные с ними вихревые структуры:

1 — контуры континентов и древние платформы в их пределах; 2 — линейные структуры сжатия и растяжения по границам литосферных плит; вихревые структуры; 3 — полярный правозакрученный вихрь; 4 — литосферные левозакрученные вихри. Литосферные плиты: СА — Северо-Американская, ЕА — Евразийская, АФ — Африканская, АН — Антарктическая, ТО — Тихоокеанская, АВ — Австралийская

О вращательном движении тектонических плит

Интересные данные о вращательном движении самой большой на планете Тихоокеанской плиты (с характерным «радиусом» $R \approx 10^4$ км, измеряемым вдоль поверхности Земли) приведены в работе [Маслов, 1996]. Согласно А. Такеучи [Takeuchi, 1985, 1986], с середины олигоцена по настоящее время имели место пять перестроек регионального поля напряжений, которые характеризовались изменениями его величины и ориентации (рис. 4). Периодам 30–23, 16–13, 6–0 млн лет отвечает субширотное сжатие (Р), периодам 22–17, 12–7 млн лет — субширотное растяжение (Т). На этом же рисунке приведена кривая угловых осцилляций вектора скорости Тихоокеанской плиты, полученная в работе (Jackson et al., 1975). В этой же работе показано, что

вектор движения Тихоокеанской плиты, определяемый простирием Гавайской вулканической цепи (составляющим примерно 70° с направлением на север), испытывает периодические повороты по часовой стрелке и против нее. В результате Тихоокеанская плита совершает знакопеременные вращательные движения с центром в Гавайской горячей точке. Амплитуда угла вращения по [Takeuchi, 1986] составляет примерно 10° , что на радиусе, соединяющем о. Гонолулу с Тихоокеанским подвижным поясом, равносильно смещениям до нескольких сотен километров [Маслов, 1996].

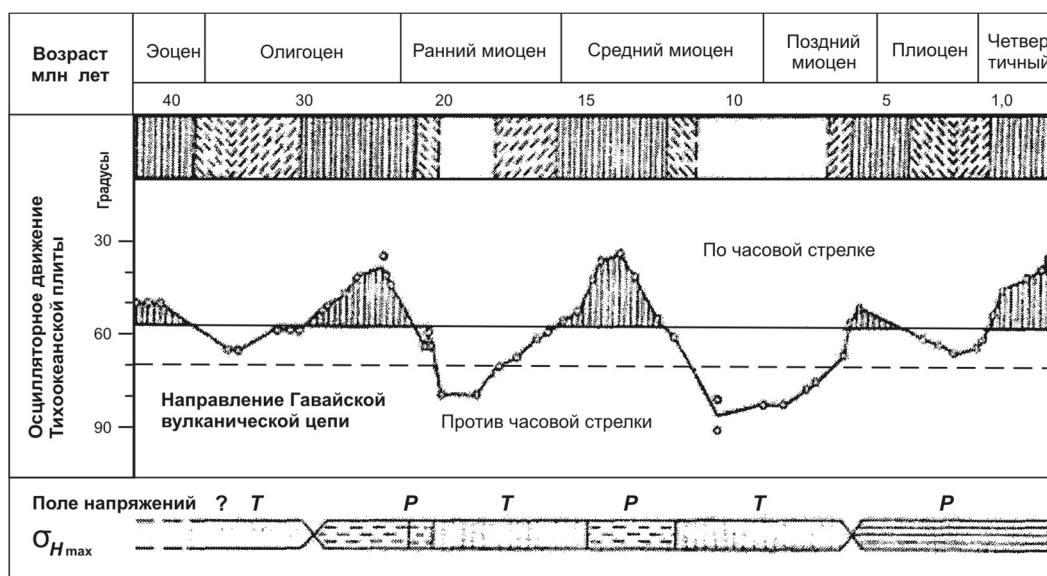


Рис. 4. Изменение регионального поля напряжений о. Хонсю во времени по работе [Маслов, 1996]:

P, T — девиаторное сжатие и растяжение соответственно. Приведена кривая угловых осцилляций вектора скорости Тихоокеанской плиты по [Jackson et al., 1975]. Вертикальная штриховка на графике указывает на кульминационные моменты эпизодов вращения по часовой стрелке, фиксируемые фазами изменения тектонических напряжений в пределах Тихоокеанского пояса

Убедительные комплексные геолого-геофизические данные о вращении микроплиты Пасха ($R \approx 200$ км, 25° ю. ш.), расположенной на гребне Восточно-Тихоокеанского поднятия между плитами Наска — на западе, Пасифик — на востоке, приведены в работе [Геолого..., 2003, с. 56]. Вихревой характер движения этой микроплиты отчетливо прослеживается на тектонической схеме, построенной по механизмам очагов землетрясений, данным батиметрической карты, карт остаточных аномалий магнитного поля и аномалий силы тяжести в свободном воздухе. Микроплита вращается против часовой стрелки со «скоростью около 15° /млн лет и уже повернулась почти на 90° со времени своего образования». Следы вихревых движений отчетливо проявляются на батиметрической карте и карте аномального магнитного поля микроплиты Хуан-Фернандос ($R \approx 150\text{--}200$ км, 33° ю. ш.), которая расположена на гребне Восточно-Тихоокеанского поднятия, на 500 км южнее плиты Пасха, на стыке трех плит: Наска — на западе, Пасифик — на востоке и Антарктической — на юго-западе [Геолого..., 2003, с. 57].

На вращение Исландии ($R \approx 10^2$ км) по часовой стрелке со скоростью $7^\circ(\pm 2)/10\text{--}20$ тыс. лет указывает изменение ориентировки доледниковых и послеледниковых зон трещинных извержений в южной части острова [Мелекесцев, 1979, 2004a]. Вихревые складки ($R \approx 10^2$ км) Генуя (против часовой стрелки) и Дунай (по часовой стрелке), расположенные в пределах горных дуг Альпийской системы (рис. 2, б), отмечены в работе [Ван Беммелен, 1991].

Примеры поворотов Восточно-Европейской платформы ($R \approx 1,2 \cdot 10^3$ км) против часовой стрелки в ордовике и триасе, Сибирской платформы ($R \approx 1,5 \cdot 10^3$ км) по часовой стрелке в триасе, юре и мелу, Омолонского массива ($R \approx 150$ км) по отношению к Сибири, наоборот, против часовой стрелки с конца юры до начала раннего мела, и вращений «отщепов» террейна Горного Крыма ($R \approx 70\text{--}100$ км) на 15° против часовой стрелки в титонское время, восточного

крыла северной части Левантской зоны ($R \approx 400$ км) по часовой стрелке в плиоцен-четвертичное время приведены в работе [Полетаев, 2005]. При этом для докембрия установлено «существование... вихревых систем литосферы, объединяющих в качестве своих элементов различные структуры земной коры и верхней мантии... размеры их... до 10–12 тыс. км в диаметре ($R_{\max} \approx (5-6) \cdot 10^3$ км), и в виде зон глубинных разломов они проникают на глубину до 700 км и более» [Слензак, 1972, с. 4].

Как видим, вращательное и вихревое движение тектонических плит, платформ и массивов разных пространственных масштабов имеет достаточно общий характер, наблюдается в течение разных геологических эпох и затрагивает практически всю верхнюю мантию.

На вращение Индийской плиты ($R \approx 4 \cdot 10^3$ км) убедительно указывают данные по миграции очагов землетрясений как Австралийского материка [Викулин, 1994], так и сейсмического пояса, протягивающегося вдоль Океании в сторону Гималаев [Mogi, 1968], в пределах которого 26.12.2004 г. произошло землетрясение с $M \approx 9$ и катастрофическое цунами. Миграция очагов землетрясений вдоль всей окраины Тихого океана, отдельно взятых островных дуг и континентальных окраин — явление достаточно широко известное. После пионерских работ Р. З. Тараканова [1961], С. Дуды [Duda, 1963] и К. Моги [Mogi, 1968] оно отмечалось многими исследователями [Викулин, 2001]. Более того, эффект миграции землетрясений установлен для всех сейсмически активных поясов, при этом показано, что он является характерным свойством планетарного сейсмического процесса [Викулин, 2003]. По этой причине эффект миграции очагов землетрясений, несомненно, должен быть связан с механизмом образования смещений вдоль границ плит. Согласно работе [Маслов, 1996], в масштабах геологического времени землетрясения, многократно обегая Тихий океан, в результате накопления остаточных деформаций могут обеспечить наблюдаемую амплитуду смещения, которая, как уже отмечалось, составляет несколько сот километров. Именно по этой причине циклическая миграция очагов землетрясений может и сопровождать смещение всего Тихоокеанского сегмента, и в определенной степени его обеспечивать.

Полная подборка данных о миграции тихоокеанских землетрясений представлена в работе [Викулин, 2001]. Оказалось, что вся совокупность этих данных может быть интерпретирована в виде солитонных (*soliton*, S) и экситонных (*exciton*, E) решений «сейсмического» модельного нелинейного уравнения син-Гордона, волновые свойства которого обусловлены ротацией планеты Ω [Викулин, 2003]. При этом энергии волновых миграционных решений E и величины их скоростей V оказались взаимосвязанными в рамках типичных для таких «геофизических» [Быков, 2000] нелинейных [Давыдов, 1982] уравнений соотношений

$$E_S \approx V_S^n, V_S < c_0(\Omega), \quad (1)$$

$$E_E \approx V_E^p, V_E > c_0(\Omega), \quad (2)$$

где

$$c_0(\Omega) \approx 1 \text{ см/с}; n = 4-5; p = 2-3. \quad (3)$$

Миграция землетрясений является характерным свойством сейсмического процесса, протекающего в пределах всех сейсмических поясов планеты [Викулин, 2001, 2003; Mogi, 1968]. Поэтому волновые ротационно обусловленные решения (1)–(3), установленные для тихоокеанского пояса, должны быть характерными для границ всех тектонических плит.

Энергия тектонического процесса

Энергия тектонического процесса, очевидно, определяется (массами) размерами L плит (и блоков) и скоростями V их движения. Из самых общих соображений следует, что существование зависимости $L(V)$ является принципиальным моментом, по сути, определяющим физику механизма перемещения тектонических плит вдоль поверхности Земли. Действительно, в случае существования зависимости между такими (вообще говоря, векторными) величинами, однозначно определяющими величины энергий движущихся плит, появляются все основания для предположения о моментной природе тектонического процесса, протекающего на вращающейся планете.

В такой плоскости вопрос об энергии тектонического процесса ранее не ставился. Однако в неявном виде анализ особенностей проявления тектонической энергии проводился. Действительно, во-первых, в настоящий момент вопрос о существовании зависимости $L(V)$ является проблематичным: имеются аргументы как против [Кукал, 1987], так и за [Ле Пишон, 1974; Морган, 1974]. Во-вторых, аргументом в пользу моментной природы тектонического процесса на Земле, на наш взгляд, является установленная корреляция между «средним полярным расстоянием плит» и скоростями субдукции [Жарков, 1983; Forsyth, Uyeda, 1975] и спрединга [Жарков, 1983; Морган, 1974].

Анализ имеющихся в нашем распоряжении данных о размерах плит и скоростях их движения вдоль границ за последние 150 млн лет позволил получить следующие результаты [Викулин, Тверитинова, 2004]. Во-первых, по совокупности всех ($N = 61$) имеющихся в нашем распоряжении данных о протяженностях зон и скоростях субдукции (табл. 1, $N_1 = 12$; табл. 2, $N_2 = 17$), рифтинга и спрединга (табл. 3, $N_3 = 5$; табл. 4, $N_4 = 24$; табл. 5, $N_5 = 3$) в их пределах, статистически значимая зависимость $L(V)$ не выявляется: поле экспериментальных точек на плоскости с осями $L - V$ в диапазонах размеров $650 < L$ [км] $< 18\,000$ и скоростей $5 < V$ [мм/год] < 112 равномерно заполняет площадку примерно круговой формы (рис. 5, а). Во-вторых, анализ только данных о скоростях рифтинга и спрединга (РС-данные), представленных в табл. 3, 4 ($N = 29$) и на рис. 5, б, позволяет достаточно уверенно выявить следующую статистически значимую зависимость:

$$\text{Lg } L_1 \text{ [км]} (\pm 0,33) = (0,43 \pm 0,15) \cdot \text{Lg } V_1 \text{ [мм/год]} + (3,17 \pm 0,26). \quad (4)$$

В-третьих, по достаточно представительным (с числом данных 4 и более: строки 2–5 в табл. 3 и 2–5 в табл. 4) совокупностям РС-данных, представленных данными в пределах меньших по продолжительности интервалов, определяются близкие друг другу зависимости (табл. 6):

$$\text{Lg } L_2 \text{ [км]} (\pm 0,3) = (0,7 \pm 0,3) \cdot \text{Lg } V_2 \text{ [мм/год]} + (2,9 \pm 0,5). \quad (5)$$

При этом отклонение данных, представленных в графах 6, 7 табл. 4, от средней зависимости (5) не превышает ее дисперсии.

В-четвертых, статистически значимая зависимость $\text{Lg } L (\text{Lg } V)$ только для «субдукционных» (С) данных ($N = 32$, табл. 1, 2, 5) не выявляется (рис. 5, в). Определение всех зависимостей $\text{Lg } L (\text{Lg } V)$, представленных на рис. 5 и в табл. 6, проводилось методом наименьших квадратов.

Таблица 1

Значения скоростей субдукции [Кукал, 1987, с. 41]

| № п/п | Область | Пододвигание литосферных плит | Длина зоны L , км | Скорость субдукции V , мм/год |
|-------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 1 | Курилы, Камчатка, о. Хонсю | Тихоокеанская под Евразийскую | 2800 | 75 |
| 2 | О-ва Тонга и Кермадек, Новая Зеландия | Тихоокеанская под Индийскую | 3000 | 82 |
| 3 | Центральная Америка и Мексика | Кокос под Северо-Американскую | 2800 | 95 |
| 4 | Алеутские о-ва | Тихоокеанская под Северо-Американскую | 3800 | 35 |
| 5 | Ява, Суматра, Бирма | Индийская под Евразийскую | 5700 | 67 |
| 6 | Южные Сандвичевы о-ва | Южно-Американская под Скоша | 650 | 19 |
| 7 | Карибское море | Южно-Американская под Карибскую | 1350 | 5 |
| 8 | Эгейское море | Африканская под Европейскую | 1550 | 27 |
| 9 | Соломоновы о-ва, Новые Гибриды | Индийская под Тихоокеанскую | 2750 | 87 |
| 10 | О-ва Бонин и Марианские | Тихоокеанская под Филиппинскую | 4450 | 12 |
| 11 | Иран | Аравийская под Евразийскую | 2250 | 45 |
| 12 | Индия | Индийская под Евразийскую | (2700) | 55 |

Примечание. Значение в скобках — определение длины зоны, принятое в расчетах авторами этой статьи.

Таблица 2

Параметры зон субдукции по данным работы [Гатинский и др., 2000]

| № п/п | Зона субдукции | Длина L островной дуги над зоной субдукции, км | Скорость субдукции V , см/год | Возраст коры погружающейся плиты / номера линейных магнитных аномалий в ней | $T_1 - T_2 = \tau$, млн лет тому назад |
|-------|----------------------------------|--|---------------------------------|---|---|
| 1 | Восточно-Алеутская | 1625 | 5,8–6,4 | Палеоцен — эоцен / 18–24 | 54 – 43 = 11 |
| 2 | Западно-Алеутская | 1000 | 7,7 | Палеоцен — эоцен / 20–26 | 59 – 45 = 14 |
| 3 | Северо-Курильско-Камчатская | 1125 | 8,3 | Ранний — поздний мел / 30–M0 | 119 – 67 = 52 |
| 4 | Южно-Курильская | 950 | 9,5 | Ранний мел / M1–M5 | 128 – 123 = 5 |
| 5 | Японская (северная часть) | 1700 | 9,5–10,3 | Ранний мел / M5–M16 | 145 – 128 = 13 |
| 6 | Японская (южная часть) | 875 | 6,2 | Палеоцен — средний миоцен / 6–22 | 51 – 20 = 31 |
| 7 | Рюкю | 1100 | 5,2–6,5 | Палеоцен — эоцен / 18–21 | 49 – 43 = 6 |
| 8 | Филиппинская (южная часть) | 1000 | 7,0–9,3 | Палеоцен — эоцен / 18–22 | 51 – 43 = 8 |
| 9 | Идзу-Бонинская | 1380 | 4,7–7,7 | Поздняя юра — ранний мел / M5–M21 | 154 – 128 = 26 |
| 10 | Марианская | 3000 | 3,1–3,8 | Поздняя юра / M21–M32 | 169 – 154 = 15 |
| 11 | Западно-Зондская | 3000 | 6,0–6,7 | Эоцен — ранний мел / 20–M4 | 128 – 45 = 83 |
| 12 | Восточно-Зондская | 2250 | 7,6–8,0 | Поздняя юра / M16–M26 | 163 – 145 = 18 |
| 13 | Новая Британия и Соломоновы о-ва | 2400 | 10,3 | Палеоцен — плиоцен / 2–26 | 59 – 2 = 57 |
| 14 | Новые Гебриды | 2000 | 8,5 | Эоцен — средний миоцен / 9–23 | 53 – 30 = 23 |
| 15 | Тонга — Кермадек | 3250 | 5,5–9,3 | Поздняя юра — ранний мел / M0–M16 | 145 – 119 = 26 |
| 16 | Анды | 9000 | 7,4–15,4 | Эоцен — средний миоцен / 5–22 | 51 – 10 = 41 |
| 17 | Центральная Америка и Мексика | 3125 | 6 | Средний миоцен — четвертичный / 1–6 | 20 – 1 = 19 |

Примечание. Данные в последнем столбце (временные интервалы $T_1 - T_2$ и их продолжительности τ) определены авторами этой статьи по приведенным в таблице номерам магнитных аномалий в соответствии с данными работ [Хейцлер, Диксон, Херрон и др., 1974; Харленд, Кокс, Ллевеллин и др., 1985].

Таблица 3

Скорости раскрытия современных океанов, определенные по «Тектонической карте мира» (масштаб 1 : 45 000 000)

| № п/п | Протяженность зоны L , км | Ширина зон проявления процесса H , км | Возраст зоны T , млн лет | Скорость $V = H/T$, мм/год | Регион |
|-------|-----------------------------|---|----------------------------|-----------------------------|--|
| 1 | ~ 15 000 | 18 000 | 160 | 112,5 | Тихий океан |
| 2 | ~ 11 000 | 6 000–8 000 | 144 | 40–55 | Индийский океан |
| 3 | ~ 11 000 | 6 300 | 144 | 44 | Атлантический океан, Центральный сегмент |
| 4 | ~ 7 000 | 5 400 | 163 | 33 | Атлантический океан, Южный сегмент |
| 5 | (18 000) | (5 400–6 300) | (144)–(163) | (33–44) | Атлантический океан |

Примечание. В расчетах не учитывались данные для всего Атлантического океана.

Таблица 4

Длина L (км), ширина раскрытия (минимальная и максимальная) H (км), возраст и значение скоростей V (мм/год) рифтовых зон Земли, определенные по «Тектонической карте мира» (масштаб 1 : 45 000 000)

| Возраст спрединга $T_1 - T_2 = \tau$, млн лет → Рифтовая система ↓ | $L/H/V$ | | | | | |
|---|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| | $N_2 - Q$ (5-0) = 5 | $P_3 - N_1$ (38-5) = 33 | P_{1-2} (65-38) = 27 | K_2 (98-65) = 33 | K_1 (144-98) = 46 | J_{3E} (163-144) = 19 |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Срединно-Атлантическая | 18 000 / 180-360 / 36-72 | 18 000 / 540-1 440 / 16-44 | 18 000 / 540-1 260 / 20-47 | 16 000 / 1 350-2 700 / 41-82 | 13 500 / 720-1 440 / 16-31 | 3 800 / 720-1 260 / 38-66 |
| Срединно-Индоокеанская | 11 000 / 180-1 080 / 36-260 | 11 000 / 180-1 620 / 5-19 | 11 000 / 180-1 800 / 7-70 | 9 000 / 450-1 800 / 14-55 | — | — |
| Восточно-Тихоокеанская | 14 400 / 450-1 800 / 90-360 | 14 400 / 1 800-4 500 / 50-136 | 14 400 / 2 250-3 150 / 83-117 | 14 400 / 2 250-4 590 / 68-139 | 14 400 / 2 700-5 400 / 59-117 | 5 400 / > 5 400 / > 284 |
| Западно-Тихоокеанская | 5 000 / 180-270 / 36-52 | — | 5 000 / 180-360 / 7-13 | 3 150 / 1 350-1 800 / 41-55 | — | — |
| Северного Ледовитого океана | 1 800 / 180-450 / 36-90 | 1 800 / 180-450 / 5-14 | 1 800 / 360-720 / 13-27 | — | — | — |
| Байкальская | 900 / 45-90 / 9-18 | — | — | — | — | — |
| Красноморская | 4 000 / 45-135 / 9-27 | 3 150 / 180-270 / 5-8 | — | — | — | — |

Примечание. Возраст спрединга определялся по работе [Харленд, Кокс, Ллевеллин и др., 1985], ширина раскрытия зоны — по минимальному и максимальному замерам ширины зоны поперечно к направлению рифтовой зоны; длина зоны — по длине зоны с соответствующим временным интервалом. Если вдоль зоны фиксируется спрединг разных временных интервалов, то длина зоны с какого-то момента остается постоянной.

Таблица 5

Скорости спрединга, рассчитанные по данным работ [Хейцлер, Диксон, Херрон и др., 1974, с. 50; Ле Пишон, 1974, с. 95]

| Океан | Протяженность зоны L , км | n | V , мм/год |
|---------------|-----------------------------|-----|--------------|
| Тихий | 13 600 | 12 | 40 ± 12 |
| Атлантический | 12 400 | 10 | 17 ± 14 |
| Индийский | 9 100 | 7 | 18 ± 7 |

Примечание. Символ n — число экспериментальных определений скоростей субдукции для каждой из зон; V — средние значения скоростей субдукции, принимаемые нами в расчетах, и среднеквадратичные отклонения.

Проведенный анализ данных о протяженностях рифтинг-спрединговых зон и скоростях движения границ плит в их пределах указывает на существование двух механизмов с характерными временами около 150 (144–163) млн лет для соотношения (4) и примерно 20 (5–33) млн лет для соотношения (5).

Таблица 6

Параметры зависимостей $Lg L (Lg V)$, характеризующих протяженности зон как функции скоростей спрединга для разных геологических отрезков времени

| № п/п | Число данных N | Временной интервал $T_1 - T_2$, млн лет | Продолжительность интервала τ , млн лет | $Lg L (\pm s_0) = (a \pm s_a) \cdot Lg V + (b \pm s_b);$ $L, \text{ км}; V, \text{ мм/год}$ | | |
|---------|------------------|--|--|--|---------------|---------------|
| 1 | 7 | 5–0 | 5 | $Lg L (\pm 0,4) = (0,8 \pm 0,4) \cdot Lg V + (2,4 \pm 0,6)$ | | |
| 2 | 5 | 65–38 | 27 | $Lg L (\pm 0,4) = (0,7 \pm 0,4) \cdot Lg V + (2,9 \pm 0,8)$ | | |
| 3 | 9 | 38–5; 98–65 | 33 | $Lg L (\pm 0,3) = (0,6 \pm 0,2) \cdot Lg V + (3,1 \pm 0,4)$ | | |
| Всего | 21 | | | | | |
| Средние | | | $n = 3$ | $0,3 \pm 0,1$ | $0,7 \pm 0,3$ | $2,9 \pm 0,5$ |

Примечание. Данные граф 1–5 представлены в табл. 4; графы 6 — в табл. 4.

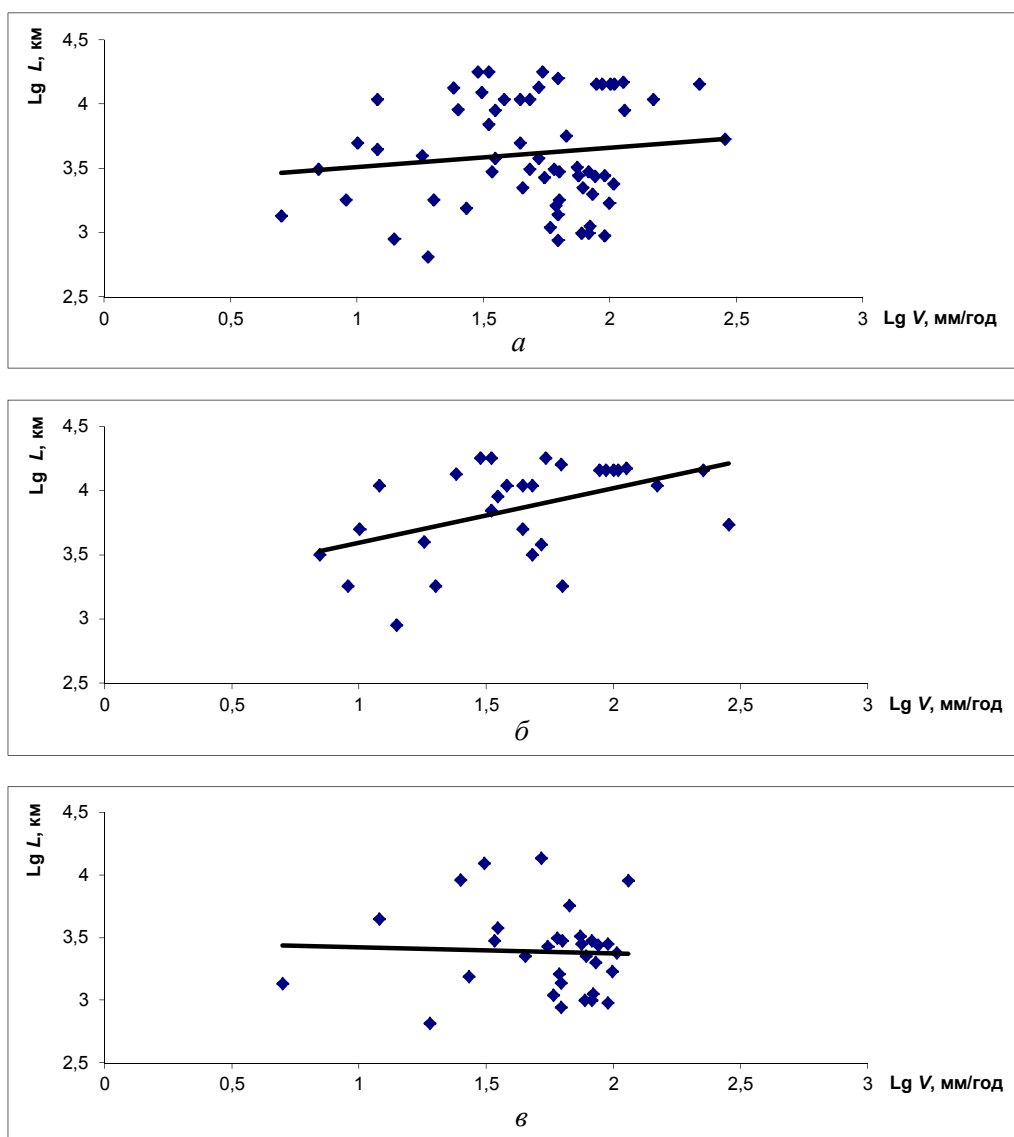


Рис. 5. Данные, характеризующие зависимость $Lg L (Lg V)$ между протяженностями плит L и скоростями их движения по работе [8]:

a — скорости субдукции, рифтинга и спрединга ($N = 61$); b — скорость рифтинга и спрединга ($N = 29$); c — скорости субдукции ($N = 32$).

Отметим, что корреляционная зависимость $Lg L \approx Lg V$, близкая соотношению (5), была получена в работах [Айзекс и др., 1974; Жарков, 1983; Морган, 1974] для процессов как спрединга, так и субдукции. Форма («вытянутость») и минимаксные значения «субдукционной» (рис. 5, в) и «рифтинг-спрединговой» (рис. 5, б) областей расположения исходных точек являются близкими. Отличаются эти области разными плотностями точек: РС-данные распределены по всей области достаточно равномерно, в то время как С-данные с большей плотностью сосредоточены в области предельно больших значений протяженностей зон. Представляется, что участки зон субдукции малой (1000–2000 км и менее) протяженности исследованы недостаточно полно, в результате чего для них имеет место искусственный «дефицит» данных. Другими словами, проведенный в настоящей работе анализ и данные, полученные другими исследователями, показывают, на наш взгляд, что выявленные в работе два механизма являются характерными для тектонического процесса вообще, включая и процесс субдукции.

Для определения тектонической энергии движущейся плиты будем полагать, что ее кинетическая энергия определяется по формуле

$$E = \frac{1}{2} m V^2,$$

где $m \approx \rho L^\alpha$ — масса плиты; ρ — ее объемная ($\alpha = 3$), площадная ($\alpha = 2$) или линейная ($\alpha = 1$) плотность. Тогда, дифференцируя выражение для энергии, заменяя в полученном дифференциальном уравнении dL на dV , определяемое из соотношений $Lg L \approx \beta Lg V$, и интегрируя полученное соотношение, для величины энергии движущейся со скоростью V плиты протяженностью L получим выражение $E / E_0 = (V / V_0)^{(2+\alpha\beta)}$, или

$$E \approx V^{(2+\alpha\beta)}, \quad (6)$$

где $\beta \approx 0,45 \pm 0,13$ для механизма, описываемого соотношением (4), и $\beta \approx 0,7 \pm 0,3$ — соотношением (5);

$$E_0 = \frac{1}{2} \rho L_0^\alpha V_0^2,$$

L_0 и V_0 — соответственно энергия, протяженность плиты и скорость движения ее границы в момент начала процесса.

Из соотношений (4) — (6) видно, что зависимости энергий плит от величин их скоростей движения для каждого из механизмов существенно различаются. Действительно, в «предельных» случаях для механизмов (5), когда $\beta_{\max} \approx 1$ при $\alpha_{\max} \approx 2,5$ (например, при малых временах $2 < \alpha < 3$ имеем зарождение плиты), и (4), когда $\beta_{\min} \approx 0,3$ при $\alpha_{\min} \approx 1$ (например, при больших временах размер плиты увеличивается практически в одном направлении), соответственно получаем:

$$E_1 \approx V_1^{2,3}, \quad (7)$$

$$E_2 \approx V_2^{4,5}. \quad (8)$$

Обсуждение результатов

1. В работе [Жарков, 1983] на основании данных исследований [Ле Пишон, 1974; Морган, 1974; Forsyth, Uyeda, 1975] формулируется вывод о том, что «скорости плит коррелируются с величиной среднего полярного расстояния плиты». При этом В. Н. Жарков [1983] делает вывод о том, «что движение литосферы... *увлекает* за счет сил вязкого трения подстилающую ее астеносферу» (курсив наш. — **А. В.**), т. е. движение литосферы, по сути, не зависит от движений в нижележащей астеносфере. Как видим, все приведенные нами, по сути, экспериментальные и теоретические геологические и тектонические данные: Ли Сыгуана [1928, 1958], Пейве — Лукьянова [Лукьянов, 1999], Ле Пишона [1974] — Моргана [1974], Слензака [1972], Forsyth — Uyeda [1975] и Жаркова [1983] — подтверждают наше предположение о том, что в соответствии

с формулами (4) и (5) механизмы, обеспечивающие вращательное движение, действительно имеют «собственную» природу, независимую от движений в мантии, дрейфа материков и перемещений плит вдоль разделяющих их разломов.

2. Проведем сопоставление полученных в настоящей работе тектонических и геологических данных с результатами сейсмологических исследований.

В рамках модели поворачивающихся за счет своих внутренних источников сейсмофокальных блоков было показано, что «солитонные» (S) и «экситонные» (E) скорости миграции тихоокеанских землетрясений $V_{S,E}$ связаны с их магнитудами M следующими соотношениями: $M = (2,6 \pm 0,5) \cdot \text{Lg } V_S + (1,9 \pm 0,8)$, $V_S < c_0$; $M = (1,3 \pm 0,3) \cdot \text{Lg } V_E - (2,5 \pm 1,6)$, $V_E > c_0$, где $c_0(\pm)$ — характерная скорость ротационного сейсмического процесса, определяемая соотношением (3). При среднем для мира соотношении между протяженностью очага землетрясения Λ и его магнитудой $\text{Lg } \Lambda = 0,4 \cdot M - 1,0$ (Викулин, 2003) для солитонных и экситонных «блоковых» (для сейсмофокальной зоны) зависимостей соответственно получаем:

$$\text{Lg } \Lambda_S \approx \text{Lg } V_S, \quad V_S < c_0, \quad (9)$$

$$\text{Lg } \Lambda_E \approx 0,5 \cdot \text{Lg } V_E, \quad V_E > c_0. \quad (10)$$

Видим, что солитонные (9) и экситонные (10) «блоковые сейсмические» решения [Викулин, 2003] вследствие примерного равенства коэффициентов при $\text{Lg } V$, по сути, близки полученным ранее «плитовым тектоническим» решениям (5) и (4). Таким образом, все эти решения описывают, по сути, единый геодинамический процесс. Близость зависимостей (1), (2) таким же зависимостям (8), (7), т. е. $E_2 \approx E_S$, $V_2 \approx V_S$ и $E_1 \approx E_E$, $V_1 \approx V_E$, соответственно позволяет описывать взаимодействие тектонических плит, как и сейсмофокальных блоков [Викулин, 2003], в терминах самосогласованного упругого поля (по А. В. Лукьянову [1999]: «самоорганизация... с ненулевыми дивергенциями и вихрями»), волновая природа которого определяется ротацией планеты. Другими словами, установлена взаимосвязь вращательных (вихревых) движений блоков, плит и их образований с ротационно обусловленными самосогласованными волновыми планетарными процессами с характерной скоростью порядка 1 см/год.

3. Геолого-геофизические данные, приведенные в [Геолого..., 2003, с. 56–57] для вращающихся микроплит Пасха и Хуан-Фернандес, при их интерпретации в рамках развиваемого в статье ротационного подхода указывают на ряд совпадений. Действительно, с одной стороны, возраст микроплиты Пасха (и, по-видимому, Хуан-Фернандес) $\tau \approx 5$ млн лет. При этом протяженность микроплиты Хуан-Фернандес $L \approx 2R = 400$ км оказывается близкой произведению возраста τ , умноженного на разность скоростей, с которыми движутся относительно друг друга плиты Пасифик (П), Наска (Н) и Атлантическая (А): $V_{ПН} = 168$ км/млн лет, $V_{РА} = 107$ км/млн лет и $V_{НА} = -61$ км/млн лет. Тогда

$$L \approx \tau [1/2 (V_{ПН} + V_{РА}) + V_{НА}] = 5 \cdot [1/2 (168 + 107) - 61] \text{ км/млн лет} = 380 \text{ км.}$$

С другой стороны, протяженности плит Пасха и Хуан-Фернандес, а также значения скоростей спрединга $V_{ПН}$ и $V_{РА}$ удовлетворяют соотношению $\text{Lg } L$ ($\text{Lg } V$) в графе 1 табл. 6, характерному для временного интервала 5–0 млн лет, включающему τ .

Отмеченные совпадения, на наш взгляд, неслучайны и указывают на то, что процесс «зарождения» (и, очевидно, «отмирания») тектонических плит на планете происходит в геологическом смысле непрерывно и определяется самосогласованным упругим планетарным полем, имеющим волновую ротационно обусловленную природу. Вопрос требует более детальной проработки в дальнейшем.

4. Следует отметить, что в работах [Ле Пишон, 1974; Морган, 1974; Новая..., 1974; Forsyth, Uyeda, 1975] поиск корреляций между скоростями движения границ плит и другими их параметрами проводился в полном соответствии с принципами механики движения жестких плит вдоль сферической поверхности. Однако такое рассмотрение происходило без учета вращения планеты. Поэтому, несмотря на абсолютно правильную с механической точки зрения формулировку целей исследования: «Обладает ли тектонический механизм достаточной для движения плит энергией?», «Может ли предлагаемый теоретический механизм вызвать фиксируемые в зо-

нах спрединга и субдукции движения плит?» [Forsyth, Uyeda, 1975], — игнорирование эффектов, связанных с вращением Земли, привело к «пропуску» нелинейных сеймотектонических решений ротационного типа (1)–(2), (8)–(7) или (4)–(5). И как следствие, в рамках новой глобальной тектоники [Новая..., 1974] потребовалось отвечать на вопросы типа [Айзекс, Оливер, Сайкс, 1974] «Подтверждают ли данные сейсмологии концепцию Новой глобальной тектоники?» и «Позволяет ли Новая глобальная тектоника по-новому подойти к проблемам сейсмологии?», ответы на которые, вообще говоря, были заранее очевидны. Надо отметить, что не на все из таких вопросов к настоящему времени получены убедительные ответы. Например, «структурные и кинематические решения, предлагаемые плейттектоникой, во многих случаях малообоснованны» [Пушаровский, 2005]. Более того, становится все более очевидной несостоятельность Новой глобальной тектоники как всеобъемлющей геодинамической концепции [Спорные..., 2002]. Тем не менее плейттектоническая концепция своей наглядностью, тесной причастностью ко многим научным дисциплинам и, по-видимому, главным — своим «мобилистическим началом» [Пушаровский, 2005] уже сыграла и еще в течение долгого времени будет играть важную роль в науках о Земле, так как является «популярной до предела» [Пушаровский, 2005].

5. Движение плит и сейсмичность (и вулканизм), как гром и молния (и дождь), по своей сути есть разные проявления одного и того же геодинамического процесса. В рамках новой глобальной тектоники представляется очевидным, что движение плит и тектоника (молния) — «первичны», а землетрясения и сейсмология (гром) — «вторичны». В рамках же геодинамического процесса, опирающегося на представления о нелинейных свойствах вращающейся геофизической среды, вопрос о «первичности» и «вторичности» в такой постановке, вообще говоря, не имеет смысла. Действительно, и ранее [Викулин, 2003], и в этой работе показано, что и тектонические плиты, и сейсмофокальные блоки на вращающейся планете движутся в условиях самосогласованного упругого поля, волновые свойства которого являются ротационно обусловленными. В соответствии с теоремой Эйлера таким движениям должны соответствовать вполне определенные трансляционные перемещения блоков — землетрясения, сейсмический процесс и плит-тектонический процесс, наблюдаемые на поверхности Земли. Другими словами, «первичным», по сути, является сам геодинамический процесс, волновая (самоорганизующая) природа которого в условиях ротации планеты обеспечивается наличием собственных моментов у слагающих геологическую среду образований. В таком случае понятно, почему «тектоническое движение есть производная форма вращательного движения» [Бондарчук, 1970, с. 57]. «Вторичными» же являются разные проявления такого геодинамического процесса, которые в соответствии с теоремой Эйлера наблюдаются в виде перемещения плит, движения блоков — землетрясений и извержений вулканов.

6. В последнее время наблюдается резкое повышение интереса к проблеме вихревых структур и их взаимосвязи с ротацией планеты. «Весьма показательным в этом смысле можно назвать XXXV Тектоническое совещание 2002 года [Тектоника..., 2002], каждый седьмой доклад которого в той или иной мере касался теоретических, планетарных или региональных проблем ротогенеза. Несколько докладов на этом совещании были посвящены результатам изучения влияния ротационного режима Земли на новейшую и современную геодинамику. Отдельные публикации, появившиеся в последние годы, подтверждают перспективность и плодотворность таких исследований, вносящих существенный вклад в познание геотектоники и геодинамики и зачастую приводящих к весьма неожиданным результатам. Огромный фактический материал, накопленный к настоящему времени по обсуждаемой проблеме, вероятно, заслуживает того, чтобы комплекс структур, обязанных своим происхождением ротационному фактору, стал рассматриваться в рамках специально выделенной ротационной тектоники» [Поletaев, 2005].

Более того, «размеры сил, вызывающих движение в атмосфере... совершенно исключительны. Не меньше они и в гидросфере и, конечно, в литосфере. Они должны вызывать изменения и в твердой среде. Отрицать существование этих изменений бесполезно и даже вредно» [Наливкин, 1969, с. 91]. Мы уже начинаем осознавать преобладающую роль циклонических процессов в атмосфере [Наливкин, 1969; Сидоров, 2002б] и гидросфере [Бреховских и др., 1971; Крамарева, 2002] Земли и их тесную связь с вращением планеты [Иванчин, 2004; Сидоров, 2002а].

Этот, по сути, «непрерывный» ряд явлений хорошо дополняют существенно большие по масштабу и интенсивности циклонические явления в атмосферах быстро вращающихся Юпитера, Сатурна и, по-видимому, Нептуна а также отсутствие данных о таких явлениях в атмосфере практически не вращающейся вокруг своей оси Венеры. Юпитер и Сатурн имеют к тому же гигантские по масштабу и массе (вращающиеся) спутниковые системы.

На существование тесной взаимосвязи между движениями в литосфере, гидросфере и атмосфере Земли указывают и такие данные. С одной стороны, нутация планеты, ее амплитуда и частота связаны с сеймотектоническим процессом [Викулин, Кролевец, 2001], с другой — периоды многолетних возмущений в системе океан — атмосфера кратны периодам Чандлера [Сидоров, 2002б, с. 278]. Эти данные подтверждают сформулированный многими исследователями вывод о том, что литосфера (тектоносфера) — гидросфера — атмосфера представляют собой единую нелинейную систему, движение которой определяется вращательными движениями планеты. Как видим, «комплекс структур, обязанных своим происхождением ротационному фактору» [Полетаев, 2005], необходимо рассматривать в том числе и с более общих позиций — ротационной физики Земли [Викулин, 2004б].

Литература

1. Айзекс Б., Оливер Дж., Сайкс Л. Сейсмология и новая глобальная тектоника // Новая глобальная тектоника. — М.: Мир, 1974. — С. 133–179.
2. Берснев И. И. Осевое вращение Земли как одна из причин геотектогенеза // Строение и развитие земной коры. — М.: Наука, 1964. — С. 194–200.
3. Бондарчук В. Г. Основные вопросы тектоорогении. — Киев: АН Украины, 1961. — 384 с.
4. Бондарчук В. Г. Движение и структура тектоносферы. — Киев: Наук. думка, 1970. — 192 с.
5. Борисов А. В., Мамаев И. С., Соколовский М. А. Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей. — М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исслед., 2003. — 704 с.
6. Некоторые результаты гидрофического эксперимента в Тропической Атлантике / Л. М. Бреховских, Ю. А. Иванов, М. Н. Кошляков [и др.] // Докл. АН СССР. — 1971. — Т. 198. — № 6. — С. 1434–1439.
7. Горизонтальные перемещения по разломам и некоторые методы их изучения / В. С. Буртман, А. В. Лукьянов, А. В. Пейве [и др.] // Разломы и горизонтальные движения земной коры. — М.: АН СССР, 1963. — С. 5–33.
8. Быков В. Г. Нелинейные волновые процессы в геологических средах. — Владивосток: Дальнаука, 2000. — 190 с.
9. Ван Беммелен Р. И. Теория ундаций // Структурная геология и тектоника плит. Тектоника гравитационного скольжения. Эллипсоид напряжений. Т. 3 / под ред. К. Сейферта. — М.: Мир, 1991. — С. 200–213.
10. Викулин А. В. О природе австралийских землетрясений // Вулканология и сейсмология. — 1994. — № 2. — С. 99–108.
11. Викулин А. В. Миграция и осцилляции сейсмической активности и волновые движения земной коры // Пробл. геодинамики и прогноза землетрясений: материалы 1-го рос.-яп. семинара, Хабаровск, 26–29 сентября 2000 г. — Хабаровск: ИГиГ ДВО РАН, 2001. — С. 205–224.
12. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН: КГПУ, 2003. — 151 с.
13. Викулин А. В. Взгляд физика: вращательное движение как характерное свойство пространства — времени Вселенной // Вихри в геологических процессах. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004а. — С. 8–19.
14. Викулин А. В. Введение в физику Земли: учеб. пособие. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004б. — 240 с.
15. Викулин А. В., Кролевец А. Н. Чандлеровское колебание полюса и сеймотектонический процесс // Геология и геофизика. — 2001. — Т. 42. — № 6. — С. 996–1009.
16. Викулин А. В., Тверитинова Т. Ю. О скоростях движения тектонических плит // Вихри в геологических процессах. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — С. 83–92.

17. *Вихри* в геологических процессах: сб. науч. ст. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — 297 с.
18. *Зоны субдукции: действующие силы, геодинамические типы, сейсмичность и металлогения* / Ю.Г. Гатинский, Д. В. Рундквист, Г. Л. Владова [и др.] // Вестник ОГПТГН РАН. — 2000. — № 2 (12) — Т. 1.
19. *Геологическая история территории СССР и тектоника плит*. — М.: Наука, 1989. — 206 с.
20. *Геолого-геофизический атлас Тихого океана*. — М.; СПб.: Межправительственная океанографическая комис., 2003. — 120 с.
21. *Гущенко О. И.* Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии // Поля напряжений и деформаций в литосфере. — М.: Наука, 1979. — С. 26–59.
22. *Давыдов А. С.* Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах // Успехи физических наук. — 1982. — Т. 138. — Вып. 4. — С. 603–643.
23. *Регистрация* собственных колебаний геоблоков с помощью лазерных деформографов / А. В. Давыдов, Г. И. Долгих, А. М. Запольский [и др.] // Тихоокеанская геология. — 1988. — № 2. — С. 117–118.
24. *Дмитриевский А. Н., Володин И. А., Шипов Г. И.* Энергоструктура Земли и геодинамика. — М.: Наука, 1993. — 155 с.
25. *Жарков В. Н.* Внутреннее строение Земли и планет. — М.: Наука, 1983. — 416 с.
26. *Иванчин А. Г.* Движущие силы смерча // Вихри в геологических процессах. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — С. 269–273.
27. *Кольцевые* структуры Земли: миф или реальность / Я. Г. Кац, В. В. Козлов, А. И. Полетаев [и др.]. — М.: Наука, 1989. — 190 с.
28. *Крамарева Л. К.* Структура и динамика вихревых образований энергоактивных зон Тихого океана. — Владивосток: Дальнаука, 2002. — 334 с.
29. *Кудрявцев П. С.* История физики. Т. 1. — М.: Учпедгиз, 1956. — 564 с.
30. *Кукал З.* Скорость геологических процессов. — М.: Мир, 1987. — 246 с.
31. *Кулаков А. П.* Морфоструктуры востока Азии. — М.: Наука, 1986. — 174 с.
32. *Кэрри У.* В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной: история догм в науках о Земле / пер. с англ. — М.: Мир, 1991. — 447 с.
33. *Ле Пишон.* Спрединг океанического дна и дрейф континентов // Новая глобальная тектоника. — М.: Мир, 1974. — С. 93–133.
34. *Ли Сыгуан.* Вихревые структуры Северо-Западного Китая. — М.; Л.: Госгеолтехиздат, 1958. — 132 с.
35. *Лукьянов А. В.* Нелинейные эффекты в моделях тектогенеза // Пробл. геодинамики литосферы. — М.: Наука, 1999. — С. 253–287.
36. *Маслов Л. А.* Геодинамика литосферы тихоокеанского подвижного пояса // Хабаровск; Владивосток: Дальнаука, 1996. — 200 с.
37. *Мелекесцев И. В.* Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Пробл. глубинного вулканизма. — М.: Наука, 1979. — С. 125–155.
38. *Мелекесцев И. В.* Роль вихрей в происхождении и жизни Земли // Вихри в геологических процессах: сб. науч. ст. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — С. 25–70.
39. *Мелекесцев И. В.* Взгляд геолога: вращательные движения и вихри как фактор формирования литосферы и геолого-географической среды Земли // Вихри в геологических процессах: сб. науч. ст. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — С. 20–23.
40. *Морган В.* Океанические поднятия, глубоководные желоба, большие разломы и блоки земной коры // Новая глобальная тектоника. — М.: Мир, 1974. — С. 68–93.
41. *Мясников Е. А.* Магматические и рудоконтролирующие морфоструктуры центрального типа на примере Верхнего Приамурья. — Владивосток: Дальнаука, 1999. — 84 с.
42. *Наливкин Д. В.* Ураганы, бури и смерчи. — Л.: Наука, 1969. — 488 с.
43. *Новая глобальная тектоника: тектоника плит*. — М.: Мир, 1974. — 472 с.

44. *Поletaев А. И.* Ротационная тектоника земной коры // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых: материалы 38-го Тектонического совещ. — М.: ГЕОС, 2005. — Т. 2. — С. 97–100.
45. *Потанов Ю. С., Фоминский Л. П., Потанов С. Ю.* Вихревая энергетика и холодный ядерный синтез с позиции теории движения. — Кишинев; Черкассы: Око-Плюс, 2000. — 324 с.
46. *Пуцаровский Ю. М.* Глобальная тектоника в перспективе // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых: материалы 38-го Тектонического совещ. — М.: ГЕОС, 2005. — Т. 2. — С. 121–123.
47. *Расцветаев Л. М.* Закономерный структурный рисунок земной поверхности и его динамическая интерпретация // Пробл. глобальной корреляции геологических явлений. — М.: Наука, 1980. — С. 145–216.
48. *Рикитаке Т.* Геофизические и геологические данные о Японской островной дуге и ее обрамлении // Окраины континентов и островные дуги. — М.: Мир, 1970. — С. 216–236.
49. *Роль* сдвиговой тектоники в структуре литосферы Земли и планет земной группы. — СПб.: Наука, 1997. — 591 с.
50. *Сато Х.* Повторные геодезические съемки // Методы прогноза землетрясений и их применение в Японии. — М.: Недра, 1984. — С. 108–120.
51. *Сидоров Н. С.* Физика нестабильностей вращения Земли. — М.: Физматлит, 2002а. — 384 с.
52. *Сидоров Н. С.* Атмосферные процессы и вращение Земли. — СПб.: Гидрометеоздат, 2002б. — 368 с.
53. *Система* планета Земля (нетрадиционные вопросы геологии): материалы 11-го науч. семинара, Москва, 3–5 февраля 2003 г. — М.: МГУ, 2003 — 336 с.
54. *Слензак О. И.* Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. — Киев: Наук. думка, 1972. — 182 с.
55. *Спорные* аспекты тектоники плит и возможные альтернативы: сб. науч. ст. / под ред. В. Н. Шолпо. — М.: ИФЗ РАН, 2002. — 236 с.
56. *Структурная* геология и тектоника плит: сб. ст. / под ред. К. Сейферта. — М.: Мир, 1991. — Т. 3. — 350 с.
57. *Тараканов Р.З.* Повторные толчки землетрясения 4 ноября 1952 года // Тр. СахКНИИ СО АН СССР. — 1961. — Вып. 10. — С. 67–77.
58. *Тектоника* и геофизика литосферы: материалы 35-го Тектонического совещ.: в 2 т. — М.: ГЕОС, 2002.
59. *Фридман А. М.* Из жизни спиральных галактик // В мире науки. — 2005. — № 1. — С. 70–79.
60. *Хаин В. Е., Ломизе М. Г.* Геотектоника с основами геодинамики: учеб. — М.: МГУ, 1995. — 480 с.
61. *Шкала* геологического времени / У. Б. Харленд, А. В. Кокс, П. Г. Ллевеллин [и др.]. — М.: Мир, 1985. — 139 с.
62. *Морские* магнитные аномалии, инверсии геомагнитного поля и движения океанического дна и континентов / Дж. Хейцлер, Г. Диксон, Е. Херрон [и др.] // Новая глобальная тектоника. — М.: Мир, 1974. — С. 38–57.
63. *Шунов Г. И.* Теория физического вакуума. — М.: Кириллица-1, 2002. — 128 с.
64. *Daly M. C.* Correlation between Nazka-Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador // Tectonics. — 1989. — Vol. 8. — № 4. — P. 769–790.
65. *Duda S. J.* Strain release in the Circum-Pacific belt, Chile 1960 // J. Geophys. Res. — 1963. — Vol. 68. — P. 5531–5544.
66. *Geist E. L., Childs J. R., Scholl D. W.* The origin of basins of the Aleutian ridge: implications for block rotation of an arc massif // Tectonics. — 1988. — Vol. 7. — № 2. — P. 327–341.
67. *Hashimoto M., Tada T.* Horizontal Crustal movements in Hokkaido and its tectonic implications // Jour. Seismol. Soc. Jap. — 1988. — Vol. 41. — № 1. — P. 29–38.
68. *Forsyth D., Uyeda S.* On the relative importance of the driving forces of plate motion // Geophys. J. R. Astr. Soc. — 1975. — Vol. 43. — P. 163–200.

69. *Jackson E. D., Shaw H. R., Bargar K. E.* Calculated geochronology and stress field orientations along the Hawaiian chain // *Earth Planet Sci. Lett.* — 1975. — Vol. 26. — P. 145–155.
70. *Lee J. S.* Some Characteristic Structural Types in Eastern Asia and Their Bearing upon the Problems of Continental Movements // *Geol. Mag.* — 1928. — LXVI. — P. 422–430.
71. *Maps* of part of the Northern hemisphere of Venus. Miscellaneous investigations series. — U.S. Geological Survey, 1989.
72. *Mogi K.* Migration of seismic activity // *Bull. of the Earthquake Res. Inst.* — 1968. — Vol. 46. — P. 53–74.
73. *Morelli A., Dzevonsky A. M.* Topography of the Core-Mantle boundary and lateral homogeneity of the liquid core // *Nature.* — 1987. — Vol. 19. — P. 679–683.
74. *Nur A., Ron H., Scotti O.* Fault mechanics and the kinematics of block rotation // *Geology.* — 1986. — Vol. 14. — P. 746–749.
75. *Reigber Ch., Muller H., Rizos Ch.* [et al.]. An improved GRIM-3 Earth gravity model (GRIM-3) // *Symp. Union Geodes. Geophys.: XVIII Gen. Assembly / Proc. Internat. Assoc. Geodes (IAG).* — Hamburg, 1983. — Vol. 1. — P. 388–415.
76. *Takeuchi A.* On the episodic vicissitude of tectonic stress field of the Cenozoic northeast Hounshu arc, Japan // *Formation of active ocean margins / ed. N. Nasu [et al.].* — Tokyo, 1985. — P. 443–465.
77. *Takeuchi A.* Pacific swing: Cenozoic episodicity of tectonism and volcanism in Northeastern Japan // *Memoir of the Geological Society of China.* — 1986. — № 7. — P. 233–248.
78. *Tveritinova T. Y.* On the geometrical regularities in the structure of the Alpine Mediterranean belt: XV Congress of the Carpatho-Balkan Geological Association // *Special publications of the Geological society of Greece.* — 1995. — № 4 (1) — P. 124–133 .
79. *Tveritinova T. Ju.* Features of a structure and development of the Northwest margin of the Pacific ocean mobile belt as a global zone of shear deformations // *Linkages among tectonics, seismicity, magma genesis and eruption in volcanic arcs. IV International Biennial Workshop on Subduction Processes. Emphasizing the Japan-Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs., Petropavlovsk-Kamchatsky, August 21–27, 2004. Session II: Geodynamics, tectonics, geochemistry, petrology and magma-formation.* — Petropavlovsk-Kamchatsky: IVIS, 2004.
80. *Whitney M. I.* Aerodynamic and vorticity erosion of Mars: Part II. Vortex features, related systems, and some possible global patterns of erosion // *Geol. Soc. America Bull.* — 1979. — Part I. — Vol. 90. — P. 1128–1143.

А. В. Викулин^{1,2}

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

² *Камчатский государственный университет*

РОТАЦИОННЫЕ УПРУГИЕ ПОЛЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ И ВИХРЕВЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ДИРИХЛЕ: ТОЖДЕСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ?*

Ставится и аналитически решается задача об упругом поле, связанном с вращением блокового твердого тела; проводится построение волновой ротационной модели Земли. Показывается, что наблюдаемые движения сейсмофокальных блоков, тектонических плит, систем сдвиговых деформаций и структур растяжения — сжатия могут быть описаны в рамках такой модели. В работе приводится обзор проблемы фигур равновесия вращающихся гравитирующих жидкостей. Предполагается, что модельные ротационные тектонические движения соответствуют вихревым решениям задачи Дирихле для Земли. Обсуждаются проблемы трения и ротационной физики Земли.

ROTATION ELASTIC FIELDS IN SOLID BODY AND VORTEX DECISIONS OF DIRICHLET'S PROBLEM — IDENTICAL SYSTEMS?

The proposition about rotation-elastic field in rotating block's solid is stated and is resolved analytically. Rotating wave model of Earth's seismotectonic process is resolved. It shown that the movements of blocks, of tectonic plates, of geological displacement structures may be described in frame of such model. The review of equilibrium figures of rotating gravitating fluids is given. It supposed that modeling rotational tectonic movements corresponded the vortex decisions of Dirichlet's problem for the Earth. The problems of the friction and of the rotational physics of the Earth are discussed.

Введение

В связи с задачами, стоящими перед метеорологией и океанологией, в последнее время резко повысился интерес к проблеме вихревых гидродинамических движений. Получены [Алексеев и др., 2005; Борисов и др., 2003; Сидоренков, 2002а, 2002б и др.] новые фундаментальные результаты для Земли и новые данные для атмосфер других планет Солнечной системы. Накопленный материал показывает, что основными движениями газовых и жидких оболочек планет являются определяемые их угловыми скоростями вращения циклоны, антициклоны, кольцевые течения, ринги и широкий спектр захваченных волн: Стокса (краевые волны), Кельвина, Россби и др. На основании большого количества фактов сделано обобщение о том, что океан и атмосфера являются, по сути, единой системой, что наиболее отчетливо проявляется эффектом квазидвухлетней цикличности атмосферы. Показано, что многие из наиболее заметных межгодовых колебаний метеорологических элементов в атмосфере и гидрологических величин в океане связаны с этим явлением [Сидоренков, 2002а].

В последние десятилетия получены фундаментальные результаты и в теории гравитационного потенциала — одном из важнейших разделов математической физики и геофизики [Кондратьев, 2003; Чандрасекхар, 1973]. Успех связан в основном с преодолением кризиса в теории фигур равновесия, выразившегося в недооценке и забвении проблемы Дирихле — задачи о движении вращающейся гравитирующей жидкости, фигура которой в любой момент остается эллипсоидальной [Dirichlet, 1860]. Для различных сред (звезды, их скопления, галактики, ядра планет) в рамках задачи Дирихле были установлены новые решения Римана — Дедекинда [Риман, 1948], которые подтвердили вихревую природу наблюдающихся в этих средах движений. Были получены принципиально новые данные о физических свойствах исследованных сред,

* 34 (199). Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2005. № 6. С. 89–99.

таких как вязкость, сжимаемость, напряженность магнитного поля и др. Таким образом, становится все более ясным и определенным понимание того, что «вихревыми» решениями задачи Дирихле — фундаментальной проблемы механики о фигурах равновесия [Кондратьев, 2003; Ламб, 2003], по сути, являются все движения вращающейся гравитирующей реальной жидкости: вязкой, сжимаемой и движущейся во взаимодействии с различными полями.

Влияние ротации на процессы, протекающие в недрах планеты, в том числе на состояние и форму ее поверхности, несомненно. Геофизические [Кузнецов, 2000; Тяпкин, 1998] и геологические [Лукьянов, 1999; Мелекесцев, 1979; Слензак, 1972; Система..., 2003; Тектоника..., 2002] данные тоже приведены в многочисленных публикациях [Вихри..., 2004; Тверитинова, Викулин, 2005]. Более того, в науках о Земле на фоне «неуспехов» Новой глобальной тектоники [Пущаровский, 2005; Спорные..., 2002] резко повысился интерес именно к проблеме вихревых структур в литосфере [Вихри..., 2004; Система..., 2003; Полетаев, 2005; Тектоника..., 2002]. Вихревые структуры обнаружены и на поверхностях других быстровращающихся планет Солнечной системы и их спутников [Вихри..., 2004]. Все эти данные позволяют объединить «твердотельные» геолого-геофизические движения и движения океана — атмосферы в один ряд явлений. Действительно, на это указывают следующие материалы.

«Твердая» Земля в течение геологических отрезков времени с достаточно хорошим приближением может рассматриваться как жидкое тело.

Далее, известно много данных [Викулин, 2003], указывающих на существование взаимосвязи между сейсмотектоническими процессами, вариациями вращения планеты, нутацией ее полюса, с одной стороны, и процессами в атмосфере, количеством осадков и уровнем моря — с другой. Оказалось, что все эти планетарного масштаба процессы взаимосвязаны, в свою очередь, с «внеземными» факторами: солнечной активностью, гелиофизическими и космическими параметрами, эклиптической долготой Луны.

Было установлено [Сидоренков, 2002б], что не только газово-жидкая оболочка планеты представляет собой единую систему. Такой, по своей сути, является система Земля — океан — атмосфера, компоненты которой совершают согласованные колебания, влияя друг на друга. Такие колебания проявляются в виде движения полюсов Земли, эффектов Эль Ниньо и Ла Ниньо в океане, Южного (в субтропической зоне южного полушария между Тихим и Индийским океанами) колебания масс воздуха и уже отмечавшейся квазидвухлетней цикличности атмосферы.

Таким образом, приведенные данные позволяют действительно рассмотреть все геолого-геофизические данные о вихревых движениях (структурах) с позиции механической задачи Дирихле, вихревые решения которой отождествлены с движениями, происходящими в реальных средах, в том числе и в геофизической среде.

Представленная статья является обзорной и постановочной. Ее основные цели заключаются в том, чтобы, во-первых, обратить внимание на наличие общих «вихревых» свойств у движений, наблюдающихся в совершенно разных по своим физическим свойствам средах: в атмосфере, Мировом океане и «твердых» слоях Земли, вращение которой и позволяет объединить их в один класс явлений; во-вторых, указать на возможность исследования таких движений в рамках задачи Дирихле. В этом смысле статья продолжает «вихревую» ротационно-волновую направленность работ [Викулин, 2003; Вихри..., 2004; Тверитинова, Викулин, 2005].

Материал статьи излагается в следующей последовательности:

- 1) приводится обзор проблемы фигур равновесия вращающихся жидкостей;
- 2) кратко рассматриваются вихревые структуры (движения) в геологии и геофизике;
- 3) ставится и решается задача об упругом поле вращающегося блокового твердого тела;
- 4) показывается, что в рамках такой ротационной концепции оказывается возможным описать волновые сейсмотектонические явления в сейсмических поясах;
- 5) рассматривается вопрос об энергии тектонического процесса; формулируется вывод о том, что сейсмотектонические движения блоков и плит, а также движения Мирового океана и атмосферы относятся к одному классу явлений.

В заключении формулируются некоторые предварительные выводы.

Фигура равновесия вращающихся тел (краткий обзор проблемы)

Обстоятельные обзоры проблемы содержатся в классических работах [Буллен, 1978; Ламб, 2003]. Согласно работе [Кондратьев, 2003, с. 15–37] условно можно выделить следующие этапы, характеризующие состояние теории фигур равновесия вращающейся гравитирующей жидкости.

Начальный, *ньютоновский этап* можно связать с появлением первых фактов. В 1672 г. Рише обнаружил, что часы, верно отсчитывающие секунды в Париже (490° с. ш.), отстают приблизительно на 2,5 мин в сутки в Кайенне (50° с. ш.), где он вынужден был укоротить маятник более чем на линию ($1/12$ французского дюйма). Аналогичное отставание часов позднее было замечено Вареном и Де Хэем в Горэ (150° с. ш.) и в других местах. Один из членов Парижской академии предположил, что на экваторе тело весит меньше, чем на полюсах. В 1690 г. Гюйгенс заметил, что линия отвеса направлена нормально к поверхности вращающейся самогравитирующей жидкости. Кроме того, он оценил эллиптичность ε Земли [Буллен, 1978, с. 18].

Все это стимулировало деятельность Ньютона, который, как сообщают, случайно слышал об открытии Рише на заседании Королевского общества в 1682 г. Ньютон понял, что с помощью закона всемирного тяготения можно исследовать не только движение небесных тел, но и саму их форму. Он поставил знаменитую задачу о равновесной форме гравитирующей жидкой массы, имеющей вращение вокруг оси. Эта задача и положила начало теории фигур равновесия. Ньютон первый определил сжатие однородной Земли:

$$\varepsilon = \frac{5}{4}m = \frac{1}{229},$$

где m — отношение центробежной силы к притяжению на экваторе. Это был несомненный успех в познании Земли и других планет.

Ученые думали и о фигуре равновесия неоднородной Земли. Не все моменты этой проблемы во времена Ньютона были ясными и понятными. Например, из популярной в то время вихревой теории Декарта (вспомним великое (!) противостояние ньютонианцев и картезианцев [Вихри..., 2004; Тверитинова, Викулин, 2005]) следовало, что Земля в противоположность полученному Ньютоном результату должна напоминать огурец, стоящий на остром конце.

И только Клеро (1743) верно понял, что все дело в существовании тесной взаимосвязи между сжатием планеты и распределением вещества внутри нее. Ему первому стало ясно, что в рамках альтернативы «сплюснутость однородной фигуры (Ньютон) — сплюснутость полностью переконденсированной фигуры (Гюйгенс)» имеет место неравенство

$$\frac{5}{4}m \geq \varepsilon \geq \frac{1}{2}m.$$

Ньютоновские «Начала» побудили многих математиков к решению задач по фигурам равновесия. Маклорен (1742), последователь Ньютона, решил трудную задачу о притяжении внутри однородного сфероида. Компоненты силы притяжения оказались линейными функциями координат. Это позволило Маклорену красиво обобщить результат Ньютона доказательством, что однородно сжатый сфероид при любой сплюснутости может быть фигурой относительного равновесия вращающейся жидкой гравитирующей массы. В итоге Маклорен не только открывает равновесные жидкие сфероиды, носящие теперь его имя, но и доказывает, что внутри них полная сила тяжести всегда направлена по нормали к поверхности, проходящей через испытываемую точку и подобной границе данной фигуры. Это и есть уровенные поверхности, которые после вышедших в 1743 г. работ Симпсона и Клеро, выражаясь современным языком, являются поверхностями постоянного значения давления и полного потенциала.

Этап Якоби. Период становления теории фигур равновесия был наполнен решением важных математических задач. Лежандр ввел понятие гравитационного потенциала и разработал общую теорию притяжения однородного трехосного эллипсоида, содержащую как частный случай и результаты Маклорена. Лаплас получил знаменитое дифференциальное уравнение второго порядка для потенциала вне гравитирующей массы, а Пуассон — внутри нее. Эйлер сформулировал принципы гидродинамики невязкой жидкости. Лагранж преобразовал всю механику. В результате этого подход к проблеме фигур равновесия, сформулированной Ньютоном, стал более абстрактным, что давало какой-то выигрыш в общности.

Дело касалось самого принципиального момента теории: обязаны ли фигуры равновесия иметь осевую симметрию или могут существовать и фигуры с нарушением ее? У самого Ньютона предположение об осевой симметрии было только априорным, однако почти все его последователи считали, что гипотезе об осесимметричности нет альтернативы. Все рассуждали здраво, но, увы, стандартно: раз поле центробежных сил, ответственных за появление сплюснутости вращающейся конфигурации, имеет осевую симметрию, то неизбежно такую же симметрию должна иметь и сама фигура.

Новый толчок к развитию теории дал математик Якоби (1834 г.), указавший на возможность существования однородной фигуры равновесия в форме трехосного эллипсоида — эллипсоида Якоби. В 1884 г. Ляпунов и годом позднее Пуанкаре независимо друг от друга открывают целый класс новых фигур равновесия, отдаленно напоминающих по форме груши, рубчатые дыни, волнистые патиссоны, другие фрукты и овощи. Оказалось, что в окрестности определенных сфероидов Маклорена и эллипсоидов Якоби (их множество бесконечно, хотя и счетное) существуют неэллипсоидальные фигуры относительного равновесия. Строгое доказательство существования неэллипсоидальных форм дано в начале XX в. [Ляпунов, 2000].

Это блестящее достижение Ляпунова — Пуанкаре открыло новую страницу в математической физике и геофизике, сформулировало круг любопытных идей и дало толчок к развитию новых аналитических методов. Отсюда берут начало понятия о линейных сериях фигур равновесия, бифуркациях, нелинейных интегральных уравнениях. Был сделан важный шаг от идеальных поверхностей второго порядка к сложной реальности: действительно, у многих галактик, звезд и планет в их форме замечено присутствие третьих и более высоких гармоник [Пуанкаре, 2000].

Этап Дирихле [Dirichlet, 1860]. Математик Дирихле внес настолько революционный вклад в основы теории фигур равновесия, что раздвинул сами границы этой дисциплины. Поставленная Дирихле проблема такова. Дана однородная несжимаемая масса гравитирующей жидкости. Допускают ли законы гидродинамики такое движение этой массы, чтобы ее форма в любой момент оставалась эллипсоидальной, а поле скоростей жидкости — линейным по координатам? Дирихле поставил задачу и получил уравнения движения такого эллипсоида.

Если до Дирихле говорили исключительно о фигурах относительного равновесия, то теперь вопрос поставлен значительно шире: существуют ли однородные эллипсоиды с внутренними течениями? Фигуры же относительного равновесия — всего лишь частный случай стационарных фигур в проблеме Дирихле. Ключевым в этой проблеме является условие линейности внутреннего поля скоростей в эллипсоидах — только оно делает решаемой трудную динамическую задачу учета сил Кориолиса. В итоге поля сил гравитации и Кориолиса и центробежной силы в эллипсоиде оказываются линейными. Суперпозиция этих силовых полей, без которой проблема Дирихле вообще не имела бы смысла, порождает обширное семейство возможных конфигураций, в том числе и вихревые течения.

Дедекинд отметил особую симметрию, присущую уравнениям движения эллипсоида Дирихле. Такое свойство уравнений говорило о том, что возможно такое движение эллипсоида, конгруэнтного исходному, которое имеет и другое поле скоростей и вращается уже с другой угловой скоростью. Другими словами, такое свойство симметрии уравнений движения указывает на возможность существования вихревых течений во вращающихся средах.

Самый значительный вклад в разработку идеи Дирихле внес великий математик Риман. Он впервые рассмотрел стационарные фигуры равновесия и открыл класс двухпараметрических равновесных эллипсоидов, у которых вектор угловой скорости Ω и вектор вихря внутренних течений ζ совпадают с одной из главных осей симметрии фигуры (*S*-эллипсоиды Римана). Класс *S*-эллипсоидов состоит из однопараметрических последовательностей фигур с определенным отношением $f = \zeta / \Omega$ (являющимся, как впоследствии будет показано Чандрасекхаром, своеобразным условием «квантования» получаемых решений).

Еще более удивительными являются эллипсоиды Римана [Риман, 1948] с наклонным вращением (например, Земля). У таких фигур ось вращения и вектор вихря в общем случае не совпадают с главными осями эллипсоида, что значительно расширяет спектр возможных решений.

По сути, задача Дирихле явилась дальнейшим, на более высоком уровне, развитием идеи Декарта (1644) «о вихревых движениях как основных движениях Материи, как системы Мира» [Тверитинова, Викулин, 2005].

Первый этап развития проблемы Дирихле прошел под знаком «бури и натиска»: ни Дедекин, ни Риман, так много сделавший в различных областях математики и механики, к этой теме так и не возвращались после получения ими первых результатов. Наступило долгое затишье.

Современный этап. Интерес к проблеме Дирихле был возрожден через 100 лет работами по динамике звезд, выполненными С. Чандрасекхаром и его сотрудниками в 60-х гг. прошлого века. За эти работы С. Чандрасекхар (совместно с У. А. Фаулером) в 1983 г. был удостоен Нобелевской премии. Важные результаты в областях астрономии, космогонии и геофизики, связанные с изучением в рамках проблемы Дирихле строения и свойств звезд, звездных систем, галактик, газопылевых облаков и твердого внутреннего ядра Земли, движущегося в вязкой мантийной оболочке, были также получены Б. П. Кондратьевым и его сотрудниками, другими коллективами исследователей [Кондратьев, 2003]. Эти работы убедительно доказывают существование во вращающихся реальных (не идеальных!) системах внутренних движений, имеющих вихревую природу. Важным результатом такого рассмотрения, имеющим принципиальное значение, является возможность получения новых данных о физических свойствах сред, таких как вязкость, сжимаемость, напряженность магнитного поля и др.

Полученные данные позволили модифицировать классическую задачу Дирихле об идеальной жидкости и тем самым применить ее к движению реальных сред [Кондратьев, 2003]. Представляется, что вихревые решения модифицированной проблемы Дирихле будут в большей степени соответствовать движениям, наблюдаемым в реальных средах, включая и геофизическую среду, которая, как известно [Вихри..., 2004; Ли Сыгуан, 1958; Поплавский, Соловьев, 2000], содержит большое количество разномасштабных вихревых геологических структур и вихревых геофизических движений.

Вихревые структуры в геологии и геофизике

Вихревые геологические структуры первым описал в 20-х гг. прошлого века Ли Сыгуан [1958]. Наиболее ярким и наглядным подтверждением именно такого движения блоков земной коры являются расположенные между тектоническими плитами Пасифик — на западе и Наска — на востоке микроплиты Пасха и Хуан-Фернандос (протяженностью 300–400 км), изолинии на геофизических картах которых представляют собой вихревые линии. Сами же составители этих карт отмечают, что микроплита Пасха вращается против часовой стрелки со «скоростью около 15° /млн лет и уже повернулась почти на 90° со времени своего образования», т. е. около 5 млн лет назад [Геолого..., 2003, с. 58–59].

Обширная библиография работ по вихревым геологическим структурам и вихревым геофизическим движениям на настоящий момент приведена в работах [Вихри..., 2004; Тверитинова, Викулин, 2005]. Важно то, что многие *геологи* и *геофизики* — *непосредственные исследователи* этих структур [Вихри..., 2004; Дмитриевский и др., 1993; Жарков, 1983; Лукьянов, 1999; Система..., 2003; Тектоника..., 2002] — отмечали, что и само существование кольцевых, вихревых, спиральных и других структур на поверхности Земли и их динамика могут являться следствием вихревого решения задачи Дирихле [Поплавский, Соловьев, 2000; Устинова, Вылцан, Устинов, 2005].

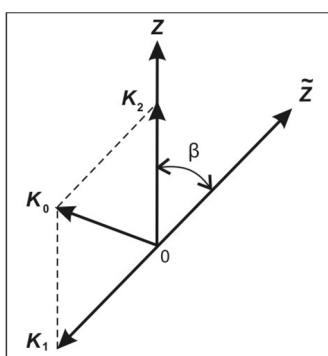
Для доказательства этого утверждения, очевидно, достаточно показать возможность существования в реальном (по М. А. Садовскому [Садовский, Писаренко, 1991], блоковом) твердом теле упругих полей, связанных с его вращением.

Энергия и момент силы упругого ротационного поля

Для блоковых геофизических сред [Садовский, Писаренко, 1991] в рамках классической теории упругости была сформулирована и аналитически решена задача о поле напряжений во вращающемся с угловой скоростью Ω твердом теле вокруг упруго связанного с ним небольшого, поворачивающегося под действием внутренних источников макрообъема V [Викулин,

1990; Викулин, Иванчин, 1998]. Основная идея решения такой задачи заключается в том, что когда макрообъем V упруго сцеплен с окружающей его средой (матрицей), изменение направления момента импульса макрообъема приводит к появлению вокруг него упругих напряжений, которые в силу законов сохранения должны характеризоваться соответствующим компенсирующим моментом силы. Эта идея находится в полном соответствии с известным положением из теории вихрей [Сэффмэн, 2000]: «Завихренность пропорциональна моменту количества движения частиц». Следует отметить, что наш подход к сеймотектоническим задачам, при котором упругое поле «наследует» механический момент (или завихренность, циркуляцию), в принципе, отличается от подходов других авторов [Ли Сыгуан, 1958; Mandeville, 2000; Wezel, 1986; Xie Xin-sheng, 2004]. Решение задачи проведем в три этапа [Викулин, 2003].

Рассмотрим две системы координат, которые повернуты относительно друг друга вокруг общей оси Y на угол β . Ось Z первой (исходной) системы координат параллельна оси вращения тела (Ω) и направлена от Южного полюса к Северному. Ось \tilde{Z} второй системы параллельна моменту импульса блока V после его поворота на угол β . Начала обеих систем координат находятся в центре масс области V , что представлена на рисунке.



Две системы координат, повернутые относительно общей оси на угол β . Ось Z параллельна оси вращения тела и направлена от его Южного полюса к Северному

Для определения величины упругих напряжений, возникающих вокруг поворачивающегося блока V , применим следующий мысленный эксперимент.

1. Сначала останавливаем вращение объема V , прикладывая упругие напряжения σ_1 с моментом силы K_1 , направленным в отрицательном направлении оси \tilde{Z} . При этом считаем, что кинетическая энергия вращения области V полностью переходит в потенциальную энергию упругих напряжений σ_1 . Затем, прикладывая упругие напряжения σ_2 с моментом силы K_2 , направленным вдоль оси Z , блок V опять раскручиваем до скорости вращения тела.

Другими словами, когда мы тормозим область V , ее кинетическая энергия вращения

$$W = 1/2 I \Omega^2 \quad (1)$$

переходит в упругую энергию, определяемую тензором напряжений σ_1 , а когда раскручиваем — создаем точно такую же кинетическую энергию, но за счет упругих напряжений σ_2 .

Рассмотрим случай, когда объем V представляет собой однородный шар, момент инерции I которого, как известно, не зависит от выбора оси вращения. Тогда равенство кинетической и потенциальной энергий приводит к соотношению $|K_1| = |K_2|$. При этом разность этих векторов и является искомым моментом силы K_0 , возникающим в результате поворота блока V в неинерциальной системе: $K_0 = K_2 - K_1$. Его модуль получаем из теоремы косинусов:

$$|K_0| = 2 |K_1| \sin \beta / 2. \quad (2)$$

2. Искомое поле упругих деформаций U , как известно [Ландау, Лифшиц, 2003], должно удовлетворять уравнению упругого равновесия

$$\text{grad div } U - a \cdot \text{rot rot } U = 0: \quad (3)$$

– с нулевыми граничными условиями на бесконечности:

$$U \rightarrow 0 \text{ при } r = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)^{1/2} \rightarrow \infty; \quad (4)$$

– с действующей на объем V силой, равной нулю:

$$F_i = \oint \sigma_{ij} dS_j = 0; \quad (5)$$

– с моментом силы, не зависящим от размера блока V :

$$K_i = \oint x_k e_{ikl} \sigma_{ij} dS_j \neq f(R_0), \quad (6)$$

где $a = (1 - 2\nu) / 2(1 - \nu)$; ν — коэффициент Пуассона; R_0 — радиус области; V , e_{ikl} — индекс Леви — Чивита.

Решением задачи (3)–(6) в сферической системе координат (r, φ, θ) с началом $r = 0$ в центре шарового объема V в области $r \geq R_0$ являются поля смещений U и напряжений σ :

$$U_r = U_\theta = 0, U_\varphi = Ar^{-2} \sin \theta, \quad (7)$$

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = 3/2 A Gr^{-3} \sin \theta, \quad (8)$$

где G — модуль сдвига; A — константа, которая будет определена далее. Остальные компоненты тензора напряжений равны нулю.

Подставляя выражение (8) в формулу (6) для момента силы упругого поля, получаем:

$$K_{1z} = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sigma_{r\varphi} r^3 \sin \theta d\theta d\varphi = 3\pi^2 A G. \quad (9)$$

Остальные компоненты момента силы равны нулю: $K_{1x} = K_{1y} = 0$ (см. рисунок).

3. Интегрируя плотность энергии упругих деформаций W , где λ — модуль всестороннего сжатия, ε_{ij} — деформация, δ_{ij} — символ Кронекера, по всему объему тела и считая его несжимаемым, получим величину упругой энергии, созданной моментом силы K_1 :

$$W = 9/2 A^2 G \int_0^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^{-4} \sin \theta dr d\theta d\varphi = 4\pi A^2 G R_0^{-3}. \quad (10)$$

Приравнивая ее к кинетической энергии (1) и учитывая, что момент инерции шара

$$I = 8/15 \pi \rho R_0^5,$$

где ρ — плотность вещества, получаем следующее выражение для A :

$$A = R_0^4 \Omega \sqrt{\frac{\rho}{15G}}. \quad (11)$$

С учетом формулы (2) получаем:

– для момента силы упругого поля вокруг блока, направленного перпендикулярно плоскости его поворота:

$$K = -6 \pi^2 \Omega R_0^4 \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \beta / 2; \quad (12)$$

– для величины упругой энергии:

$$W = 16/15 \pi \rho \Omega^2 R_0^5 \sin^2 \beta / 2; \quad (13)$$

– для поля смещений:

$$U_r = U_\theta = 0, U_\varphi = \Omega R_0^4 r^{-2} \sqrt{\frac{\rho}{15G}} \sin \theta \sin \beta / 2, r \geq R_0; \quad (14)$$

– для величины напряжений:

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = 3/2 \Omega R_0^4 r^{-3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \theta \sin \beta / 2, r \geq R_0. \quad (15)$$

Остальные компоненты напряжений равны нулю.

Оценки. При параметрах модели $\rho = 3 \text{ г/см}^3$, $G = 10^{11} \text{ н/м}^2$, $\Omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$, $R_0 \approx 100 \text{ км}$, соответствующих сейсмофокальным блокам земной коры, для сильнейших (с магнитудами $M \approx 8$) землетрясений получаем из соотношений (12)–(15): $U_0 \approx 10 \text{ м}$, $\sigma_0 \approx 100 \text{ бар}$, $W_0 \approx 10^{16+18} \text{ Дж}$, $K_0 \approx 10^{28+30} \text{ дин} \cdot \text{см}$, которые по порядку величины близки реально регистрируемым при таких

землетрясениях смещениям, сброшенным напряжениям, упругой энергии и сейсмическому моменту соответственно. Эти значения достигаются при угле поворота блока (очага землетрясения) $\beta_0 \approx U_0/R_0 = 10^{-4}$ рад. При продолжительности сейсмического цикла (при повторяемости сильнейших землетрясений в одном месте) около 100–1000 лет для скорости поворота блока получим «механическую» оценку $10^{-(4+6)}$ град/год, которая близка скорости вращения микроплиты Наска [Геолого..., 2003] и вообще «геологическим» скоростям вращения блоков и плит земной коры [Зоненшайн, Савостин, 1979].

Ротационные сейсмические волны

Рассмотрение совокупности блоков привело к следующей модели сейсмотектонического процесса [Викулин, 2003].

Для модели двух поворачивающихся блоков аналитически определена энергия их взаимодействия и показан дальнедействующий характер такого взаимодействия, что позволило перейти к рассмотрению цепочки блоков — протяженного сейсмического пояса. Уравнение движения цепочки блоков было получено в виде уравнения синус-Гордона (СГ) с характерной скоростью ротационного процесса [Викулин, Иванчин, 1998]:

$$c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \Omega R_0 \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx V_R V_S, \quad (16)$$

где V_S, V_R — соответственно скорость поперечных сейсмических волн и центробежная скорость. Отсюда следует, что упругие поля, возникающие вокруг поворачивающихся сейсмофокальных блоков (очагов землетрясений), определяются величиной угловой скорости вращения планеты. Поэтому авторы модели дали ей название «ротационная модель». При принятых ранее модельных параметрах характерное для ротационной модели значение скорости, по сути, является тектоническим:

$$c_0 \approx 1 \text{ см/с}, \quad (17)$$

что позволяет принять: в рамках ротационной волновой модели можно проводить описание единого, по сути, сейсмотектонического планетарного процесса.

Анализ имеющихся данных о скоростях миграции землетрясений показал, что существуют две зависимости, которые в рамках СГ-уравнения можно интерпретировать как солитоны (*soliton, s*) — уединенные тектонические волны и экситоны (*exiton, e*) — волны миграции форшоков и афтершоков в очагах землетрясений [Викулин, 2002; Викулин, Иванчин, 1998]:

$$E_s \approx V_s^5, V_s < c_0; E_e \approx V_e^2, V_e > c_0. \quad (18)$$

«Предельным» экситоном при магнитуах мигрирующих фор-афтершоков ($M_{\text{аф}}$), стремящихся к магнитуе сильнейшего землетрясения ($M_{\text{сз}}$): $M_{\text{аф}} \rightarrow M_{\text{сз}} \approx 8$, т. е. $V_e \rightarrow V_{\text{max}} \approx V_S \approx 4$ км/с — является само сильнейшее землетрясение. Другими словами, ротационная волновая модель фактически «содержит» внутри себя и ротационную модель очага землетрясения [Викулин и др., 2000]. Согласно представлениям ротационной волновой модели сильнейшее землетрясение является по своей сути результатом коллективного (самосогласованного) взаимодействия всех сейсмофокальных блоков, слагающих сейсмические пояса планеты.

Энергия тектонического процесса

«Закрученные» структуры на геологических и тектонических картах разного масштаба часто проявляются в виде разновозрастных систем сдвиговых деформаций, которые наблюдаются и вдоль границ структур, и в пределах их внутренних областей в виде спиралевидных (кольцевых или дуговых) и вихревых (в том числе радиальных) структурно-кинематических и тектонодинамических рисунков. Повсеместно наблюдающиеся на геологических и тектонических картах чередования разномасштабных структур растяжения или сжатия можно рассматривать как региональные, мегарегиональные и планетарные зоны сдвиговых деформаций. Объяснить наблюдаемую картину деформаций можно, например, с помощью гипотезы об общепланетарном правозакрученном полярном вихре [Тверитинова, Викулин, 2005].

Многочисленные данные о вращательном движении плит, платформ и блоков за последние 150–165 млн лет приведены в работах [Вихри..., 2004; Тверитинова, Викулин, 2005]. В этих же работах приведены известные на настоящий момент данные о скоростях V движения плит, протяженности границ которых известны ($N = 61$). Анализ этих данных показал существование двух механизмов, определяющих величины энергий движения тектонических плит:

$$E_1 \approx V_1^{(2-3)}, \tau_1 = 150 \text{ млн лет}; E_2 \approx V_2^{(4-5)}, \Delta \tau_2 = 5-33 \text{ млн лет}. \quad (19)$$

Первая зависимость характеризует такие движения плит, которые ответственны за перемещения в течение всего интервала наблюдений продолжительностью 150–165 млн лет, вторая — «дифференциальные» движения, которые оказалось возможным выявить по номерам магнитных аномалий в пределах небольших интервалов времени продолжительностью 5–33 млн лет.

Сравнение зависимостей (18) и (19) позволяет сформулировать три вывода.

Во-первых, движение каждого из ансамблей, состоящих только из сейсмофокальных блоков (18) или только из тектонических плит (19) качественно описывается одинаковыми механизмами. При этом движение плит в течение длительных интервалов времени (первая зависимость в формуле (19)), соответствует экситонному движению (второй зависимости в формуле (18)). В этом случае энергия плиты определяется выражением, характерным для кинетической энергии движущегося тела, пропорциональной квадрату скорости движения. Движение плит в течение коротких интервалов времени (вторая зависимость в формуле (19)), в том числе в периоды их «рождения», соответствует вихревому солитонному движению (первой зависимости в формуле (18)), что и подтверждается приведенными ранее данными для микроплит Наска и Хуан-Фернандос. Энергия «вихревого» решения, пропорциональная пятой степени скорости движения плиты и значительно превышающая энергию первого, «кинетического» решения, соответствует механизму ротационного самосогласованного взаимодействия всех тектонических плит планеты.

Во-вторых, в рамках ротационной волновой модели можно описать движение всего ансамбля, состоящего из блоков, тектонических плит, платформ и других геолого-геофизических образований и движений (течений).

В-третьих, сеймотектонические движения и геологические течения (структуры), рассматриваемые в совокупности, относятся к такому же классу явлений, как и движения Мирового океана (течения, ринги, волны Стокса, Кельвина, Россби и др.) и атмосферы (циклоны, антициклоны, смерчи, тайфуны).

Некоторые предварительные выводы

1. В данной работе на основании строго аналитически решенной механической задачи об упругом поле напряжений, связанном с вращением твердого тела и его блоковым строением, построена волновая ротационная модель. В рамках такой модели оказалось возможным качественно описать самосогласованные движения всего ансамбля, состоящего из блоков, тектонических плит, «закрученных» разновозрастных систем сдвиговых деформаций, региональных, мегарегиональных и планетарных структур растяжения и сжатия. Другими словами, упругое поле в ротационной волновой модели фактически представляет собой самосогласованное тектоническое поле планетарного масштаба, которое, с одной стороны, отражает состояние поверхности всей Земли, с другой — определяется величиной угловой скорости ее вращения. В рамках ротационной волновой модели нашло свое объяснение и явление нутации полюса Земли — колебания Чандлера [Vikulina, Krolevets, 2002].

Ротационные сеймотектонические (ст) волны (18), длина которых близка протяженностям сейсмофокальных блоков (очагов сильнейших землетрясений) $\lambda_{ст} \approx R \approx 100$ км, имеют, «по определению», поворотную поляризацию, а остающиеся на поверхности следы их воздействия на породы часто представляют собой спиралеобразные, вихревые, кольцевые и другие далеко не прямые линии. Как видим, имеет место более чем «прозрачная» аналогия между сеймотектоническими волнами и океаническими захватными волнами (зв). Такие волны существуют в краевых областях океана (часто располагающимися над сейсмическими поясами), имеют длину $\lambda_{зв} \approx 100$ км ($\approx \lambda_{ст}$), их вихревая поляризация четко прослеживается фиксируемыми течениями, в том числе рисунками поверхности ледяного покрова [Алексеев и др., 2005]. В этой связи

ротационные тектонические (рт) волны (19), характерные длины которых соизмеримы с размерами тектонических плит ($\lambda_{\text{рт}} \approx 10^2 - 10^4$ км), также могут быть ассоциированы с атмосферными вихрями, размеры которых, согласно работе [Алексеев и др., 2005], составляют для циклонов (ц) — антициклонов $\lambda_{\text{ц}} \approx 10^2 - 10^3$ км, для тропических (т) ураганов $\lambda_{\text{т}} \approx 10^3 - 10^4$ км.

Таким образом, геофизические и геологические данные подтверждают и дополняют выводы метеорологов и океанологов о существовании взаимосвязанной системы Земля — океан — атмосфера.

Полученные результаты позволяют предположить, что все поля, включающие движение полюсов, геологические структуры, сеймотектонические движения, океанические и метеорологические течения и волны, а также связанные колебания в системах океан — атмосфера и Земля — океан — атмосфера, объединены тем единым по своей ротационной природе геофизическим полем, которое и определяет состояние поверхности Земли. Такое поле, по определению, и должно быть решением соответствующей модифицированной задачи Дирихле о фигуре гравитирующей массы с реальными физическими свойствами, такими как вязкость, сжимаемость и напряженность геофизических полей.

В рамках такой задачи о ротационном поле Земли находят, очевидно, свое ясное понимание как установленная взаимосвязь между планетарными атмосферными явлениями и землетрясениями [Сытинский, 1997], так и зафиксированные колебания систем океан — атмосфера и Земля — океан — атмосфера [Сидоренков, 2002а, 2002б]. И наоборот: как и для сильнейших землетрясений, являющихся результатом коллективного взаимодействия всех сейсмофокальных блоков литосферы, для наиболее интенсивных уединенных атмосферных вихрей можно сформулировать следующую гипотезу. Тайфуны и тропические циклоны, как наиболее интенсивные движения в системе Земля — океан — атмосфера, также следует считать явлениями, в подготовке и реализации которых участвуют вся атмосфера Земли и значительная часть как ее Мирового океана, так и, по-видимому, литосферы.

2. Для вихревых решений задачи Дирихле было доказано существование трех интегралов, выражающих сохранение энергии, момента вращения и циркуляции [Кондратьев, 2003, с. 27; Риман, 1948]. Такое свойство вихревых решений позволяет сформулировать следующую принципиальной важности задачу, решение которой, по-видимому, следует искать в рамках модифицированной проблемы Дирихле: какую же природу имеет вязкость (внутреннее трение)?

Согласно словарю [Физический..., 1983, с. 99] вязкость как сопротивление к перемещению одной части тела относительно другой была определена Ньютоном для плоскопараллельного течения в рамках классической физики, для которой, как известно, выполняются законы сохранения энергии, импульса и момента импульса. В случае же геофизических процессов, в которых «прямолинейные» процессы отсутствуют в принципе и в которых, как показано ранее, преобладают вихревые движения (течения), должны выполняться законы сохранения энергии, момента вращения и циркуляции. Механические различия между законами сохранения, по-видимому, и должны будут определить различия между понятиями «плоскопараллельной» (по Ньютону) и «вихревой» (по Дирихле) вязкости.

Следует отметить следующее: имеется много указаний на то, что некоторые геологические и геофизические процессы часто протекают в средах, которые должны были иметь «нулевую» [Аносов и др., 2004] или отрицательную [Алексеев и др., 2005] вязкости.

3. Полученные в работе результаты позволяют предложить другой подход к решению задач, стоящих перед физикой Земли как единого раздела науки, все составляющие дисциплины которого тесно взаимосвязаны. Возможность такого подхода к физике Земли обсуждалась и ранее. С этой целью в работе [Тяпкин, 1998] предложены «новая ротационная гипотеза структурообразования» и «новая модель геозостаии», в работе [Кузнецов, 2000] — «модель горячей Земли» и «принцип минимизации — основной закон эволюции планет». Полученные в настоящей статье результаты позволяют предложить в качестве основополагающей теорию потенциала, развиваемую в рамках задачи Дирихле.

За основу при построении новой физики Земли можно было бы взять *вихревую геодинамику литосферы*. Это направление фактически уже разрабатывается многими исследователями (см. обзоры в работах [Викулин, 2003, 2004; Вихри..., 2004] и работы [Викулин, 2002; Викулин и др., 2000; Дмитриевский и др., 1993; Лукьянов, 1999; Полетаев, 2005; Поплавский, Соловьев, 2000; Пущаровский, 2005; Система..., 2003; Тверитинова, Викулин, 2005; Тектоника..., 2002;

Устинова и др., 2005]. Из данных этих и многих других работ следует, что высока значимость вращательных движений для всех дисциплин науки о Земле, как, впрочем, и других планетах Солнечной системы и их спутниках. Это позволяет предположить, что учет всего спектра вращательных эффектов, включая геодинамо-вихревые движения во внешнем ядре Земли [Глацмайер, Олсон, 2005], действительно может быть положен в основу *новой ротационной физики Земли* [Викулин, 2004]. В рамках такой физики естественной становится волновая природа геофизических, тектонических и геологических процессов, включая пульсации Земли, волновые явления в системах океан — атмосфера и Земля — океан — атмосфера, а также «геологические» и «геофизические» процессы, протекающие на других планетах Солнечной системы в течение всей ее жизни.

Представляется, что построение ротационной физики Земли, охватывающей все ее основные ныне существующие разделы, а также, возможно, и новые, дело не такого уж далекого будущего.

Автор признателен И. В. Мелекесцеву и Г. М. Водинчару за прочтение рукописи статьи, ее обсуждение и ценные замечания.

Литература

1. Алексеев В. В., Киселева С. В., Ланто С. С. Лабораторные модели физических процессов в атмосфере и океане. — М.: Наука, 2005. — 312 с.
2. Аносов Г. И., Колосков А. В., Флеров Г. Б. Особенности проявления ультрамафитов Камчатского региона с позиций вихревой геодинамики // Вихри в геологических процессах. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — С. 129–200.
3. Борисов А. В., Мамаев И. С., Соколовский М. А. Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей. — М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исслед., 2003. — 704 с.
4. Буллен К. Е. Плотность Земли. — М.: Мир, 1978. — 442 с.
5. Викулин А. В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 621–824.
6. Викулин А. В. Уединенные тектонические волны поворотной деформации как результат вращения планеты // Геофиз. журн. — 2002. — № 4. — Т. 24. — С. 90–101.
7. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. — 150 с.
8. Викулин А. В. Введение в физику Земли: учеб. пособие. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — 240 с.
9. Викулин А. В., Быков В. Г., Лунева М. Н. Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса // Вычислительные технологии. — 2000. — Т. 5. — № 1. — С. 31–39.
10. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. — 1998. — Т. 17. — № 6. — С. 94–102.
11. Вихри в геологических процессах. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — 297 с.
12. Геолого-геофизический атлас Тихого океана. — М.; СПб.: Межправительственная океанографическая комис., 2003. — 120 с.
13. Глацмайер Г., Олсон Р. Изучение геодинамо // В мире науки. — 2005. — № 7. — С. 29–35.
14. Дмитриевский А. Н., Володин И. А., Шипов Г. И. Энергоструктура Земли и геодинамика. — М.: Наука, 1993. — 154 с.
15. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. — М.: Наука, 1983. — 416 с.
16. Зоненшайн Л. П., Савостин Л. А. Введение в геодинамику. — М.: Наука, 1979.
17. Кондратьев Б. П. Теория потенциала и фигуры равновесия. — М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исслед., 2003. — 624 с.
18. Кузнецов В. В. Физика горячей Земли. — Новосибирск, 2000. — 365 с.
19. Ламб Г. Гидродинамика. Т. 2. — М.; Ижевск: Регуляр. и хаот. динамика, 2003. — 482 с.
20. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. — М.: Наука, 2003. — 246 с.
21. Ли Сыгуан. Вихревые структуры Северо-Западного Китая. — М.; Л.: Госгеолтехиздат, 1958. — 130 с.

22. Лукьянов А. В. Нелинейные эффекты в моделях тектогенеза // Пробл. геодинамики литосферы. — М.: Наука, 1999. — С. 253–287.
23. Ляпунов А. М. Общая задача об устойчивости движения. — Череповец: Меркурий-Пресс, 2000. — 386 с.
24. Мелекесцев И. В. Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Пробл. глубинного магматизма. — М.: Наука, 1979. — С. 125–155.
25. Полетаев А. И. Ротационная тектоника земной коры // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых: материалы 38-го Тектонического совещ. Т. 2. — М.: ГЕОС, 2005. — С. 97–100.
26. Поплавский А. А., Соловьев В. Н. Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. — С. 235–242.
27. Пуанкаре А. Фигуры равновесия жидкой массы. — Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2000. — 208 с.
28. Пуцаровский Ю. М. Глобальная тектоника в перспективе // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых: материалы 38-го Тектонического совещ. Т. 2. — М.: Геос, 2005. — С. 121–123.
29. Риман Б. О движении жидкого однородного эллипсоида. — М.; Л.: Гостехиздат, 1948. — 339 с.
30. Садовский М. А., Писаренко В. Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. — М.: Наука, 1991. — 96 с.
31. Сидоренков Н. С. Атмосферные процессы и вращение Земли. — СПб.: Гидрометеоздат, 2002а. — 200 с.
32. Сидоренков Н. С. Физика нестабильностей вращения Земли. — М.: Физматлит, 2002б. — 384 с.
33. Система планета Земля (нетрадиционные вопр. геологии): материалы 11-го науч. семинара, Москва, 3–5 февраля 2003 г. — М.: МГУ, 2003. — 336 с.
34. Слензак О. И. Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. — Киев: Наук. думка, 1972. — 182 с.
35. Спорные вопросы тектоники плит и возможные альтернативы / под ред. В. Н. Шолпо. — М.: ИФЗ РАН, 2002. — 236 с.
36. Сытинский А. Д. О планетарных атмосферных возмущениях во время сильных землетрясений // Геомагнетизм и астрономия. — 1997. — Т. 37. — № 2. — С. 132–137.
37. Сэффмэн Ф. Дж. Динамика вихрей. — М.: Научный мир, 2000. — 376 с.
38. Тверитинова Т. Ю., Викулин А. В. Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2005. — № 5. — С. 59–77.
39. Тектоника и геофизика литосферы: материалы 35-го Тектонического совещ.: в 2 т. — М.: Геос, 2002.
40. Тяпкин К. Ф. Физика Земли. — Киев: Выща шк., 1998. — 310 с.
41. Чандрасекхар С. Эллипсоидальные фигуры равновесия. — М.: Мир, 1973. — 328 с.
42. Устинова В. Н., Выцан И. А., Устинов В. Г. О пространственном и временном развитии циклически протекающих событий на Земле по геофизическим данным // Геофизика. — 2005. — № 3. — С. 65–71.
43. Физический энциклопедический словарь. — М.: Сов. энцикл., 1983. — 928 с.
44. Фридман А. М. Из жизни спиральных галактик // В мире науки. — 2005. — № 1. — С. 71–79.
45. Dirichlet G. L. Untersuchungen uber ein Problem der Hydrodynamik // J. Reine Angew. Math. — 1860. — Vol. 58. — P. 801.
46. Forsyth D., Uyeda S. On the relative importance of the driving forces of plate motion // Geophys. J. R. Astr. Soc. — 1975. — Vol. 43. — P. 163–200.
47. Mandeville M. W. An outline of the principles of vortex tectonics [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.aa.net/~mwm> (дата обращения: 10.06.2010).
48. Vikulin A. V., Krolevets A. N. Seismotectonic processes and the Chandler oscillation // Acta Geophysica Polonica. — 2002. — Vol. 50. — № 3. — P. 395–411.
49. Wezel F. S. The Pacific island arcs: produced by post-orogenic vertical tectonics? // The origin of arcs. — Elsevier, Amsterdam, 1986. — P. 529–566.
50. Xie Xin-sheng. Discussion on rotational tectonics stress field and genesis of circum-Ordos landmass fault system // Acta Seismol. Sinica. — 2004. — Vol. 17. — № 4. — P. 464–472.

А. В. Викулин¹, Т. Ю. Тверитинова²

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

² *Московский государственный университет*

ЭНЕРГИЯ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВИХРЕВЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ*

Представлена академиком Е. Е. Милановским 26.04.2006 г.

В рамках блоковой геофизической среды анализируется движение совокупности тектонических плит. Показывается существование двух ротационно-упругих механизмов, обеспечивающих движение совокупности сеймотектонических блоков и тектонических плит. Отмечается своеобразный корпускулярно-волновой дуализм тектонического процесса. Описанную в работе ротационно-упругую модель предлагается использовать в качестве основы новой тектонической парадигмы.

В настоящее время не вызывает сомнений как существование эффектов пульсаций [1] и тектонических перестроек [2] планеты, «генерирующих» зоны сжатия, растяжения и сдвига, так и их взаимосвязь с вращением Земли [3]. Для количественного описания такого рода тектонических эффектов в рамках волновых концепций необходимо разработать соответствующую ротационно-упругую модель геофизической среды.

Представления о геофизической среде как «неклассической нелинейной» блоковой среде [4–6] в последнее время стали общепринятыми [7]. Имеющиеся данные прямо указывают на вращательный, крутильный и вихревой характер движения блоков, плит и других геологических структур планеты [8]. Важно, что многие геологи и геофизики, как непосредственно работающие с материалом исследователи, отмечают «самостоятельный», «собственный», «с ненулевыми дивергенциями и вихрями», упругий характер таких движений, которые прямо связаны с вращением планеты [9]. Для геофизических вращающихся сред было установлено существование нового типа упругих ротационных волн с характерной скоростью 1 см/с и показано, что такими волнами, по сути, являются тектонические волны [10, 11].

Рассмотрение строения границ литосферных плит как зон сдвиговых деформаций в свете волновой тектонической концепции привело к формулировке гипотезы о правозакрученном планетарном вихре. В рамках гипотезы именно такой полярный вихрь планетарного масштаба и должен вызывать наблюдаемое левостороннее кручение ансамбля всех литосферных плит [8, 9].

Оценим энергию тектонического процесса в рамках концепции геофизической среды.

Энергия тектонического процесса, очевидно, определяется (массами) размерами L плит (и блоков) и скоростями V их движения. Из самых общих соображений следует, что существование зависимости $L(V)$ является принципиальным моментом, по сути определяющим физику механизма перемещения тектонических плит вдоль поверхности Земли. Действительно, в случае существования зависимости между такими (вообще говоря, векторными) величинами, однозначно определяющими величины энергий движущихся плит, появляются все основания для предположения о моментной природе тектонического процесса, протекающего на вращающейся планете.

В такой плоскости вопрос об энергии тектонического процесса ранее не ставился. Однако в неявном виде анализ особенностей проявления тектонической энергии проводился. Действительно, во-первых, в настоящий момент вопрос о существовании зависимости $L(V)$ является проблематичным: имеются аргументы как против, так и за [8, 9]. Во-вторых, аргументом в пользу моментной природы тектонического процесса на Земле, на наш взгляд, является установленная корреляция между «средним полярным расстоянием плит» и скоростями субдукции и спрединга [8, 9, 12].

* 35 (212). Доклады РАН. 2007. Т. 413. № 3. С. 372–374. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НШ-5280.2006.5.

Анализ имеющихся в нашем распоряжении данных о размерах плит и скоростях их движения вдоль границ за последние 150–165 млн лет позволил получить следующие результаты [8, 9]. Во-первых, по совокупности имеющихся в нашем распоряжении данных ($N = 61$) о протяженностях зон и скоростях (субдукции, рифтинга и спрединга) статистически значимая зависимость $L(V)$ не выявляется: поле экспериментальных точек на плоскости с осями $L - V$ в диапазонах размеров плит $650 < L$ [км] $< 18\,000$ и скоростей их движения $5 < V$ [мм/год] < 112 равномерно заполняет площадку примерно круговой формы (рис. 1, а).

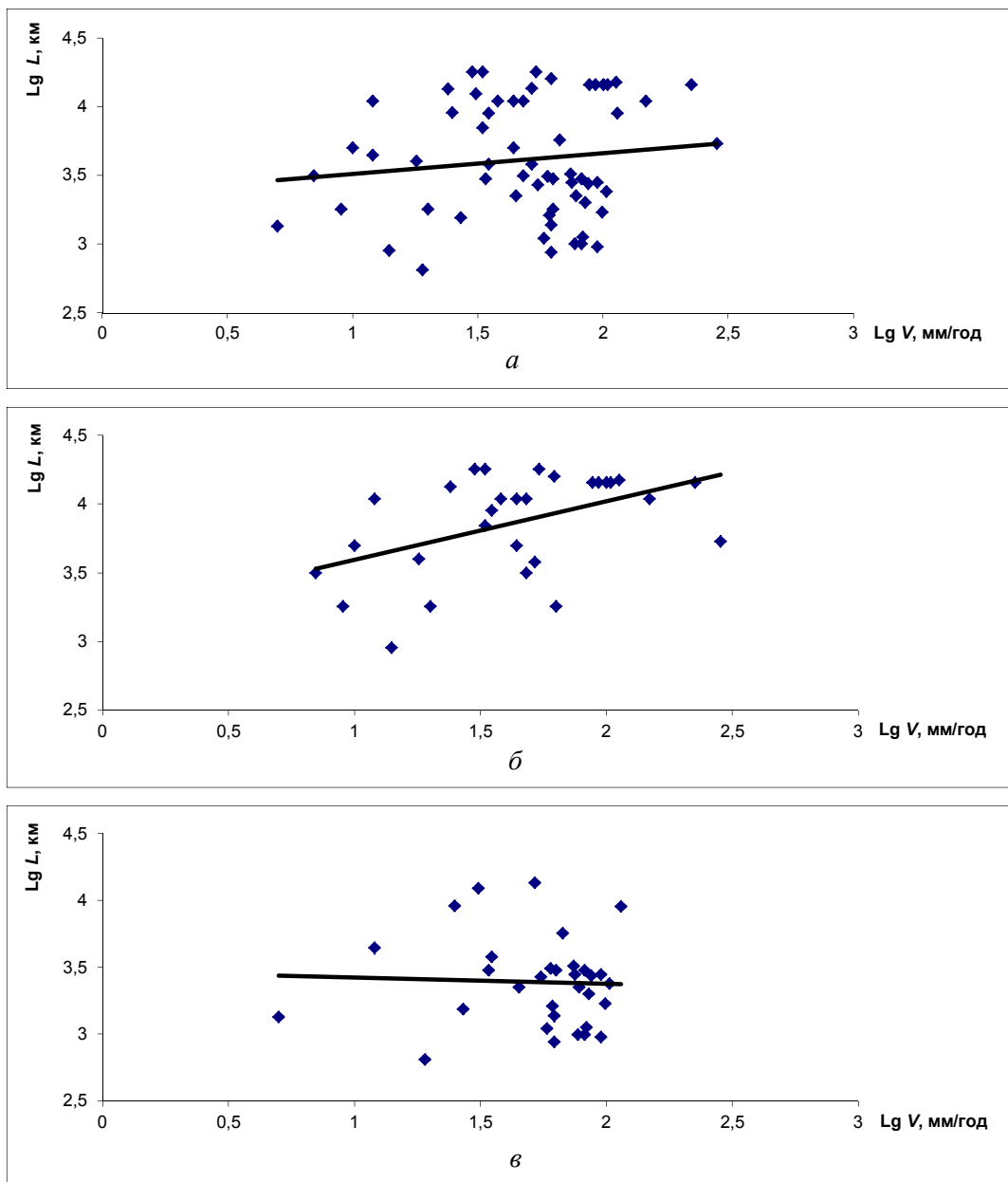


Рис. 1. Данные, характеризующие зависимость $Lg L (Lg V)$ между протяженностями плит L и скоростями их движения [8]:

а — скорости субдукции, рифтинга и спрединга ($N = 61$); б — скорости рифтинга и спрединга ($N = 29$); в — скорости субдукции ($N = 32$)

Во-вторых, анализ только данных о скоростях рифтинга и спрединга (РС-данные), представленных на рис. 1, б ($N = 29$), позволяет достаточно уверенно выявить следующую статистически значимую зависимость:

$$Lg L_1 \text{ [км]} (\pm 0,33) = (0,43 \pm 0,15) \cdot Lg V_1 \text{ [мм/год]} + (3,17 \pm 0,26). \tag{1}$$

В-третьих, по совокупностям РС-данных, представленных данными в пределах меньших по продолжительности интервалов 20 (5–33) млн лет, которые удалось определить авторам по номерам магнитных аномалий $N = 21$ [8, 9], определяются близкие друг другу зависимости:

$$\text{Lg } L_2 \text{ [км]} (\pm 0,3) = (0,7 \pm 0,3) \cdot \text{Lg } V_2 \text{ [мм/год]} + (2,9 \pm 0,5). \quad (2)$$

В-четвертых, статистически значимая зависимость $\text{Lg } L$ ($\text{Lg } V$) только для «субдукционных» (С) данных ($N = 32$) не выявляется. Определение зависимостей $\text{Lg } L$ ($\text{Lg } V$) проводилось методом наименьших квадратов.

Проведенный анализ данных о протяженностях рифтинг-спрединговых зон и скоростях движения границ плит в их пределах указывает на существование двух механизмов с характерными временами около 150 (144–165) млн лет для зависимости (1) и примерно 20 (5–33) млн лет для зависимости (2).

Отметим, что корреляционная зависимость $\text{Lg } L \approx \text{Lg } V$, близкая соотношению (2), была получена в работе [12] для процессов как спрединга, так и субдукции. Форма («вытянутость») и минимаксные значения «субдукционной» (рис. 1, *в*) и «рифтинг-спрединговой» (рис. 1, *б*) областей расположения исходных точек являются близкими. Отличаются эти области разными плотностями точек: РС-данные распределены по всей области достаточно равномерно, в то время как С-данные с большей плотностью сосредоточены в области предельно больших значений протяженностей зон. Представляется, что участки зон субдукции малой (1000–2000 км и менее) протяженности исследованы недостаточно полно, в результате чего для них имеет место искусственный «дефицит» данных. Другими словами, проведенный в настоящей работе анализ и результаты, полученные другими исследователями, на наш взгляд, показывают, что выявленные в работе два механизма являются характерными для тектонического процесса вообще, включая и процесс субдукции.

Для определения тектонической энергии движущейся плиты будем полагать, что ее кинетическая энергия определяется по формуле

$$E = \frac{1}{2} m V^2,$$

где $m \approx \rho L^\alpha$ – масса плиты; ρ — ее объемная ($\alpha = 3$), площадная ($\alpha = 2$) или линейная ($\alpha = 1$) плотность. Тогда, дифференцируя выражение для энергии, заменяя в полученном дифференциальном уравнении dL через dV , определяемое из соотношений $\text{Lg } L \approx \beta \text{Lg } V$, и интегрируя полученное соотношение, получим для величины энергии движущейся со скоростью V плиты протяженностью L выражение

$$E / E_0 = (V / V_0)^{(2+\alpha\beta)}$$

или

$$E \approx V^{(2+\alpha\beta)}, \quad (3)$$

где $\beta \approx 0,45 \pm 0,13$ для механизма, описываемого соотношением (1), и $\beta \approx 0,7 \pm 0,3$ — соотношением (2);

$$E_0 = \frac{1}{2} \rho L_0^\alpha V_0^2,$$

L_0 и V_0 — соответственно энергия, протяженность плиты и скорость движения ее границы в момент начала процесса.

Из соотношений (1)–(3) видно, что зависимости для энергий плит от величин их скоростей движения для каждого из механизмов существенно различаются. Действительно, в «предельных» случаях для механизмов (2), когда $\beta_{\max} \approx 1$ при $\alpha_{\max} \approx 2,5$ (например, при малых временах $2 < \alpha < 3$ имеем зарождение плиты), и (1), когда $\beta_{\min} \approx 0,3$ при $\alpha_{\min} \approx 1$ (например, при больших временах размер плиты увеличивается практически в одном направлении), соответственно получаем:

$$E_1 \approx V_1^2, \quad (4)$$

$$E_2 \approx V_2^5. \quad (5)$$

Как видим, полученные нами «плитовые тектонические» соотношения (1)–(2) и (4)–(5) близки соответствующим волновым солитонным и экситонным решениям ротационной сеймотектонической задачи [10, 11]. Тектонический процесс в рамках ротационно-упругой модели [8–11] имеет своеобразные корпускулярно-волновые свойства, что позволяет рассматривать сеймотектонические блоки и тектонические плиты планеты как *взаимосвязанные структуры*. Результатом их взаимодействия и являются ротационно-упругие сеймотектонические солитоны и экситоны, которые в совокупности представляют собой самосогласованное тектоническое волновое поле (по [13]: «самоорганизация... с ненулевыми дивергенциями и вихрями»). Новая глобальная тектоника в рамках таких представлений, по сути, является «корпускулярной» как составляющей тектонического процесса *без учета вращения планеты*.

Примечательно, что в науках о Земле стремительное за последние 10 лет увеличение интереса к проблеме вращательных структур [8, 9, 14] (т. е. переход от «линейки» к «циркулю») происходит на фоне «неуспехов» Новой глобальной тектоники [14, 15]. Как видим, имеет место очевидный процесс поиска новой тектонической парадигмы, в основу которой могут быть положены представления приведенной в работе ротационно-упругой тектонической модели [7–10].

Литература

1. Милановский Е. Е. Пульсации Земли // Геотектоника. — 1995. — № 5. — С. 3–24.
2. Тверитинов Ю. Т., Тверитинова Т. Ю. Закономерность смены структурных планов в складчатых областях // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2006. — № 1(7). — С. 67–94.
3. Хаин В. Е., Ломизе М. Г. Геодинамика с основами геотектоники. — М.: КДУ, 2005. — 560 с.
4. Пейве А. В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. Геологическая. — 1961. — № 3. — С. 36–54.
5. Садовский М. А. Новая модель геофизической среды // Българско геофизично списание. — 1985. — Т. XII. — № 2. — С. 3–10.
6. Островский Л. А. Неклассическая нелинейная акустика // Нелинейные волны-2004. — Н. Новгород: ИПФ РАН, 2005. — С. 109–124.
7. Гольдин С. В. Физика «живой» Земли // Пробл. геофизики XXI века. — М.: Наука, 2003. — Кн. 1. — С. 17–36.
8. Вихри в геологических процессах: сб. науч. ст. / под ред. А. В. Викулина. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — 297 с.
9. Тверитинова Т. Ю., Викулин А. В. Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2005. — № 5. — С. 59–77.
10. Викулин А. В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 621–824.
11. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса: монография. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. 150 с. — [Электронный ресурс] // Ин-т вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. — URL: www.kscnet.ru/ivs/monograph/vikulin/index.html
12. Новая глобальная тектоника (тектоника плит). — М.: Мир, 1974. — 472 с.
13. Лукьянов А. В. Нелинейные эффекты в моделях тектогенеза // Пробл. геодинамики литосферы. — М.: Наука, 1999. — С. 253–287.
14. Полетаев А. И. Ротационная тектоника или тектоническое вращение? // Актуальные пробл. региональной геологии и геодинамики: материалы 8-х Горшковских чтений. — М.: МГУ, 2006. — С. 32–38.
15. Пуцаровский Ю. М. Глобальная тектоника в перспективе // Материалы 38-го Тектонического совещ. Т. 2. — М.: Геос, 2005. — С. 121–123.

А. В. Викулин¹⁻³, Т. Ю. Тверитинова⁴

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

² Камчатский государственный технический университет

³ Камчатский государственный университет

⁴ Московский государственный университет

МОМЕНТНАЯ ВОЛНОВАЯ ПРИРОДА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ*

Развиваются концепции А. В. Пейве и М. А. Садовского о блоковом строении геологической и геофизической сред. Геологическая гипотеза А. В. Пейве о «самостоятельной движущей силе» блока, «заключенной в нем самом», подтверждается геологическим материалом и геофизическими данными и «наполняется» новым физическим содержанием. С использованием сейсмологических данных в рамках принципиально нового «собственномоментного» подхода формулируются выводы о моментном, корпускулярном (блоковом) и волновом свойствах геологической и геофизической сред.

Введение

Фундаментальная работа геолога А. В. Пейве [1961] содержит три важных момента. Во-первых, в этой работе автор за 18 лет до геофизика М. А. Садовского [2004] обосновал блоковое строение геологической среды. Во-вторых, анализируя ее структуру и движение, автор пришел к новому, фантастическому по тем временам (да и по нынешним) механизму движения коры — собственному источнику движения блока. При этом каждый структурно обособленный, более или менее цельный однородный блок имеет свой собственный «потенциал перемещения», в чем и «заключается главная особенность тектонических движений». В-третьих, тектонические силы и вектор необратимых тектонических движений являются «врожденными» извечными свойствами нашей и, вероятно, других планет и связаны не с процессами развития вещества внутри каждой планеты, а с более общими законами движений космических тел: «Геологи должны поставить вопрос перед астрономами и астрофизиками о том, что даже за относительно короткий период неогейского мегахрона продолжительностью около 1 млрд лет, вероятно, происходит эволюция гравитационного поля Солнечной системы» [Пейве, 1961]. Аналогичный призыв к геологам и астрофизикам содержался и в высказываниях академика Д. В. Наливкина [Шпитальная, Заколдаев, Ефимов, 1991].

В 1973 г. вышел фундаментальный труд Л. И. Седова «Механика сплошной среды». В этой работе, в частности, обосновывается важная для физики и геологии концепция момента количества движения конечного объема сплошной среды [Седов, 1973, с. 146–148, 504–530].

Основные работы М. А. Садовского (2004) с сотрудниками, посвященные созданию модели блоковой геофизической среды, в рамках которой предпринимается попытка построения «геомеханического» сейсмического процесса, относятся к 1979–1986 гг. Модель построена на основании установленного М. А. Садовским с сотрудниками иерархического свойства горных пород, которое наблюдается в пределах 12–14 порядков размеров. Отличительной особенностью таких моделей является сильная нелинейность дифференциальных уравнений, с помощью которых должен описываться сейсмический процесс [Викулин, 2003].

Развивая концепцию блоковой среды, ученики А. В. Пейве пришли к выводу о том, что геологическая среда является нелинейной и самоорганизующейся, вследствие чего ее движение может быть представлено в виде тектонического течения с неоднородными деформациями, ненулевыми дивергенциями и вихрями [Лукьянов, 1999].

К этому же периоду относятся и первые попытки интерпретации геодинамической роли «собственного» вращательного движения и «космического фактора», предпринятые в рамках количественных геодинамических моделей, разрабатываемых в работах [Вихри..., 2004; Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Ротационные..., 2007]. В рамках таких представлений самостоятельной движущей силой блока земной коры может быть только его *собственный*, по сути, *макроскопический момент* в смысле Л. И. Седова [1973, с. 146–148, 504–530].

* 36 (237). Вестник МГУ. Сер. 4, Геология. 2008. № 6. С. 16–19.

Вихревые структуры

В рамках представлений о собственном моменте блока геологической среды Ю. И. Тверитиновым и Т. Ю. Тверитиновой была сформулирована гипотеза полярного планетарного вихря [Вихри..., 2004, с. 71–92, 112–117; Тверитинова, Викулин, 2005], одним из основных элементов которого является зона левостороннего тетического кручения — левосдвиговая конвергентная система Средиземноморско-Гималайского альпийского складчатого пояса (рис. 1).

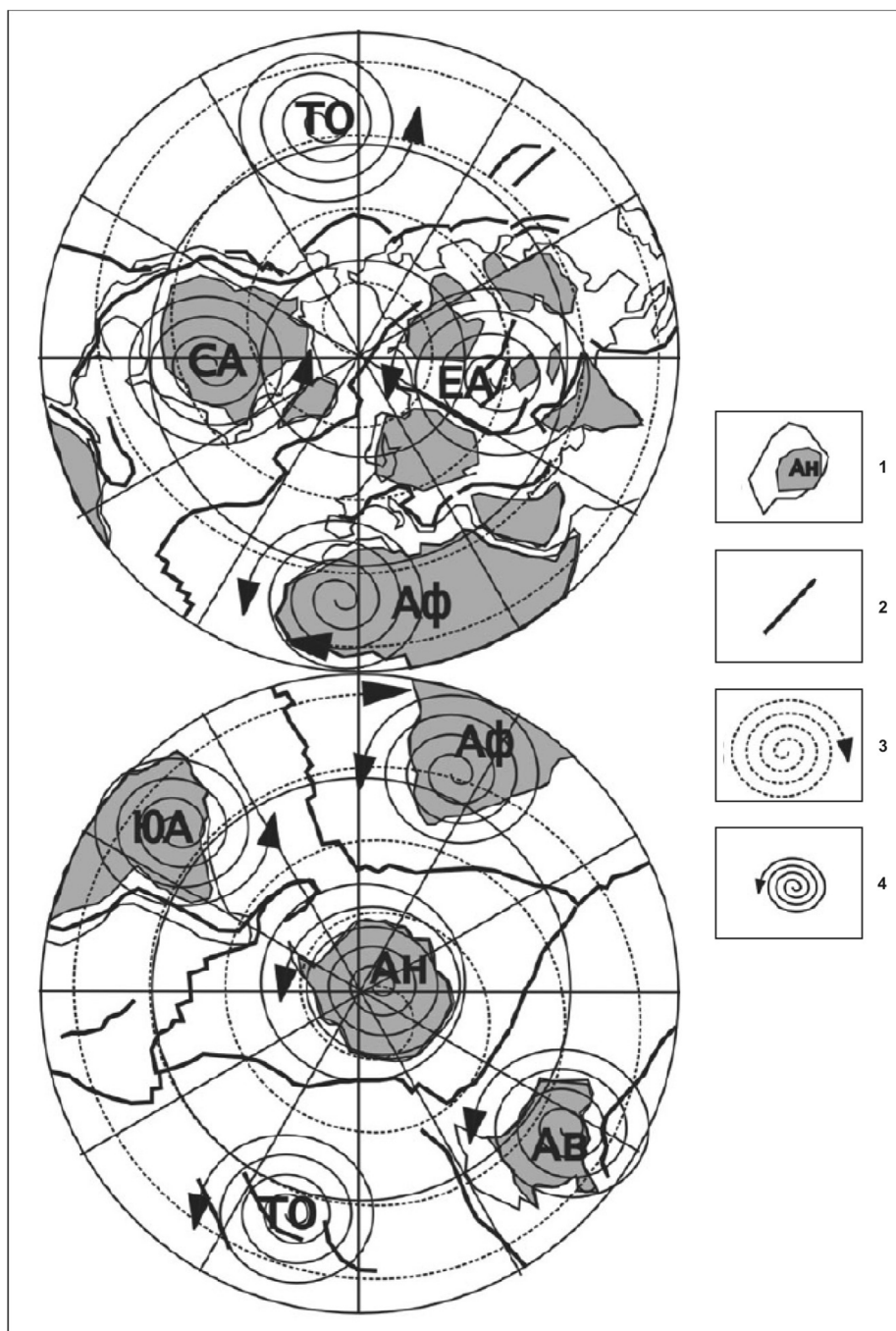


Рис. 1. Система литосферных плит и связанные с ними вихревые структуры:

1 — контуры континентов и древние платформы в их пределах; 2 — линейные структуры сжатия и растяжения по границам литосферных плит; вихревые структуры; 3 — полярный правозакрученный вихрь; 4 — литосферные левозакрученные вихри. Литосферные плиты: СА — Северо-Американская, ЕА — Евразийская, АФ — Африканская, АН — Антарктическая, ТО — Тихоокеанская, АВ — Австралийская

Строение этого пояса нельзя объяснить только одним поперечным сжатием, при этом требуется привлечение механизма левостороннего сдвига или вращения по часовой стрелке плит северного полушария относительно южного. В общем вихревом движении участвуют все литосферные плиты, которые при этом испытывают относительные смещения, что сопровождается формированием вдоль их границ характерных зон сдвиговых деформаций — кулисного сочетания элементарных структур растяжения (рифты), сжатия (зоны субдукции) или сдвига (трансформные разломы). Характерным примером правосдвиговой мегарегиональной зоны является рифтовая система Атлантического океана. Ее строение не может быть объяснено только расхождением разделяемых ею литосферных плит, но требует их относительного правосдвигового смещения или вращения против часовой стрелки.

Впрочем, такие построения не новы. Существование вихревых, кольцевых, спиральных и других подобных структур было обосновано работами китайского геолога Ли Сыгуана [Lee, 1928], японских исследователей Т. Рикитакэ, С. Фуджихары и др., российских геологов О.И. Слензака, И.В. Мелекесцева, А.П. Кулакова, А.И. Полетаева и многих др. [Вихри..., 2004; Ротационные..., 2007; Хаин, Полетаев, 2007]. В последние годы число публикаций по вихревым [Lee, 1928] структурам стремительно растет, накапливаются данные о таких «непрямолинейных» структурах, многочисленные проявления которых установлены для различных частей планеты [Вихри..., 2004; Ротационные..., 2007; Хаин, Полетаев, 2007], и, что важно в контексте статьи, наличие таких структур и соответствующих им упругих полей кручения было достаточно убедительно продемонстрировано на геологическом и геофизическом материале и обосновано физически [Вихри..., 2004; Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Международный..., 2003, с. 56–57; Ротационные..., 2007; Тверитинова, Викулин, 2005]. Все эти данные доказывают исключительную важность вихревых структур и формирующих их упругих полей для геологических построений.

Приведенные по вихревым структурам данные, по сути, доказывают «вихревую» моментную природу дискретной геологической среды, что соответствует результатам, полученным в 1995 г. Н. Сигачевой с сотрудниками (МГУ). Они показали, что «спиралевидно-скручивающее движение» можно рассматривать как «механизм самоорганизации геологического пространства» [Хаин, Полетаев, 2007, с. 17].

Волновые свойства среды

Отчетливо и с физической точки зрения достаточно прозрачно вывод о моментной вихревой природе геологической среды — «самоорганизации геологического пространства» — может быть проиллюстрирован на примере форшокового и афтершокового процессов, протекающих в очагах больших землетрясений протяженностями (Λ) около 1000 км и более [Викулин, 2006].

В очагах долготных (вытянуты вдоль долгот $\lambda = \text{const}$) землетрясений (Чилийское — 1960 г., $M_W = 9,5$, $\Lambda = 2000\text{--}4000$ км, $\lambda \approx 70^\circ$ з. д.; Суматра, 2004 г., $M_W = 9,0$, $\Lambda = 1200$ км, $\lambda \approx 98^\circ$ в. д.), а также широтных (вытянуты вдоль широт $\varphi = \text{const}$) землетрясений (Алеутские — 1957 г., $M_W = 8,8$, $\Lambda = 1300$ км, $\varphi \approx 52^\circ$ с. ш.; 1965 г., $M_W = 8,7$, $\Lambda = 700$ км, $\varphi \approx 52^\circ$ с. ш.; Аляска — 1964 г., $M_W = 9,0$, $\Lambda = 1000$ км, $\varphi \approx 58^\circ$ с. ш.) исследовались временные зависимости скоростей миграции V и частот (повторяемостей) ν форшоков и афтершоков магнитудных диапазонов $5 \leq M_S < 8$:

$$\text{Lg } V \text{ [км/ч]} = A \cdot \text{Lg } t \text{ [ч]} + B, \quad \text{Lg } \nu \text{ [ч}^{-1}\text{]} = a \cdot \text{Lg } t \text{ [ч]} + b.$$

Оказалось, что значения и скоростей, и частот в очагах долготных (l_o) землетрясений значимо больше, чем в очагах широтных (l_a) землетрясений: $A^{l_o} \approx a^{l_o} \approx -0,62 \pm 0,09 > A^{l_a} \approx a^{l_a} \approx -0,92 \pm 0,07$ (что, на наш взгляд [Викулин, 2003; Викулин, Тверитинова, 2007], количественно может быть связано с нутацией полюса Земли). При этом отношения

$$\left(\frac{V}{\nu} \right)_{l_o} = L_{l_o}, \quad \left(\frac{V}{\nu} \right)_{l_a} = L_{l_a}$$

оказались, во-первых, величинами постоянными, т. е. $(B - b)^{l_o} \approx (B - b)^{l_a} \approx 2,26 \pm 0,15$, определяющими размеры, по сути, «элементарного» сейсмофокального блока — очага сильнейшего ($M_S > 7,5$) землетрясения [Викулин, 2003]: $10^{B-b} = L_{l_o} = L_{l_a} = L_0 = 200 \pm 50$ км.

Во-вторых, отношения скоростей и частот оказались независимыми от ориентации сейсмофокальной зоны: $L_0 \neq f(\varphi, \lambda)$, что физически равносильно следующему утверждению: постоянная величина L_0 является инвариантной к поворотам. Следовательно, само существование, по сути, дискретной [Садовский, 2004] константы L_0 как величины, характеризующейся в соответствии с представлениями А. В. Пейве [1961] и А. В. Лукьянова [1999] «самостоятельной движущей силой», определяет такую независимую от ориентации и, следовательно, сохраняющуюся величину, которая по своей физической сути является *моментом* [Общие..., 2008, с. 143–147].

Таким образом, сейсмологические данные о форшоках и афтершоках в очагах больших землетрясений — «дискретных» кирпичиках геофизической среды [Садовский, 2004] — подтверждают сделанный на основании анализа геологических материалов вывод А. В. Пейве [1961] и А. В. Лукьянова ([1999] о «самостоятельной движущей силе» блока и определяют *моментную природу* такой силы.

Новый тип ротационных упругих волн

Следует отметить, что используемый нами «собственномоментный» подход к решению геомеханической задачи о движении совокупности блоков и плит [Викулин, 2003; Тверитинова, Викулин, 2005] является принципиально новым и отличается от всех других известных нам подходов, например [Вихри..., 2004; Ротационные..., 1995; Earthquake, 2006]. Результатом такого подхода для совокупности взаимодействующих блоков и плит стало новое решение для геодинимических волн [Викулин, 2003; Викулин, Тверитинова, 2007].

Суть его сводится к следующему [Викулин, 2008]: в рамках классической теории упругости с симметричным тензором напряжений поставлена и аналитически решена задача об упругом поле во вращающейся геофизической среде. Установлен дальнедействующий характер такого поля. Для вращающихся геофизических сред показано существование двух новых типов упругих волн с моментом — солитонов и экситонов, названных ротационными. Солитонные решения представляют собой волны глобальной миграции землетрясений (медленные тектонические волны [Быков, 2005]) с максимальной скоростью 1–10 см/с, близкой к скорости миграции наиболее сильных ($M > 7,5 \div 8$) землетрясений. Экситонным решениям соответствуют волны (локальной) миграции форшоков и афтершоков в очагах землетрясений (быстрые тектонические волны [Быков, 2005]), максимальная скорость которых равна скорости испарывания и (или) скорости поперечных сейсмических волн. В тектоническом приближении, считая длину волны экситона равной размеру сейсмофокального блока (очага наиболее сильного землетрясения), получено значение характерной скорости [Викулин, 2008]

$$c_0^2 = V_R V_S,$$

равной среднегеометрическому произведению центробежной $V_R = \Omega R_0$ и поперечной сейсмической V_S скоростей, где Ω — угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси, R_0 — размер блока (плиты).

Таким образом, для геологических (и/или геофизических, по сути, блоковых и вращающихся) сред теоретически установлено существование нового типа упругих ротационных волн и показано, что именно такие волны ответственны за взаимодействие блоков, плит и, как следствие, за миграцию землетрясений. Представляется, что очень медленные, ответственные за движение всей планеты экситонные решения в процессе эволюции гравитационного поля Солнечной системы [Пейве, 1961] в принципе могут характеризовать геологические пульсации Земли, определяющие в глобальном масштабе тектонические деформации планеты [Милановский, 1995].

Дуплеты и пары землетрясений — следствие блокового строения среды

Установленные ранее «корпускулярные» (блоковые) и волновые свойства геодинимического процесса подтверждаются анализом взаимного расположения дискретных составляющих геофизической среды [Садовский, 2004] — очагов тихоокеанских землетрясений-дуплетов (зд) и землетрясений-пар (зп) [Викулин, 2003; Общие..., 2008, с. 143–147]. Действительно, такие связи

из очагов землетрясений являются мгновенными событиями, так как происходят в течение коротких (и в геологическом, и в сейсмологическом аспекте) интервалов времени ($0 \leq \tau \leq 8$ мес) с очагами, удаленными один от другого на расстояние $L_{зд} \approx 250$ (0–400) км, $\tau \approx 4\text{--}5$ с \div 1 мин; $L_{зн} \leq L_{max} \approx 23\,000$ км, $\tau = 3 \pm 2$ мес, где L_{max} — половина протяженности окраины Тихого океана.

Результаты анализа, представленные на рис. 2, показывают существование отчетливых максимумов, соответствующих межочаговому в парах и дуплетах землетрясений расстояниям $L_i = 250, 5\,000, 8\,000\text{--}9\,000, 12\,000\text{--}13\,000, 16\,000, 19\,000, 22\,000\text{--}23\,000$ км, определяющим «мгновенный портрет» тихоокеанского сейсмотектонического пояса. «Структура» такого портрета, включающая очаги сильнейших землетрясений, островные дуги и их совокупности, определяется набором значений L_i , который, очевидно, может быть интерпретирован как соответствующая совокупность стоячих геодинамических волн с длинами, кратными значениям $L_{зд} \approx 250$ км и $2\,500\text{--}5\,000$ км.

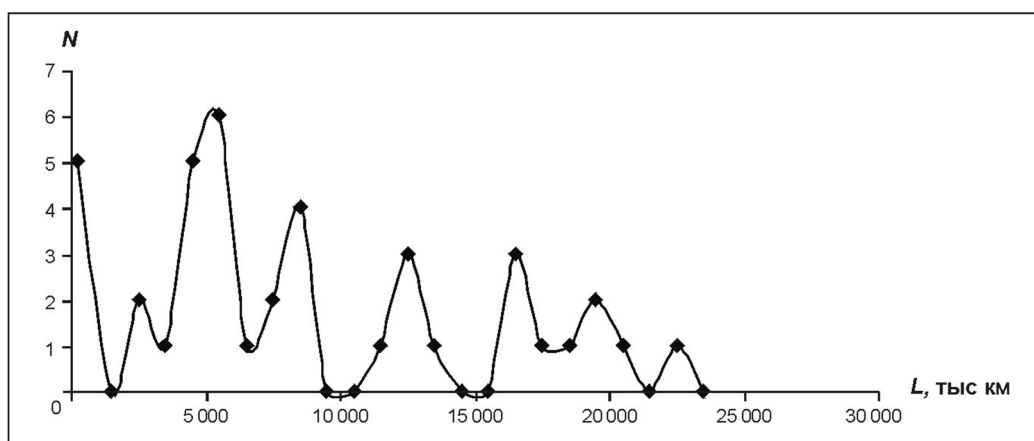


Рис. 2. Число N землетрясений-дуплетов и землетрясений-пар, соответствующих северо-западно-тихоокеанским сильнейшим ($M > 7,5$) землетрясениям 1899–1994 гг., как функция расстояния L между их очагами

Близость значений L_0 (размер элементарного блока) и $L_{зд}$ (среднее расстояние между очагами в дуплетах) представляется неслучайной: именно «собственные» моменты как элементарных блоков (и плит), так и соответствующих им полей упругих напряжений являются тем «каркасом», который формирует структуру геомеханического поля планеты.

Заключение

Таким образом, приведенные в статье геофизические данные и их анализ подтвердили сформулированный на основе геологических материалов А. В. Пейве [1961] вывод о самостоятельной движущей силе блока и наполнили его новым физическим содержанием: геологическая среда имеет моментную, корпускулярную (блоковую) и волновую природу.

Полученное в работе выражение для характерной скорости можно рассматривать как своеобразную визуализацию в геодинамике корпускулярно-волнового дуализма, который, с одной стороны, на малых расстояниях проявляется в виде механического взаимодействия частиц (блоков и плит) между собой, с другой — на больших расстояниях проявляется в виде действующего упругого ротационного поля, имеющего волновую природу.

В последнее время все больший научный интерес вызывают кольцевые, вихревые и другие нелинейные структуры. Такие структуры существовали в течение всей геологической истории, напрямую были связаны с моментной природой геодинамического процесса [Вихри..., 2004; Ротационные..., 2007; Earthquake, 2006] и, следовательно, принимали участие в «механизме самоорганизации геологического пространства» [Хаин, Полетаев, 2007, с. 17]. Все больше докладов на тектонических совещаниях посвящено ротационной проблеме и космическому фактору [Общие..., 2008; Хаин, Полетаев, 2007]. Такое положение дел сложилось в результате поисков

новой геологической парадигмы (вместо глобальной тектоники) [Вихри..., 2004; Ротационные..., 2007; Общие..., 2008; Хаин, Полетаев, 2007], в основу которой, как нам представляется, могут быть положены описанные в статье физические свойства геологической среды.

Авторы признательны Е. Е. Милановскому и И. В. Мелекесцеву за доброжелательное обсуждение статьи и ценные замечания.

Литература

1. *Быков В. Г.* Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. — 2005. — Т. 46. — № 11. — С. 1176–1190.
2. *Викулин А. В.* Физика волнового сейсмического процесса [Электронный ресурс]. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003. — 150 с. — URL: www.kscnet.ru (дата обращения: 10.02.2008).
3. *Викулин А. В.* Волновая природа ротационного упругого поля литосферы // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2006. — С. 401–419.
4. *Викулин А. В.* Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика. — 2008. — № 6. — С. 559–750.
5. *Викулин А. В., Тверитинова Т. Ю.* Энергия тектонического процесса и вихревые геологические структуры // Докл. РАН. — 2007. — Т. 413. — № 3. — С. 372–374.
6. *Вихри* в геологических процессах: сб. науч. ст. / под ред. А. В. Викулина. — [Электронный ресурс]. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — 297 с. — URL: www.kscnet.ru (дата обращения: 03.01.2008).
7. *Дмитриевский А. Н., Володин И. А., Шипов Г. И.* Энергоструктура Земли и геодинамика. — М.: Наука, 1993. — 154 с.
8. *Лукьянов А. В.* Нелинейные эффекты в моделях тектогенеза // Пробл. геодинамики и литосферы / под ред. А. В. Лукьянова. — М.: Наука, 1999. — С. 253–287.
9. *Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана* / под ред. С. Уеда. — М.; СПб.: Межправительственная океанографическая комис., 2003. — 120 с.
10. *Милановский Е. Е.* Пульсации Земли // Геотектоника. — 1995. — № 5. — С. 3–24.
11. *Общие* и региональные проблемы тектоники и геодинамики: материалы 41-го Тектонического совещ. Т. 1. — М.: Геос, 2008. — 560 с.
12. *Пейве А. В.* Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. Геологическая. — 1961. — № 3. — С. 36–53.
13. *Ротационные* процессы в геологии и физике: сб. науч. ст. / под ред. Е. Е. Милановского. — М.: КомКнига, 2007. — 528 с.
14. *Садовский М. А.* Геофизика и физика взрыва: избр. тр. — М.: Наука, 2004. — 440 с.
15. *Седов Л. И.* Механика сплошной среды. Т. 1. — М.: Наука, 1973. — 536 с.
16. *Тверитинова Т. Ю., Викулин А. В.* Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2005. — № 5. — С. 59–77.
17. *Хаин В. Е., Полетаев А. И.* Ротационная тектоника Земли // Наука в России. — 2007. — № 6. — с. 14–21.
18. *Шпитальная А. А., Заколдаев Ю. А., Ефимов А. А.* Проблема времени в геологии и звездной астрономии // Пробл. пространства и времени в современном естествознании. Сер. Пробл. исслед. Вселенной. — Вып. 15. — СПб., 1991. — С. 95–106.
19. Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects. — Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006. — 582 p.
20. *Lee J. S.* Some Characteristic Structural Types in Eastern Asia and Their Bearing upon the Problems of Continental Movements // Geol. Mag. — 1928. — Vol. LXVI. — P. 422–430.

А. В. Викулин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

ВИХРЕВЫЕ ДВИЖЕНИЯ И СТРУКТУРЫ: ФИЗИЧЕСКИЙ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ*

VORTEX MOTIONS AND VORTEX STRUCTURES: PHYSICAL AND GEOLOGICAL ASPECTS OF THE PROBLEM

Physical and geological aspects of vortex motions in historical evolution are considered. The hypothesis of vortex motion source is formulated. The way out the crisis in Physics and Geology is suggested.

Становление представлений о вихревых движениях

Представления о вихревом движении были заложены в VI–IV вв. до н. э. в Элладе: Анаксимандром, Левкиппом, Демокритом из Абдери и Эпикуром из Самоса. Обсуждая проблему бесконечного, Демокрит разрабатывал учение о движении как о движущихся в пустоте «вихревых атомах», создающих наблюдаемое разнообразие природы [3, с. 556; 42, с. 7]. Первые интуитивные качественные модели устройства нашего мира, в основе которых были заложены представления о вихревом движении материи, созданы Р. Декартом и И. Кантом в XVII–XVIII вв. [2, с. 52; 27]. Создание теории вихревой материи трудами Г. Л. Ф. Гельмгольца, В. Томсона (лорда Кельвина), Г. Р. Кирхгофа, П. Г. Дирихле, Ю. В. Дедекинда, Б. Римана, В. Гребли, Дж. Дж. Томсона, А. М. Ляпунова, А. Пуанкаре и другими исследователями было осуществлено в середине XIX — начале XX вв. Школой Дж. Дж. Томсона при простых предположениях было получено выражение квантового вихревого кольца, которое совпало с известным законом Планка: $E = h\nu$, а в 1903 г., за два года до А. Эйнштейна, Дж. Томсон, исходя из вихревой теории эфира и совершенно других предпосылок, чем А. Эйнштейн, показал, что $E = mc^2$ [10, с. 64–71; 20, с. 131–132].

Как видим, идея вихревого движения, угаданная в мистическом хаосе греческими и итальянскими философами-материалистами и интуитивно поддержанная и развитая Р. Декартом, И. Кантом, Г. Ф. Гельмгольцем, лордом Кельвиным, Дж. Дж. Томсоном и другими исследователями, в рамках классической физики была доведена до законченной теории, которая содержит в себе наиболее важные элементы и квантовой механики, и теории относительности. Возможность определения квантовых вихревых свойств окружающего нас мира в рамках классической физики, очевидно, указывает на то, что и «квантованность», и «завихренность» являются изначально неотъемлемыми свойствами пространства — времени — материи.

Физика вихревых движений

Спин как собственный момент частицы — квантовое число. Согласно современным данным спин, как внутренняя степень свободы элементарной частицы, является таким же первичным ее свойством, как масса и заряд [50, с. 25]. Однако спин, в отличие от других первичных параметров частицы, имеет исключительно квантовую природу [51, с. 713], но у него нет никаких классических аналогов и он не допускает интерпретации классического характера [30, с. 234]. В квантовой механике понятие спина становится в особенности глубоким, делаясь по существу основным содержанием момента, и вопрос о его происхождении становится несущественным, приобретая смысл квантового числа [29, с. 234–235].

Обзор становления и развития концепции спина [10] показал, что классические представления о собственном механическом моменте сыграли важную роль при формулировке представлений о спине как чисто квантовой величине. Именно под давлением экспериментальных фактов, рассматривая электрон как классическое тело конечной протяженности, Дж. Уленбек и С. Гаудсмит формальным образом предложили гипотезу существования у электрона собственного момента [4, с. 180], который логикой квантовой механики и был превращен в спин.

* 37 (239). Материалы конференции, посвященной дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский, 2008. С. 42–51.

«Ценой» такого превращения классического собственного момента в спин, т. е. в квантовое число, как можно видеть, является отказ от поиска в рамках квантовой механики *источника вихревого движения*. Вихревые движения как уже турбулентные движения макрообъемов среды стали предметом исследования газо- и гидродинамики. Другими словами, введение концепции спина — собственного момента элементарной частицы, — превратило задачу древних греков и италийцев об источнике вихревого движения сначала в проблему квантовой механики, а затем, обозначив спин квантовым числом, по сути, вывело ее вообще за рамки физики.

Успехи гидродинамики, в том числе «нетрадиционные». В 20–30 гг. XX в. Н. Е. Кочин получил решения уравнений движения сжимаемой жидкости на вращающейся Земле и определил условия образования на поверхностях раздела воздушных масс волны, переходящей в циклон — воздушный вихрь, перемещающийся в атмосфере.

Вторая мировая война в значительной степени стимулировала разработку принципиально новых научно-технических установок, включая ядерное оружие и космическую технику. В концлагере гитлеровской Германии с вихревыми потоками работал В. Шауберг, который обнаружил, что при определенных условиях (конусообразная форма вихря, скорость, температура и др.) поток становится самоподдерживающимся и его энергию можно использовать. Он разработал диск Белонце, который потреблял только воду и воздух. В 1945 г. диск Белонце совершил свой первый полет, поднявшись за 3 мин на высоту 15 тыс. м, и при горизонтальном полете достиг скорости 2 200 км/ч. Этот аппарат был уничтожен в конце войны и не восстановлен. Автор заявил, что его открытие принадлежит будущему [36, с. 95].

В 70–80 гг. XX в. практики-гидроэнергетики подметили, что турбины с горизонтально расположенной осью вырабатывают на 15–20% энергии больше, чем с вертикально расположенной осью. Вместе с тем было установлено, что в ускоряемом потоке воды происходит ее самопроизвольное охлаждение с превращением части запасенной в воде тепловой энергии в энергию движения потока [39, с. 52–53]. Из анализа такого рода многочисленных фактов был сделан вывод, что в природе при определенных условиях, предположительно при условии вихревого закручивания потока, реализуется процесс прямого преобразования теплоты потока в его кинетическую энергию [36, с. 70].

В начале XXI в. при достаточно общих предположениях получено решение для вихревого механизма, создающего атмосферные смерчи и ураганы с гигантскими энергиями [24]. Основная идея полученного нового решения сводится к следующему. При формировании газового вихря на микроуровне происходит самопроизвольное, с понижением температуры макрообъема, преобразование потенциальной энергии давления окружающего вихрь газа в кинетическую энергию вращения вихря. При этом соблюдается закон постоянства момента количества движения, и чем сильнее сжато тело вихря, тем больше в него закачивается энергии из окружающей среды. Тороидальный вихрь окружен пограничным слоем газа, в котором температура и вязкость понижены по сравнению с температурой и вязкостью окружающей среды. Винтовой тороидальный вихрь газа в процессе образования концентрирует в себе энергию окружающей среды и является, таким образом, природным механизмом по преобразованию потенциальной атомно-молекулярной микроквантовой энергии газовой среды в кинетическую энергию вращения макроскопического вихря [2, с. 178–179].

Как видим, теоретические и практические результаты, полученные в рамках классической гидродинамики, указывают на наличие механизмов, обеспечивающих перекачку атомно-молекулярной, по сути квантовой энергии в кинетическую энергию вращения макроскопического вихря. Эти данные дают все основания для продолжения построения вихревой теории материи в рамках классической (неквантовой) физики.

Вихревая геодинамика

Основные вехи

Работами китайского геолога Ли Сыгуана [31, 59], японских исследователей [40, 57], российских геологов О. И. Слензака [46], И. В. Мелекесцева [35], А. П. Кулакова [28] и других было обосновано существование вихревых, кольцевых, спиральных и других подобных структур. В последние годы наблюдался «рутинный» сбор данных о таких «непрямолинейных» структурах, многочисленные и разноразмерные примеры которых были установлены для различных частей

планеты [17, 41]. В контексте настоящей работы является особенно важным то, что наличие таких структур и соответствующих им упругих полей кручения было достаточно убедительно продемонстрировано на геологическом и геофизическом материале и обосновано физически [9, 17, 18, 41, 52, 55]. Все эти данные доказывают исключительную важность вихревых структур и формирующих их упругих полей для геологических построений.

Формулировка гипотезы об источнике вихревых движений в геологии

1961 г. Выход в свет фундаментальной работы геолога А. В. Пейве [38], следующие три важных момента которой являются наиболее важными. Во-первых, в работе автор за 18 лет до М. А. Садовского обосновывает *блоковое строение* геологической среды. Во-вторых, анализируя ее структуру и движение, приходит к новому, фантастическому по тем (да и по нынешним тоже) временам механизму движения коры — *собственному источнику движения блока*. При этом каждый структурно обособленный, более или менее цельный однородный блок имеет свой собственный «потенциал перемещения», в чем и «*заключается главная особенность тектонических движений*». В-третьих, «*тектонические силы и вектор необратимых тектонических движений являются „врожденными“ извечными свойствами нашей и, вероятно, других планет и связаны не с процессами развития вещества внутри каждой планеты, а с более общими законами движения космических тел ...* Геологи *должны поставить вопрос перед астрономами и астрофизиками* о том, что даже за относительно короткий период неогейского мегахрона продолжительностью *около 1 млрд лет*, вероятно, происходит *эволюция гравитационного поля Солнечной системы*» (курсив наш — А. В.).

1969 г. Выход в свет первого издания фундаментального труда Л. И. Седова «Механика сплошной среды» [44]. В этой работе, в частности, обосновывается важная для физики и геологии концепция *момента количества движения конечного объема сплошной среды* [44, с. 146–148, 504–530].

1979–1986 гг. Выход в свет основных работ М. А. Садовского с сотрудниками [43], посвященных созданию модели блоковой геофизической среды, в рамках которой предпринимается попытка построения «геомеханического» сейсмического процесса. Модель строится на основании установленного М. А. Садовским с сотрудниками иерархического свойства горных пород, которое наблюдается в пределах 12–14 порядков размеров. Отличительной особенностью таких моделей является сильная нелинейность дифференциальных уравнений, с помощью которых должен описываться сейсмический процесс [34].

90-е гг. XX в. Развивая концепцию блоковой среды, ученики А. В. Пейве пришли к выводу о том, что геологическая среда является нелинейной и самоорганизующейся. Вследствие этого ее движение может быть представлено в виде тектонического течения с неоднородными деформациями, *ненулевыми дивергенциями и вихрями* [33].

К этому же периоду относятся и первые попытки интерпретации геодинамической роли «собственного» вращательного движения и «космического фактора», предпринятые в рамках количественных геодинамических моделей, разрабатываемых в работах [17, 18, 41]. В рамках таких представлений «самостоятельной движущей силой блока» земной коры может быть только его *собственный*, по сути — *макроскопический момент* в смысле Л. И. Седова [44, с. 146–148, 504–530].

Приведенные данные показывают, что самосогласованное тектоническое течение [33] возможно в том случае, когда взаимодействие упругих полей, возникающих вокруг блоков с собственными моментами, будет иметь дальний порядок, как и при спин-споновом взаимодействии частиц в квантовой механике.

Вихревые упругие ротационные поля

Исходные данные

1923–2006 гг. Отмечены распространяющиеся по поверхности Земли визуально видимые «горбы» из очагов достаточно сильных землетрясений (Япония — 1923 г., $M_S = 8,2$ [63]); Камчатка — 1959 г., $M_S = 7,6$ [53]; Чили — 1960 г., $M_W = 9,5$ [60]; Мехико — 1985 г., $M_S = 8$ [61] и др. [54]) или «земляные волны» [54]. Такие движения представляют собой, по сути, гравитационные волны, где траектория движения частиц среды происходит по эллипсу в сторону, противоположную направлению распространению волны. Теория таких волн представлена в работе [62].

В рамках классической теории упругости такие движения в однородном (не блоковом) твердом теле невозможны. В таком контексте становится понятно, почему вихревые геологические структуры, выделяемые на поверхности Земли, сложенной «твердым» материалом земной коры и/или литосферы, с самого момента своего открытия в течение уже многих десятков лет не являются предметом науки — они в соответствии с законами физики не должны существовать.

08.12.1988 г. Спитакское (Армения) разрушительное землетрясение [23]. Многочисленные свидетельства крутильных колебаний поверхности грунта при землетрясении отчетливо проявились массовыми поворотами архитектурных памятников и надгробных камней, а также характерными разрушениями торцевых и центральных частей зданий и сооружений [2, 23, 26]. В большом количестве поворотные движения наблюдались и при землетрясениях в других местах планеты [21, 22].

1995 г. В. Н. Николаевский [37] в рамках математической модели *поворачивающихся блоков* показал принципиальную возможность получения *сильнонелинейного* синус-Гордона уравнения движения, допускающего *решения в виде уединенных волн-солитонов*.

1999 г. Экспериментально зарегистрированы колебания крутильной поляризации при землетрясении Ch-Chi (Тайвань — 1999 г., $M = 6,9$ [58]). Многочисленные доказательства присутствия в сильных движениях грунта интенсивной вращательной компоненты приведены в работе [52].

Возможный путь построения теории

1993 г. В работе [18] разрабатывается новый взгляд на физику Земли и геодинамику с учетом последних достижений в области физики вакуума, астрофизики, реологии горных пород и физической химии. Формулируются основы новой геодинамической парадигмы, связанной с различными уровнями неустойчивости материи, динамика которых описывается на основе представлений о новом физическом поле — поле инерции. Показывается, что такое поле претендует на роль первичного квантового поля, а характерные движения геологической среды в полях инерции приводят к различным типам вихревых и винтовых структур. В рамках такого подхода показывается, что, во-первых, образование диссипативной геологической структуры соответствует переходу системы в состояние устойчивого равновесия. Другими словами, равновесие геологической среды достигается рождением новой структуры. Во-вторых, динамика кристаллического вещества Земли (коренные горные породы) имеет макроквантовый характер. В-третьих, в рамках построенной в работе [18] теории, в основу которой заложены макроквантовые уравнения Г. И. Шипова [55], оказывается возможным конкретизировать понятие самой геологической структуры и предложить формальный аппарат для ее описания. В результате движение геологической среды, по сути, является результатом развития протекающих в ней процессов самоорганизации. В-четвертых, существует новый, неизвестный ранее тип взаимодействия между геологическими структурами, «дальнодействующий» характер которого определяется моментами собственного количества движения геологических структур (как и спин-спиновое взаимодействие в квантовой механике, которое определяется спинами частиц). Физические поля, осуществляющие такое взаимодействие, в современной литературе принято называть торсионными полями, или полями кручения.

1997–1998 г. В рамках классической теории упругости с симметричным тензором напряжений [13, 14], во-первых, аналитически решена задача о поле упругих напряжений, возникающем вокруг поворачивающегося под действием собственного момента блока геофизической среды. Во-вторых, аналитически решена задача о поле упругих напряжений вокруг двух отстоящих друг от друга блоков, поворачивающихся под действием своих собственных моментов; определено взаимодействие блоков и показан его дальнодействующий характер. В-третьих, феноменологически решена задача о поле упругих напряжений вокруг цепочки блоков с собственными моментами. В результате построена ротационная упругая модель сейсмического процесса как процесса, протекающего в пределах сейсмического пояса.

2000 г. В рамках ротационной модели показано, что результатом взаимодействия блоков геофизической среды являются сильнонелинейные волны деформации солитонного типа [12].

2001 г. Дано объяснение эффекту миграции землетрясений [6].

2001–2002 гг. В рамках ротационной упругой модели дано количественное объяснение нутации полюса Земли (колебаниям Чандлера), что указывает на наличие прямой причинно-следственной связи между сейсмическим планетарным процессом, протекающим в тектонических активных поясах, и вращением планеты [15, 64].

2002 г. Показано, что уединенные тектонические волны, ответственные за взаимодействие блоков геофизической среды, имеют циркулярную поляризацию [7].

2003 г. В рамках ротационной упругой модели сейсмического процесса построена принципиально новая модель очага землетрясения, позволяющая объяснять эффекты, связанные с взаимодействием очагов друг с другом: эффекты миграции землетрясений, удаленные форшоки и афтершоки, землетрясения-дуплеты и пары землетрясений [8].

2005 г. Показано, что взаимодействие тектонических плит описывается теми же решениями, которые получаются в рамках ротационной модели блоков с собственными моментами. Другими словами, напряженное состояние всей поверхности (вращающейся!) Земли представляет собой ротационное циркулярно поляризованное упругое поле, создаваемое взаимодействующими между собой геофизическими блоками и тектоническими плитами с моментами [48].

Показано, что ротационные вихревые поля во вращающихся твердых блоковых телах могут быть описаны в рамках задачи Дирихле о равновесной и остающейся в каждый момент эллипсоидальной форме капли гравитирующей вращающейся жидкости, поле скоростей которой прямо пропорционально координатам [9].

2007 г. В рамках ротационной упругой модели предложен способ количественного определения энергии тектонического процесса [16].

2008 г. Для твердых вращающихся геофизических сред обосновано существование принципиально нового типа ротационных упругих волн, ответственных за «моментное» взаимодействие слагающих их блоков [11].

Как видим, анализ геодинамического материала с различных точек зрения указывает на то, что самые различные природные процессы имеют макроквантовый «вихревой» характер. Описание таких процессов возможно с использованием представлений о поле инерции. Характерными движениями геологической среды в таких полях являются вихревые и винтовые структуры, дальнедействующие взаимодействия которых описываются физическими торсионными полями (полями кручения).

Концепция блоковой с собственными моментами геологической среды по Пейве — Седову — Садовскому соответствует макроквантовому описанию.

В рамках концепции геологической среды Пейве — Седова — Садовского удастся количественно объяснить нутацию полюса Земли (колебания Чандлера) и миграцию землетрясений, построить принципиально новую модель очага землетрясения, концептуально определить энергию тектонического процесса планеты и обосновать существование нового типа ротационно-упругих волн в твердых блоковых вращающихся (и геологических и геофизических) средах.

Таким образом, макроквантовый «вихревой» подход в совокупности с концепцией геологической среды Пейве — Седова — Садовского, рассматриваемой в рамках ротационной модели, оказался достаточно перспективным и плодотворным с точки зрения геодинамики. Это позволяет считать физически обоснованным основное физическое предположение концепции — предположение Пейве-Седова о существовании у блоков геологической среды собственных моментов.

Кризис в физике и геологии и возможные пути выхода из него

После того как в конце 20-х гг. XX в. были сформулированы основные принципы квантовой механики, физики-теоретики разделились на две «большие» и по количеству, и по «силе» примерно равные группы: «детерминистскую» («Бог не играет в кости!») группу А. Эйнштейна, куда вошли М. Планк, Луи де Бройль, Э. Шредингер, и «вероятностную» группу Н. Бора, куда вошли В. Гейзенберг, М. Борн и П. Дирак. Уже сам факт появления таких групп указывает на глубокий кризис в понимании физической реальности окружающего нас мира [20], который продолжается уже более полувека.

Возможные пути выхода из сложившегося кризиса можно искать в двойственной природе материи, установленной Луи де Бройлем [20, с. 244–246], который в 1924–1925 гг. писал: «Идея о глубокой взаимосвязи двух великих принципов геометрической оптики и динамики могли бы стать ценным руководством для реализации синтеза волн и квантов. <...> Квант действия служит соединительным звеном между корпускулярным и волновым представлениями о матери-

альных частицах. <...> Таким образом, можно приписать электрону или вообще всем частицам, подобно фотонам, двойственную природу, наделить их волновыми и корпускулярными свойствами, связанными между собой квантом действия» [5, с. 135–137].

В связи с таким подходом к проблеме материи А. Эйнштейн [56, с. 489, 496–497] заметил: «...допуская, что излучение можно рассматривать как газ из квантов, мы обязаны признать, что аналогия между газом из квантов и газом из молекул должна быть полной. <...> Думаю, что здесь речь идет не только о простой аналогии... можно полагать, что каждому движению соответствует волновое поле, подобно тому, как в оптике волновое поле излучения соответствует движению световых квантов. Это волновое поле — *пока еще неизвестной физической природы* — в принципе должно оказывать свое влияние на движение» (курсив наш. — А. В.).

Такое направление исследований впоследствии получило название теории квазичастиц (почти элементарных частиц), которая описывает свойства макроскопических по размерам частиц. Теория существенным образом опирается на вывод: «Спиновые свойства элементарных частиц играют огромную роль как в области микропроявлений, так и в поведении макроскопических тел. Последнее обстоятельство связано с тем, что спин непосредственно определяет статистические свойства систем, построенных из квантовых частиц» [30, с. 236]. Используя такой подход, Л. Д. Ландау в 1947 г. выдвинул теорию, объясняющую сверхтекучесть гелия II (Нобелевская премия 1962 г.). Концепция момента количества движения конечного объема сплошной среды, как уже отмечалось, была обоснована в 1969 г. Л. И. Седовым [44, с. 146–148, 504–530]. Применимость такого подхода для геодинамических построений фактически была обоснована в работе [18]. Все такого рода представления, которые в нашем случае включают микроквантовые представления квантовой механики и макроквантовые геодинамические представления, по сути, были положены в основу теории квазичастиц, начало создания которой принято связывать с работой [32].

Полученные в последние годы результаты в принципе подтверждают правильность такого макроподхода к решению проблемы природы источника микровращений. Действительно, в работе [25] было получено принципиально новое вихревое решение для классической задачи об электрическом поле электрона. В работе [55] было показано, что материя представляет собой имеющие конечные размеры сгустки поля инерции, которые, по сути, представляют собой *поля кручения*. Особенно важным в контексте настоящей работы является то, что наличие таких полей кручения было достаточно убедительно продемонстрировано на геологическом и геофизическом материале [18]. Близкие, по сути, вихревые геологические и геофизические структуры в большом количестве были выявлены и описаны в научных публикациях (число которых составляет многие десятки, если не сотни), выполненных в течение последних десятилетий многими исследователями разных специальностей [17, 41].

Период окончания становления квантовой механики (1925–1930) и начало кризиса в физике (1927–1929) совпадают по времени с открытием в 1928 г. Ли Сыгуаном нового типа движений в геологии — вихревых структур. Такое совпадение во времени представляется неслучайным.

С конца 20-х гг. XX в. и до настоящего времени вихревая геодинамика не только никак не сформировалась как наука, но даже никак не обозначилась. Более того, в настоящее время последняя парадигма геологии — Новая глобальная тектоника — находится в состоянии кризиса в основном по причине неучета ею эффектов вращения планеты [47, 49]. Приведенные в работе данные показывают, что изучение вихревых геологических планетарных структур, развивающихся в течение протяженных геологических эпох и «невозможных» с точки зрения законов нынешней физики, вне всякого сомнения, может в дальнейшем подсказать ключ к решению проблемы источника вихревого микроскопического движения и проблемы природы спина.

Для объяснения в конце XIX в. лордом Кельвином энергетики Солнца его гравитационным сжатием, когда стало ясно, что химическое горение не обеспечивает достаточной мощности и длительности излучения, было предложено Кельвиновское сжатие. Кельвиновский механизм «давал» Солнцу 30 млн лет жизни. Сторонники Кельвина не верили в геологические данные о куда большем возрасте Земли, считая это *проблемой геологии*. В 1930-х гг. теория термоядерного синтеза предложила новый источник энергии звезд, а радиоизотопный метод определил возраст Земли более чем в 4,2 млрд лет. Теория же Кельвина в настоящее время объясняет первичный разогрев протозвезд до начала в них ядерного синтеза [45, с. 128].

Приведенный пример лишней раз доказывает уже давно ставшую очевидной истину: не может существовать кризиса только в физике и (или) только в геологии! «Размежевание» натурфилософии на естественные науки, в том числе на физику и геологию, произошло не так уж и давно, в XVII–XVIII вв. [19, с. 256–266]. Поэтому «совпадение» во времени кризисных явлений в физике и появление принципиально новых данных о движении среды в геологии в аспекте истории науки является вполне естественным и ожидаемым событием. Примеров тому история науки знает множество.

Данные геологии, убедительно доказывающие как существование вихревых структур, так и связанных с ними ротационного упругого планетарного поля, как видим, могут оказаться не просто полезными, а в принципе необходимыми как при решении проблемы источника макро- и микровращений, так и, вероятно, для преодоления кризиса и в физике, и в геологии [17, 41].

Литература

1. *Аносов Г. И., Константинова Т. Г., Делемень И. Ф.* Некоторые сведения о крутильных деформациях при землетрясениях в связи с развитием методов сейсмического микрорайонирования и усиления зданий // Вихри в геологических процессах / под ред. А. В. Викулина. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — С. 246–252.
2. *Ацюковский В. Аносов Г. А.* Общая эфиродинамика. — М.: Энергоатомиздат, 2003. — 584 с.
3. *Боголюбов А. Аносов Г. Н.* Математики. Механики: библиогр. справ. — Киев: Наук. думка, 1983. — 640 с.
4. *Борн М.* Атомная физика. — М.: Мир, 1967. — 494 с.
5. *Бройль Л.* Революция в физике. — М.: Атомиздат, 1965. — 232 с.
6. *Викулин А. В.* Миграция и осцилляции сейсмической активности и волновые движения земной коры // Пробл. геодинамики и прогноза землетрясений: материалы I рос.-яп. семинара, Хабаровск, 26–29 сентября, 2000 г. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. — С. 205–224.
7. *Викулин А. В.* Уединенные тектонические волны поворотной деформации как результат вращения планеты // Геофизический журн. — 2002. — № 4. — Т. 24. — С. 90–101.
8. *Викулин А. В.* Физика волнового сейсмического процесса: монография. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. — 150 с.
9. *Викулин А. В.* Ротационные упругие поля в твердых телах и вихревые решения проблемы Дирихле: тождественные системы? // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2005. — № 2. — Вып. 6. — С. 86–95.
10. *Викулин А. В.* Хроника развития естественнонаучных представлений о ротационных и вихревых движениях // Вестник КамчатГТУ. — 2007. — Вып. 6. — С. 64–77.
11. *Викулин А. В.* Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика. — 2008. — № 6. — С. 559–570.
12. *Викулин А. В., Быков В. Г., Лунева М. Н.* Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса // Вычислительные технологии. — 2000. — Т. 5. — № 1. — С. 31–39.
13. *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Модель сейсмического процесса // Вычислительные технологии. — 1997. — Т. 2. — № 2. — С. 20–25.
14. *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. — 1998. — Т. 17. — № 6. — С. 95–103.
15. *Викулин А. В., Кролевец А. Н.* Чандлеровское колебание полюса и сеймотектонический процесс // Геология и геофизика. — 2001. — № 6. — С. 996–1006.
16. *Викулин А. В., Тверитинова Т. Ю.* Энергия тектонического процесса и вихревые геологические структуры // Докл. РАН. — 2007. — Т. 413. — № 3.
17. *Вихри* в геологических процессах: сб. науч. ст. / под ред. А. В. Викулина. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — 297 с.
18. *Дмитриевский А. Н., Володин И. А., Шипов Г. И.* Энергоструктура Земли и геодинамика. — М.: Наука, 1993. — 154 с.
19. *Дорфман Я. Г.* Всемирная история физики: с древнейших времен до конца XVIII века. — М.: ДомКнига, 2007а. — 352 с.
20. *Дорфман Я. Г.* Всемирная история физики: с начала XIX до середины XX вв. — М.: ДомКнига, 2007б. — 320 с.

21. *Егунов К. В.* Проблемы проектирования на сейсмостойкость протяженных и несимметричных сооружений // Сейсмостойкое строительство. — 2000. — № 1. — С. 23–30.
22. *Поворотные* колебания высотного здания / Т. Ж. Жунусов, Н. В. Кузьмина, В. А. Токмаков, Д. А. Харин // Вопр. инженерной сейсмологии. — 1980. — Вып. 21. — С. 112–116.
23. *Землетрясения: уроки и проблемы* // Природа. — 1989. — № 12. — 128 с.
24. *Иванчин А. Г.* Движущие силы смерча // Вихри в геологических процессах: сб. науч. ст. / под ред. А. В. Викулина. — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. — С. 269–273.
25. *Иванчин А. Г.* Непотенциальное вихревое решение задачи об электроде // Ротационные процессы в геологии и физике: сб. науч. ст. / под ред. Е. Е. Милановского. — М.: ДомКнига, 2007. — С. 211–218.
26. *Клячко М. А.* Землетрясения и мы. — СПб: Интеграф, 1999. — 234 с.
27. *Кудрявцев П. С.* История физики. Т. 1. — М.: Учпедгиз, 1956. — 564 с.
28. *Кулаков А. П.* Морфоструктуры востока Азии. — М.: Наука, 1986. — 176 с.
29. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Квантовая механика. Нерелятивистская теория. — М.: Наука, 1974. — 752 с.
30. *Левич В. Г., Вдовин Ю. А., Мямлин В. А.* Курс теоретической физики. Т. 2. — М.: Наука, 1971. — 936 с.
31. *Ли Сыгуан.* Вихревые структуры Северо-Западного Китая. — М.; Л.: Госгеолтехиздат, 1958. — 132 с.
32. *Лифшиц Е. М.* Сверхтекучесть (теория) // Гелий: сб. науч. ст. / под ред. А. И. Шальникова. — М.: Иностран. лит., 1949. — С. 385–429.
33. *Лукьянов А. В.* Нелинейные эффекты в моделях тектогенеза // Пробл. геодинамики литосферы: сб. науч. ст. / под ред. А. В. Лукьянова. — М.: Наука, 1999. — С. 253–287.
34. *Любушин А. А. (мл.)*. Иерархическая модель сейсмического процесса // Физика Земли. — 1987. — № 11. — С. 43–52.
35. *Мелекесцев И. В.* Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Пробл. эндогенного магматизма. — М.: Наука, 1979. — С. 125–155.
36. *Николаев Г. В.* Тайны электромагнетизма и свободная энергия. — Томск: НТЦ НЭД, 2002. — 150 с.
37. *Николаевский В. Н.* Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Докл. РАН. — 1995. — Т. 341. — № 3. — С. 403–405.
38. *Пейве А. В.* Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. Геологическая. — 1961. — № 3. — С. 36–54.
39. *Потапов Ю. С., Фоминский Л. П., Потапов С. Ю.* Вихревая энергетика и холодный ядерный синтез с позиции теории вращения. — Кишинев; Черкассы: Око-Плюс, 2000. — 352 с.
40. *Рикитаке Т.* Геодезические и геологические данные о японской островной дуге и ее обрамлении // Краины континентов и островные дуги. — М.: Мир, 1970. — С. 216–236.
41. *Ротационные* процессы в геологии и физике / ред. Е. Е. Милановский. — М.: ДомКнига, 2007. — 528 с.
42. *Савенко В. С.* Что такое жизнь? Геохимический подход к проблеме. — М.: ГЕОС, 2004. — 203 с.
43. *Садовский М. А.* Геофизика и физика взрыва: избр. тр. — М.: Наука, 2004. — 440 с.
44. *Седов Л. И.* Механика сплошной среды. Т. 1. — М.: Наука, 1973. — 536 с.
45. *Сергеев А.* Почему мы доверяем науке? // Вокруг света. — 2008. — № 3. — С. 120–128.
46. *Слензак О. И.* Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. — Киев: Наук. думка, 1972. — 182 с.
47. *Спорные* аспекты тектоники плит и возможные альтернативы: сб. науч. ст. / под ред. В. Н. Шолпо. — М.: ИФЗ РАН, 2002. — 236 с.
48. *Тверитинова Т. Ю., Викулин А. В.* Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2005. — № 5. — С. 59–77.
49. *Тяпкин К. Ф.* О кризисе в современной геотектонике и возможности выхода из него // Геофизика. — 2003. — № 5. — С. 70–72.
50. *Ферми Э.* Квантовая механика. — М.: Мир, 1968. — 368 с.
51. *Физический* энциклопедический словарь. — М.: Сов. энцикл., 1983. — 928 с.
52. *Халчанский С. А.* Проблема регистрации угловых перемещений в сейсмологии // Сейсмические приборы. — 1998. — Вып. 30. — С. 80–82.

53. Черных Г. П. Землетрясение у берегов Камчатки 4 мая 1959 г. // Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР. — 1960. — № 11. — С. 6–17.
54. Шебалин Н. В. Количественная макросейсмика (фрагменты незавершенной монографии) // Вычислительная сейсмология. — 2003. — Вып. 34. — С. 57–200.
55. Шипов Г. И. Теория физического вакуума. — М.: Кириллица-1, 2002. — 128 с.
56. Эйнуштейн А. Собр. науч. тр. Т. 3. — М.: Наука, 1966. — 632 с.
57. Fujiwhara S., Tsujimura T., Kusamitsu S. On the Earth-vortex, Echelon Faults and allied Phenomena // Gerlands Beiträge zur Geophysik, zweite Supplementband. — 1933. — P. 303–360.
58. Huang B. S. Evidence for azimuthal and temporal variations of the rupture propagation of the 1999 Chi-Chi Taiwan, earthquake from seismic data recorded by a dense array // Geophys. Res. Lett. — 2001. — № 28. — P. 3370–3380.
59. Lee J. S. Some Characteristic Structural Types in Eastern Asia and Their Bearing upon the Problems of Continental Movements // Geol. Mag. — 1928. — Vol. LXVI. — P. 422–430.
60. Lomnitz C. Some observations of gravity waves in the 1960 Chile earthquake // Bull. Seism. Soc. Am. — 1970. — Vol. 59. — P. 669–670.
61. Lomnitz C. Mexico 1985: the case for gravity waves // Geophys. J. Letter. — 1990. — Vol. 102. — P. 569–572.
62. Lomnitz C., Castanos H. Earthquake hazard in the valley of Mexico: entropy, structure, complexity // Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects / eds. R. Teisseyre, M. Takeo, E. Majewski. — Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006. — P. 347–364.
63. Matuzawa T. On the possibility of gravitational waves in soil and allied problems // J. Inst. Astr. Geophys. — 1925. — № 3. — P. 161–174.
64. Vikulun A. V., Krolevets A. N. Seismotectonic processes and the Chandler oscillation // Acta Geophys. Polonica. — 2002. — Vol. 50. — № 3. — P. 395–411.

Приложение 2009

Завершая подготовку настоящего сборника к печати, автор считает необходимым сделать некоторые дополнения к статье:

1. Автор «натолкнулся» на давнишнюю уже публикацию еще одного патриарха по физике пластичности и прочности — В. Е. Панина [65], который пришел к следующим выводам: «Многочисленные попытки органически связать теорию дислокаций и механику сплошной среды до сих пор были безуспешными. <...> В последнее время стало очевидным, что наше понимание элементарного акта пластической деформации было не совсем верным и определялось ошибочной схемой. <...> За элементарный акт пластической деформации принималось сугубо трансляционное движение любого деформированного тела». В качестве выхода из сложившегося положения В. Е. Панин приходит к выводу: «Носителями пластического течения на мезоуровне являются трехмерные структурные элементы (мезообъемы), которые перемещаются по схеме „сдвиг + поворот“». В этой связи обсуждаемую модель геологической среды можно было бы назвать концепцией Пейве — Седова — Садовского — Панина. Но это уже тема отдельной публикации.

2. Полученные автором за последние два десятилетия результаты показывают, что в рамках среды Пейве — Седова — Садовского (или, см. выше, среды Пейве — Седова — Садовского — Панина), в которой движителем геологического или геофизического блока является его собственный момент, удастся в рамках единой концепции объяснить, «увязав воедино», многие геодинамические явления (см. статьи настоящего сборника). Таким образом, в геодинамике в настоящее время сложилась ситуация, аналогичная той, что соответствовала формальному введению в физику в 1925 г. для электрона собственного момента, который фактически спас закон сохранения энергии на микроуровне и тем самым превратился в спин элементарной частицы. Аналогия между спином элементарной частицы и введенным автором (вслед за В. А. Пейве и Л. И. Седовым) собственным моментом геологического блока не просто очевидна. Такая аналогия физически была обоснована А. Эйнштейном [56, с. 489, 496–497] в рамках корпускулярно-волнового дуализма Луи де Бройля [20, с. 244–246] (подробнее см. выше).

Тем не менее вопросы о том, где заканчивается микромир и начинается макромир, где заканчивается действие законов, объясняющих существование спина у элементарных частиц,

и начинают действовать законы, объясняющие волновое движение геологических блоков, пока остаются открытыми. Остается неясной и физика ответственного за такой дуализм на макроуровне природы волнового поля, в существовании которого не сомневался А. Эйнштейн [56]. Можно наметить два возможных в рамках *геодинамики* пути решения проблемы:

1. Листая старые журналы, автор натолкнулся на интересную статью в журнале «Техника молодежи» за 1982 г., в которой Л. Шипицын [66] проследивает существование волн де Бройля у частиц с увеличивающимися размерами, проводя аналогию между *микроволновой* и вихревой цепочкой Кармана в *макросреде*. Теория волнового движения среды как результат образования в ней вихревой цепочки Кармана описана А. Зоммерфельдом [67, с. 288–298] и может являться механической основой объяснения в рамках механики корпускулярно-волновой природы моментной геодинамики [16, 68], включая волновые движения, отвечающие вихревым геологическим структурам и геофизическим движениям.

2. А. Эйнштейн из-за чрезвычайной сложности проблемы неоднократно менял свою точку зрения относительно концепции эфира [69, с. 440–442]. Подводя итог его взглядам, Г. И. Шипов [70, с. 22–23] приходит к выводу: «В теории Эйнштейна имеется две реальности: пространство-время и материя. Материя выступает на фоне пространства-времени, искривляя его. Таким образом, пространство-время наделяется упругими свойствами, которые проявляются через искривление его геометрии. <...> Можно теперь утверждать, что согласно теории Эйнштейна физический вакуум — это пустое (без материи) пространство-время, обладающее упругими свойствами. Эти свойства проявляются тогда, когда в пустое пространство помещается некая масса. Вакуумные уравнения Эйнштейна являются чисто геометрическими и *не содержат никаких физических констант*».

Таким образом, приходим к выводу, что *упругие* свойства *вращающейся* блоковой среды в соответствии с общей теорией относительности А. Эйнштейна определяются, с одной стороны, самой средой, ее массой, с другой — далекодействующими геодинамическими полями, определяющими взаимодействие блоков между собой. В соответствии с теоретическими представлениями астрофизиков К. Барцело, М. Виссер, С. Либрати и др., «все эти величины, вызывающие искривление (пространства, или, по Эйнштейну — Шипову, его *упругость*. — **А. В.**), описываются *одним* физико-математическим объектом — *тензором энергии-импульса*» [71] (курсив наш. — **А. В.**). В таком случае вихревые геологические структуры и геофизические движения, происходящие внутри и на поверхности геосреды, в том числе и гравитационные аномалии в виде моментных по своей природе волн геоида [72, 73], должны быть ответственными за корпускулярно-волновой механизм геодинамики и по своей природе являться *гравитационно-геодинамическими*. Тогда становится понятным, почему в течение такого продолжительного отрезка времени, несмотря на титанические усилия, так и не смогли обнаружить ни гравитационные, ни тектонические (геодинамические) волны — они являются взаимосвязанными явлениями и определяются *единым гравитационно-геодинамическим тензором энергии-импульса*.

Литература

65. Панин В. Е. Основы физической мехомеханики // Физическая мезомеханика. — 1998. — № 1. — С. 5–22.
66. Шипицын Л. Волны де Бройля или волны Кармана? // Техника молодежи. — 1982. — № 5. — С. 20–21, 34.
67. Зоммерфельд А. Механика деформируемых сред. — М.: Иностран. лит., 1954. — 486 с.
68. Викулин А. В., Тверитинова Т. Ю. Моментная волновая природа геологической среды // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. — 2008. — № 6. — С. 16–19.
69. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 2. — М.: Наука, 1966. — 632 с.
70. Шипов Г. И. Теория физического вакуума. — М.: Кириллица-1, 2002. — 128 с.
71. Барцело К., Виссер М., Либрати С., Сонего С. Черные звезды, а не дыры // В мире науки. — 2009. — № 12. — С. 18–25.
72. Магницкий В. А. Внутренне строение и физика Земли / ред. А. О. Глико. — М.: Наука, 2006. — 390 с.
73. Викулин А. В. Физика Земли и геодинамика: учеб. пособие. — Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. — 463 с.

ЧАСТЬ V

**СЕЙСМОЛОГИЯ
И НАУКА
НА ДАЛЬНЕМ
ВОСТОКЕ
РОССИИ**

А. В. Викулин, Л. Г. Синельникова

Институт физики Земли АН СССР

НАЧАЛО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ* К 70-летию сейсмостанции «Петропавловск»

О первых годах инструментальной регистрации землетрясений на Камчатке известно немного: сейсмическая станция 2-го разряда в Петропавловске была организована Постоянной центральной сейсмологической комиссией (ПЦСК), начала регистрацию землетрясений в июле 1915 г. и проработала до января 1927 г., при этом материалы наблюдений по большей части утрачены [1, 6, 7, 12]. В то же время, просматривая петропавловские газеты за 1916–1930 гг., можно видеть часто встречающиеся и достаточно детальные описания землетрясений и деятельности вулканов, которые составлялись как со слов очевидцев, так и на основании данных сейсмологических наблюдений. Это подтверждает то, что первые наблюдатели вели большую общественно-просветительскую работу, распространяя знания о землетрясениях и вулканах. Некоторые из составленных ими макросейсмических описаний землетрясений не потеряли научного значения и в настоящее время.

В июле 1985 г. исполняется 70 лет со времени начала инструментальных сейсмологических наблюдений на Камчатке. В связи с этим рассмотрим более подробно путь становления этих наблюдений и деятельность первых наблюдателей сейсмостанции «Петропавловск».

Основные этапы образования и работы сейсмостанции в Петропавловске находим в «Деле сейсмической станции» [4], которое хранится в Государственном архиве Камчатской области. На с. 1 этого «Дела...» приведена копия письма Председателя ПЦСК академика Б. Б. Голицына губернатору Камчатской области, датированное 19.04.1914 г.: «Стремясь к всестороннему изучению сейсмических явлений, сейсмическая комиссия при Академии наук остановила свое внимание на Камчатке — единственной области в России, на которой и поныне не угасла еще вулканическая деятельность, сопряженная с землетрясениями своеобразного характера... Сейсмическую станцию 2-го разряда предполагается учредить на Камчатке, скорее в Петропавловске как центре культурной жизни. Сейсмическая станция, снабженная необходимым ассортиментом самопишущих приборов, должна иметь небольшое уединенное помещение в местности, вне людных улиц, вдали от усиленного движения и езды... участок земли мерою до 100 кв. сажен. Расходы будут приняты за счет комиссии. Для наблюдения за приборами наблюдатель должен ежедневно в заранее выбранный час посещать помещение станции... а также периодически отсылать в Петербург в Бюро ПЦСК сейсмограммы с записями землетрясений».

В соответствии с рекомендациями Б. Б. Голицына в июне 1914 г. представительная комиссия для организации сейсмостанции выбирает уединенный участок на окраине Петропавловска, «в 50 саженях (100 м) на северо-восток от здания служащих радиостанции, вверх по ключу». Заведывание станцией возлагается на чиновника радиотелеграфа А. А. Пурина. В приемной описи «Дела...» от 08.10.1914 г. читаем: «Здание состоит из комнаты аппаратной и прихожей размером 1,83 × 2,25 × 1,00 × 1,15 при высоте 1,50 саженей. Здание из железобетона с каркасом из балок с арматурой. Толщина стен 0,06, потолка 0,04 саженей. Полы бетонные с метлахскими плитками. Поверх потолка подсыпка земли толщиной 0,05 с одерновкой».

На одной из фотографий 1916 г., хранящейся в Камчатском областном краеведческом музее, рядом с домом служащих просматривается сейсмостанция, похожая на бункер, расположенный на склоне сопки. С помощью этой фотографии было определено, что на месте первой сейсмостанции в настоящее время расположено железобетонное строение, размеры которого в точности совпадают с размерами первой сейсмостанции. В районе строения осенью 1984 г. нами был найден осколок метлахской плитки, датируемый началом XX в. Таким образом, строение по ул. Радиосвязи между домами № 9 и 15 является помещением первой сейсмостанции (в настоящее время оно занято под частный гараж). Весной 1951 г. возле этого строения, которое в то время использовалось для хранения старых кинолент, был найден помятый барабан от регистра механического маятника Голицына.

* 38 (22). Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 102–106.

Об оборудовании первой станции узнаем из имеющейся в «Деле...» описи приборов, высланных ПЦСК в Петропавловск: «2 сейсмографа со штативами — 440 руб., 2 регистрационных аппарата с 2 запасными барабанами — 440 руб., контактные часы фирмы «Штрассер-Родэ» ~ 260 руб., 1500 листов бумаги (на 2 года) — 27 руб., 3 элемента лекланше с запасом нашатыря и цинков ~ 7 руб., 3 фунта звонковой проволоки — 2 руб. 70 коп. ...16 ящиков (68 пудов)».

Приборы прибыли в Петропавловск в мае 1915 г. К ним были приложены инструкции для установки и сейсмометрические таблицы. Начало регистрации сразу же показало, что помещение в первоначально построенном виде нельзя использовать для сейсмостанции, так как «зимой стены и пол покрывались льдом до 2 дюймов... весной проникают грунтовые воды... топка печей влияет на ход регистрира... сейсмограммы из-за сырости в помещении не склеиваются... копать пером свободно не снимается... на приборах появилась ржавчина». К 02.10.1915 г. здание сейсмостанции было реконструировано: «...осушено, построен чехол в виде крытой галереи из листовницы и железа, по дренажной трубе отведена вода, сделана отлогая крыша».

Первая сводка о записи землетрясения была отправлена Б. Б. Голицыну 18.07.1915 г. (старого стиля): «18 июля 01 ч 33 мин Гринвича продолжении часа сейсмографы описывали колебание почвы, максимальное отклонение на канале север — юг 24 мм, затем сдвинуло магниты, максимум не отмечен». Таким образом, дату 18 июля 1915 г. (по старому стилю) можно считать началом сейсмологических наблюдений на Камчатке. В 1985 г. им исполняется 70 лет.

В некоторых сводках встречается приписка наблюдателя: «Приборы без увеличения». По-видимому, наблюдатель не смог определить параметры сейсмографов (затухание, увеличение), поэтому к значениям амплитуд в донесениях следует относиться крайне осторожно.

В аппаратные журналы, которые велись аккуратно, записывались номера сейсмограмм, время пуска, остановки и профилактики приборов. В графе «Примечания» встречаются, например, такие записи: «Быстрые колебания, ощутимые всеми по шкале Росси — Фореля 3–4 балла. Ввиду большой частоты толчков с периодом около 0,25 с станция их не записала». Из аппаратных журналов, имеющихся в «Деле...», можно заключить, что наблюдения велись непрерывно с июля 1915 г. по декабрь 1917 г. Сейсмограммы за этот срок были отправлены А. А. Пуриным в Петербург в адрес ПЦСК. Однако при составлении атласа [1] сейсмограммы станции «Петропавловск» за 1915–1917 гг. не использовались. Это указывает на то, что сейсмограммы за этот срок утеряны.

Особо следует сказать о трудностях в работе первых наблюдателей.

В те годы задачей сейсмических станций 2-го разряда являлась запись землетрясений в сейсмоактивных областях. Эти станции оборудовались тяжелыми горизонтальными маятниками системы Голицына с механической регистрацией. Период собственных колебаний маятника составлял около 20 с, магнитное затухание — 0,3–0,5, увеличение — около 40, скорость регистрации — 30 мм/мин. Приборы с такой характеристикой могли обеспечить отчетливую запись удаленных землетрясений и поверхностных волн. Для регистрации близких землетрясений, характеризующихся короткими периодами, сейсмографы Голицына оказались малопригодными.

О службе времени из «Дела...» узнаем следующее. Контактные часы были установлены не в сыром помещении станции, а в 100 м от нее, в доме служащих радиотелеграфа, с ключом Морзе для пуска и остановки. «Зимой и осенью сигналы точного гринвичского времени получают из Японии по радиотелеграфу, летом сигналов нет... Морским секстантом выверен суточный ход часов с точностью ± 10 с». Хотя, как видно из сказанного, служба времени оставляла желать лучшего, надо отдать должное наблюдателю, который делал все, что было в его силах.

Наконец, был необходим фиксаж для сейсмограмм. Закопченные сажей сейсмограммы до сих пор закрепляют раствором светлого шеллака или канифоли в спирту. Отсутствие спирта на такие цели в период становления советской власти на Камчатке положило конец наблюдениям.

В мае 1918 г. А. А. Пурин передает сейсмостанцию служащему радиотелеграфа Асаевичу.

Август 1922 г. Из акта обследования сейсмостанции, который подписан краеведом Камчатки, инспектором Петропавловского высшего училища П. Т. Новограбленовым и командиром корабля «Свирь», узнаем, что «работа (станции) прекращена в 1918 г. (она и по сей день не работает из-за отсутствия денежных средств и необходимого материала (спирт, шеллак). Станция в запущенном состоянии, металлические части маятника и барабанов заржавели».

1923 г. После сильнейших землетрясений и цунами в феврале — апреле 1923 г. предпринимается попытка возродить сейсмическую регистрацию, на что указывают сообщения в газете «Полярная звезда» от 1 и 3 июня 1923 г. Однако регистрация была весьма непродолжительной.

Апрель 1924 г. На запрос вице-президента АН СССР академика В. А. Стеклова и заведующего сейсмическим отделом П. М. Никифорова о состоянии станции из Петропавловска отвечают, что «штативы приборов, маятники и фундамент имеют перекос, станция не работает».

Июль 1925 г. На заседании Камчатского губревкома выносится решение о том, чтобы контроль за работой сейсмостанции возложить на отдел народного образования, а руководство сейсмостанцией — на преподавателя П. Т. Новограбленова. С этого момента и до 1929 г. П. Т. Новограбленов делает попытку возродить регистрацию землетрясений. Он составляет сметы, описывает состояние аппаратуры, ведет многочисленную переписку, получает необходимые материалы, но денег для восстановления и содержания станции ему не выделяют.

1929 г. Куратором сейсмостанции «Петропавловск» назначается заведующий вновь открытой станцией «Владивосток» А.С. Уланов. Он подробно инструктирует П.Т. Новограбленова, в каждом письме просит прислать сейсмограммы для обработки, но, по-видимому, так ничего и не получает. В то же время, по сообщениям газеты «Полярная звезда» за 1928–1929 гг., сейсмостанция периодически работает. В 1928 г. П.Т. Новограбленов помещает в газете от 15.06.1928 г. обзорный очерк «Подземные силы Камчатки. Что надо знать о землетрясениях». Последнее сообщение П. Т. Новограбленова о камчатских землетрясениях помещено в газете «Полярная звезда» от 17.01.1929 г.: «13 января 1929 г. в 11 ч 02 мин землетрясение силою 5 баллов, перо север — юг заклинило, восток — запад регистрировал около 3 ч. Главная фаза колебаний была 3 мин 20 с, максимальная амплитуда 108 мм. Сейсмограмма хранится в Камчатском музее». К сожалению, ответ на запрос в Камчатский областной краеведческий музей о наличии этой сейсмограммы был отрицательным. По-видимому, сейсмограммы, которые были получены П. Т. Новограбленовым в 1928–1929 гг., также можно считать утерянными.

Последним документом «Дела...» является черновик письма П. Т. Новограбленова на сейсмостанцию «Владивосток», из которого следует, что он передал станцию т. Стришину.

1930–1936 гг. В документах Камчатского управления гидрометслужбы [5] сохранилась копия телеграммы в Хабаровский крайком, из которой узнаем, что «Сейсмическая станция прекратила наблюдения в мае 1933 г. по заключению экспедиции Академии наук, предполагавшей восстановить станцию в 1935 г.; необходимо поставить сейсмограф новейшей системы, также произвести капитальный ремонт пола, потерявшего горизонтальность». В этих документах содержится рапорт об осмотре сейсмостанции в декабре 1936 г. Помещение было занесено снегом. Это были последние документы 1930-х гг., которые нам удалось найти.

В 40-х г. начинается новая эпоха сейсмологических наблюдений на Камчатке. В декабре 1946 г. лаборатория вулканологии АН СССР открывает сейсмическую станцию в Ключах, оснащенную аппаратурой системы Никифорова. В 1952 г. на этой станции устанавливаются приборы СГК, СВК, ГСХ, ВСХ. Позднее, в 1958 и 1960 гг., с открытием сейсмических станций «Козыревск» и «Апахончич» создается сеть за слежением активности Ключевской группы вулканов [10, 12].

В 50-х гг. принимается решение открыть в Петропавловске новую станцию 1-го класса, опорную в системе единой сети сейсмических наблюдений. В марте 1951 г. при активном содействии Н. В. Шебалина в неудобном подвале гостиницы «Восток» была открыта сейсмостанция «Петропавловск» Института физики Земли АН СССР. Заведующий станцией Г. П. Чермных прикладывает много сил и энергии для выбора места и более удобного помещения для регистрации. Для станции выделяется помещение в цокольном этаже жилого здания по ул. Советской, д. 21. Одновременно велось строительство специального здания под сейсмостанцию по ул. Гарагина, д. 81а, куда станция и переезжает в 1960 г. С 1963 г. и по настоящее время работой этой станции руководит Л. Г. Синельникова.

В 1961 г. Тихоокеанской сейсмической экспедицией (ТСЭ) ИФЗ АН СССР совместно с Камчатской геолого-геофизической обсерваторией СО АН СССР, вошедшей в 1962 г. в Институт вулканологии СО АН СССР, создается камчатская региональная сеть сейсмических станций [14]. В течение почти 25 лет, с 01.11.1961 г. до настоящего времени, сейсмические наблюдения

на Камчатке осуществляются этой региональной сетью и сейсмостанцией «Петропавловск» ИФЗ АН СССР. Региональная сеть ведет детальные наблюдения за землетрясениями Камчатки и Командорских островов, телесеismicкая сейсмостанция «Петропавловск» регистрирует землетрясения всего мира и участвует в работе службы цунами.

Возвращаясь к деятельности первых наблюдателей, надо отметить, что она выходила за рамки их непосредственных обязанностей. Постоянно в местной печати появлялись их статьи, в которых население полуострова достаточно подробно информировалось о числе и особенностях ощутимых и зарегистрированных землетрясений, о цунами и деятельности камчатских вулканов. Читая эти описания, поражаешься, как хорошо, добросовестно, профессионально они сделаны. Ярким примером тому может служить составленное А. А. Пуриным [8] описание землетрясения 30.01.1917 г. с $M = 8,1$ на о. Беринга.

Наблюдателями проведена большая работа по сбору данных как о прошлых, так и о происходящих землетрясениях. Значительная часть собранных наблюдателями данных уже использовалась исследователями для сейсмического районирования Камчатки [2, 3, 13]. Некоторые из них не потеряли научной ценности и в настоящее время. Так, используются неизвестные ранее макросейсмические данные, составленные первыми наблюдателями, и переопределяется балльность в Петропавловске 30.01.1917 г., в пос. Калыгирь 03.02.1923 г. и, как следствие, предлагается новый вариант положения очагов сильнейших камчатских землетрясений 30.01.1917 г. с $M = 8,1$ и 03.02–24.02.1923 г. с $M = 8,5$ и $M = 7,7$ соответственно.

«19 декабря 1916 г. в 8 ч 55 мин (3 января 1917 г. по новому стилю. — А. В., Л. С.) во время урагана замечено три подземных толчка, коими поломаны трубы в некоторых домах Петропавловска, а в Колонии прокаженных (ныне район пос. Завойко. — А. В., Л. С.) разрушен дом сестры милосердия» [8]. Описание соответствует 7–8-балльному землетрясению. Сведения об этом землетрясении отсутствуют в наиболее полных сводках макросейсмических данных Камчатки [2, 3, 13]. В отчете «О сейсмическом районировании участка Кроноцкой ГЭС на Камчатке» (Петропавловск-Камчатский, 1968 г., Фонды ТЭС ИФЗ АН СССР), в котором впервые собрана большая часть всех сведений о землетрясениях Камчатки до 1961 г., вторая часть приведенного описания, касающаяся сообщения о разрушении дома, ошибочно приписана землетрясению 09.01.1917 г. Вероятно, вследствие этого в отчете интенсивность колебаний в Петропавловске при землетрясении 16.12.1916 г. занижена до 6 баллов, а событие 09.01.1917 г. в список землетрясений включено ошибочно.

Сотрудник отдела геомагнетизма ИФЗ АН СССР Ю. А. Сковородкин нашел в старых бумагах и передал С. А. Федотову «Аппаратный журнал Петропавловской на Камчатке сейсмической станции за январь месяц 1917 г.» и «Вопросный лист о землетрясениях» с данными о камчатском землетрясении 17 (30) января 1917 г., которое имело магнитуду $M = 8,1$. С. А. Федотов любезно предоставил эти материалы нам. Аппаратные журналы за 1915–1917 гг., которые хранятся в «Деле сейсмической станции» в Государственном архиве Камчатской области, и этот «Вопросный лист о землетрясениях» — по-видимому, единственные уцелевшие материалы сейсмологических наблюдений за 1915–1917 гг., своего рода реликвия камчатской сейсмологии. Копии этих материалов имеются в фондах сейсмостанции «Петропавловск» ИФЗ АН СССР.

Вопросный лист содержит описание землетрясения, составленное камчатским епископом Нестором: «Во время землетрясения (в Ключах) люди в испуге выбегали на улицу, матери схватывали детей и бежали с детьми. Некоторые падали на колени и молились богу. Коровы и собаки беспокоились... В некоторых домах разрушились дымовые трубы. На расстоянии более 400 верст (от Ключей до Мильково) ощущалось сильное землетрясение, сопровождавшееся вышеописанными мною явлениями». В части, касающейся пос. Ключи, это описание известно из работ [6, 11] и соответствует сотрясениям 5–6 баллов [2, 3, 13]. Однако вторая часть, касающаяся описания сотрясений на территории между пос. Ключи и Мильково, по-видимому, неизвестна. Из нее, в частности, следует, что в Мильково 30.01.1917 г. сотрясения достигали силы 4–5 баллов.

Несомненно, важным событием можно считать выход в свет в 1917 г. в Петропавловске брошюры А. А. Пурина «Землетрясения Камчатки и их регистрация» [8]. Брошюра написана ясным языком, читается легко и с большим интересом. В доступной форме излагаются новей-

шие по тем временам представления о причинах, вызывающих извержения вулканов и землетрясения, и их связи с геологическими процессами внутри Земли. Землетрясения классифицируются на вулканические, обвальные и тектонические. Для последних определяется очаг как «место нарушения равновесия». Кроме того, приводится много сведений о землетрясениях и извержениях вулканов до 1917 г., в том числе о более чем 70 землетрясениях, зарегистрированных Петропавловской станцией в 1915–1916 гг.; описывается устройство сейсмической станции в Петропавловске и приводится описание шкалы Росси — Фореля; дается подробное описание сильнейшего землетрясения 30.01.1917 г. с $M = 8,1$ в разных пунктах Камчатки.

Наибольший интерес вызывает то место брошюры, где обсуждаются вопросы, связанные с предсказанием «времени возникновения землетрясений». Поражает уверенность автора в том, что «если не предсказывать, то по крайней мере наметить пределы времени, между которыми следует ожидать наступление крупной катастрофы, можно и теперь». Такая постановка вопроса в 1917 г. намного опередила свое время.

Дело, начатое А. А. Пуриным, продолжал П. Т. Новограбленов. О жизни и деятельности этого замечательного человека, очень много сделавшего для краеведения Камчатки, достаточно подробно написал А. А. Харитановский [16]. Здесь лишь отметим, что составленные П. Т. Новограбленовым подробные описания землетрясений и цунами в 20-х гг., в особенности катастрофических землетрясений и цунами 1923 г., внесли большой вклад в изучение сейсмичности Камчатки.

Работая с петропавловскими газетами старых лет, мы обнаружили также сведения о явлениях на поверхности моря у берегов Камчатки, которые не учтены в сводках сведений о цунами [9] и могут оказаться полезными.

«Облуковино (ныне район Усть-Большерецка. — **А. В., Л. С.**). 10 октября утром (стиль старый. — **А. В., Л. С.**) при тихой погоде вода в море поднялась сажени на 3, а через час поднялась выше своего нормального уровня сажень до 5 (11 м. — **А. В., Л. С.**); образовались огромные валы-волны и затопили всю кошку. Продолжались эти воды три дня, после чего вода пошла на убыль, и теперь вошла в свое нормальное состояние» («Камчатский листок» от 22.10.1917 г.).

«В ночь с 27 на 28 ноября с 3 до 4 ч утра ощущалось плавное колебание почвы. Этим и объясняется небывалый прилив воды в Ковше (район рыбного порта г. Петропавловска-Камчатского. — **А. В., Л. С.**)» («Известия Камчатского областного народно-революционного комитета» от 30.11.1922 г.).

Хочется еще раз подчеркнуть, что организация сейсмостанции, перестройка ее помещения проходили в крайне тяжелых условиях такой далекой в те времена Камчатки. Несмотря на это, процесс становления сейсмических наблюдений на Камчатке прошел очень быстро. Именно благодаря этому мы и располагаем в настоящее время достаточно детальными данными о камчатских землетрясениях 1915 и последующих годов. Роль первых наблюдателей станции А. А. Пурина и П. Т. Новограбленова трудно переоценить.

К 1915 г. мировая сеть насчитывала 60 сейсмических станций [15], причем примерно пятая часть приходилась на станции в России [1]. Оснащенная лучшими по тем временам сейсмографами Голицына, российская сеть сейсмических станций занимала передовое место в мире. Свой вклад в общее дела вносила и самая восточная в России станция в Петропавловске.

Считаем приятным долгом выразить признательность С. А. Федотову, Н. В. Шебалину и П. И. Токареву за ряд ценных замечаний и дополнений. Авторы признательны также сотрудникам Государственного архива Камчатской области, Камчатского областного краеведческого музея и Центра научно-технической информации за помощь при подборке материалов, за консультации и изготовление ксерокопий материалов.

Литература

1. *Атлас землетрясений в СССР*. — М.: АН СССР, 1962. — 338 с.
2. *О сейсмическом микрорайонировании территории Петропавловска-Камчатского* / А. В. Горяев, И. А. Ершов, Ф. А. Кириллов [и др.] // *Вопр. инженерной сейсмологии*. — 1963. — Вып. 8. — С. 3–60.
3. *Камчатка и Курильские острова* / А. В. Горячева, Ф. А. Кириллов, Н. В. Кондорская [и др.] // *Сейсмическое районирование СССР*. — М.: Наука, 1968. — С. 408–433.

4. *Дело* сейсмической станции // Гос. архив Камчатской области. — Ф. 372.
5. *Камчатское* управление гидрометслужбы // Гос. архив Камчатской области. — Ф. 176.
6. *Никифоров П. М.* Сейсмология // Тихий океан: русские науч. исслед. — Л.: АН СССР, 1926. — С. 77–83.
7. *Новый* каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. — М.: Наука, 1977. — 536 с.
8. *Пурин А. А.* Землетрясения Камчатки и их регистрация. — Петропавловск-Камчатский, 1917. — 24 с.
9. *Соловьев С. Л.* Основные данные о цунами на тихоокеанском побережье СССР 1737–1976 гг. // Изучение цунами в открытом океане. — М.: Наука, 1978. — С. 61–136.
10. *Токарев П. И.* Вулканические землетрясения Камчатки. — М.: Наука, 1981. — 164 с.
11. *Уланов А. С.* К материалам по сейсмологии Дальнего Востока. — Владивосток, 1931. — С. 101–137.
12. *Федотов С. А., Багдасарова А. М.* Сейсмичность Камчатки // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. — Новосибирск: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1974. — С. 7–34.
13. *Камчатка* и Командорские острова / С. А. Федотов, А. А. Гусев, Л. С. Шумилина [и др.] // Сейсмическое районирование территории СССР. — М.: Наука, 1980. — С. 269–283.
14. *Федотов С. А.* 20 лет Института вулканологии (краткий очерк возникновения и развития, достижения, перспективы) // Вулканология и сейсмология. — 1983. — № 2. — С. 98–105.
15. *Филипас С. Ф.* Современная сейсмическая активность западной части Тихого океана. — М., 1980. — Деп. в ВИНТИ № 28–80, 1980.
16. *Харитановский А. А.* Выдающийся натуралист Камчатки // Вопр. географии Камчатки. — 1963. — № 1. — С. 41–58.

А. В. Викулин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВЕХИ*

Эта тема постоянно присутствует в научных и научно-популярных изданиях по сейсмологии и сейсмическому риску. По-видимому, наиболее объемно впервые эта тема, основанная на японских данных, прозвучала в книге Т. Рикитакэ [1979]. Впоследствии эту тему на камчатском материале развил автор в книге [Викулин, Дроздюк, Семенец, Широков, 1997]. В настоящей статье тема влияния землетрясений на жизнь людей анализируется на разных масштабных уровнях: весь мир в целом, Япония, Россия и Камчатка. Приведенный материал, на взгляд автора, почти не требует пояснений — в любой стране или области, территория которой является сейсмически активной, неизбежно наступает момент, когда сейсмичность начинает влиять на жизнь общества, вынуждая разрабатывать мероприятия по защите населения. За «занавесом» этой темы скрываются не только многочисленные человеческие жертвы и большие материальные потери [Соболев, 1993; Шебалин, 2003], пути поиска их уменьшения [Викулин, Семенец, Широков, 1989], озарения и научные открытия, но и крушение основ целых научных направлений (см., например, Н. В. Шебалин [Коммунист, 1989. № 10. С. 82–89]).

SEISMIC LANDMARK

The subject has been permanently present in seismic and popular science publications on seismology and seismic hazard. Apparently, this subject, based on the Japanese data, was touched upon for the first time, in the book de T. Rikitake [1979]. This subject was advanced later by the author [Vikulin et. al., 1997] basing on Kamchatkan data. The impact of earthquakes on people's life in analysed in the present publication at miscellaneous scale levels: planet as a whole, Japan, Russia and Kamchatka. Contents of the paper, in author's opinion, almost does not need any explanations. In any country or area, the territory of which is seismically active, inevitable occurs the moment. When seismicity starts to influence the life of society, forcing to elaborate measures on protection of the population. Behind the «curtain» of this subject are hidden not only numerous human victims and life material losses [Sobolev, 1993; Shebalin, 2003], ways to their reduction [Vikulin et. al., 1997; ets.], inspiration and scientific discoveries, but also collapse of fundamentals and scientific directions (see, for example N. W. Shebalin [J. Communist, 1989, № 10. P. 82–89])

Земля как планета

[Викулин, Дроздюк, Семенец, Широков, 1997; Оноприенко, 2002;
Проблемы..., 2000; Соболев, 1993; Шебалин, 2003]

100–70 млн лет назад в юго-западной части Тихого океана произошло разрушение возвышенности Дарвина. При этом имели место массовые излияния базальтов гигантских объемов, которые сопровождалась вдоль всей окраины океана многочисленными (непрерывными) извержениями вулканов, сильнейшими землетрясениями и катастрофическими цунами. Это была катастрофа планетарного масштаба. В результате сформировалась окраина, в пределах которой начался современный тектонический процесс.

3600 лет назад произошел взрыв вулкана Санторин в Эгейском море, сопровождавшийся многочисленными сильными землетрясениями и цунами. По мнению многих ученых, эти явления привели к гибели минойской цивилизации. Число погибших, по нашим оценкам, составило около 10 млн человек. Некоторые ученые связывают с этим событием гибель Атлантиды.

132 г. Китайский астроном Чжан Хэн создал первый в мире сейсмический прибор, способный определять направление на очаг землетрясения.

854–893, 1319 гг. Серия катастрофических землетрясений сопровождалась многочисленными жертвами и большими разрушениями, что привело к изменению мест расположения столицы Армении (Двин, Ани, Ереван).

IX–X вв. Появились первые сообщения о землетрясениях в Европе.

XI в. Крупнейшее научное достижение макросейсмологии этого периода: арабские ученые установили, что сейсмические проявления в разных, порой достаточно удаленных друг от друга местах могут относиться к одному и тому же землетрясению.

* 39 (144, 234). Проблемы сейсмичности Дальнего Востока: сб. науч. ст. / под ред. А. В. Викулина. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. С. 276–281; Мир вихревых движений: моногр. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ: КГТУ, 2008. С. 194–209.

10 мая 1230 г., 7 часов утра. Сильные сотрясения «по всей Земле в один час» ощущались в Киеве, Переславле, Новгороде, Суздале, Владимире-Суздальском и других местах. Автор Лаврентьевской летописи, в которой было приведено сообщение о землетрясении в этих городах, по сути, повторил открытие арабских ученых.

XIV–XV вв. Серия сильных землетрясений, захвативших многие области в Европе: Виллах (Австрия), 1348 г.; Базель (Швейцария), 1390 г.; Восточные Пиренеи, 1427 г. — привела к серьезному росту интереса европейцев к землетрясениям.

XV–XVI вв. Появление первых специализированных трактатов о землетрясениях.

23 января 1556 г. Сильнейшее по количеству жертв за всю историю человечества землетрясение в Шэнси (Китай), в результате которого погибло около 830 тыс. человек.

1 ноября 1755 г. Землетрясение и цунами в Лиссабоне, при которых погибло 30–70 тыс. человек, привело к новому росту общественного интереса в Европе к проблемам сейсмологии. Сами португальцы оценивают число жертв в 40 тыс. человек. Начиная с этого времени многочисленные упоминания о землетрясениях обнаруживаются в самых различных архивах стран Южной и Центральной Европы.

Первая половина XIX в. Сложился определенный стереотип «хорошего» каталога землетрясений, который отличает достаточно четкое описание основных событий и явлений при землетрясении, более или менее аккуратная пространственная привязка событий и ссылки на первоисточники сообщений.

Вторая половина XIX в. К этому времени накопился огромный объем макросейсмических данных, что и привело к созданию первых макросейсмических шкал М. Росси (1875) и Ф. Фореля (1881). Созданы первые в современном понимании сейсмографы.

18 апреля 1889 г. С помощью горизонтальных маятников, следящих за периодическими колебаниями отвесной линии под влиянием лунно-солнечного притяжения, геодезист Ребер-Паншиц зарегистрировал в Потсдамской обсерватории сейсмические волны, пришедшие от землетрясения в Японии, на удалении около 9000 км. Тем самым была доказана возможность регистрации землетрясений на больших расстояниях и стало очевидно, что для записи землетрясений и изучения процессов, протекающих в их очагах, необходимо создавать сети сейсмических станций.

1896–1898 гг. Создана первая сеть сейсмических станций в Японии, оснащенных сейсмографами Милна.

1902 г. Б. Б. Голицыным разработан гальванометрический метод регистрации землетрясений с электродинамическим преобразованием перемещений маятника в электрические токи, определивший направление развития сейсмометрии в мире.

25 января 1906 г. Сильнейшее землетрясение, разрушившее Сан-Франциско (США). Анализ последствий этого землетрясения позволил Ф. Рейду в 1910–1911 гг. сформулировать положения, которые впоследствии были положены в основу теории очага землетрясения.

18 февраля 1911 г. Сильнейшее землетрясение на Памире. Анализ сейсмограммы этого землетрясения, полученной на сейсмической станции Пулково (вблизи Санкт-Петербурга), позволил Б. Б. Голицыну в 1915 г. предложить способ определения величины сейсмической энергии, выделяющейся в очагах землетрясений.

1911 г. Состоялся съезд Международной сейсмологической ассоциации в г. Манчестер (Англия), на котором Б. Б. Голицын выступил с *серией* докладов: «Новая организация сейсмической службы в России», «Об определении положения эпицентра землетрясения по наблюдениям одной сейсмической станции», «О вертикальном сейсмографе с гальванометрической регистрацией», «О результатах наблюдений с вертикальным сейсмографом и об определении угла выхода сейсмической радиации», «О рациональной динамической шкале для оценки макросейсмических движений», — которые, по сути, обозначили основные направления развития всей мировой сейсмологии в XX в.

1912 г. «Лекции по сейсмометрии» Б. Б. Голицына, прочитанные и написанные по случаю подготовки научных сейсмологических кадров, переведенные и опубликованные во многих странах, оказали решающее влияние на становление и развитие мировой сейсмологии в XX в.

Первая половина XX в. Завершение создания мировой сети сейсмических станций позволило в 1945 г. Б. Гутенбергу ввести в рутинную практику сейсмометрических исследований определение магнитуды землетрясения.

60–70-е гг. Во многих странах создаются геофизические полигоны с целью изучения физики очага землетрясения и его прогноза.

4 февраля 1975 г. Произошло сильное землетрясение, разрушившее г. Ханченг (Китай). Этому землетрясению предшествовал достаточно длительный процесс изучения и анализа предвестников землетрясений. Впервые в мировой практике оно было предсказано, что позволило избежать больших человеческих жертв.

27 июля 1976 г. Произошло сильное землетрясение, разрушившее многомиллионный промышленный г. Таньшань. Число жертв составило около 650 тыс. человек. Это землетрясение, происшедшее в соседней (по отношению к Ханченгскому землетрясению 1975 г.) провинции Китая, которому также предшествовал длительный этап изучения предвестников землетрясений, тем не менее не было предсказано.

24 декабря 2004 г. Землетрясение Суматра в Индонезии и возникновение цунами привели к гибели более 300 тыс. человек в Индонезии, Индии, Таиланде и Австралии.

Резюме. Несомненно, тот гигантский прогресс, который имел место в науке и технике в течение последних веков, в том числе в сейсмологии и сейсмостойком строительстве, тем не менее оказался недостаточным для построения надежных схем прогноза сейсмических бедствий и разработки методов защиты от них. Требуются новые, более действенные усилия мирового научно-технического сообщества, которые, вне всякого сомнения, должны быть объединены единой планетарной программой исследований стихийных бедствий.

Япония

[Викулин, Викулина, 1989; Викулин, Дроздюк, Семенец, Широков, 1997; Проблемы..., 2000; Рикитакэ, 1979; Шебалин, 2003]

27 ноября 684 г. Произошло первое сильное землетрясение, сведения о котором содержатся в известном каталоге японских землетрясений, составленном Ф. Омори: «Сильное землетрясение в префектурах (с запада на восток) Эхиме, Коти, Токусима, Вакаяма, Нара, Миэ, Айти и Сидзуска. Особенно сильными землетрясения были в префектуре Коти. Возникло цунами, которое было наиболее интенсивным на побережье префектуры Коти. Около 12 км² земли ушло под воду вместе с двумя деревнями. Где это произошло, неизвестно, но, возможно, на побережье залива Тоса, в районе бухты Урадо».

Из приведенного описания видно, что область, затронутая землетрясением, простирается не менее чем на 600–700 км.

22 февраля 1880 г. Достаточно слабое ($M = 5,4$, повреждены дымовые трубы) землетрясение в Июкогаме послужило, тем не менее, толчком к созданию *сейсмологического общества в Японии*.

28 октября 1891 г. Сильное ($M = 8,4$) Нобийское землетрясение, унесшее жизни 7 273 человек и разрушившее 142 177 зданий, стимулировало образование *Императорского комитета по изучению землетрясений*.

1 сентября 1923 г. Катастрофическое ($M = 8,2$) землетрясение в Канто. Горизонтальные перемещения при землетрясении в районе Токио достигали 2 м и более, интенсивность колебаний грунта доходила до 8–9 баллов по японской шкале JMA. Разрушена и сожжена столица Японии — г. Токио, погибло 142 807 человек, ранено 104 000 человек, сгорело около 600 000 зданий. Через два года после этого землетрясения правительство Японии учредило *Сейсмологический институт при университете г. Токио*.

20–60-е гг. Произошла серия сильнейших землетрясений в Японии, сопровождавшихся многочисленными жертвами и большим материальным ущербом.

7 марта 1927 г. В результате землетрясения в Танго погибло 3 017 человек, разрушено и сожжено 15 594 дома.

1944–1945 гг. Землетрясения Тонанкай и Микава унесли жизнь 2 959 человек, разрушили 46 950 домов, цунами смыло 3 059 строений.

21 декабря 1946 г. Землетрясение Нанкай, в результате которого погибло 1 443 человека, разрушено и смыто цунами 4 049 домов и строений.

4 марта 1952 г. Землетрясение вблизи о. Хоккайдо, в результате которого погибло 33 человека, смыто цунами 92 человека, разрушено 615 домов.

16 июня 1964 г. Землетрясение разрушило г. Ниигата.

Эти катастрофы привели к тому, что в начале 60-х гг. была разработана общенациональная программа исследований по прогнозу землетрясений. В 1963 г. создается подкомитет по предсказанию землетрясений. Наконец, в 1964 г. правительство принимает решение о финансировании долгосрочной программы работ по поиску предвестников землетрясений.

17 июня 1973 г. Сильное ($M = 7,9$) землетрясение с очагом на Южных Курилах (т. е. фактически в России), в результате которого на севере о. Хоккайдо были небольшие жертвы и незначительные разрушения. Тем не менее в Японии создается новая программа, включающая оснащение аппаратурой нового типа. Расходуется значительные средства на обучение населения действиям при сильных землетрясениях.

16 мая 1978 г. Сильное ($M = 7,8$) землетрясение Токати-оки, в результате которого значительно пострадала северная часть Японии. На правительственном уровне было предложено сконцентрировать больше усилий на проблеме прогноза землетрясений. Общественность требует не исследований по предсказанию землетрясений, а реальных прогнозов, где это возможно. Для обработки данных по предвестникам создано три общенациональных центра.

17 января 1995 г. Сильное ($M = 7,2$) землетрясение в Кобэ. Погибло более 5 300 человек, ранено 27 тыс. человек, лишились крова 300 тыс. человек, разрушено 11 тыс. домов.

Японское правительство отказалось от международной помощи. Это было сделано не только из гордости, но и от сознания того, что созданная на государственном уровне мощная система по ликвидации последствий от стихийных бедствий сработает четко и быстро. Действительно, в очень короткое время были восстановлены все поврежденные транспортные магистрали и морской порт, крупнейший не только в Японии, но и в мире. Факты свидетельствуют — Кобэ выстоял.

Сейсмические «достопримечательности» и прогноз (Япония)

[Викулин, 1992, 2003; Викулин, Викулина, 1989]

В пределах желоба Нанкай в 684–1946 гг. произошло 15 землетрясений с $M \geq 7,9$, расположение очагов которых обнаруживает ряд характерных особенностей (рис. 1), а именно:

1. Сейсмофокальный объем можно разбить на три зоны, границы которых фиксированы во времени. Размеры зон примерно равны по протяженности и составляют 270 ± 30 км.

2. Очаги землетрясений объединяются в цепочки, в пределах которых они мигрируют из одной зоны в другую в направлении с северо-востока на юго-запад. При этом в пределах одной миграционной цепочки очаги землетрясений захватывают две или три зоны.

3. Интервалы времени между землетрясениями в миграционной цепочке изменяются в пределах от нуля (в случае землетрясений 1605 и 1707 гг., представленных двумя практически одновременными толчками с очагами, расположенными в соседних зонах) до одного дня (23–24.12.1854 г.), 3–4 лет (1096 и 1099 гг.) и 23 лет (1923, 1944 и 1946 гг.).

4. Повторяемости землетрясений в пределах каждой из зон близки и в среднем равны одному такому событию в течение $T_1 = 128 \pm 44$ г.

5. В пределах каждой из зон очаги землетрясений мигрируют в сторону береговой линии. Значения скоростей миграции для каждой зоны близки друг другу, составляя в среднем $V_1 = 0,17 \pm 0,04$ км/год.

Выявленные особенности пространственно-временного распределения очагов землетрясений с $M \geq 7,9$ позволили построить прогноз для желоба Нанкай. Этим прогнозом определяется не только вероятный временной интервал следующих таких землетрясений (2070 ± 40 лет), но и их макросейсмический эффект, который по шкале MSK-64 должен быть на $1,0 \pm 0,5$ балла больше, чем при последних сильнейших землетрясениях 1923, 1944 и 1946 гг.

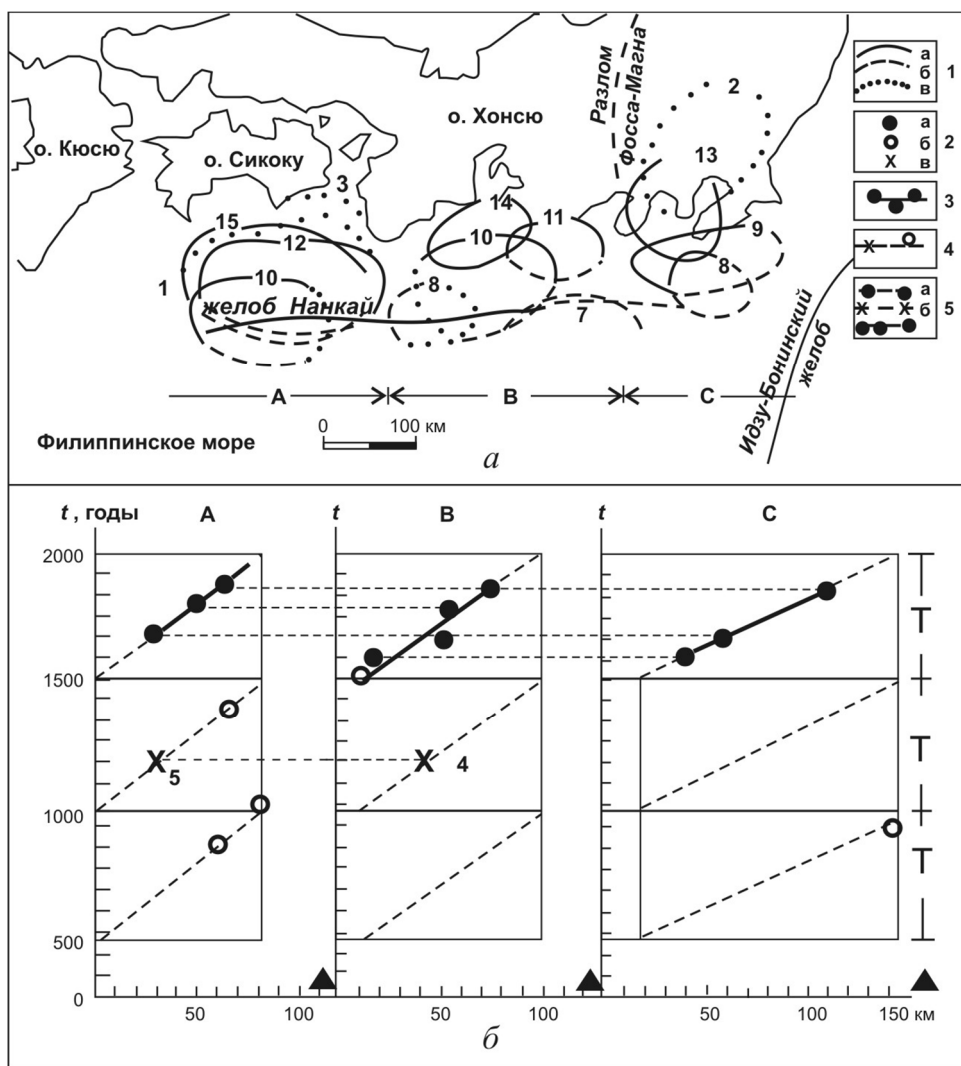


Рис. 1. Расположение очаговых областей землетрясений 684–1946 гг. с $M \geq 7,9$ в районе желоба Нанкай (а) и их пространственно-временная карта (б):

1 — уверенные (а), менее уверенные (б) и вероятные (в) участки границ очаговых областей землетрясений; 2 — уверенные (а), менее уверенные (б) и вероятные (в) значения, определяющие величину расстояния от оси желоба до ближайших к берегу участков границ очаговых областей землетрясений; 3 — миграционные цепочки, рассчитанные для каждой из трех зон (А, В, С) методом наименьших квадратов и объединяющие очаговые области землетрясений 1605–1946 гг.; 4 — такие же цепочки, продолженные в интервале времени 648–1498 гг.; 5 — пары (а) и тройки (б) землетрясений. Цифры 1–15 обозначают следующие землетрясения: 1 — 27.11.684 г., $M = 8,0-8,4$; 2 — 818 г., $M = 7,9$; 3 — 26.08.887 г., $M = 8,6$; 4 — 21.02.1099 г., $M = 8,0$; 5 — 17.12.1096 г., $M = 8,4$; 6 — 03.08.1361 г., $M = 8,4$; 7 — 20.09.1498 г., $M = 8,6$; 8 — 31.01.1605 г., $M = 7,9$; 9 — 31.12.1703 г., $M = 8,2$; 10 — 28.10.1707 г., $M = 8,4$; 11 — 23.12.1854 г., $M = 8,4$; 12 — 24.12.1854 г., $M = 8,4$; 13 — 01.09.1923 г., $M = 8,2$; 14 — 07.12.1944 г., $M = 8,0$; 15 — 21.12.1946 г., $M = 8,0$

В частности, для столицы Японии г. Токио ближайшее землетрясений с $M \geq 7,9$ по этому прогнозу ожидается в 2051 ± 44 г. При этом город, как и при предыдущем землетрясении Канто в 1923 г., будет фактически располагаться в очаговой области прогнозируемого землетрясения, что определит колебания при землетрясении интенсивностью 9–10 баллов по шкале MSK-64 или до 8–9 баллов по принятой в Японии шкале JMA. По-видимому, наиболее близким аналогом по расположению прогнозируемого для района г. Токио сильнейшего землетрясения может являться землетрясение 818 г. ($M = 7,9$), описание которого, согласно каталогу Ф. Омори, гласит: «Сильное землетрясение в префектурах Токио, Сайтама, Ибараки, Гимма, Тотиги. Цунами в заливе Сагами».

Россия

[Викулин, Семенец, Широков, 1989; Ломоносов, 1986; Медведев, 1968; Новый..., 1977; Оноприенко, 2002; Проблемы..., 2000; Шебалин, 2003; Уломов, Шумилина, 1998]

2000 г. до н. э. В это время на территории бывшего СССР произошли первые землетрясения, отмеченные в Новом каталоге землетрясений: в Западной Туркмении с $M = 7,1$, сильно разрушившее г. Ак-Тепе, и в Прибайкалье с $M = 7,2$, выявленное и датированное по сейсмодислокации во второй половине XX в.

1757 г. В августе этого года выходит в свет работа М.В. Ломоносова, в которой автор высказал свои взгляды на геологические процессы и попытался дать объяснение причинам землетрясений, предложив одну из первых в мире их классификацию по четырем типам.

8 июня 1887 г. Произошло сильное ($M = 7,3$) землетрясение, полностью разрушившее г. Верный (ныне г. Алма-Ата, Средняя Азия). Основной толчок в течение 5 минут сопровождался 5-балльным форшоком, что вынудило многих спящих уже жителей покинуть дома и тем самым спастись. Это землетрясение было тщательно обследовано геологом И. В. Мушкетовым (1850–1902), по предложению и председательством которого в этом же году в Императорском русском географическом обществе создается *Сейсмическая комиссия*. В 1890 г. она разрабатывает *программу наблюдений за землетрясениями*.

1892–1893 гг. Сначала в Морской астрономической обсерватории г. Николаев (1892), а затем в Харьковской и Юрьевской астрономических обсерваториях (1893) при университетах начинают работу первые три сейсмические станции в России.

1893 г. Под редакцией И. В. Мушкетова был издан «Каталог землетрясений Российской империи» (авторы И. В. Мушкетов, А. П. Орлов), который включал перечень и описание землетрясений в России и сопредельных государствах с древнейших времен. Каталог содержит сведения о 2574 землетрясениях и широко используется сейсмологами вплоть до наших дней.

4 февраля 1898 г. В Петербургской академии наук состоялось первое заседание Комиссии по организации наблюдений над сейсмическими явлениями, на котором присутствовали представители Академии наук, Русского географического общества, Главной физической обсерватории и Военно-топографического отдела.

Комиссия признала необходимым:

1) учредить при Академии наук для руководства сейсмическими наблюдениями в России постоянную сейсмическую комиссию при участии российских университетов, Русского географического общества, Военно-топографического отдела Главного штаба и Главного гидрографического управления;

2) для выбора аппаратуры для сейсмических станций произвести сравнительные испытания существующей аппаратуры;

3) организовать сейсмические наблюдения в Иркутске и Тифлисе.

На следующем заседании комиссии было предложено организовать сейсмические наблюдения во Владивостоке, Хабаровске, Томске, Омске, Екатеринбурге, Верном, а при Тифлисской, Ташкентской и Иркутской обсерваториях — *сеть пунктов (по сути, локальные сети сейсмических станций)*, оборудованных простейшими сейсмоскопами.

25 января 1900 г. В России создается Постоянная центральная сейсмическая комиссия (ПЦСК), в работе которой самое активное участие принимает физик Б. Б. Голицын (1862–1916). Центральное бюро ПЦСК, возглавляемое Б. Б. Голицыным, начинает реализовывать проект организации сейсмической службы, инициатором и вдохновителем которой он сам и являлся.

1910 г. Б. Б. Голицын добивается ассигнования на оборудование сейсмических станций и утверждения *постоянного бюджета* ПЦСК. Кроме того, отпускаются значительные средства на изготовление сейсмографов системы Голицына для станций первого и второго классов и на строительство специальных павильонов на сейсмических станциях (сейчас — Государственный заказ). Для станций первого класса изготавливаются семь комплектов горизонтальных и вертикальных сейсмографов с магнитным затуханием и гальванометрической регистрацией системы Голицына. Для сейсмических станций второго класса Б. Б. Голицыным разрабатываются тяжелые маятники с механической регистрацией. Станции снабжаются превосходными регистрирующими аппаратами и вспомогательным оборудованием для определения их постоянных.

Приобретаются контактные маятниковые часы высокого качества. Начинается строительство специальных зданий и павильонов для установки аппаратуры на Центральной сейсмической станции в Пулково, а также на станциях в Баку, Иркутске, Ташкенте, Тифлисе, Екатеринбурге, Кабанске, Самарканде, Боржоме, Оше, Пятигорске и других городах.

1911 г. Для подготовки научного персонала станций Б. Б. Голицын в 1911 г. впервые прочел свои знаменитые «Лекции по сейсмометрии».

20-е гг. Восстановление сейсмической службы в СССР после революционных преобразований возглавил ученик Б. Б. Голицына профессор П. М. Никифоров (1884–1944), руководитель сейсмического отдела Физико-математического института АН СССР.

22 октября 1926 г. Произошло землетрясение в Ленинакане. В 44 селах пострадало 6 018 хозяйств, было полностью разрушено 4 246 домов, полуразрушено — 985, частично разрушено — 739. В селах погибло 355, ранено 387 человек, а в Ленинакане погибло 15 и ранено 100 человек. Были полностью разрушены 12 деревень и 15 пострадали частично. В Ленинакане остались без крова 57 000, а в селах — 93 750 жителей. Результаты проведенного обследования показали, что в Ленинакане разрушены полностью 40 % домов, частично — 35 %, легко — 25 %.

1927 г. Создается Геофизический институт Академии наук СССР (ныне Институт физики Земли Российской АН — ИФЗ РАН). Первым директором института стал О. Ю. Шмидт. До настоящего времени все работы по регистрации землетрясений в России проводятся под научным руководством Института физики земли РАН.

1938 г. Г. С. Горшковым разработана первая карта общего сейсмического районирования территории СССР. В последующем такие карты совершенствовались в 1963, 1978 и 1997 гг.

5 октября 1948 г. Произошло землетрясение, полностью разрушившее г. Ашхабад и рядом расположенные населенные пункты. В результате землетрясения погибло около 100 тыс. человек. На изучение последствий этого землетрясения уехали практически все сейсмологи Геофизического института.

Это землетрясение послужило началом *качественного* (скачкообразного) изменения отношения государства к работам по изучению землетрясений. В России и республиках бывшего СССР начался заметный подъем сейсмологических исследований. Начало процесса, как это было и раньше во многих странах, связано именно с тяжелейшими, катастрофическими последствиями Ашхабадского землетрясения.

1949 г. После Ашхабадского землетрясения были отпущены значительные средства на развитие сети сейсмических станций СССР и на научные исследования по сейсмологии как в Москве, так и во многих периферийных научных центрах. В результате в Средней Азии (в городах Гарм и Талгар), а впоследствии и в других сейсмоактивных регионах России создаются комплексные сейсмологические экспедиции для изучения землетрясений.

Удивительным образом этот период совпал с рядом крупных научных событий, из которых можно выделить три: создание Ч. Рихтером и Б. Гутенбергом в США и внедрение в отечественную сейсмологическую практику шкалы магнитуд; разработка С. В. Медведевым шкалы макросейсмической интенсивности первого поколения; открытие связи между магнитудой и макросейсмическими характеристиками очага землетрясения, выполненное почти одновременно рядом ученых.

4 ноября 1952 г. Произошло катастрофическое ($M_S = 8,5$, $M_{LH} = 9,0$, $H_W = 9,0$) Камчатское землетрясение. Цунами смыт г. Северо-Курильск. Погибло около 3000 человек. Все данные по этому землетрясению были рассекречены только в канун 50-летней годовщины этой трагедии — в самом начале XXI в.

Землетрясение обратило внимание правительства СССР на проблемы сейсмо- и цунами-опасности Дальнего Востока. В результате в конце 1950 — начале 1960-х гг. на Дальнем Востоке были созданы региональные сети сейсмических станций, а впоследствии в крупных городах Дальнего Востока — Южно-Сахалинске, Владивостоке, Хабаровске, Петропавловске-Камчатском, Магадане и других были основаны научно-исследовательские институты, которые в настоящее время объединены в рамках Дальневосточного отделения РАН. Это привело к созданию на Дальнем Востоке России мощного научного центра, способного самостоятельно решать крупные научно-исследовательские проблемы.

1957 г. Создается Сибирское отделение АН СССР. Начинается ускоренное развитие науки на Дальнем Востоке СССР.

8 декабря 1988 г. Сильное ($M = 7,2$) землетрясение в Армении, разрушившее г. Спитак. Пострадали города Ленинакан, Кировакан, Степанован. Погибло около 25 тыс. жителей. Это землетрясение, очаг которого был удален «всего» на 100–200 км от очагов разрушительных землетрясений 854–1319 гг., завершает пока цепочку катастроф в Армении и в полной мере отражает недоучет их влияния.

Восстановительные работы, в организации которых приняли активное участие все союзные республики, начались быстро. Но разваливающийся СССР уже не смог, а может быть, и не хотел обеспечить тот достаточно высокий уровень восстановительных работ, который имел место при предыдущих сейсмических катастрофах в 1948 г. в Ашхабаде, в 1952 г. — на Курильских островах и Камчатке, в 1966 г. — в Ташкенте.

После Спитакского землетрясения Правительством СССР принято решение о создании Федеральной системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений (ФССН). Создание этой структуры во многом способствовало сохранению сейсмологических наблюдений на территории России в период развала СССР и в течение «трудных» 90-х гг. прошлого века.

1991–2004 гг. 8 марта 1991 г. произошло Хаилинское ($M = 7,0$) 8-балльное землетрясение, вообще говоря, не очень сильное, без жертв и особых разрушений, но происшедшее в *асейсмичном* районе, в котором согласно действующей на тот момент карте Общего сейсмического районирования (ОСР) 1978 г. «допускались» сотрясения не более 5 баллов. Три балла — это *очень большая ошибка карты ОСР-78*.

По инициативе администрации Корякского автономного округа (КАО), на территории которого произошло это землетрясение, в течение ряда лет проводились комплексные исследования. Главным итогом проведенных работ явилась разработка принципиально новой методики сейсмического районирования.

1997 г. В результате комплексных исследований, выполненных под общим руководством ИФЗ РАН в 1991–1997 гг. по проблеме «Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии» в рамках государственной научно-технической программы «Глобальные изменения природной среды и климата», построен с использованием принципиально новых подходов комплект новых карт ОСР, разграничивающих зоны разной балльности для фиксированных интервалов времени $\Delta T = 50, 100, 1000$ лет с 90%-ной вероятностью непревышения (или 10%-ной вероятностью превышения) расчетной интенсивности. В основе карт ОСР-97 была заложена методика, предложенная и отработанная на Хаилинском землетрясении 1991 г.

2004 г. Авторский коллектив карт ОСР-1997 удостоен Государственной премии России.

1994 г. Вместо Единой сети сейсмических наблюдений СССР была образована Геофизическая служба РАН, в которую по Постановлению Президиума РАН от 31 мая 1994 г. № 107 были включены сейсмические станции европейской части России, Сибири и Дальнего Востока.

4 декабря 1994 г. Произошло Шикотанское ($M = 8,0$) землетрясение. Имелись человеческие жертвы и разрушения зданий в населенных пунктах на Южных Курильских островах.

В рамках Министерства по чрезвычайным ситуациям для ликвидации последствий стихийных бедствий создана служба быстрого реагирования.

28 мая 1995 г. Землетрясение ($M = 7,0$), сопровождавшееся сотрясениями до 9–10 баллов, практически полностью разрушило г. Нефтегорск на о. Сахалин. Из 3 197 человек, проживавших в этом городе на момент землетрясения, 2068 человек (около 70 %) погибли.

Уже через сутки после землетрясения в спасательных работах было задействовано 13 самолетов, 11 вертолетов и 66 единиц наземной техники. Всего в спасательных работах участвовали 25 самолетов и 24 вертолета. На четвертые сутки количество техники составляло 267 единиц. Сразу после землетрясения к спасательным работам приступили 500 человек, число спасателей быстро увеличивалось. Кроме оперативной группы МЧС, личного состава Министерства обороны и специалистов гражданской обороны России, к работе было привлечено 27 поисково-спасательных отрядов, оперативно прибывших из более чем 10 областей России, включая и такой отдаленный от Сахалина регион, как Урал. Всего в работах по ликвидации последствий землетрясения приняли участие более 1500 человек. Благодаря усилиям спасателей были извлечены из завалов в общей сложности 2364 человека, из которых 406 остались живы.

Служба быстрого реагирования была создана в сжатые сроки и оперативно, что позволило спасти несколько сотен людей. В последующие годы эта служба хорошо проявила себя при различных стихийных бедствиях, происходивших как на территории нашей страны, так и за рубежом.

Конец 90-х гг. Японская и сахалинская трагедии (катастрофические землетрясения 1995 г. в Кобэ и Нефтегорске) привели к объединению усилий японских и дальневосточных российских ученых в исследованиях природы землетрясений, проводимых в рамках совместной российско-японской программы «Исследования сейсмоструктуры региона Охотоморской плиты».

21 апреля 2006 г. Олюторское ($M = 8,0$) землетрясение на территории КАО сопровождалось 9-балльными сотрясениями и значительными разрушениями. Это первое разрушительное землетрясение в «новой» России. На ликвидацию последствий государством были выделены большие средства. В результате два поселка — Тиличики и Корф — по соображениям высокой сейсмо- и цунамиопасности были закрыты. Начато строительство нового поселка. Зону бедствия в 2006 г. посетил первый заместитель Председателя Правительства России Д. А. Медведев.

Олюторское землетрясение подтвердило справедливость новой карты ОСР-97 для территории КАО.

Камчатка

[Викулин, Дроздюк, Семенец, Широков, 1997; Викулин, Семенец, Широков, 1989; Гущенко, 1979; Новейший ..., 2005; Предварительный ..., 1968; Проблемы ..., 2000]

1696 г. В результате похода, предпринятого В. Атласовым из Анадырского острога, Камчатка была присоединена к России.

1697–1698 гг. Произошло первое отмеченное людьми извержение вулкана Ключевского на Камчатке: «Из горы, подобной сенному стогу, днем идет дым, а ночью искры и зарево».

1727–1731 гг. Наблюдаются землетрясения и извержения Ключевской сопки: «Вулкан сей горел постоянно, причем земля беспрерывно колебалась».

1737–1742 гг. Природная катастрофа на Камчатке сопровождалась сильными извержениями многих вулканов и серией сильнейших ($M \approx 8$ и более) землетрясений.

1737 г., лето — сентябрь. Началась катастрофа летом двумя сильными извержениями Авачинского и Ключевского вулканов, которые сопровождались ощутимыми землетрясениями, и следующим образом были описаны С. П. Крашенинниковым: «Самое страшное ея (Авачи) возгорание в 1737 г. ... в летнее время, а окончилось извержением великой тучи пеплу, которым околележащие места на вершок (4,5 см. — **А. В.**) покрыты были»; «Сей ужасный пожар (Ключевской сопки. — **А. В.**) начался сентября 25 числа и продолжался с неделю с такой свирепостью, что жители, которые близко горы на рыбном промысле были, ежечасно к смерти готовились, ожидая кончины. Вся гора оказалась раскаленным камнем. Пламя, которое внутри ея сквозь расщелины было видно, устремлялось иногда вниз, как огненные реки, с ужасным шумом. В горе слышен был гром, треск и будто сильными мехами раздувание, от которого все ближние места дрожали... Конец пожара был обыкновенный, то есть извержение множества пеплу, из которого, однако ж, немного на землю пало для того, что всю тучу унесло в море» [Крашенинников, 1755].

13 октября. Произошло, по-видимому, самое сильное ($M \approx 9,0$) из всех камчатских землетрясений, сведения о которых сохранились людьми: «Октября 6 числа пополуночи в третьем часу началось и с четверть часа продолжалось волнами так сильно, что многие камчатские юрты обвалились и балаганы попадали... Перед каждым трясением слышен был под землею страшный шум и стенание..., в некоторых местах луга холмами и поля морскими заливами сделались... А продолжалось оно до самой весны 1738 года» [Крашенинников, 1755].

О сильнейших деформациях береговой зоны тихоокеанского побережья Камчатки в районе Петропавловска-Камчатского, обусловленных этим землетрясением, свидетельствуют и другие результаты. Так, по данным И.В. Мелекесцева, прибрежная полоса Авачинского залива Тихого океана к северо-востоку от города (35-километровый Халактырский пляж) была поднята до 4 м, дельта и низовье долины р. Авача — до 2–3 м.

Это землетрясение сопровождалось самым мощным за все историческое время на Камчатке цунами с высотой залеска более 60 м: «Учинился на море ужасный шум и волнение, и вдруг взлилось на берега воды в вышину сажени на три (одна сажень равна 2.14 м. — **А. В.**)... Потом вторично земля всколебалась, воды прибыло против прежнего, но при отливии столь далеко она взбежала, что море видеть невозможно было. В то время усмотрены в проливе на морском дне между первым и вторым Курильским островом каменные горы, которые до того

никогда не виданы... С четверть часа после того спустя последовали валы ужасного и несравненного трясения, а при том взлилось воды на берег в вышину сажен на 30... От сего наводнения тамошние жители совсем разорились, а многие бедственно скончали живот свой» [Крашенинников, 1755].

4 ноября случилось землетрясение в Камчатском заливе: «Октября 23 дня часах в 7 пополудни началось в Нижнем остроге (располагавшемся в 40 км от устья р. Камчатка. — А. В.) трясение земли, которое было волнистое, и три вала прошли невольге один после другого так сильно, что едва хоромы не попадали, а печи в избах и балаганах падали и колокола звонили. Оное трясение с перемежкой продолжалось до весны 1738 года, только легко» [Крашенинников, 1775].

17 декабря. В море, южнее мыса Лопатка, произошло сильное ($M = 7,5$) землетрясение, сопровождавшееся, возможно, цунами.

8–24 (и позже) декабря 1740 г. Произошло предвзвешенное и сопровождавшееся сильными ощутимыми землетрясениями многоцентровое извержение в виде серии шлаковых конусов на склоне вулкана Плоский Толбачик типа трещинного извержения 1975–1976 гг., но более скромное по масштабам.

1737–1742 гг. По данным тифрохронологических и геолого-вулканических исследований, проведенных И.В. Мелекесцевым и его сотрудниками, предполагается, что в это время произошли сильные извержения вулканов Мутновский и Горелый.

1741 г., февраль. Произошло сильное землетрясение на о. Медный.

18 февраля 1742 г. Сильное землетрясение на островах Беринга и Медный сопровождалось двумя ощутимыми афтершоками: «Сотрясения земли были настолько сильными, что подпорки нашего подземелья подломились» [Стеллер, 1999].

1742 г. Г. В. Стеллером отмечены извержения вулканов Камбальный, Кошелевский (на юге Камчатки) и Кроноцкий.

18 ноября 1742 г. Сильное ($M = 7,5$) землетрясение с очагом против о. Парамушир сопровождалось цунами.

Как видим, в течение 1737–1742 гг. сильные извержения и сильнейшие землетрясения происходили вдоль всей восточной сейсмовулканической зоны Северных Курильских островов и Камчатки общей протяженностью около 900 км. Сильно извергались или находились в стадии повышенной активности как минимум 15 вулканов вдоль всей зоны. Суммарный объем продуктов извержений только пяти изученных вулканов (Авачинский, Ключевской, Плоский Толбачик с Толбачинской зоной шлаковых конусов, Мутновский и Горелый) составил более 1 км³ лавы. В это же время С. П. Крашенинниковым была отмечена исключительно высокая деятельность гидротерм на Южной и Восточной Камчатке. Сейсмически активными были по очереди то южное (13.10.1737 г., 17.12.1737 г., 18.11.1742 г.), то северное (04.11.1737 г., 1740 г., 1741 г., 18.02.1742 г.) окончания зоны. Такое «согласованное» во времени и пространстве поведение сейсмической и вулканической активности показывает, что в 1737–1742 гг. интенсивные тектонические движения захватили одновременно всю 900-километровую зону — от Северных Курил до Камчатского залива и Командорских островов.

1914–1915 гг. Сейсмическая станция в Петропавловске-Камчатском была организована очень оперативно.

18 февраля 1914 г. От председателя Постоянной центральной сейсмологической комиссии Б. Б. Голицына в адрес губернатора Камчатской области отправляется письмо: «Стремясь к всестороннему изучению сейсмических явлений, сейсмическая комиссия при Академии наук остановила свое внимание на Камчатке — единственной области в России, на которой и поныне не угасла еще вулканическая деятельность, сопряженная с землетрясениями своеобразного характера... Сейсмическую станцию 2-го разряда предполагается учредить на Камчатке, скорее в Петропавловске как центре культурной жизни. Сейсмическая станция, снабженная необходимым ассортиментом самопишущих приборов, должна иметь небольшое уединенное помещение... вдали от усиленного движения и езды... участок земли мерою до 100 квадратных сажен... Для наблюдения за приборами наблюдатель должен ежедневно в заранее выбранный час посещать помещение станции... а также периодически отсылать в Петербург сейсмограммы с записями землетрясений».

1914 г., июнь. В соответствии с рекомендациями Б. Б. Голицына представительная комиссия для организации сейсмостанции выбирает участок земли на окраине Петропавловска, в 100 м к северо-востоку от радиостанции (ныне железобетонное строение, расположенное по ул. Радиосвязи между домами № 9 и 14).

1915 г., май. Из Петербурга прибыли приборы для устройства сейсмостанции. Согласно описи, составленной первым наблюдателем станции А. А. Пуриным, узнаем: «2 сейсмографа со штативами — 440 руб., 2 регистрационных аппарата с двумя запасными барабанами — 440 руб., контактные часы фирмы «Штрассер-Родэ» — 260 руб., 1 500 листов бумаги (на два года) — 27 руб., 3 элемента лекланше с запасом нашатыря и цинков — 7 руб., 3 фунта звонковой проволоки — 2 руб. 70 коп. ... 16 ящиков (68 пудов)».

18 июля 1915 г. Начало работы сейсмостанции — в Петербург отправлена первая сводка о записи землетрясения: «18 июля 01 ч 33 мин в продолжение часа сейсмографы описывали колебание почвы, максимальное отклонение на канале север — юг 24 мм».

Именно идея создания сети сейсмических станций «прорубило окно» из столицы России на ее окраины.

30 января 1917 г. Произошло землетрясение с интенсивностью до 8 баллов на о. Беринга. Впервые на Камчатке получена инструментальная запись сильного землетрясения и собраны макросейсмические данные.

Летом этого года А. А. Пуриным (1887–1952) в Петропавловске издается брошюра о землетрясениях Камчатки, в которой описаны собранные им последствия сильного январского землетрясения и высказаны соображения о том, что «если не предсказывать, то по крайней мере наметить пределы времени, между которыми следует ожидать наступление крупной катастрофы, можно и теперь».

1918 г. А. А. Пурин просит Совет народных депутатов Петропавловска выделить спирт, который требовался для растворения канифоли и закрепления сейсмограмм, и получает отказ, вследствие чего передает сейсмостанцию Асаевичу.

1919–1929 гг. Работу сейсмостанции пытается поддерживать П. Т. Новограбленов — первый камчадал с высшим образованием (14.08.1892–1937 гг., в 1918 г. окончил Томский учительский институт), первый краевед Камчатки. Им подробно описаны последствия сильных камчатских землетрясений и цунами в 1923 г. Но наладить постоянную работу станции ему не удается.

П. Т. Новограбленовым составлены первые достаточно подробные каталоги вулканов и горячих источников Камчатки.

Судьба первых наблюдателей сейсмической станции в Петропавловске-Камчатском трагична. А. А. Пурин, как первый демократически избранный руководитель Камчатки (председатель Областного комитета в 1917–1919 гг.), с возвращением в Петропавловск «красных» в 1922 г. был интернирован в Японию. Впоследствии он проживал в Чехии и Шанхае, был арестован в Китае и 17.06.1952 г. передан в УМГБ по Хабаровскому краю. Умер 10.08.1952 г. в тюремной больнице г. Хабаровска. Посмертно реабилитирован. П. Т. Новограбленов в 1919–1922 гг. — гласный Петропавловской городской думы. В 20–30-х гг. в Петропавловске неоднократно арестовывался и в 1937 г. был репрессирован (фактически утоплен в бухте Бабия). В 1956 г. посмертно реабилитирован.

Вот так трагически переплелись судьбы первых сейсмологов Камчатки с революционными событиями в России.

1935 г. В Ключах открывается Камчатская вулканологическая станция лаборатории вулканологии АН СССР. Ее создатель — академик А. Н. Заварицкий (1884–1952), первый начальник — профессор В. И. Влодавец (1893–1993). Начинается систематическое изучение вулканов Камчатки, в первую очередь Ключевской группы вулканов.

40-е гг. Начало новой эпохи сейсмологических исследований на Камчатке.

29 декабря 1946 г. По инициативе Б. И. Пийпа (1906–1966) начинает работу станция в пос. Ключи. Ценнейшие данные были получены на этой станции во время катастрофического извержения вулкана Безымянный в 1955–1956 гг.

1958 г. Открывается станция в пос. Козыревск.

1960 г. Начинает работать сейсмическая станция Апахончич — завершается первый этап создания сети за слежением активности Ключевской группы вулканов.

1951 г. Оснащенная новыми современными приборами, возобновляет свою работу сейсмическая станция в Петропавловске-Камчатском как опорная станция Единой сети сейсмических наблюдений СССР.

17–30 ноября 1952 г. Б. И. Пийпом и А. Е. Святловским (1912–1998) на гидрографическом судне проведено обследование последствий цунами на Северных Курилах — Южной Камчатке после катастрофического ($M = 8,5$) Камчатского землетрясения 04.11.1952 г. Хроника происходящих на Камчатке и Северных Курилах событий, последовавших за этими землетрясением и цунами, достаточно подробно описана в очерке А. Смышляева «Ночь океана. Хроника тихоокеанского цунами 1952 года», который опубликован в его книге «Время красной рыбы», вышедшей в свет в 2003 г. Число погибших составило 3–5 тыс. человек. Смыт ряд населенных пунктов на Северных Курилах и Камчатке. Фамилии многих погибших приведены в очерке А. Смышляева.

Конец 50-х — начало 60-х гг. Становление науки на Камчатке.

1958 г. С целью слежения за гидротермальным месторождением в пос. Паужетка начинает работу сейсмическая станция.

4 мая 1959 г. Произошло сильное ($M = 7,6$) землетрясение с очагом в Кроноцком заливе, на побережье которого оно ощущалось как 9-балльное. Сотрясения в Петропавловске-Камчатском достигали 8 баллов. Сильный ($M = 7,0$) афтершок этого землетрясения, происшедший **18 июня**, разрушил бетонные строения в пос. Жупаново.

1959 г. Постановлением Президиума АН СССР были созданы Камчатская комплексная экспедиция Совета по изучению производительных сил АН СССР и Камчатская геолого-геофизическая обсерватория СО АН СССР, в которой проводились сейсмологические исследования. Начальником экспедиции и директором обсерватории стал Б. И. Пийп.

1961 г., ноябрь. На Камчатке начинает работу региональная сеть, состоящая из 15 сейсмических станций. Регистрация и обработка параметров землетрясений проводится под руководством С. А. Федотова, будущего академика, и П. И. Токарева.

Построена карта сейсмического микрорайонирования Петропавловска-Камчатского.

1962 г. Образование Института вулканологии АН СССР на базе Камчатской комплексной экспедиции и Камчатской геолого-геофизической обсерватории.

1963–1965 гг. На материале землетрясений Курило-Камчатской зоны и Северо-Восточной Японии С. А. Федотовым разработана долгосрочная схема прогноза мест расположения очагов сильнейших курило-камчатских землетрясений, которая впоследствии была применена и к другим участкам окраины Тихого океана.

1971 г. Происходят два сильных землетрясения, значительно «потрясших» Камчатку.

24 ноября. Землетрясение ($M = 7,2$) на глубине 100 км прямо под городом, что вызвало 7–8-балльные колебания. Землетрясение повредило многие дома, несколько человек погибло.

15 декабря. Сильное ($M = 7,8$) землетрясение в Усть-Камчатске. Повреждены некоторые дома.

1975 г. Выходит в свет книга «Сильные камчатские землетрясения 1971 года», в которой опубликованы результаты изучения последствий сильных землетрясений в 1971 г.

1986 г. Данные детальных сейсмологических исследований и результаты обследования сильных землетрясений 1971 г. предопределили распоряжение Совмина СССР о заблаговременном укреплении зданий и сооружений Петропавловска-Камчатского и Камчатской области, которое впоследствии (1995 г.) переросло в федеральную программу «Сейсмозащита».

1979 г., июнь. Выделение из Института вулканологии лаборатории сейсмологических исследований в самостоятельное подразделение — Опытную-методическую сейсмологическую партию (ОМСП) Института вулканологии (с 1994 г. — ОМСП ГС РАН). Начало качественного изменения уровня сейсмологических наблюдений на Камчатке.

Конец 80-х — начало 90-х гг. Обобщение данных по миграции землетрясений позволило А. В. Викулину привнести временной аспект в разработанную в начале 60-х гг. С. А. Федотовым методику прогноза мест сильнейших землетрясений. В результате разработана долгосрочная методика прогноза мест и времени сильнейших землетрясений северо-западной части Тихого океана. Последующие сильнейшие землетрясения региона происходили в соответствии с этой долгосрочной пространственно-временной схемой прогноза.

После Спитакского (1988 г.) землетрясения и начавшихся в стране перемен резко изменилось отношение к работам по сейсмоусилению. В начале 90-х гг. в Петропавловске-Камчатском благодаря усилиям камчатских ученых впервые в нашей стране проводится паспортизация

всех зданий и сооружений города, начинаются работы по их массовому сейсмоусилению. Такая «благоприятная» для города ситуация была создана усилиями администрации области, а также благодаря положительным результатам, полученным в сейсмологии и сейсмостойком строительстве сотрудниками научно-технических учреждений города.

18 марта 1991 г. Произошло Хаилинское ($M = 7,0$) землетрясение, которое в 5-балльном по карте ОСР-78 районе сопровождалось 8-балльными сотрясениями. Незначительные повреждения зданий и сооружений.

По инициативе администрации Корякского автономного округа, на территории которого произошло это землетрясение, в течение ряда лет проводились комплексные исследования Камчатской опытно-методической партией Геофизической службы РАН (руководитель А. В. Викулин). Было показано, что территория КАО является зоной повышенной опасности, в пределах которой возможны сильные землетрясения, катастрофические цунами, размывы берегов в устьях рек и песчаных кос, по амплитуде достигающие многих и многих метров. В работах приняли участие камчатские ученые (КОМСП ГС РАН, ИВ ДВО РАН, ИВГиГ ДВО РАН), ученые из Москвы (МГУ, ИФЗ РАН) и Новосибирска (ВЦ СО РАН), а также из Японии и Норвегии.

Одним из основных итогов проведенных работ явилась разработка принципиально новой методики сейсмического районирования, которая и была использована при составлении новой для территории всей России карты ОСР-1997. За составление этой карты коллектив ее авторов в 2004 г. был удостоен Государственной премии России.

21 апреля 2006 г. Произошло Олюторское ($M = 8,0$) 9-балльное землетрясение, в результате которого сильно пострадали поселки Тиличики, Корф и Хаилино.

На проектирование и строительство нового поселка Тиличики, в котором проживает около 1 000 человек, государством было отпущено примерно 5 млрд руб. Таким образом, минимальная «стоимость» 8–9-балльного землетрясения для Петропавловска-Камчатского, в котором проживает около 200 тыс. человек, составит около 1 000 млрд руб.

Сейсмические «достопримечательности» и прогноз (Камчатка — Курильские острова)

[Викулин, 1992, 2003; Викулин, Викулина, 1989;
Викулин, Дроздюк, Семенец, Широков, 1997; Проблемы..., 2000]

Полученные сейсмологические данные и проведенные исследования позволяют построить для Камчатки и Курильских островов схемы долгосрочного прогноза землетрясений:

1. Карты сейсмического районирования Камчатки. На рис. 2 приведены все карты сейсмического районирования территории Камчатки, построенные в 1938, 1963, 1978 и 1997 гг. Видно, что для района Петропавловска-Камчатского за эти годы балльность изменялась следующим образом. В 1938 г. она составляла 8 баллов, ближе к 7; в 1963 г. — тоже 8 баллов, но гораздо ближе к 9; в 1978 г. — 9 баллов; в 1997 г. расчетная балльность составила уже 9,52 балла, или 10 баллов. Как видим, по мере накопления данных и степени изученности территории можно принять, что сотрясаемость территории Петропавловска-Камчатского в 30–90-х гг. XX в. увеличивалась в среднем на один балл в 20 лет. Предел ли это? Данные, приведенные в работе [Викулин, Мелекесцев, 1989], позволяют предположить отрицательный ответ. Положение очагов сильнейших ($M \geq 7,6$) северо-курильских и камчатских землетрясений, происшедших в XX в., показывает, что сейсмофокальная зона, как и для района желоба Нанкай, может быть разбита на 9 блоков (рис. 3).

2. Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. ($M = 7-8,0$) с очагом в IV блоке подтвердило правильность построенной схемы прогноза. Следующим местом, в котором согласно построенной схеме прогноза следует ожидать расположение очага сильнейшего землетрясения, является Южно-Камчатский VII блок. Ожидаемый «тревожный» интервал времени для этого блока составляет 2008 ± 10 лет с вероятностью около 70% и 2008 ± 20 лет с вероятностью около 95%. Сотрясения в Петропавловске-Камчатском при этом землетрясении на средних грунтах не будут превышать 7 баллов. Более сильное землетрясение, интенсивность колебаний при котором в городе может составлять до 9 баллов, ожидается в 2058 ± 8 лет с вероятностью около 70%.

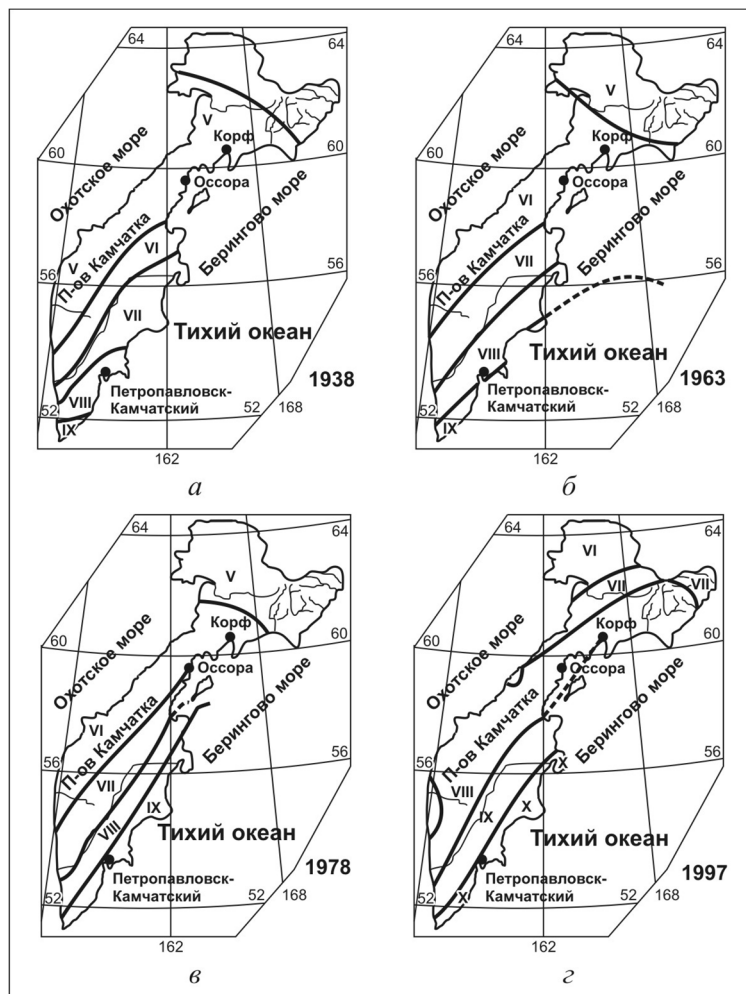


Рис. 2. Карты общего сейсмического районирования Камчатки в 1938 (а), 1963 (б), 1978 (в) и 1997 (з) гг. [Проблемы ..., 2000]

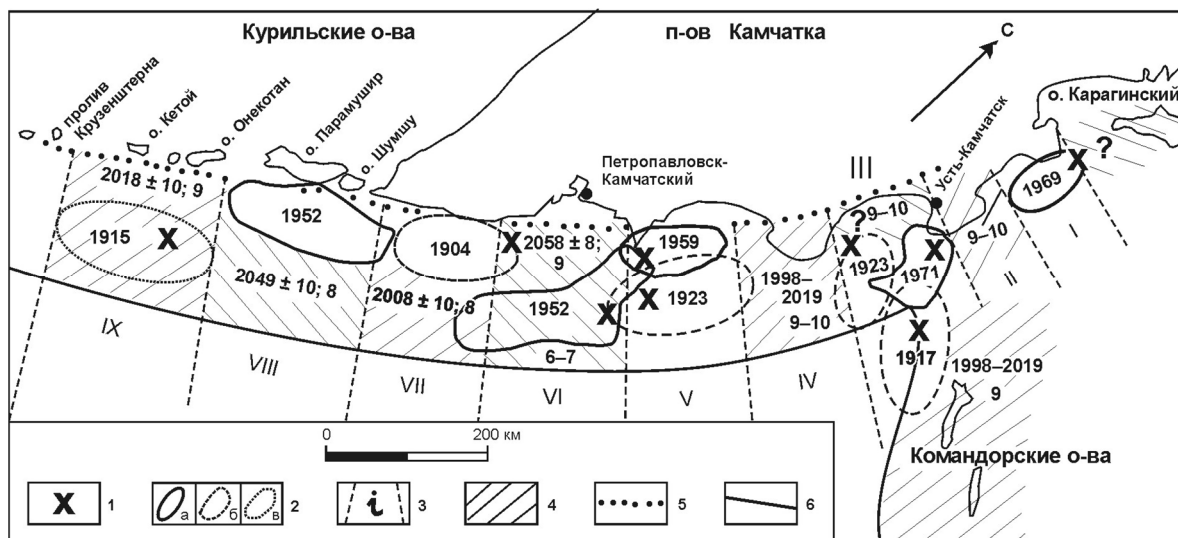


Рис. 3. Блоковое строение сейсмофокальной зоны и прогнозная карта расположения очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений в будущем:

1 — эпицентры сильнейших землетрясений; 2 — границы очаговых областей сильнейших землетрясений XX в. (цифра обозначает год сильнейшего землетрясения); 3 — границы между блоками сейсмофокальной зоны ($i = I-IX$); 4 — места вероятного расположения очагов сильнейших землетрясений в будущем (цифрами обозначены год ожидаемого землетрясения, временной интервал и максимальное значение балльности на берегу при землетрясении); 5 — западная граница сейсмофокальной зоны; б — ось глубоководного желоба [Викулин, 2003]

Прогноз возможен, но...

Завершая обзор, в котором были рассмотрены последние вулканические и сейсмические катастрофы планетарного и регионального масштабов, хотелось бы подвести некоторые итоги.

Главный итог, на взгляд автора, заключается в следующем. Несмотря на очевидные достижения в решении ряда важных научных (например, овладение ядерной энергией), технических (все убыстряющееся освоение космоса) и политических (договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний и меры по контролю за его выполнением) проблем, человечество в целом еще не «доросло» до понимания важности предотвращения природных катастроф. Ярким примером тому служит последняя (пока) катастрофа в Юго-Восточной Азии в декабре 2004 г., когда от цунами, возникшего после одного из самых сильнейших за последнее столетие землетрясений, погибло более 300 тыс. человек. Весь мир наблюдал на экранах своих компьютеров *в режиме реального времени* распространение волны цунами в Индийском океане. Но осуществить какие-то конкретные действия по предотвращению катастрофы или хотя бы по уменьшению ее возможных последствий, пусть в небольшой части побережья, ни одно из пострадавших государств так и не смогло.

Второй пример, меньший по масштабу затронутой катастрофой территории, но существенно более масштабный по числу ее жертв — это Китай. Можно пытаться понять причины гибели 830 тыс. человек при землетрясении 1560 г. в Шэнси — они в силу тех или иных, но вполне понятных обстоятельств жили в пещерах, которые при землетрясении обвалились, похоронив бóльшую часть погибших. Но как понять почти такое же по масштабу количество жертв при Тяньшаньском землетрясении 1976 г., происшедшем через 400 лет после землетрясения в Шэнси, менее чем через год после успешного прогноза Ханченгского землетрясения 1975 г.?

Китай во все времена был самым густонаселенным государством. Наверное, поэтому жизнь человека там ничего не стоила. Например, после одного из побоищ под г. Чанпин в 20 г. до н. э. воины царства Цинь только живьем закопали 400 тыс. (!) сдавшихся в плен воинов. Но по уровню научно-технической мысли Китай всегда был впереди. Вспомним: бумага, порох, компас, шелк, фарфор, механические часы, технология горячей обработки металлов, добыча нефти и газа — все это впервые появилось именно в Китае. По-видимому, неслучайным событием был и первый в мире прогноз Ханченгского землетрясения с последующей эвакуацией жителей из опасной зоны *до происшедшего землетрясения*. Так по какой шкале ценностей совместить могущество научно-технической мысли, с одной стороны, и полное пренебрежение конкретной человеческой жизнью — с другой?

Третий важный для камчадалов пример, являющийся результатом Хаилинского 1991 г. и Олюторского 2006 г. землетрясений, — это «экспериментальное» определение в современных ценах «стоимости» 8–9-балльного землетрясения на Камчатке: 5 млрд руб. для пос. Тилички и около 1 000 млрд руб. для Петропавловска-Камчатского.

Вывод из сказанного может быть только один — в научно-техническом плане человечество вполне «созрело» для решения проблемы прогноза землетрясений и извержений вулканов. Однако в силу политических и других мотивов передовые страны пока не могут объединиться для решения такой грандиозной проблемы. В этой связи власти на местах должны принимать соответствующие меры. Из приведенного обзора следует, что наиболее сейсмоопасными районами являются города Токио и Петропавловск-Камчатский.

Литература

1. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса // Природа. — 1992. — № 7. — С. 11–19.
2. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003. — 150 с.
3. Викулин А. В., Викулина С. А. Закономерности размещения очаговых областей сильнейших землетрясений в районе желоба Нанкай. — Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ АН СССР, 1989. — 44 с. — Препринт № 5.

4. *К землетрясению без риска* / А. В. Викулин, В. Н. Дроздук, Н. В. Семенец, В. А. Широков // Петропавловск-Камчатский: СЭТО-СТ, 1997. — 120 с.
5. *Викулин А. В., Мелекесцев И. В.* О вероятности и повторяемости 10-балльных землетрясений в Петропавловске-Камчатском // Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ДальНИИС Госстроя СССР, 1989. — С. 66–67.
6. *Викулин А. В., Семенец Н. В., Широков В. А.* Землетрясение будет завтра. — Петропавловск-Камчатский: СЭТО-СТ, 1989. — 80 с.
7. *Гуценко И. И.* Извержения вулканов мира: каталог. — М.: Наука, 1979. — 476 с.
8. *Крашенинников С. П.* Описание земли Камчатки. Т. 1. — СПб.: Императорская акад. наук, 1755. — 438 с.
9. *Ломоносов М. В.* Слово о рождении металлов от трясения Земли // М. В. Ломоносов. Избр. произведения: в 2 т. Т. 1. Естественные науки и философия. — М.: Наука, 1986. — С. 344–360.
10. *Медведев С. В.* Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. — М.: Наука, 1968. — С. 151–162.
11. *Новейший* и современный вулканизм на территории России: сб. науч. ст. / под ред. Н. П. Лаврова. — М.: Наука, 2005. — 604 с.
12. *Новый* каталог сильных землетрясений на территории СССР: сб. науч. ст. / под ред. Н. В. Кондорской, Н. В. Шебалина. — М.: Наука, 1977. — 536 с.
13. *Оноприенко В. И.* Борис Борисович Голицын. — М.: Наука, 2002. — 335 с.
14. *Предварительный* отчет о сейсмическом районировании участка строительства Кроноцкой ГЭС на Камчатке. Ч. 2. — Петропавловск-Камчатский: ТЭС ИФЗ АН СССР, 1968. — 144 с.
15. *Проблемы* сейсмичности Дальнего Востока: сб. науч. ст. / под ред. А. В. Викулина. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. — 318 с.
16. *Рикитаке Т.* Предсказание землетрясений. — М.: Мир, 1979. — 390 с.
17. *Соболев Г. А.* Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука, 1993. — 314 с.
18. *Стеллер Г. В.* Описание земли Камчатки. — Петропавловск-Камчатский: Камчатский печ. двор, 1999. — 287 с.
19. *Шебалин Н. В.* Количественная макросейсмика (фрагменты незавершенной монографии) // Вычислительная сейсмология. — 2003. — Вып. 34. — С. 57–200.
20. *Уломов В. И., Шумилина Л. С.* Комплект новых карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации // Сейсмостойкое строительство. — 1998. — № 4. — С. 30–34.

А. В. Викулин^{1,2}, Н. И. Надольская²

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

² *Камчатский государственный технический университет*

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ В МИРЕ, РОССИИ И НА КАМЧАТКЕ*

Приводится хронология материалов с древнейших времен до настоящего времени, раскрывающих становление и развитие образования и научных школ в мире, России и на Камчатке.

The article gives a summary of materials from ancient times until today, which describe formation and evolution of education and of scientific schools in the world, in Russia and in Kamchatka.

5 млн лет назад. По одной из общепринятых гипотез, 22 млн лет назад путь развития человека по причинам, недостаточно известным науке, резко изменился по сравнению с развитием других приматов, число которых насчитывало многие десятки. В семействе обезьян выделились представители, интеллектуальные способности которых начали развиваться быстрее, чем у остальных. В достаточной степени условно можно принять, что самым далеким нашим предком является австралопитек, который 5 млн лет назад взял палку и сшиб ею банан [Исаков, 2004б, с. 13].

XIII в. до н. э. Появление первых цивилизаций Востока и начало их интенсивного развития. Достаточно условно можно принять, что первые признаки цивилизованной жизни начались одновременно в нескольких местах: в Месопотамии по берегам рек Тигр и Евфрат, в Египте на берегу Нила, в Индии на реке Ганг и в Китае на реках Хуанхэ и Янцзы. Этапы развития этих цивилизаций во многом были сходны, несмотря на то, что Ближний и Дальний Восток разделены многими тысячами километров морских и сухопутных путей [Исаков, 2004б, с. 16].

VII в. до н. э. В Китае начали активно развиваться физические учения (науки), что впоследствии позволило ему стать одним из двух научных центров мировой цивилизации [Дорфман, 2007а, с. 28; Исаков, 2004а, с. 195–227].

318 г. до н. э. Император Сюань основал первую в Китае Академию, где на постоянной и платной основе работали крупнейшие мыслители того времени со своими учениками. Вряд ли можно сомневаться в том, что зарождение китайской физики было самобытным историческим явлением [Викулин, 2007; Дорфман, 2007а, с. 21–28].

VII–VI вв. до н. э. Фалес Милетский (625–547 гг. до н. э.) — первый из семи мудрецов при афинском архонте Дамасии, родоначальник древнегреческой философии. Учителей не имел, если не считать, что ездил в Египет и жил там у мудрецов. Основатель Милетской философской школы; первый стал вести беседы о природе [Викулин, 2007].

Все последующие древнегреческие и древнеиталийские мыслители имели свои философские школы. С Фалеса принято отсчитывать начало истории метафизики, создаваемой на основе умозрительного метода [Исаков, 2004б, с. 45].

Анаксимандр (610–546 гг. до н. э.) — самый известный ученик Фалеса; подарил человечеству первую космологическую систему мира и первую гипотезу происхождения жизни [Исаков, 2004б, с. 47–49].

V–II вв. до н. э. Около 387 г. до н. э. Платоном (428/427–348/347 гг. до н. э.) в Афинах была основана Академия, которая просуществовала около 10 веков и была закрыта в 529 г. императором Юстинианом (482/483–565 гг.) как оплот язычества [Советский... , 1983, с. 30, 1008, 1564].

Основной проблемой платоновского мироздания стала разработка деталей учения о Вселенной, которую Платон представлял себе как составное веретено с элементами в виде хрустальных сфер, насаженных на одну ось. Творцом небесных сфер, полных гармонии, был всемогущий Бог. Так появился на научном горизонте единый Бог-Творец, которого Платон назвал

* 40 (238). Вестник КамчатГТУ. 2008. № 8. С. 92–100.

Демиургом (Мастером). Все предыдущие мыслители с их школами, учениками и последователями создали научную базу, воплотившуюся гением Платона в Академии и тем самым позволившую перейти от общих рассуждений к последовательному и планомерному изучению природы [Исаков, 2004б, с. 54–55].

Евдокс Книдский (408–355 гг. до н. э.), ученик Платона, был одним из первых ученых, который развил далее гипотезу Платона. Он разработал модель Солнечной системы, состоящей из 27 концентрических сфер, в центре которых была Земля.

335 (?) до н. э. Аристотель (384–322 гг. до н. э.), в течение двадцати лет учившийся в Академии Платона, ставший ее первым учеником, но изгнанный, по его собственным словам, за фразу «Платон мне друг, но истина дороже», ставший учителем Александра Македонского, организовал при его поддержке школу в местечке Ликей близ Афин — прообраз будущего Лицея. В этой школе Аристотель реализовал свои замыслы по воспитанию философов-естествоиспытателей. Философские беседы велись во время прогулок, что послужило основанием назвать последователей Аристотеля «перипатетиками» («странствующими») [Исаков, 2004б, с. 55–56; Кудрявцев, 1956, с. 36; Советский..., 1983, с. 75].

Калипп — ученик Аристотеля и младший современник Евдокса — увеличил количество сфер до 57, чтобы имеющиеся экспериментальные данные ввести в рамки развиваемой теории.

II в. н. э. Клавдием Птолемеем (100–178) в окончательном виде создана геоцентрическая система мира с Землей в центре.

Таким образом, в течение *шести веков* в рамках «планового» академического (научного) подхода гипотетические представления Платона последовательно доводились до завершенной модели. Результат работы говорит сам за себя: созданная модель в виде признанной всеми картины мира просуществовала *полторы тысячи лет* вплоть до работ Н. Коперника (1473–1543), И. Кеплера (1571–1630) и Г. Галилея (1564–1642) — создателей современной теории строения Солнечной системы.

Два центра — Древний Китай и античные Греция и Италия — существовали практически в одно и то же время, развивались независимо друг от друга и без взаимного общения. Однако полученные ими научные результаты и найденные оригинальные инженерные решения являются одинаково выдающимися. Способы получения таких результатов являются близкими (создание Академий) и практически «одновременными». Это поразительно, но факт [Дорфман, 2007а, с. 28; Исаков, 2004а, с. 195–227].

III в. до н. э. Птолемеями (царская династия в эллинистическом Египте в 305–30 гг. до н. э.) в Александрии был создан знаменитый Мусейон, в котором обучался и Архимед (ок. 287–212 гг. до н. э.). При создании *Мусейон* более всего напоминал современную Академию наук и насчитывал более пятидесяти крупнейших научных авторитетов того времени. Когда у них появились последователи и ученики, это учебное заведение стало больше походить на современный университет. В Мусейоне обучались филологии, астрономии, математике, ботанике, зоологии и другим наукам.

Архимед застал этот научно-образовательный центр в зените его славы и научного величия. За несколько десятилетий до Архимеда в Александрии работал Евклид (365–300 гг. до н. э.), написавший только по геометрии тринадцать томов сочинений, которые стали на целых двадцать веков, вплоть до появления трудов Н.И. Лобачевского (1792–1856) и Б. Римана (1826–1866), незыблемыми геометрическими канонами.

III в. н. э. Мусейон был разрушен, просуществовав, таким образом, шесть веков. Но наиболее ценные рукописи сберегли [Исаков, 2004б, с. 58–59; Советская..., 1983, с. 1076].

III–IV вв. н. э. В Египте (Александрии) долгое время существовала *Абдерская школа* (Абдеры — город, где родился Демокрит), которая сохранила, несколько видоизменив, традиции *школы Демокрита*.

С Абдерской школой были связаны Болос из Менде (III в.) — составитель трактатов, приписываемых Демокриту и Пифагору, и Зосима из Понополиспа (III–IV вв.) — один из основателей алхимии [Джуа, 1966, с. 40, 55].

VII–X вв. Начало VII в. Мусульманская община, возглавляемая Мухаммедом (Могамедом) (ок. 570–632 гг.), захватила власть в Аравии, создав ядро арабского государства. В странах халифата наряду с *духовными училищами* — медресе вскоре были созданы *университеты*.

755, 795 и 972 гг. — образование *университетов* в Кордове, Багдаде и Каире. Влияние духовенства в них было несколько слабее, нежели в образовавшихся впоследствии университетах и колледжах христианской Западной Европы [Дорфман, 2007а, с. 86].

VII–XII вв. Новые научные теории и их техническое воплощение в период раннего средневековья проникали в Европу в основном с Востока. Солнечные часы появились в Англии и Ирландии только в VIII в. от арабов — почти на тысячу лет позже, чем в Месопотамии. В Западной Европе научной деятельностью в основном занимались монахи. Первый европейский трактат «Физика» вышел в 1150 г. из-под пера настоятельницы Дзибоденбергского монастыря [Исаков, 2004б, с. 77].

X–XI вв. Арабы ушли из Европы, оставив после себя великолепно сохранившуюся до настоящего времени архитектуру. Влияние арабов на культуру стран Западной Европы значительно. А. Гумбольдт (1769–1859) писал: «Арабы... частично вывели Европу из состояния одичания, в которое она была погружена в течение двух веков в результате нашествия варварских народов. Арабы снова указали на вечные источники греческой философии; они не только помогли сохранить научную культуру, но расширили и открыли новые пути для исследования природы» [Джуа, 1966, с. 39].

XI–XIII вв. «Средневековье развивалось на совершенно примитивной основе. Оно стерло с лица земли древнюю философию, политику и юриспруденцию, чтобы начать во всем с самого начала» (К. Маркс, Ф. Энгельс). На базе монастырей образовались первые университеты в странах Западной Европы, которые, по-видимому, сначала возникали по образцу арабских университетов.

1080–1158 гг. Создание первого университета. Университеты раннего средневековья управлялись самими студентами, которых тогда именовали школярами. Вначале разделение учеников определялось их происхождением. Студенческая нация своими силами и средствами нанимала преподавателей, заботилась о помещении, составляла правила, избирала ректора — обязательно студента, непременно богатого и холостого, чтобы семья не мешала многочисленным и весьма серьезным делам. Первое учреждение подобного рода появилось в 1080 г. в Болонье, определив южный тип высших учебных заведений, отличавшихся демократизмом как в организации, так и в управлении. Когда национальное деление сменилось профессиональным, ученическое сообщество стало именоваться университетом (от лат. *Universitas* — общность). В 1158 г. этот статус впервые получила юридическая школа в Болонье [Грицак, 2006, с. 113].

Появление университетов в Монпелье (1180), Париже (1200), Виченце (1205), Оксфорде (1209), Ареццо (1215), Саламанке (1218), Падуе (1222), Неаполе (1224) и Кембридже (1229).

Самым престижным в Западной Европе считался Парижский университет, основанный духовником короля Робертом Сорбоном на базе интернационального приюта. Впоследствии это учреждение стало называться Сорбонной [Исаков, 2004б, с. 80]. Ученые французской столицы в отличие от Болоньи самостоятельно сформировали свой университет в Париже, не ожидая инициативы местных школяров, и тем самым во многом ограничили студенческую вольницу [Грицак, 2006, с. 113].

Первые университеты — это школы под патронатом церкви, часто преобразованные из духовных или монастырских училищ. Корпоративный строй и замкнутость первых университетов мешали им быстро изменяться в соответствии с веяниями времени [Арутюнов, Стрекова, 2003, с. 106; Дорфман, 2007а, с. 85; Платэ, 1999].

Одному из авторов этой статьи довелось побывать летом 2007 г. в г. Саламанка (Испания), который сохранил облик истинно студенческого города до настоящего времени.

1218–2007 гг. Саламанка — город первого университета Испании и одного из самых первых университетов в Европе. В 1218 г. волей короля Леона Альфонса IX все монастырские школы Саламанки, занимавшиеся изучением Библии, канонического права и медицины, были объединены в одну Университетскую школу [Попенченко, Семашко, 2006].

В средние века студенты, успешно закончившие Саламанский университет, заказывали корриду и кровью убитого быка расписывались на стенах своей *alma mater*. Некоторые из этих надписей, так называемые «виторы» (от лат. *victor* — победа), расположенные на более чем 10-метровой высоте от поверхности земли, можно увидеть и в настоящее время. Эта традиция расписываться (но только краской), сохранилась и в настоящее время. С помощью таких надписей велась, по сути, хроника университета: «виторы» оповещали о разных торжественных событиях вроде окончания университета, присвоения докторской степени или получения кафедры.

В начале XXI в. в университет Саламанки ежегодно приезжают (не считая туристов), 25–30 тыс. абитуриентов из Испании, стран Европы, Азии, Африки, Америки, включая США. Во время учебного года из 180 тыс. жителей города почти треть составляют студенты и аспиранты [Испания, 2007, с. 190]. По этому показателю Саламанку может обогнать разве что российский Томск, в котором из 0,5 млн человек населения на долю студентов приходится около половины.

Комплекс зданий Саламанского университета расположен рядом с новым и старым кафедральными соборами (с высотой строений до 40–50 м). Во время их осмотра туристам рассказывают о «страшном» Лиссабонском землетрясении 1 ноября 1755 г., сопровождавшемся сильными колебаниями почвы в течение продолжительного времени (к счастью, без значительных повреждений зданий и без жертв). Конечно, для туристов с Камчатки такая информация была особенно важной [Викулин, Викулина, Аргас, 2007].

Начало XIV в. В странах Западной Европы уже существует 76 университетов.

XIV–XVI вв. Образование университетов в Центральной и Восточной Европе, а именно: Карлова в Праге (1348), Ягеллонского в Кракове (1364), Венского (1365), Гейдельбергского (1385), Кельнского (1388) и Йенского (1548) в Германии.

Середина XV в. Изобретение И. Гутенбергом (1406–1468) книгопечатания.

1527 г. В Марбурге, недалеко от Франкфурта, ландграф Филипп I основал первый в Европе протестантский университет, в котором в 1736–1739 гг. учился М. В. Ломоносов. Этот университет знаменит еще и тем, что он воспитал девять лауреатов Нобелевской премии — больше всех университетов.

1564 г. И. Федоров (1510–1583) напечатал первую в России и на Украине книгу.

1579 г. Польский воевода Стефан Баторий, в 1576 г. ставший королем польско-литовской Речи Посполитой, издал вскоре подтвержденную папой римским жалованную грамоту о преобразовании Вильнюсской коллегии иезуитов, учрежденной девятью годами ранее, в университет под латинским названием *Almae* (благотетельная) *academia et universitas Vinensis* — ныне Вильнюсский университет.

XV — начало XVIII вв. Этот период характеризуется двумя фундаментальными социально-экономическими процессами — загниванием феодальной системы и прогрессом техники цехового кустарно-ремесленного производства в городах. Однако вольные университеты при этом практически не изменились и не откликнулись на происходящие перемены. Поэтому в эпоху гениев, совершивших научную революцию в XVI — начале XVIII вв., главные творцы этой революции делали свои открытия вне стен университетов, будучи учеными-одиночками на королевской службе или членами неформальных научных кружков. У. Гильберт (1544–1603), установивший связь источника магнитного поля с Землей — королевский медик; Ф. Бэкон (1561–1626), родоначальник английского материализма — лорд-канцлер при дворе короля Якова I; И. Кеплер (1571–1630), открывший законы обращения планет вокруг Солнца — сотрудник Парижской королевской обсерватории; У. Гарвей (1578–1657), открывший систему кровообращения — член Королевской коллегии врачей в Лондоне; И. Ньютон (1643–1727), создавший механику и более чем на 200 лет определивший направление развития всей науки — чиновник Министерства финансов, и т. д. [Платэ, 1999].

1632 г. Галилео Галилей (1564–1642) опубликовал знаменитый труд «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевской и коперниковой», в котором он обращался, по сути, не к университетским ученым, уже давно осмеянными, а по примеру У. Гильберта, к широким кругам интеллигенции, уже привыкшим к чтению популярных лекций и научно-популярной литературы [Дорфман, 2007а, с. 147].

«Общий дух научного преподавания и исследовательской работы, естественно, не мог удовлетворить новые общественные слои, поднимавшиеся с растущим капиталистическим производством и желавшие теоретически осмыслить свою собственную промышленную и техническую деятельность. Резкое выражение такой неудовлетворенности можно неоднократно встретить в сочинениях трех гигантов XVII в. — Бэкона, Декарта и Галилея» [Дорфман, 2007а, с. 130]. Неудивительно, что грандиозный научный переворот XVII в. совершался фактически вне традиционных научных и даже учебных учреждений и нередко вопреки им.

1-я половина XVII в. Образование первых университетов в Новом Свете и США.

1551 и 1553 гг. После открытия университета в Санто-Доминго, учрежденного королевским декретом от 1551 г., открывается университет в Мехико — второй в Новом Свете.

1611 г. В крепости Интрамурос, на месте которой позже возникнет филиппинская столица Манила, испанские миссионеры-доминиканцы основали католический университет Санто-Томас (испанская версия имени Фомы Аквинского) — старейший из ныне существующих в Азии вузов и крупнейшее католическое учебное заведение в мире.

1636 г. Гарвардский университет близ Бостона в Кембридже начинался как колледж, который с 1639 г. носит имя Дж. Гарварда, завещавшего ему капитал. Реорганизован в университет в первой четверти XIX в. В 1979 г. насчитывал 19 тыс. студентов [Советский... , 1983, с. 275].

2-я половина XVII в. Характерной особенностью торговли и промышленности являются новые формы их экономической организации. Для увеличения оборотного капитала и уменьшения риска возникают такие мощные торговые объединения, как английская, французская и нидерландская Ост-Индские компании. Появляются производственные промышленные компании. Эта организационная тенденция проникает и в науку.

1657 г. Во Флоренции создается *Accademia dell' Cimento* (Академия опыта). Сосредоточение распыленных экспериментальных исследований позволяет оснастить исследовательскую работу флорентийских ученых первоклассным оборудованием.

1662 г. Английским королем учреждается Лондонское королевское общество с прекрасной лабораторией и платной должностью куратора, на которую приглашается блестящий инженер и физик Роберт Гук (1635–1703). Примерно в это же время крупный богач-аристократ, выдающийся физик и химик Роберт Бойль (1627–1691) создает на собственные средства *первый в мире научно-исследовательский институт* с превосходно оснащенными лабораториями и специальными мастерскими.

1666 г. По инициативе французского министра Кольбера в Париже организуется Королевская академия наук.

1672 г. По инициативе Готфрида Лейбница (1646–1716) создается *Брандербургское научное общество* (впоследствии *Берлинская академия наук*), или «Общество для поощрения в Германии искусств и наук» [Дорфман, 2007а, с. 134; Советский ... , 1983, с. 695].

XVII–XVIII вв. Образование первых высших учебных заведений в России.

1687 г. Открытие в Москве *Славяно-греко-латинской академии* — своего рода прообраза высшего заведения. Она была открыта для людей «всякого чина, сана и возраста» и готовила высшее духовенство, чиновников государственной службы, переводчиков, преподавателей для немногочисленных школ. Образование по тем временам было достаточно широким: преподавались славянский, древнегреческий, а позже и латинский языки, русская грамматика, поэтика, философия, риторика, физика, богословие и ряд других предметов. Именно здесь обучался М. В. Ломоносов, попавший сюда лишь с помощью обмана. Несмотря на объявленную первоначально всесословность заведения, в 1728 г. указом синода было предписано «...крестьянских детей... впредь не принимать», и будущему основателю Московского университета пришлось объявить себя сыном холмогорского дворянина [Павловская, 2005].

XVIII в. — век широкого распространения академий. Несмотря на все старания реакционной философии и церкви, в это время получили широкое распространение научные знания и материалистические воззрения. Важную роль здесь сыграли появившиеся в Европе и Америке «Энциклопедии» и различные научно-популярные руководства.

1700 г. Основана Прусская академия наук в Берлине и ряд академий в столицах некоторых немецких королевств и княжеств [Дорфман, 2007а, с. 261].

1724 г. Указом Петра I создается Академия наук в России. Когда царь обдумывал учреждение Академии, он долго сомневался, что создавать: Академию наук или университет? Мысль о создании Академии наук в России высказывалась Петром I еще в 1698–1699 гг. Позднее он посетил Берлинскую академию наук, Марбургский и Оксфордский университеты, Гринвичскую обсерваторию (основанную в 1675 г.), а в 1717 г. был избран членом Парижской академии наук. Петр I обсуждал вопрос о создании Академии наук с Г. Лейбницем, а переговоры о приглашении иностранных ученых для работы в России были начаты в 1721 г. [Федотов, 2003, с. 127].

Определенность наступила лишь тогда, когда 22 января 1724 г. Петр I представил сенату Проект — документ, в котором впервые в мировой практике развивалась идея создания в едином учреждении, под общим руководством, с общим штатом и бюджетом Академии наук и художеств как исследовательского учреждения, университета и гимназии. Последние были призваны готовить кадры для Академии. В проекте университет определялся как «собрание ученых людей, которые наукам высоким, до какого состояния оные дошли, младых людей обучают». Университет был неотъемлемой частью Академии: отсюда она получала пополнение. Таким образом, в России создавалось единое научно-образовательное учреждение, все части которого были тесно связаны [Платэ, 1999].

1724 г. — *наше время*. Можно утверждать, что Российская академия наук почти за 300 лет существования оправдала надежды своего создателя Петра I: она всегда стремилась «через новые инвенты совершать и умножать» науки, чтобы «через обучение и расположение оных польза в народе впредь была» [Платэ, 1999].

1726 г. В Санкт-Петербурге, в гимназии при Академии (фактически в первом университете Академии), начинают обучаться студенты. Профессоров пригласили из-за границы. Приехали ученые первой величины: математики и физики Иоганн Бернулли (1667–1748) и его сын Даниил (1700–1782), математик Леонард Эйлер (1707–1783), историк Готлиб Байер (1694–1738), астроном Жозеф Делиль (1688–1768) и др. Со студентами занимались индивидуально. Так были обучены первые русские академики: Степан Петрович Крашенинников (1711–1755), который еще студентом прибыл 14 октября 1737 г. в составе Второй Камчатской экспедиции на Камчатку и написал впоследствии свой капитальный труд «Описание земли Камчатки» [1755]; Иван Иванович Лепехин (1740–1802), ставший в 1783 г. неперемненным секретарем Российской академии. Относительно регулярно академический университет работал до 1750–1760 гг., пока его опекал М. В. Ломоносов. После его ухода в 1755 г. в Московский университет (вместе с ним ушли и лучшие профессора) академический университет стал угасать. В 1767 г. он был упразднен, сыграв важную роль в воспитании первых отечественных академиков [Платэ, 1999].

1729 г. Открытие Шведской академии наук в Стокгольме [Дорфман, 2007а, с. 26].

1755 г. К середине XVIII в. в России сложились все условия для открытия университета настоящего, самостоятельного, построенного с учетом западных традиций, но на свой лад. У истоков Московского университета стояли три выдающиеся личности — «дщерь Петрова» императрица Елизавета Петровна, ее фаворит граф Иван Васильевич Шувалов и Михаил Васильевич Ломоносов.

12 января. Императрица Елизавета Петровна подписала Указ об открытии Московского университета (ныне всемирно известный МГУ). Именно этот день стал отмечаться как день рождения университета, а святая Татиана, которая когда-то в Древнем Риме противостояла жестокости язычников, была объявлена покровительницей студентов и профессоров. В Татьянин день все, молодые и старые, баловни судьбы и неудачники, вновь получали возможность окунуться в неповторимую атмосферу университетского единства [Павловская, 2005].

1755 г. — *наше время*. Россия за последнее десятилетие проиграла мировым державам по очень многим статьям, кроме, быть может, одной — борьбы за знания. В этом немаловажная заслуга принадлежит именно Московскому государственному университету [Садовничий, 1999].

1773 г. В Санкт-Петербурге создается Горное училище (ныне Горный институт).

1819 г. Создание университета в Санкт-Петербурге.

2-я половина XIX в. Имели место выдающиеся успехи почти во всех областях естествознания. Резко возросла потребность в инженерах, что привело прежде всего к созданию учебных физических лабораторий при высших учебных заведениях.

1846 г. Открытие студенческой физической лаборатории в Гейдельбергском университете.

1865 г. По инициативе профессора Ф. Ф. Петрушевского (1828–1904) в Петербургском университете создается физический практикум.

1866–1868 гг. Возникают учебные физические лаборатории в Оксфорде, Геттингене и Сорбонне.

1872 г. Некоторые известные германские ученые внесли предложение о создании Государственного института точных наук и точной механики. Данный проект удалось осуществить в 1887–1888 гг., когда известный изобретатель и промышленник Варнер фон Сименс (1816–1892) пожертвовал на эту цель 500 тыс. марок, а германский рейхстаг ассигновал дополнительные средства. Созданием такого института фактически обозначено начало новой фазы — срастания науки и промышленности под руководством государства [Дорфман, 2007б, с. 85–89].

1-я половина XX в. Начиная с конца 1917 г., т. е. с момента появления социалистического государства, развитие взаимоотношений науки и общества оказывается существенно различным в социалистических и капиталистических странах.

1909–1911 гг. С целью усиления позиций России на Дальнем Востоке город Петропавловск-Камчатский становится губернским (областным) центром, в котором открывается педагогическое училище.

1914 г. Период Первой мировой войны явился в капиталистических странах логическим продолжением начавшегося задолго до войны срастания работы ученых с деятельностью частных промышленных предприятий. Начиная с 1914 г. промышленное производство во всех воюющих странах было перенесено на обслуживание военных действий. Так, к руководству военными физическими исследованиями были привлечены: во Франции — П. Ланжевен (1872–1946), видный ученый и общественный деятель; в Англии — Э. Резерфорд (1871–1937), автор планетарной модели атома; в США — А. Майкельсон (1852–1931) и Р. Милликен (1868–1953), видные физики-экспериментаторы.

1919 г. В Программе Коммунистической партии, принятой VIII съездом в 1919 г., было записано: «Советская власть уже приняла целый ряд мер, направленных к развитию науки и ее сближению с производством: создание сети новых научно-исследовательских институтов, лабораторий, испытательных станций, опытных производств по проверке новых методов и т. д. РКП, поддерживая все эти меры, стремится к их дальнейшему развитию и созданию наиболее благоприятных условий научной работы в связи с поднятием производительных сил страны» [Федотов, 2003, с. 130].

1940–1950 гг. В СССР после Второй мировой войны «атомный проект» по созданию атомной бомбы возглавил И. В. Курчатов (1903–1960), виднейший ученый и общественный деятель СССР [Дорфман, 2007б, с. 218].

2-я половина XX в. — настоящее время. История учит, что наука шаг за шагом превращается в производительную силу и вплотную подходит к границам техники и инженерии. При этом превращение физики в производительную силу имеет фундаментальное значение и будет играть в последующем главенствующую роль. Все больше усиливается международная кооперация ученых, а иначе просто невозможно проводить исследования, которые становятся все более и более дорогими. Даже самое богатое государство не может себе позволить такие расходы. Примером тому служат работы в области астрономии (по исследованию звезд, галактик и экзопланет), физики высоких энергий (по созданию ускорителей элементарных частиц), освоения космического пространства и др.

1940 г. Группа виднейших ученых Академии наук СССР обратилась в правительство с предложением о создании учебного заведения особого типа, в котором студенты наряду с обучением проводили бы научные эксперименты в исследовательских институтах. Предложение было одобрено.

1943 г. Создается Академия педагогических наук (АПН) РСФСР.

1966 г. В результате преобразования АПН РСФСР создается АПН СССР — высшее научное учреждение, объединяющее выдающихся ученых в области педагогики и деятелей народного образования [Советский..., 1983, с. 30].

1946–1952 гг. На базе МГУ был создан физико-технический факультет, который в 1952 г. был преобразован в Московский физико-технический институт (МФТИ).

1955 г. В СССР осуществляется переход на смешанную форму обучения (в одном классе учатся и девочки, и мальчики).

1957 г. Создается Сибирское отделение Академии наук СССР (СО АН СССР) с центром в Новосибирске, в которое были объединены все организации и учреждения АН СССР, расположенные к востоку от Урала. При организации СО принцип интеграции науки и образования по «системе физтеха» был одним из основополагающих. При создании Новосибирского Академгородка руководствовались тремя правилами: наибольшее число проблем современной науки решается на стыках наук; тесная связь с народным хозяйством; правильное сочетание ученых старшего поколения и молодежи [Платэ, 1999; Федотов, 2003, с. 133].

1957 г. Принимается решение об организации в Петропавловске-Камчатском высшего технического заведения рыбохозяйственного профиля. В этом же году в деревянном здании Школы совершенствования кадров командного плавсостава Камчатского совнархоза открывается учебно-консультационный пункт (УПК) Всесоюзного заочного института рыбной промышленности.

1958–1959 гг. Преобразование УПК Всесоюзного института рыбной промышленности в Камчатский УПК заочного факультета Дальрыбвтуза.

1968–1969 гг. Приняты первые 100 студентов на дневное обучение.

1987 г. Камчатский филиал Дальрыбвтуза превратился в Петропавловск-Камчатское высшее инженерное училище.

2000 г. Образование Камчатского государственного технического университета (КамчатГТУ). В настоящее время университет размещается в 12 корпусах, имеет Дворец культуры, собственное издательство. В его состав входит колледж, дающий среднее специальное образование по 9 специальностям. В 2004 г. в университете обучалось более 7300 студентов [Гаврилов, 2002].

2006 г. Начало создания в КамчатГТУ технопарка.

1958 г. В Петропавловске-Камчатском открывается Камчатский государственный педагогический институт (КГПИ).

2002 г. В связи с последними событиями, происходящими в нашей стране, камчатская наука, как и наука всей страны, быстро «стареет». В этой связи в КГПИ создается совместно с камчатскими институтами Академии наук Камчатская региональная ассоциация «Учебный научный центр» (КРАУНЦ). В рамках этого объединения на физическом факультете образована новая кафедра «Геология, география и геофизика», одной из главных целей которой является подготовка научных кадров для камчатской науки. В течение нескольких последних лет научными сотрудниками камчатских академических институтов стали первые выпускники этой кафедры, приступившие к решению задач, стоящих перед наукой и Камчатским краем.

2004 г. Приказом ректора в КГПИ создается технопарк.

2005 г. КГПИ преобразуется в Камчатский государственный университет (КамГУ им. Витуса Беринга). С момента его образования в университете стали организовываться корпоративные кафедры, позволяющие готовить кадры по «запросу» предприятий и учреждений региона.

1963 г. При МГУ и Новосибирском университете создаются школы-интернаты, в которые после специальных экзаменов принимаются ученики 9–10-х классов общеобразовательных школ с целью более углубленного изучения физики, математики, химии и биологии. Выпускники этих школ, как правило, легко поступают в шефствующие и другие университеты, затем в аспирантуру и быстро защищают диссертации. За прошедшие десятилетия для многих выпускников камчатских общеобразовательных школ эти специализированные школы послужили хорошим трамплином в науку.

1965 г. В СССР осуществлен переход от 10-летнего обучения к 11-летнему и от 7-летнего незаконченного общего образования к 8-летнему.

1970 г. Создан Дальневосточный научный центр (ДВНЦ), впоследствии преобразованный в Дальневосточное отделение (ДВО) АН СССР с центром во Владивостоке. В него перешли все учреждения СО АН СССР, находившиеся на Дальнем Востоке СССР в городах Владивосток, Хабаровск, Магадан, Южно-Сахалинск, Петропавловск-Камчатский и др. Создание ДВО способствовало усилению науки и образования на Дальнем Востоке России.

1990-е гг. В связи с перестройкой из России начался интенсивный отток научно-технических высококвалифицированных кадров, что доказывает высокий уровень сложившейся за последние десятилетия системы получения образования и фундаментальной науки в СССР и России [Викулин, 2005]. Действительно, несмотря на то что ресурсное обеспечение российских вузов

в 50 раз меньше, чем европейских университетов, а разрыв с американскими вузами еще выше, российские студенты и школьники до сих пор регулярно занимают призовые места на многочисленных международных олимпиадах. Это оказалось возможным отчасти потому, что выпускники наших школ оказываются по уровню подготовки намного выше, чем их ровесники за рубежом [Арутюнов, Стрекова, 2003, с. 122]. Наше преимущество состоит в том, что мы своевременно и мощно используем принцип фундаментальной подготовки.

2000-е гг. Начало реформы образования в России. В общеобразовательных школах введен ЕГЭ — единый государственный экзамен, результаты которого должны учитываться при поступлении в высшие учебные заведения. Отношение к реформе неоднозначное. Чем закончится эксперимент — покажет время.

2005 г. Выступлением 11 января Президента В. В. Путина в Новосибирском Академгородке Россия открывает путь инновационного развития [Викулин, 2005].

28 апреля. В Петропавловске-Камчатском по инициативе ИВиС ДВО РАН и КамГУ, а также при поддержке городской администрации прошел научно-практический семинар, посвященный «смотрю» инновационного потенциала региона, который оказался достаточно высоким [Место..., 2005].

2008 г. Начало создания корпоративных учебно-научных кафедр в Институте вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН и в КамчатГТУ.

Литература

1. Арутюнов В. С., Стрекова Л. Н. Социологические основы научной деятельности. — М.: Наука, 2003. — 299 с.
2. Викулин А. В. Инновационный путь развития региона как необходимое и достаточное условие увеличения благосостояния жителей // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2005. — № 5. — С. 10–16.
3. Викулин А. В. Хроника развития естественнонаучных представлений о ротационных и вихревых движениях // Вестник КамчатГТУ. — 2007. — Вып. 6. — С. 64–77.
4. Викулин А. В., Викулина С. А., Аргас Л. Новые данные о Лиссабонском землетрясении 01.11.1755 // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2007. — № 2. — С. 74–86.
5. Гаврилов С. В. Начало подготовки специалистов морского и рыбохозяйственного профиля на Камчатке // Вопр. истории рыбной промышленности Камчатки: сб. тр. — Вып. 5. — Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2002. — С. 6–41.
6. Грицак Е. Н. Саламанка. — М.: Вече, 2006. — 224 с.
7. Джуа М. История химии. — М.: Мир, 1966. — 452 с.
8. Дорфман Я. Г. Всемирная история физики: с древнейших времен до конца XVIII века. — М.: ДомКнига, 2007а. — 352 с.
9. Дорфман Я. Г. Всемирная история физики: с начала XIX до середины XX вв. — М.: ДомКнига, 2007б. — 320 с.
10. Исаков А. Я. Пионеры цивилизации. — Петропавловск-Камчатский: Новая кн., 2004а. — 32 с.
11. Исаков А. Я. Концепции современного естествознания. Древние цивилизации. Античный период. Эпоха Возрождения. — Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004б. — 165 с.
12. Испания: путеводитель. — М.: Авангард, 2007. — 240 с.
13. Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1. — М.: Учпедгиз, 1956. — 564 с.
14. Место и роль города Петропавловска-Камчатского в инновационном развитии Камчатского региона: материалы науч.-практ. семинара / под ред. А. В. Викулина. — Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2005. — 83 с.
15. Павловская А. Именем Татианы // Вокруг света. — 2005. — № 1. — С. 54–69.
16. Платэ Н. А. Академия наук и развитие образования в России // Вестн. РАН. — 1999. — Т. 69. — № 12. — С. 1063–1069.
17. Попенченко А., Семашко А. Саламанка — город-университет // Вокруг света. — 2006. — № 2. — С. 114–129.
18. Садовничий В. А. Слово о Московском университете // Вестн. РАН. — 1999. — Т. 69. — № 12. — С. 1059–1080.
19. Советский энциклопедический словарь. — М.: Сов. энцикл., 1983. — 1600 с.
20. Федотов С. А. Исследования по вулканологии и сейсмологии, их развитие и значение на Камчатке, история отечественной науки. — Петропавловск-Камчатский: Новая кн., 2003. — 184 с.

А. В. Викулин¹, С. А. Викулина²¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*² *Камчатский филиал ГС РАН*

ЭКСПЕДИЦИЯ РЯБУШИНСКОГО И СТАНОВЛЕНИЕ СЕЙСМОЛОГИИ И ДЕМОКРАТИИ НА КАМЧАТКЕ*

Экспедиция Русского географического общества России 1908–1909 гг., организованная на средства миллионера-мецената Ф. П. Рябушинского, является одним из важнейших мероприятий, положивших начало всестороннему комплексному развитию всего Дальнего Востока России и, как следствие, окончательному закреплению территории Камчатки за Россией.

Династия Рябушинских:

главным является «дело, которому ты служишь»

[Герман, 1967; Петров, 1997]

Родоначальником династии Рябушинских был уроженец слободы Панфутьево Боровского монастыря Калужской губернии Михайло Яковлев (1786–1858) — сын крестьянина, который в 1823 г. объявил 8 тыс. рублей капитала и просил записать его с семейством в 3-ю купеческую гильдию. Капитал в 2 млн рублей перешел к его сыновьям Павлу (1820–1899) и Василию (1826–1885). Капитал уже в 20 млн рублей наследовали тринадцать детей Павла Михайловича Рябушинского, крупнейшего промышленника и влиятельнейшего банкира, считавшего главной целью «не наживу, а дело». Все дети получили неплохое образование. «Богатство обязывает», — любил повторять старший третьего поколения семейства Павел Павлович (1871–1924).

Многочисленная фамилия Рябушинских была богата одаренными в различных сферах людьми. Наука и искусство были теми областями человеческой деятельности, которые притягивали буквально всех представителей третьего поколения. Одни сочетали меценатство и коллекционирование с активной предпринимательской деятельностью, для других искусство и мир знаний стали главным жизненным поприщем.

В 1904 г. Дмитрий Павлович (1882–1962) в семейном имении Рябушинских близ деревни Кучино основал на свои средства Аэродинамический институт — первый в мире научно-исследовательский институт такого профиля. На базе этого института впоследствии был создан Центр авиационной науки СССР — Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ) им. Н. Е. Жуковского [Чернышев, 2008].

Большое внимание братья Рябушинские уделяли освоению природных богатств России. Федора Павловича (1895–1910) привлекала Камчатка. На организацию научной экспедиции 1908–1909 гг. на этот полуостров он пожертвовал громадную по тем временам сумму 200 тыс. руб. Экспедиция Ф. П. Рябушинского должна была всесторонне изучить природные богатства и население далекой окраины. Федор Павлович сам планировал участвовать в экспедиции, но здоровье не позволило ему сделать это.

Осенью 1913 г. Павел Павлович решает организовать собственную «Московскую экспедицию по отысканию радия» с бюджетом около миллиона рублей и привлекает к ее финансированию более 40 московских торгово-промышленных фирм и влиятельных персон. Весной — летом 1914 г. экспедиция должна была работать в двух перспективных районах — Забайкалье и Ферганской долине. Экспедиция П. П. Рябушинского должна была действовать в контакте с экспедицией Академии наук, которую удалось «пробить» В. И. Вернадскому. Весной 1914 г. поисковые партии отправились с Сибирь и Среднюю Азию, но продолжению работ помешала начавшаяся Первая мировая война — экспедиция была свернута и поиски редкого элемента отложены на долгие годы.

* 41 (242). 100-летие Камчатской экспедиции Русского географического общества (1908–1910): материалы Всерос. науч. конф. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 76–85.

Дальний Восток России в конце XIX — начале XX вв.

[Аров, 2007]

1880 г. С этого периода японцы начинают безнаказанно вести хищнический лов лосося.

1890 г. Посещение военным губернатором Приморской области П. Ф. Унтербергом Камчатки, в результате чего появляются первые наброски плана о выделении Камчатки вместе с остальными северными уездами в отдельную область.

1895–1897 гг. В связи с началом строительства на Дальнем Востоке железных дорог на Камчатке работает Охотско-Камчатская горная экспедиция под руководством К. И. Богдановича.

1904–1905 гг. Русско-японская война. Весть о войне пришла на Камчатку через три месяца после ее начала. В период войны японцы высадили на Камчатке десятки вооруженных десантов с целью захвата незащищенной русской окраины — здесь не было ни одного русского солдата. Жители сами создали боевые дружины и отразили все нападения врага.

1906 г., декабрь. Военный губернатор Приморской области В. Е. Флуг первым поднимает вопрос «о необходимости выделения северных уездов области в особую административную единицу с центром в Петропавловске».

1907 г. Россия и Япония в соответствии с Портсмутским мирным договором подписывают рыболовную конвенцию, по которой японцы получают право арендовать на равных с русскими подданными рыболовные участки на российском побережье. В результате появления бесчисленных японских рыбалок возникает реальная угроза аннексии Камчатки мирной Японией.

Как следует из воспоминаний В. Коянто, японские рыбалки на Камчатке существовали вплоть до 1941 г. — начала Великой Отечественной войны [Коянто, 2008].

1908 г. Приамурский генерал-губернатор П. Ф. Унтерберг направляет Правительству секретный доклад «Ближайшие задачи в деле закрепления за нами Приамурского края».

31 марта об этом же говорил в Государственной думе П. А. Столыпин: «На нашей далекой окраине — на Камчатке и на побережье Охотского моря уже начался какой-то недобрый процесс. В наш государственный организм уже вклинивается постороннее тело. Для того чтобы обнять этот вопрос не только с технической, со стратегической точки зрения, но с более широкой общегосударственной, политической, надо признать, как важно для этой окраины заселение ее» [Аров, 2007].

29 октября Министерство внутренних дел опубликовало проект «Об административном переустройстве Приморской области».

1909 г. 28 апреля Государственная дума заслушала доклад комиссии по направлению законодательных предложений «Об административном переустройстве Приморской области и острова Сахалин». В докладе говорилось: «Речь идет не об образовании Камчатской области, а о восстановлении некогда существовавшей особой административной единицы — Камчатской области... Мы признаем необходимым устройство беспроволочного телеграфа между Николаевском и Петропавловском и далее до Чукотского полуострова Мы говорим о принятии санитарных мер и об устройстве медицинской помощи в Камчатской области».

17 июля опубликовано «Временное положение об управлении Камчатской областью».

22 июля Николай II назначает В. В. Перфильева, не дворянина, «исполняющим должность камчатского губернатора».

К этому времени между центром России и Дальним Востоком (Владивостоком) уже существовала устойчивая радио- и телеграфная связь. Была закончена постройка телеграфа на участке Иркутск — Якутск — Охотск [Вопросы..., 2007, с. 459–462; 2008].

Таким образом, в 1908–1909 гг. создаются все (и необходимые, и достаточные) условия, позволившие в дальнейшем реально усилить пограничную Камчатку и тем самым сохранить ее в составе России.

Камчатка в начале XX века

[Аров, 2007; Викулин, Семенец, Широков, 1987; Пурин, 2008]

1855–1909 гг. являются годами забвения: Камчатка не имеет ни школ, ни врачей, ни больниц. Русские вольные люди, покорив Камчатку, заняли все удобные для рыболовства, звероловства и сельского хозяйства места и стали с тех пор господами над туземцами. Здесь, на далекой окраине, каждый эксплуатировал инородцев. Частым явлением среди коренного населения был голод. Например, в 1890 г. якуты питались сосновой корой и мясом палогого скота. В 1906–1907 гг. ламуты и юагиры убивали свои семьи и питались их мясом.

1896–1901 гг. На Камчатке зарождается рыбная промышленность, которая ввиду отсутствия свободных рабочих рук развивается очень медленно. Местное население занималось своими делами, и привлечь его к работе на рыбных промыслах было невозможно — там работали в основном японцы. В 1901 г. в Тарьинской бухте строится первый рыбоконсервный завод.

1897 г. Приамурский генерал-губернатор С. М. Духовский посещает Петропавловск: «Петропавловск — небольшая группа потемневших, со следами разрушения домов; ничтожное число, менее 400, жителей, живущих особой, до крайности суженной в своих интересах жизнью — вот что осталось от областного центра и морского порта Петропавловска».

По переписи 1897 г. в Петропавловском округе проживало 8 365 человек.

1908–1909 гг. На Камчатке работают две экспедиции: переселенческая и Русского географического общества, оснащенная на средства Ф. П. Рябушинского. Целью первой экспедиции является переселение российского населения на территорию Камчатки с целью закрепления края за Россией.

Цель второй экспедиции, по словам одного из самых активных ее участников — начальника Ботанического отряда В. Л. Комарова, «была исключительно научная — возможно полное и всестороннее описание Камчатки; никакими другими целями экспедиция не задавалась» [Комаров, 2008, с. 15]. Именно в ходе работы этой экспедиции и произошло знакомство будущего академика и президента Академии наук СССР В. Л. Комарова с потомком «сына боярского из Иркутска» П. Т. Новограбленовым (1892–1937), и это знакомство определило всю дальнейшую жизнь совсем еще молодого камчадала [Харитановский, 1963].

1909 г., 16 августа. Губернатор В. В. Перфильев с большой группой чиновников («интеллигентные силы — учителя, врачи, духовенство, крупные промышленники и пушники, среди последних немало американцев, англичан и японцев» [Пурин, 2008]) прибывает в Петропавловск. Здесь сразу же развернулось бурное строительство. На строительстве трудилось около 300 китайцев и корейцев.

1910 г. В Петропавловске, как областном центре, при училище открываются учительские курсы, окончив которые в 1913 г. П. Т. Новограбленов поступает в Учительский (ныне Политехнический) институт в Томске.

1910–1913 гг. В Петропавловске построена инженером И. С. Багиновым уникальная по тем временам и одна из мощнейших в мире радиостанция, напрямую соединившая Камчатку с Николаевском. Для этого на Камчатку были отправлены тысячи рабочих, сотни лошадей и десяток транспортов с материалами и продовольствием. Для работ пришлось завозить абсолютно все — от гвоздя до телеграфного столба: продукты, одежду, корм для лошадей, телеги и сани. Началось строительство дороги, помещений для рабочих и учреждений. Это было огромное, не имеющее аналога в мире предприятие государственного масштаба [Вопросы..., 2007, с. 459–462], которое обошлось российской казне примерно в 20 млн рублей — деньги по тем временам просто фантастические.

В жизни полуострова произошла настоящая революция. Теперь вести из центра в Петропавловск поступали в тот же день. Одновременно началось строительство телеграфной линии протяженностью 3000 км между Петропавловском и Охотском. В течение трех лет телеграфная линия была проведена от Петропавловска до Тигиля (900 км). Она связала все населенные пункты западного побережья Камчатки.

«На первом Всеподданнейшем докладе губернатора В. В. Перфильева Государь соизволил начертать: Камчатка — жемчужина в короне российской» [Пурин, 2008].

Петропавловск, по сути, становится центром связи между Россией, Японией и США — усиливается геополитическое положение Камчатки [Вопросы..., 2007, с. 462].

Для обслуживания радиостанции в Петропавловск прибывает выпускник Санкт-Петербургского электротехнического института уроженец г. Валк (Лифляндия, Латвия) Александр Антонович Пурин (1885–1952), сыгравший в истории Камчатки видную роль.

1911–1915 гг. В результате ходатайства академика Б. Б. Голицына в Петропавловске открывается сейсмическая станция как составная часть сети сейсмических станций России. Первым наблюдателем станции в Петропавловске становится чиновник радиотелеграфа А. А. Пурин.

В это время в мире насчитывалось около 60 сейсмических станций. Четвертая их часть приходилась на долю России. Сейсмостанция в Петропавловске, удаленная от центра на максимально возможное расстояние, занимала достойное место.

1915 г., 18 июля. В этот день в центральную обсерваторию в Пулковое, расположенную близ Санкт-Петербурга, ушла первая сводка о записи камчатского землетрясения: «18 июля

01 час 33 минуты в продолжение часа сейсмографы описывали колебание почвы, максимальное отклонение на канале север — юг 24 мм». Таким образом, эту дату можно считать началом детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке и на всем Дальнем Востоке России. Ближайшие к Петропавловску российские сейсмические станции располагались в Иркутске, Ташкенте и Екатеринбурге.

Район радиостанции, вблизи которой была построена сейсмическая и хорошо оборудованная метеорологическая станция, становится крупным культурным и научным центром. Здесь кроме регистрации землетрясений проводились наблюдения в области электрометеорологии, в частности наблюдения «за воздушными электрическими экранами и их передвижением». При Петропавловской радиостанции были открыты курсы радиотелеграфии и радиотехники, на которые привлекались уроженцы Камчатки, получившие соответствующее образование, и из их числа готовили кадры работников по радиотелеграфии. Правительство России решило построить в Петропавловске радиолобораторию, мастерские и с этой целью отпустило 1 000 рублей на опыты по радиотелеграфии [Вопросы..., 2007, с. 459–462].

Как видим, возникла и стала реализовываться в жизнь идея создания в Петропавловске на базе сейсмической станции и радиостанции комплексной геофизической обсерватории. Немалая заслуга в этом принадлежит именно А. А. Пурину, который написал ряд научных работ по данным темам [Пурин, 1917; 2008, с. 109; Пустовит, 2007]. Однако осуществлению этих поистине грандиозных для Камчатки планов в жизнь помешала сначала Первая мировая война, затем Октябрьская революция и последовавшая за ней жестокая и кровопролитная борьба за власть в Сибири и на Дальнем Востоке России.

1917 г., июнь. В Петропавловске выходит в свет первая такого рода на Камчатке, Дальнем Востоке и вообще за пределами европейской части России брошюра А. А. Пурина «Землетрясения Камчатки и их регистрация». В книжке приводится подробное научное описание сильного ($M=8$) землетрясения на Камчатке и Командорских островах 30.01.1917 г. и высказывается мысль о возможности предсказания сильных землетрясений.

20 июля — 8 августа. В Петропавловске происходит первый областной съезд 46 представителей области. Организовывается областной Комитет общественной безопасности, председателем которого избирается А. А. Пурин — первый демократически выбранный руководитель Камчатки [Пирагис, 2008].

1918 г., май — июль. И. Е. Ларин (1890–1980) — один из организаторов установления советской власти на Камчатке, избирается председателем первых Советов рабочих и солдатских депутатов Камчатки [Пирагис, 2008, с. 56–57].

Несколько позже И. Е. Ларин так писал о населении Камчатки: «Главная масса населения — инородцы, стоящие на весьма низкой ступени культурного и умственного развития... Русское население в большинстве своем состоит из так называемых казаков — выходцев Сибири и переселенцев, между которыми рассосались чиновники (старого покроя), спекулянты, барахольщики и другая нечисть, высасывающая соки населения, для которых необходима железная метла» [Пустовит, 2007].

В городе фактически установилось двоевластие. Из сохранившихся документов следует, что А. А. Пурин обращается к Советам с просьбой о выделении «пшеничного спирта крепостью 95°», необходимого для растворения канифоли и закрепления сейсмограмм, и получает отказ. В результате А. А. Пурин передает сейсмостанцию Асаевичу, что приводит фактически к прекращению инструментальных сейсмологических наблюдений на Камчатке [Викулин, Синельникова, 1985].

Лето — осень. Из сохранившихся документов можно сделать вывод о том, что позиции областного Комитета, руководимого А. А. Пуриным, среди населения усиливаются, и они постепенно берут верх над Советами. На Камчатку прибывает целый ряд различных научных экспедиций. Переселенческое управление (видимо, из столицы Сибири в Омске и/или из Владивостока) присылает свои организации для постройки дороги, гидротехнических работ. Были открыты десятки новых школ и фельдшерских пунктов. Приезжают врачи и учителя, много людей с высшим образованием — это клад для края. Открываются новые магазины. Областной продовольственный комитет энергично (на сумму около 10 млн руб.) проводит для населения Камчатки заготовку продуктов во Владивостоке.

Именно в это время, окончив Томский учительский институт, прибывает в Петропавловск Прокопий Трифонович Новограбленов — первый камчадал с высшим образованием [Харитановский, 1963].

1918–1922 гг. П. Т. Новограбленов избирается гласным Городской думы, что впоследствии будет стоить ему жизни [Пустовит, 2007].

1919, май — 1922, январь. А. А. Пурин работает во Владивостоке заведующим гидрометеорологической частью Владивостокской морской обсерватории.

1922, январь — апрель. А. А. Пурин находится в Петропавловске в качестве члена особого совещания Временного Приамурского правительства по оказанию культурно-экономической помощи населению Охотско-Камчатского края.

1922 г., октябрь. А. А. Пурин — правитель канцелярии начальника области, которым являлся П. М. Иванов-Мумжиев.

2 ноября. В связи с неизбежным взятием «красными партизанскими частями» Петропавловска А. А. Пурин уже навсегда покидает Камчатку.

1922, ноябрь. Окончательное становление советской власти на Камчатке — партизанские отряды занимают Петропавловск-Камчатский и через некоторое время контролируют всю область.

Китай — Камчатка

1923–1952 гг. А. А. Пурин проживает в эмиграции в Китае, в городах Циндао и Шанхай. Неоднократно печатается в сборнике русских эмигрантов «Вольная Сибирь», издававшемся в Праге [Пурин, 1927, 1928].

1940 г. В Шанхае по инициативе А. А. Пурина широко отмечается 200-летие присоединения Камчатки к России [Вопросы..., 2008, с. 104].

1952 г. Органами китайской безопасности (видимо, по «наводке» соответствующих органов СССР) А. А. Пурин (как и многие другие русские эмигранты, проживавшие в Китае) арестовывается и передается в Управление Министерства государственной безопасности по Хабаровскому краю, где ему было предъявлено обвинение во враждебной деятельности против СССР. В этом же году А. А. Пурин умирает в тюремной больнице в Хабаровске во время следствия [Пустовит, 2007].

1998 г. А. А. Пурин полностью реабилитирован по ходатайству директора Центра документации новейшей истории Камчатской области В. П. Пустовита.

«Направляем копии фотографии и заключения о реабилитации Пурина Александра Антоновича из архивного уголовного дела П-83114. Сведений о его родственниках в деле не имеется, с заключениями по поводу его судьбы никто не обращался. В 1996 г. нами в Ваш адрес направлялись копии протоколов допросов А. А. Пурина с биографическими данными. Умер А. А. Пурин 10.08.1952 г., находясь на излечении в тюремной больнице, от двухсторонней гнойной бронхопневмонии. Место его захоронения — Хабаровское городское кладбище» [Пустовит, 2007].

Камчатка

[Викулин, Семенец, Широков, 1987]

1923 г., 15 апреля. «Я, Камчатский Губернский прокурор ПЕРЕСВЕТ-СОЛТАН, рассмотрев дело НОВОГРАБЛЕНОВА Прокопия Трифионовича по обвинению в контрреволюционной деятельности против Р.С.Ф.С.Р., принимая во внимание его активное и сознательное участие в вышеуказанных содеянных преступлениях, ПОСТАНОВИЛ: примененную следователем меру пресечения — поручительство имущественное — изменить и НОВОГРАБЛЕНОВА П. Т. в Губернскую тюрьму заключить» [Пустовит, 2007].

1923–1929 гг. На Камчатке происходит 03.02.1923 г. сильнейшее ($M = 8,5$) землетрясение и цунами, подробное описание последствий которых во всех населенных пунктах Камчатки составляется П. Т. Новограбленовым. Прокопий Трифионович пытается восстановить работу сейсмической станции, его консультирует заведующий сейсмической станцией во Владивостоке А. С. Уланов. Но полностью восстановить работу сейсмической станции ему так и не удается.

1930–1936 гг. В документах Камчатского управления гидрометеослужбы сохранилась копия телеграммы в Хабаровский крайком, из которой узнаем: «Сейсмическая станция прекратила наблюдения в мае 1933 г. По заключению экспедиции Академии наук, предполагавшей восстановить станцию в 1935 г., необходимо поставить сейсмограф новейшей системы, также произвести капитальный ремонт пола, утерявшего горизонтальность».

П. Т. Новограбленов посвящал очень много времени исследованию Камчатки. Им составлен каталог камчатских вулканов и описаны многие термальные источники. П. Т. Новограбленов продолжил начатый В. Л. Комаровым во время экспедиции 1908–1909 гг. сбор гербария, кото-

рый в настоящее время хранится в Музее землеведения МГУ. Всего перу П.Т. Новограбленова принадлежит 50 статей и большое количество научных сообщений, касающихся ботаники, геологии, зоологии, археологии, вулканологии и сейсмологии. Из них 14 работ напечатано в изданиях Академии наук СССР и Русского географического общества [Харитановский, 1963].

П. Т. Новограбленов был инспектором училища в Петропавловске и заведовал всеми образовательными учреждениями области. Тем не менее, несмотря на такую кипучую всестороннюю деятельность, П. Т. Новограбленов неоднократно «поражался в правах», подвергался «конфискации имущества» и арестовывался с содержанием в тюрьме [Пустовит, 2007].

1937 г. П. Т. Новограбленов репрессирован. О том, как это произошло, можно узнать из статьи в газете «Камчатский комсомолец» от 14 апреля 1989 г. «У него не было шансов выжить». В этой статье имя П. Т. Новограбленова не упоминается, но сообщается о группе лиц, репрессированных в 1937 г. Описание приводимых в газете событий совпадает с воспоминаниями Ю. С. Балахнова, который со слов матери узнал, как и за что ее родного брата арестовали в 1937 г. Осенью того же года его вместе с другими арестованными вывезли на барже в центральную часть бухты Бабия. Там их расстреливали и бросали в воду. Многие падали в воду живыми. О расстреле стало известно спустя месяц, и в течение этого месяца у родственников принимали передачи для арестованных.

Напряженная атмосфера, царившая в Петропавловске в 1930-х гг., отчетливо просматривается и в воспоминаниях Бориса Ивановича Пийпа (1906–1966), впоследствии основателя Института вулканологии и его первого директора [Пийп, 2006].

1946 г. На вулканостанции АН СССР в Ключах начинает работу сейсмическая станция.

1951 г., март. В Петропавловске при активном содействии и участии видного сейсмолога Н. В. Шебакина возобновила свою работу сейсмическая станция.

1952 г., 5 ноября. Большое Камчатское землетрясение, после которого цунами смыло Северо-Курильск. Землетрясение привлекло внимание Правительства СССР к проблемам сейсмической опасности и цунамиопасности тихоокеанского побережья СССР. В результате на Дальнем Востоке создаются комплексные научно-исследовательские институты Академии наук СССР, которые начинают проводить геофизический мониторинг [Викулин, 2000].

1957 г. П. Т. Новограбленов полностью реабилитирован. О жизни этого замечательного человека, так много сделавшего для просвещения и краеведения на Камчатке, рассказал писатель А.А. Харитановский [1963].

1961 г. — настоящее время. На Камчатке начинает работать сеть сейсмических станций и геофизических стационаров, которые действуют до настоящего времени, осуществляя непрерывную регистрацию землетрясений и других геофизических явлений в регионе. Материалы, получаемые сетями сейсмических и геофизических станций, обрабатываются и используются в научной и практической работе сотрудниками камчатских и российских научно-исследовательских институтов РАН и учеными всего мира.

Богатство обязывает

В словаре русского языка С. И. Ожегова, изданного в СССР в 1964 г., слова «меценат» и «меценатство» определяются следующим образом: «Меценат — в буржуазно-дворянском обществе: богатый покровитель наук и искусств. Меценатство — деятельность мецената» [Ожегов, 1964, с. 341]. Смысл очевиден — в советском обществе такого явления нет и быть не могло.

В нашем современном обществе меценатство постепенно начинает «включаться» в нашу жизнь и «набирать обороты»: такие люди, как Рябушинские, Морозовы, Третьяковы и им подобные появляются не вдруг — их появление становится возможным, когда меценатство становится выражением души общества.

Почему Федор Павлович Рябушинский пожертвовал на камчатскую экспедицию 1908–1909 гг. одну десятую часть своего личного состояния? Почему старший семейства Павел Павлович Рябушинский вложил немалые средства в организацию экспедиции 1914 г. по поиску радия и убедил многих русских промышленников и предпринимателей сделать то же самое? Почему совсем еще молодой Дмитрий Павлович Рябушинский не мог не создать Институт? Судите сами.

До начала XX в. истории был известен только один случай открытия научно-исследовательского института на свои средства — химиком Робертом Бойлем в 1662 г. в Англии [Дорфман, 2007, с. 134]. Второй такой случай — создание Института точных наук и точной механики

в Германии в 1887 г. — был осуществлен Вернером фон Сименсом совместно (наполовину) с рейхстагом [Викулин, Надольская, 2008]. Как видим, создание Института на свои средства является редким событием и, как показал российский опыт, неблагодарным и даже опасным для жизни.

Д. П. Рябушинский создал институт в 1904 г., будучи молодым человеком, в возрасте 22 лет. Н. Е. Жуковский (1847–1921) — участник создания института [Советский..., 1985, с. 440]. Произошло это сразу же после первого полета летательного аппарата братьев Райт 17 декабря 1903 г. Полет длился всего 51 секунду, но Дмитрий Павлович успел разглядеть, что за авиацией будущее, и просто не мог поступить по-другому. Вся его последующая жизнь — это служение авиации. В 1904 г. Н. Е. Жуковский сформулировал [Советский..., 1985, с. 440; Физический..., 1983, с. 192] и в 1906 г. доказал [Лойцянский, 1973, с. 28] общую теорию подъемной силы, основанную на идее присоединенного вихря. (В 1902 г. немецкий ученый Кутт доказал частный вид теоремы о подъемной силе [Лойцянский, 1973, с. 28]). В 1908–1912 гг. Дмитрий Павлович — студент физико-математического факультета Московского университета, его учителя — Н. Е. Жуковский и С. А. Чаплыгин. Созданным Институтом Дмитрий Павлович руководил до 1918 г., в 1904–1906 гг. работой института руководил Н. Е. Жуковский [Руденко, 2008]. С целью сохранения своего детища Д. П. Рябушинский в 1918 г. добровольно передает свои права на Институт советской власти и с 1919 г. продолжает свои научные исследования во Франции.

В 2008 г. отмечается 90-летие всемирно известного Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ), основание которого связывается с деятельностью заслуженного, с мировым именем ученого — Н. Е. Жуковского, нашего великого соотечественника, «отца русской авиации». Датой основания института считается 1 декабря 1918 г., когда по прямому указанию В. И. Ленина было издано соответствующее постановление Научно-технического отдела при Высшем совете народного хозяйства (Руденко, 2008). Этому действительно важному для нашей страны событию посвящена большая часть журнала «Наука и жизнь», на страницах которого достаточно подробно раскрыта работа института за весь период его существования [Наука..., 2008]. Директором института отмечено, что ЦАГИ создан на базе первого в мире Аэродинамического института в Кучино, организованного в 1904 г. на средства Д. М. Рябушинского [Чернышев, 2008]. С гордостью за отечественную науку отмечено, что «лишь спустя четыре года, в 1908-м, во Франции образовалась лаборатория Эйфеля, в 1912-м — Немецкий институт аэродинамики и только в 1915-м — NASA (тогда НАСА) в США» [Руденко, 2008]. Достаточно полно отмечены заслуги академиков Н. Е. Жуковского, С. А. Чаплыгина [Чернышев, 2008] и многих первых сотрудников Института, ставших впоследствии заслуженными учеными: В. П. Ветчинкина (1888–1950), эмигрировавшего из России в 1920 г., А. П. Фан-дер-Флита (1870–1941) и других [Замула, Нестеренко, 2008]. О роли же первопроходца Д. П. Рябушинского, фактически положившего начало эре исследовательских центров в области авиации во всем мире [Петров, 1997], сказано всего несколько слов [Руденко, 2008; Чернышев, 2008].

Передовое место в мире по вопросам авиации и космоса, которое занимал и по праву продолжает занимать ЦАГИ, несомненно, было обеспечено именно датой открытия института в Кучино и его своевременным, на достаточно высоком уровне, научно-техническим оборудованием. Еще в 1914 г., будучи директором института, Д. П. Рябушинский писал: «Задача аэродинамического полета разрешена, но на смену ей выдвигается новая, гораздо более трудная и грандиозная проблема — проблема перелета на другую планету» [Петров, 1997, с. 160]. Без создания института в 1918 г., без научно-технических разработок и «выращенных» в течение предыдущих 14 лет кадров современный авиационный и тем более космический уровень ЦАГИ и его многочисленных филиалов никак не был бы обеспечен.

Справедливости ради следует отметить, что 90-летие основания института в 1994 г. все же отмечалось: в Кучино была проведена конференция, начал создаваться мемориальный музей, стали публиковаться материалы, призванные отдать должное имени русского ученого и первопроходца в вопросах авиации и космонавтики Д. П. Рябушинского [Петров, 1997, с. 161].

Весь мир признал научные заслуги первого «покорителя воздушного пространства» Д. П. Рябушинского, ставшего членом-корреспондентом Академии наук Франции [Петров, 1997]. И только на своей родине, в России, он продолжает числиться в разряде «антисоветских» элементов. Именно по этой причине заслуги перед Отечеством и династии Рябушинских, и А. А. Пурина, и П. Т. Новограбленова, и других известных и менее известных наших соотечественников только-только начинают «как-то стыдливо» и нерешительно признаваться.

Заключение

Здание первой сейсмической станции в Петропавловске, построенное в 1914 г. по чертежам А. А. Пурина, сохранилось до настоящего времени. Сохранилась и начинается с большим трудом пробивать себе дорогу и добрая память о людях, искренним желанием которых было приумножение богатств и России, и нашего Камчатского края. Дело, начатое экспедицией 1908–1909 гг. Русского географического общества, организованной на средства Ф. П. Рябушинского, и активно подхваченное Б. Б. Голицыным, А. А. Пуриным, П. Т. Новограбленовым и другими, с честью и на высоком научно-техническом уровне продолжается и приумножается современниками.

На Камчатке имел место единственный в мировой истории случай, когда становление и сейсмологии, и демократии в регионе было связано с профессиональной деятельностью одного человека — Александра Антоновича Пурина, уроженца глухого, мало кому известного латвийского городка, выпускника Петербургского электротехнического института, первого сейсмолога Камчатки и ее первого демократически выбранного руководителя.

Литература

1. *Аров В. Н.* Административно-территориальное управление Камчатским краем (1697–1917 гг.) // *Вопр. истории Камчатки.* — Вып. 3. — Петропавловск-Камчатский: Новая кн., 2007. — С. 355–405.
2. *Викулин А. В.* Сейсмические вехи // *Пробл. сейсмичности Дальнего Востока: сб. науч. ст. / под ред. А. В. Викулина.* — Петропавловск-Камчатский: ОМСП ГС РАН, 2000. — С. 276–281.
3. *Викулин А. В., Надольская Н. И.* История развития образования и науки в мире, России и на Камчатке // *Вестн. КамчатГТУ.* — 2008. — Вып. 8. — С. 92–100.
4. *Викулин А. В., Синельникова Л. Г.* Начало сейсмологических наблюдений на Камчатке // *Вулканология и сейсмология.* — 1985. — № 6. — С. 102–106.
5. *Викулин А. В., Семенец В. Н., Широков В. А.* Землетрясение будет завтра. — Петропавловск-Камчатский: СЭТО-СТ, 1987. — 82 с.
6. *Вопросы истории Камчатки.* Вып. 3. — Петропавловск-Камчатский: Новая кн., 2007. — 472 с.
7. *Вопросы истории Камчатки.* Вып. 1. — Петропавловск-Камчатский: Новая кн., 2008. — 408 с.
8. *Герман Ю.* Дело, которому ты служишь. — М.: Молодая гвардия, 1967. — 416 с.
9. *Дорфман Я. Г.* Всемирная история физики: с древнейших времен до конца XVIII века. — М.: ДомКнига, 2007. — 352 с.
10. *Замула Г., Нестеренко Г.* Безопасность в небе рождается на Земле // *Наука и жизнь.* — 2008. — № 11. — С. 46–50.
11. *Комаров В. Л.* Путешествие по Камчатке в 1908–1909 гг. — Петропавловск-Камчатский: Новая кн., 2008. — 429 с.
12. *Коянто В.* Олени бежали к морю. — Петропавловск-Камчатский: Новая кн., 2008. — 319 с.
13. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1973. — 848 с.
14. *Наука и жизнь: ежемес. науч.-попул. журн.* — 2008. — № 11. — 160 с.
15. *Ожегов С. И.* Словарь русского языка. — М.: Сов. энцикл., 1964. — 900 с.
16. *Петров Ю. А.* Династия Рябушинских. — М.: Рус. кн., 1997. — 199 с.
17. *Пийп Б. И.* Дневники вулканолога Бориса Пийпа. — М.: Логата, 2006. — 160 с.
18. *Пирагис А.* Правители Камчатки. 1700–2007: краткий биограф. справ. — Петропавловск-Камчатский: Новая кн., 2008. — 112 с.
19. *Пурин А. А.* Землетрясения Камчатки и их регистрация. — Петропавловск-Камчатский, 1917. — 24 с.
20. *Пурин А. А.* В дни революции // *Вольная Сибирь: общественно-экон. сб. / под ред. И. А. Якушева.* — Прага, 1927. — № 2. — С. 61–92.
21. *Пурин А. А.* В дни революции в Охотско-Камчатском и Чукотско-Анадырском крае. Ч. 2 // *Вольная Сибирь: общественно-экон. сб. / под ред. И. А. Якушева.* — Прага. — 1928. — № 3. — С. 61–83.
22. *Пурин А. А.* Из прошлого и настоящего Камчатки // *Вопр. истории Камчатки.* Вып. 1. — Петропавловск-Камчатский: Новая кн., 2008. — С. 104–149.
23. *Пустовит В. П.* Антисоветский переворот 1918 г. в Петропавловске // *Вопр. истории Камчатки.* Вып. 3. — Петропавловск-Камчатский: Новая кн., 2007. — С. 306–329.
24. *Руденко Б.* Они учат летать самолеты // *Наука и жизнь.* — 2008. — № 11. — С. 2–11.
25. *Советский энциклопедический словарь.* — М.: Сов. энцикл., 1985. — 1600 с.
26. *Чернышев С. Л.* Центр авиационной науки // *Наука и жизнь.* — 2008. — № 11. — С. 12–16.
27. *Харитановский А. А.* Выдающийся натуралист Камчатки // *Вопр. географии Камчатки.* — 1963. — № 1. — С. 41–58.
28. *Физический энциклопедический словарь.* — М.: Сов. энцикл., 1983. — 928 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**РЕЗУЛЬТАТЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ,
ЗАДАЧИ,
ПРИЛОЖЕНИЯ**

РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ АВТОРОМ. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ И ПРОБЛЕМЫ ГЕОДИНАМИКИ

I. Использование представлений Ч. Цубои [1961] — А. В. Пейве [1961] — М. А. Садовского [2004] об «элементарных сейсмических» объемах [2; I.1, 6; 16; 17; 26] как своеобразных «квантах сейсмогеотектонической активности» [142, 149; IV.29, 151], а также идеи С. А. Федотова [2005] о цикличности (повторяемости) в качестве основных (фундаментальных) концепций сейсмического процесса, экспериментально доказанных высокой оправдываемостью сейсмического прогноза, оказалось перспективным.

В результате стало возможным:

- связать представления К. Моги [1988] о сейсмических брешах первого и второго типов с двумя выявленными автором классами землетрясений — соответственно сильнейшими и сильными. Очаги сильнейших землетрясений не перекрываются между собой в течение сейсмического периода (цикла). Для северо-западной окраины Тихого океана к таким событиям относятся землетрясения с $M \geq M^* = 7,7 \pm 0,2$ при продолжительности сейсмического периода «непересечения» их очагов $T_{sp} = 190 \pm 40$ лет. Сейсмические дыры в эпицентральных областях сильных землетрясений имеют тенденцию не перекрывать друг друга в очагах сильнейших землетрясений. Для Камчатки к классу сильных событий можно отнести землетрясения с $M \geq M^{**} = 5,0 \div 5,5$. Слабые землетрясения с $M < M^{**}$ являются *фоновыми* событиями;

- показать (квази) периодичность сейсмического процесса и тем самым уточнить представления С. А. Федотова о сейсмическом цикле: не цикличность, или повторяемость в одном месте, сейсмического режима, продолжительность которого, по С. А. Федотову [2005], для Камчатки, Курил и Северо-Восточной Японии составляет 140 ± 60 лет, а волновая природа сейсмического процесса с характерным периодом $T_i = 230 \pm 60$ лет и длиной волны, равной протяженности очага сильнейшего землетрясения;

- доказать, что очаги землетрясений взаимодействуют между собой;

- построить на примере окраины Тихого океана феноменологическую *волновую* модель сейсмического процесса как явления, реализуемого в пределах всего сейсмического пояса в течение отрезка времени T с продолжительностью много большей характерного сейсмического периода: $T_0 \approx T_{sp} \approx T_i \approx 200$ лет: $T \gg T_0$ [7; 17; 35; 51; I.5, 55].

Для решения этих задач потребовалось составить *однородный* магнитудный каталог землетрясений всей северо-западной окраины Тихого океана, включающей Японскую, Курило-Камчатскую и Алеутско-Аляскинскую дуги [8; I.2, 13; 14; 15; 18], и определить формулы перехода между всеми энергетическими и магнитудными классификациями, использовавшимися в этом регионе [12].

В результате автором *обоснована концепция «волнового сейсмического процесса»*, под которым понимается рассматриваемая в пространстве и во времени совокупность всех очагов сильнейших землетрясений, взаимодействующих между собой посредством волнового механизма [I.5, 55]. Такая концепция является физически более содержательной и, по сути, динамической по сравнению с ранее введенным Ю. В. Ризниченко [1985] статическим, по существу, понятием «сейсмический режим».

Актуальными представляются следующие задачи:

1. Исследование свойств сейсмического процесса в рамках известной в физике [Ландау, Лифшиц, 1964] концепции фазового пространства [170].

Для проведения таких исследований в настоящее время имеются достаточно полные и продолжительные каталоги землетрясений. Исследования в этом направлении только начинаются, и первые результаты [170; Захаров, 2002, 2007, 2008а, 2008б; Захаров, Савчук, 2008; Лукк, Дешеревский, Сидорин, Сидорин, 1996; Ключевский, 2008; Потапов, Герман, 2007] показывают, что развитие этого направления позволит применить к задачам, стоящим перед физикой Земли и геодинамикой, мощные методы физической статистики и термодинамики.

2. Изучение закономерностей сейсмического процесса в пределах других сейсмических поясов планеты, в первую очередь в пределах достаточно активного и густонаселенного Альпийско-Гималайского пояса. Так, землетрясение Суматра и последовавшее после него цунами в декабре 2004 г. причинили колоссальный материальный ущерб и унесли более 300 тыс. человеческих жизней во многих странах Юго-Восточной Азии. Такое исследование, имеющее несомненный интерес и для геодинамики, и для проблемы уменьшения ущерба при природных катастрофах, следует проводить в рамках феноменологической волновой модели, построенной с использованием данных самого активного на планете Тихоокеанского сейсмического пояса.

II. Исследование в рамках феноменологической волновой модели сейсмического процесса закономерностей миграции очагов землетрясений [35; 51; 52; I.5, 55; I.6, 67] позволило автору дополнить методику долгосрочного прогноза С. А. Федотова [2005], а именно ввести в нее прогноз *времен* будущих сильнейших землетрясений [2; 19; 29; 31; I.3, 32; 33; II.14, 34; 35; II.16, 68; II.18, 92; II.19, 111].

Таким образом, в рамках феноменологической волновой модели сейсмического процесса *долгосрочный сейсмический прогноз* положения очагов сильнейших землетрясений и их времен получил свое *теоретическое обоснование*.

В результате реализации этой программы оказалось возможным:

- для Японии, Камчатки и всей северо-западной окраины Тихого океана построить пространственно-временные схемы возможного расположения очагов сильнейших землетрясений соответственно для последних 1200, 250 и 100 лет;

- для этих регионов предложить сценарии развития сейсмического процесса на ближайшие десятилетия;

- показать, что сильнейшие северо-западно-тихоокеанские землетрясения последних лет подтверждают построенные нами схемы расположения очагов сильнейших землетрясений в пространстве и во времени;

- разработать методику расчета возможного ущерба при сильном землетрясении с учетом реального сейсмического риска, которому подвергается каждый дом и каждая квартира в доме в зависимости от грунтовых условий, типа здания, времени его постройки, этажности и качества закрепления мебели в квартире [II.17, 72].

Актуальными с точки зрения долгосрочного сейсмического прогноза и «тонкой» структуры очага землетрясения являются следующие задачи:

1. Исследование с позиции феноменологической волновой модели сейсмического процесса особенностей взаимного расположения очагов сильнейших землетрясений вблизи тихоокеанского побережья Южной и Центральной Америк.

Каталог землетрясений этого региона содержит данные о сейсмических событиях с начала XVI в. и является достаточным для проведения такого исследования.

Интерес к этому участку тихоокеанской зоны является особенным по двум причинам. Во-первых, именно здесь произошло самое мощное за всю историю инструментальных наблюдений Чилийское землетрясение (1960 г., $M_w = 9,5$), зона форшоков и афтершоков которого протянулась на многие тысячи километров. Во-вторых, в этой зоне часто происходят землетрясения предельных магнитуд с гипоцентрами очагов на максимальных глубинах до 600–700 км. Имеющиеся данные показывают, что такие землетрясения происходили здесь и ранее.

2. Выявление для юго-восточного побережья Тихого океана взаимосвязи между сейсмичностью и вулканизмом; уточнение и обобщение модели «региональной сейсмовулканической катастрофы», построенной для Камчатки И. В. Мелекесцевым [2005].

3. Продолжение исследования землетрясений-дуплетов и мультиплетов, имеющих «сложные» очаги и сопровождающихся максимальными цунами. Уточнение «тонкой» структуры очагов таких землетрясений позволит дополнить и уточнить методики сейсмо- и цунамирайонирования, выявить новые закономерности взаимодействия очагов землетрясений-дуплетов и землетрясений-мультиплетов, а также детализировать их связь с собственными колебаниями планеты и с колебаниями Чандлера [I.17; 240].

4. Внедрение методики расчета возможного ущерба при сильном землетрясении [II.17, 72] в практику.

Внедрение такой методики позволит существенным образом дифференцировать плату за проживание и может стать основанием для начисления страховых выплат в случае потерь имущества, а возможно, и жизни граждан при сильных землетрясениях. При этом окажется возможным учитывать реальный сейсмический риск, которому подвергается каждый дом и каждая квартира в доме в зависимости от грунтовых условий и типа здания, времени его постройки, этажности и качества закрепления мебели в квартире.

III. В рамках феноменологической модели сейсмического процесса доказан дальнедействующий характер взаимодействия очагов землетрясений, осуществляемый посредством волн миграции очагов землетрясений. Такое свойство сейсмического процесса не позволяет привлекать для объяснения миграции очагов «близкодействующую» модель Ф. Рейда, основанную на пяти «трещинных» принципах.

В этом направлении получены следующие результаты:

1. Для объяснения такого рода «дальнедействующих» эффектов автором совместно с А. Г. Иванчиным разработана принципиально новая модель процессов накопления напряжений в очагах землетрясений [I.9, 113]. В основу модели заложены представления о блоково-ротационной среде Цубои — Пейве — Седова — Садовского — Панина. Блоки такой геосреды не просто поворачиваются — *полагается, что блоки имеют собственный момент*, по сути спин. Вращение Земли вокруг своей оси приводит к момент-моментному взаимодействию блоков (или полей упругих напряжений вокруг них) между собой и, как следствие, к генерации в литосфере и мантии планетарных полей напряжений с моментом силы [IV.37, 239].

2. Показано, что дальнедействующий характер взаимодействия геоблоков определяется выделенным автором *новым типом ротационных упругих волн*, являющимся для блоковой вращающейся среды Пейве — Седова — Садовского — Панина таким же характерным, как, например, продольные и поперечные упругие волны для твердого тела [I.13, 233; IV.31, 164].

3. Выявлено доплеровское, связанное с вращением Земли вокруг своей оси, расщепление широтной составляющей скорости миграции очагов землетрясений, что с очевидностью подтверждает волновую и *определяет моментную природу сейсмического процесса* [I.11, 225].

В связи с опубликованием работы [Гарагаш, Николаевский, 2009] с обзором применения механики Коссера к моделям геосреды и важностью проблемы вращательных движений в мезомеханике [Панин, 1998] и геодинимике [Антонов, Кондратьев, 2008; Вихри..., 2004; Николаевский, 2008; Ротационные..., 2007] автор настоящего сборника считает необходимым сделать следующие замечания.

Во-первых, тензор упругих напряжений, возникающих в твердом теле при его деформировании как тензор второго ранга, по определению [Ландау, Лифшиц, 1953, с. 636; 1965, с. 14; 2003, с. 14], должен быть симметричным. Доказательств такого «существенного результата» [Ландау, Лифшиц, 1953, с. 636; 1965, с. 14] в литературе приведено достаточно много, в том числе два независимых доказательства самого общего вида содержатся в изданных в разные годы классических учебных монографиях: одно — в первых четырех изданиях курса [Ландау, Лифшиц, 1965, с. 14–16], второе — в пятом издании [Ландау, Лифшиц, 2003, с. 17–18]*.

* Авторы работы [Гарагаш, Николаевский, 2009] пишут: «В первых изданиях курса Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица существовали запретительные теоремы на асимметрию тензора напряжений. Лишь относительно недавно эти недоразумения устранены». Относительно времени опубликования «запретительных теорем» авторы неточны: второе доказательство симметричности тензора напряжений, основанное на достаточно общей микроскопической теории, было приведено последователями Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица в курсе, опубликованном совсем недавно в пятом издании, вышедшем в свет в 2003 г. Напомним, что первое издание «Теории упругости» в составе «Механики сплошных сред» было опубликовано в 1944 г. Кем и когда были «устранены недоразумения» (?) и почему «недоразумения» (?), авторы работы [Гарагаш, Николаевский, 2009] не сообщают. Автору настоящего сборника такие «устраняющие недоразумения» работы не известны. Ранее самими же авторами модель, основанная на континууме Коссера, вполне справедливо называлась математической [Николаевский, 1995]. Название «физическая» требует теоретического (в рамках модели) и экспериментального определения скорости ротационных волн, как, например, продольной и поперечной скоростей, чего со времени выхода в свет модели Коссера в 1909 г. никем не было сделано. И это естественно, так как моментные модули за всю почти 300-летнюю историю их определения, в том числе особо тщательные определения за последние 100 лет с момента появления механики Коссера, так и не были экспериментально обнаружены. Кроме того, наличие моментных модулей неизбежно отразилось бы на тепловых свойствах твердого тела, в частности теплоемкость ниже температуры Дебая была бы на один-два порядка выше.

Во-вторых, полученные в последнее время геофизические данные показывают, что «твердая» Земля является самоорганизованной, иерархической, состоящей из блоков [Пейве, 1961; Садовский, 2004], движущихся поступательно и вращательно [Вихри..., 2004; Николаевский, 1996; Опарин, Танайно, Юшкин, 2007; Ротационные..., 2007; и др.]. «Ротационная неустойчивость дислокационных структур твердого тела является важнейшей. Она обнаруживается при достижении достаточной степени деформации во всех твердых телах в виде закономерной переориентации в ходе пластической деформации» [Лихачев, Панин, Засимчук и др., 1989, с. 102]. На микро- и мезоуровнях при деформировании тел отмечены повороты отдельно взятых «зерен» (мезообъемов [Панин, 1998; Рыбин, 2002]) и их образований как целых, до 10° и более [Владимиров, Романов, 1986, с. 14–17]. На макроуровне, в пределах земной коры и литосферы, кроме трансляционных перемещений выявлены повороты отдельных блоков, платформ и тектонических плит. Углы поворотов таких структур протяженностью до нескольких тысяч километров за последние несколько миллионов лет достигают 90° . Кроме того, в геологии описаны так называемые вихревые структуры, размеры которых изменяются от метров до первых тысяч километров [233; 240; Вихри..., 2004; Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Мелекесцев, 1979; Колосков, Аносов, 2006; Ротационные..., 2007; и др.].

Таким образом, в последнее время все более актуальной и значимой становится проблема математического описания вращательных и вихревых геологических и геофизических движений и их физическая (геодинамическая) интерпретация в рамках моделей геосреды с симметричным тензором напряжений [199; I.13, 233; 234; 240].

В свете современных знаний основной трудностью при решении такой проблемы является механизм вращения зерен (мезообъемов) твердой среды. Из механики сплошной среды и представлений физической мезомеханики в настоящее время можно принять лишь «схему перемещения» мезообъемов, которая представляет собой «сдвиг + поворот» [Панин, 1998]. Механизм же их поворота остается пока неизвестным. Это, по-видимому, связано с тем, что «многочисленные попытки органически связать теорию дислокаций и механику сплошной среды до сих пор были безуспешными» ввиду того, что «наше понимание элементарного акта пластической деформации было не совсем верным и определялось ошибочной схемой» [Панин, 1998].

Не лучше обстоит дело и с пониманием механизма поворота блоков на мегауровне — в пределах земной коры и литосферы. Подробный анализ проблемы и большая библиография работ по данным о поворотах блоков и вихревых структурах представлена в наших публикациях и работах других исследователей [I.13, 233; 234; 240; Вихри..., 2004; Ротационные..., 2007; и др.]. Не будем повторяться. Отметим лишь, что при анализе и выявлении возможных механизмов поворота геоблоков исследователями, как правило, полностью игнорируются геодинамические (инструментальные геофизические, включая сейсмологические и геодезические, вулканологические + тектонические) данные о поворотах геоблоков (плит, платформ, вихревых структур). Основной упор при этом делается на те результаты и следствия, которые могут быть получены в рамках классической механики сплошной среды. В результате, прикладывая к границам геоблока «внешнюю» силу, действующую со стороны соседних геоблоков, в рамках механики Коссера механически очевидным образом оказывается возможным решить «внешнюю» задачу поворота блока [Гарагаш, Николаевский, 2009; Николаевский, 1995]. Однако при этом создаются, как минимум, две проблемы, по-видимому, неразрешимые в рамках классической механики сплошных сред: первая — тензор напряжений в механике Коссера несимметричный; вторая — при решении соответствующей краевой задачи для поля напряжений внутри блока в окрестности начала системы координат в центральной части блока неизбежно получаем сингулярность (видимо, по этой причине «внутренняя» граничная задача и не решается).

В результате получается замкнутый круг. Из этого круга в рамках общепринятой классической механики сплошных сред, основанной «на принципе напряжений Коши — эквивалентности действия всех внутренних сил, приложенных к элементарной площадке, действию их равнодействующей, приложенной к ее центру» [Потапов, 2005], по-видимому, нет выхода. Действительно, в работе [Пономарев, 2008] на примерах конкретных геологических и геофизических явлений убедительно показано, что классическая механика сплошной среды в принципе неприменима к описанию геологической среды ввиду ее «энергонасыщенности».

Нами [I.9, 113; I.13, 233; 234; 240] была предложена модель геосреды, основанная на данных А.В. Пейве [1961] (блоковое строение геологической среды с «собственным потенциалом перемещения»), Л. И. Седова [1973] (собственный момент макрообъема среды), М. А. Садовского [2004] (иерархическое строение геофизической среды) и В. Е. Панина [1998] (схема перемещения мезообъемов... сдвиг + поворот). В модели ПССП (по первым буквам фамилий) с симметричным тензором напряжений сохранена гипотеза сплошности и среда наделена свойствами с дискретной структурой, соответствующей реальной геологической и геофизической среде. В рамках такой модели геосреды была теоретически определена характерная ротационная скорость с «частотой отсечки» [Потапов, 2005], равной частоте Чандлеровских колебаний полюса Земли [IV.29, 151]. Другими словами, нами было показано, что при решении задач геологии и геофизики в принципе можно обойтись без континуума Коссера.

Цена вопроса велика — принятие гипотезы о собственном («внутреннем») моменте (спине) блока геосреды. Однако она вполне «окупается»: в рамках одной модели оказалось возможным теоретически описать и объяснить целый ряд геологических и геофизических явлений, включая и теоретическое обоснование ротационных волн [I.9, 113; IV.29, 151; I.13, 233; 234; 240; и др.], что, таким образом, может являться доказательством справедливости принятой нами гипотезы о существовании, по сути, спина у геоблока. Возможность существования собственного момента у макроскопического по величине объема магнитоактивной среды обосновано в работе [Седов, 1973, с. 146–148, 504–530]. «Работа» собственномоментного «дальнодействующего» упругого механизма на примере блоковой вращающейся геосреды ПССП обсуждается далее в прил. 1 (см. также [199]).

Таким образом, полученные нами результаты, описанные в III разделе, являются *принципиальными*, а для геодинамики — *фундаментальными*.

IV. В рамках концепции моментного взаимодействия очагов землетрясений построена *принципиально новая модель очага землетрясения — ротационная*, в которой процессы накопления и сброса напряжений вокруг *объемного* очага землетрясения являются результатом «самосогласованного» взаимодействия всех «элементарных» сейсмофокальных блоков, слагающих сейсмический пояс [170].

В рамках такого подхода получены следующие результаты:

- показана циркулярная поляризация ротационных упругих волн [IV.28, 146; IV.31, 164; 170; 184; IV.34, 199; 220; 226; 231; 234; IV.37, 239; 240];
- дано объяснение «мерцающему» характеру предвестников землетрясений [71];
- объяснены все известные скорости миграции очагов землетрясений в виде уединенных солитонных и экситонных ротационных упругих волн [I.8, 110; I.9, 113; 154; 170; I.11, 225], по сути, представляющих собой соответственно медленные и быстрые тектонические волны в классификации В. Г. Быкова [2005];
- объяснена природа колебаний Чандлера как «нулевого» собственного колебания всей окраины Тихого океана как целой [IV.29, 151];
- дано объяснение явлениям «землетрясение-дуплет» и «пара землетрясений» — взаимосвязанным событиям с удаленными друг от друга очагами — как вполне «обычным» эффектам, ответственным за взаимодействие всех сейсмофокальных блоков в цепочке сейсмического пояса [I.3, 32; 33; I.12, 230];

– использование моментного подхода позволило увидеть новые, незамеченные ранее другими исследователями макросейсмические детали Лиссабонского (1755 г.) землетрясения, связанные с поворотами массивных сооружений — церковных соборов [I.10, 223].

В соответствии со сказанным *актуальными* являются следующие задачи:

1. Регистрация (выявление, обнаружение и определение параметров) тектонических волн: медленных — солитонных, быстрых — экситонных.

В последние годы в этом направлении были получены существенные результаты [Вихри..., 2004; Ротационные..., 2007; Earthquake..., 2006]. Теоретическим и экспериментальным вопросам ротационной сейсмологии был посвящен отдельный номер Бюллетеня сейсмологического общества Америки [Rotational..., 2009]. Полученные данные показывают, что ротационная геодинамика в ближайшие годы будет развиваться быстрыми темпами.

2. Прогноз землетрясений и построение его теории с позиции ротационной волновой модели сейсмического процесса напрямую связан с обозначенной ранее задачей регистрации тектонических волн.

3. Моделирование *сейсмического процесса* как явления, ответственного за ротационное взаимодействие большого количества геоблоков, являющихся составными частями протяженной цепочки.

V. Анализировалось движение совокупности тектонических плит. Целью исследования являлось установление моментной природы их движения.

Энергия тектонического процесса, очевидно, определяется (массами) размерами L плит и скоростями их движения V . Из самых общих соображений следует, что существование зависимости $L(V)$ является принципиальным моментом, по сути, определяющим физику механизма перемещения тектонических плит вдоль поверхности Земли. Действительно, в случае существования зависимости между такими, вообще говоря, векторными величинами, однозначно определяющими величины энергий движущихся плит, появляются все основания для предположения о *моментной природе тектонического процесса* планеты [IV.35, 212].

Работа проводилась совместно с сотрудником геологического факультета МГУ доцентом Т. Ю. Тверитиновой.

В итоге получены следующие результаты:

1. Собраны и проанализированы данные о протяженностях границ тектонических плит L и скоростях их движения V . Определено существование двух зависимостей $L_{1,2}(V)$, аналогичных солитонной и экситонной волновым зависимостям, установленным для блоков, слагающих пространство сейсмоактивного пояса, который простирается вдоль окраины Тихого океана.

2. Показано, что, во-первых, движение геофизических (в смысле М. А. Садовского) блоков земной коры и литосферы и геологических (в смысле А. В. Пейве) тектонических плит описываются одинаковыми волновыми уравнениями и физически тождественны. Во-вторых, *сейсмический и тектонический процессы могут рассматриваться как взаимосвязанные составные части более общего геодинамического процесса, имеющего моментную природу* — и блоки, и плиты движутся (поворачиваются) под действием собственных моментов.

Актуальными первоочередными задачами этого направления являются:

1. Продолжение с привлечением новых данных исследований зависимостей $L_{1,2}(V)$: авторами при анализе было использовано лишь несколько десятков ($N = 61$) пар данных $L - V$, поэтому работу необходимо продолжить.

2. Каждая из зависимостей $L_{1,2}(V)$ была установлена для разных временных диапазонов: экситонная, имеющая меньший наклон $\text{Lg } L [\text{км}] \approx (0,4 \pm 0,2) \text{ Lg } V [\text{км/год}]$ и «простирающаяся» в область больших значений скоростей V для тектонических движений в течение последних 5 (0–5) млн лет, и солитонная, имеющая больший наклон $\text{Lg } L [\text{км}] \approx (0,7 \pm 0,3) \text{ Lg } V [\text{км/год}]$ — для движений, происходящих на интервале до 150–165 млн лет. Полученные данные позволяют предположить, что в течение разных по продолжительности геологических временных интервалов действуют различные механизмы движения геологической среды, которые необходимо проинтерпретировать.

3. Моделирование как моментного механизма движения совокупности плит на поверхности сферы (эллипсоида), так и возникающего в результате такого движения дальнедействующего планетарного упругого (вязкоупругого, пластичного) поля напряжений.

Аналитически задача движения под действием собственного момента плиты на поверхности сферы не решена. Однако физически очевидно, что такая задача может отличаться от задачи движения блока под действием собственного момента, которая решена аналитически [I.9, 113], только математически.

VI. Автором совместно с И. В. Мелекесцевым, В. К. Гусяковым, Г. М. Водинчаром, Д. Р. Акмановой и Н. А. Осиповой составлена в едином формате база, включающая все известные данные о землетрясениях планеты за последние 4,5 тыс. лет и извержениях вулканов за последние 12 тыс. лет, а также создан математический аппарат, позволяющий проводить статистический анализ пространственно-временных совокупностей данных [188; 189; 195; 204; 213–216; 228; I.12, 230; 236; 240; III.26, 245; 246; 249; 251].

Анализ данных базы позволил получить следующие результаты:

1. Подтверждены ранее полученные автором и другими исследователями данные о повторяемости землетрясений и миграции их очагов. В частности, на большом статистически значимом материале подтверждено существование основного сейсмического периода $T_0 \approx 195 \pm 6$ лет и выявлены кратные ему *четные* периоды 388 ± 4 лет $\approx 2T_0$, 789 ± 9 лет $\approx 4T_0$.

2. Показано, что извержения вулканов по объему выброшенного материала, как и землетрясения по величинам выделяемых в их очагах энергий, распределяются по одному закону — графику повторяемости. Наши данные подтвердили данные других исследователей [Голицын, 2003; Токарев, 1987, 1991]. Эти данные в принципе позволяют определить энергию извержения вулкана, в качестве которой в первом приближении может быть использован объем изверженного материала.

3. Получены новые данные о миграции вулканических извержений, как и очагов землетрясений, вдоль окраины Тихого океана. Скорости миграции вулканических извержений по порядку величины оказались близкими скоростям миграции очагов землетрясений.

4. Выделено большое количество периодов извержений вулканов мира, которые лежат в большом диапазоне 170–2 700 лет. При этом наибольшими «по амплитуде» являются именно периоды продолжительностью 198 ± 17 , 376 ± 12 , 762 ± 17 лет, которые, как видим, оказались близкими сейсмическим периодам соответственно T_0 , $2T_0$ и $4T_0$.

5. Полученные данные позволили сформулировать следующий вывод: *сейсмический и вулканический планетарные процессы имеют физически прозрачные единые волновые свойства* и потому могут рассматриваться как составные части более общего геодинамического процесса. Преобладание четных периодов, очевидно, является отражением замкнутости тектонически активных поясов планеты друг на друга.

Актуальными в этом направлении являются следующие задачи:

1. Продолжение работы, начатой П. И. Токаревым [1987, 1991] и продолженной Г. С. Голицыным [2003] и авторами, по энергетической классификации вулканических извержений и по определению энергии планетарного вулканического процесса.

Существенным отличием любой базы данных извержений вулканов является отсутствие *энергетической* характеристики извержения. Причина заключается в том, что в отличие от землетрясений, для которых мы можем определять энергию с помощью *инструментальных* измерений, для извержений вулканов мы не имеем таких инструментальных количественных измерений. Все землетрясения в значительно большей степени, чем извержения, похожи друг на друга. Поэтому существуют и более-менее адекватные теории очага землетрясения, чего пока нет для вулканических извержений.

В настоящее время почти никто не сомневается в том, что мы можем говорить об энергии извержения. Часто употребляются термины «магнитуда» и «энергетический класс» извержения [Голицын, 2003; Гуценко, 1983, 1985; Кирьянов, 2009; Леви и др., 2003; Токарев, 1987, 1991; и др.]. Но если для землетрясений доказано, что магнитуда (энергия) землетрясения является *физической* величиной (ее можно складывать, энергии разных землетрясений можно сравнивать и т. п.), то для извержений вулканов энергию пока нельзя считать такой физической величиной.

2. Продолжение статистических исследований по выявлению волновых свойств вулканического и сейсмического процессов. На волновой характер вулканического процесса однозначно указывают данные «широтного» распределения вулканических извержений вулканов мира из каталога И. И. Гуценко [1979], полученные В. М. Федоровым: «Характер распределения вулканических извержений подобен стоячей волне с затухающей от экватора к полюсам амплитудой колебания и отражает волновой характер процессов деформации коры земного эллипсоида» [Федоров, 2002]. Почти как «губермановская» [Губерман, 1975] волна миграции очагов землетрясений!

3. Исследование особенностей проявления вулканизма в пределах других, не только расположенных в пределах огненного тихоокеанского кольца, вулканических структур планеты.

VII. Многолетняя научно-преподавательская работа автора над новым вариантом учебного пособия, опубликованного в 2009 г. [240], показала, что увязать полученные в последние десятилетия данные в рамках уже сложившейся и ставшей классической схемы исследования предмета «Физика Земли» вряд ли удастся. Причины этого автор видит в следующем. Во-первых,

мы недостаточно хорошо знаем и понимаем как сами протекающие в недрах планеты процессы, так и определяющие их термодинамические, граничные и другие условия, что не позволяет проводить их адекватное описание только с помощью физических методов и теорий. Об этом с очевидностью свидетельствуют в том числе многочисленные геофизические данные, полученные на глубоких скважинах как в нашей стране, так и за рубежом.

В «Физике Земли» имеет место ситуация, аналогичная ситуации в физике, при которой сложились необходимые и достаточные условия для «неслучайного возвращения метафизики» [Владимиров, 2009, с. 16]. Метафизика, по определению М. Борна, представляет собою «исследование общих черт структуры мира и наших методов проникновения в эту структуру». Причина возникновения такой же ситуации в науках о Земле, по мнению автора, заключается в том, что мы плохо представляем себе физическое состояние вещества внутри Земли, в котором оно находится под действием различных экстремальных полей в течение уже около 5 млрд лет — отрезка времени, примерно равного *одной трети жизни Вселенной*.

Во-вторых, «Физика Земли» за последние десятилетия «прирастала» в основном за счет значительного увеличения наших знаний о *геодинамике* [240]. Такой вывод, впрочем, был ожидаемым и прогнозируемым — бессмысленно же добиваться полного сведения, скажем, всей химии и/или биологии только к физике. Но геодинамическое содержание этого вывода трудно будет преодолеть геофизикам, воспитанным на идеологии книг Г. Джеффриса, Б. Гутенберга, В. А. Магницкого, Ф. Стейси и других в убеждении, что физика Земли полностью познаваема. Для преодоления такого искусственным образом созданного барьера основу обсуждаемого предмета следует преподавать с позиции главным образом *геодинамики*. В таком случае «Геофизика» и «Физика Земли» приобретают смыслы, близкие соответственно к *геодинамической физике* и *физической геодинамике*.

В соответствии с высказыванием Д'Ламбера «...Строго говоря, нет науки, которая не имела бы своей метафизики» геодинамика могла бы быть определена как «метафизика наук о Земле».

В этой связи *актуальной является задача построения волновой моментной геодинамики*. Ранее при обсуждении проблем геодинамики мы концентрировали наше внимание в основном на вопросе существования взаимосвязей между сейсмическим, вулканическим и тектоническим процессами. Однако представляется, что не этот круг вопросов является для геодинамики наиболее главным. В своем стремлении получить ответы на эти вопросы мы всего лишь отдаем дань уже сложившейся традиции.

Взаимодействие между этими и другими планетарными процессами, несомненно, существует — это факт, на самом деле не требующий доказательств. Действительно, представим себе, что сейсмический, вулканический и тектонический процессы совершенно не взаимосвязаны между собой. В рамках каких теорий мы сможем тогда объяснить приуроченность всей сейсмичности к краям тектонических плит, параллельность сейсмических и вулканических дуг окраины Тихого океана, отмечавшиеся многими исследователями пространственно-временные и иные взаимосвязи между этими процессами? Как видим, в случае такого «предположения» складывается ситуация, аналогичная, например, объяснению существования мира, в котором не выполняется принцип Ферма о минимальном времени распространения волны между двумя любыми точками — существование такого мира в рамках современных естественнонаучных концепций просто невозможно представить!

По этому поводу образно и точно высказался Р. Фейман: «Существуют законы, которые настолько очевидны, что не требуют доказательства».

Таким образом, существенным для геодинамики является не проблема взаимосвязи сейсмичности, вулканизма и тектоники, а проблема механизма такой взаимосвязи. Полученные автором совместно с коллегами данные, приведенные в настоящем сборнике, позволяют наметить пути построения возможного механизма такой взаимосвязи — это волновая, моментная геодинамика.

Литература

1. Антонов В. А., Кондратьев Б. П. О невозможности существования упруго-вязких волн, распространяющихся вдоль литосферного разлома // Физика Земли. — 2008. — № 6. — С. 86–91.
2. Быков В. Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. — 2005. — Т. 46. — № 11. — С. 1176–1190.

3. *Вихри* в геологических процессах / под ред. А. В. Викулина. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — 297 с.
4. *Владимиров Ю.* Метафизика. — М.: Бинوم: Лаборатория знаний, 2009. — 568 с.
5. *Владимиров В. И., Романов А. Е.* Дисклинации в кристаллах. — Л.: Наука, 1986. — 223 с.
6. *Гарагаи И.А., Николаевский В.Н.* Механика Коссера для наук о Земле // Вычислительная механика сплошных сред. — 2009. — Т. 2. — № 4. — С. 44–66.
7. *Голицын Г. С.* Объяснение зависимости частота — объем извержений вулканов // Докл. РАН. — 2003. — Т. 390. — № 3. — С. 94–396.
8. *Губерман Ш. А.* О некоторых закономерностях возникновения землетрясений // Докл. АН СССР. — 1975. — Т. 224. — № 3. — С. 573–576.
9. *Гуценко И. И.* Извержения вулканов мира. Каталог. — М.: Наука, 1979. — 476 с.
10. *Гуценко И. И.* Закономерности размещения центров вулканической активности по земному шару // Вулканология и сейсмология. — 1983. — № 6. — С. 10–29.
11. *Гуценко И. И.* Цикличность извержения вулканов мира // Вулканология и сейсмология. — 1985. — № 2. — С. 27–48.
12. *Дмитриевский А. Н., Володин И. А., Шипов Г. И.* Энергоструктура Земли и геодинамика. — М.: Наука, 1993. — 154 с.
13. *Кирьянов В. Ю.* Современный вулканизм: учеб. пособие. — СПб.: Litera Scripta, 2009. — 332 с.
14. *Ключевский А. В.* Напряжения, деформации и сейсмичность на современном этапе эволюции литосферы Байкальской рифтовой зоны: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. — Иркутск, 2008. — 31 с.
15. *Колосков А. В., Аносов Г. И.* Особенности геологического строения и позднекайнозойский вулканизм Восточно-Азиатской окраины в рамках концепции вихревой геодинамики // Фундаментальные исслед. океанов и морей. Кн. 1 / ред. Н. П. Лаверов. — М.: Наука, 2006. — 307 с.
16. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Механика сплошных сред. — 2-е изд. — М.: Гостехтеоретиздат, 1953. — 788 с.
17. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Статистическая физика. — М.: Наука, 1964. — 568 с.
18. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория упругости. — 3-е изд. — М.: Наука, 1965. — 203 с.
19. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория упругости. — 5-е изд. / под ред. Л. П. Питаевского. — М.: Физматлит, 2003. — 264 с.
20. *Левы К. Г., Задонина Н. В., Бердникова Н. Е.* [и др.]. Современная геодинамика и гелиогеодинамика. — Иркутск: ИрГТУ, 2003. — 383 с.
21. *Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации* / В. А. Лихачев, В. Е. Панин, Е. Э. Засимчук [и др.]. — Киев: Наук. думка, 1989. — 320 с.
22. *Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде* / А. А. Лукк, А. В. Дещеревский, А. Я. Сидорин, И. А. Сидорин. — М.: ОИФЗ РАН, 1996. — 210 с.
23. *Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана.* — М.; СПб: Межправительственная океаногр. комис., 2003. — 120 с.
24. *Мелекесцев И. В.* Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Пробл. эндогенного магматизма. — М.: Наука, 1979. — С. 125–155.
25. *Мелекесцев И. В.* Природная катастрофа 1737–1742 гг. на Камчатке как модель будущих региональных катастроф на островных дугах Северо-Западной Пацифики / Новейший и современный вулканизм на территории России / ред. Н. П. Лаверов. — М.: Наука, 2005. — С. 533–568.
26. *Могги К.* Предсказание землетрясений. — М.: Мир, 1988. — 382 с.
27. *Захаров В. С.* Поиск детерминизма в наблюдаемых геолого-геофизических данных: анализ корреляционной размерности временных рядов // Современные вопр. геологии: материалы молодежной конф. «Вторые Яншинские чтения», Москва, 27–29 марта 2002 г. — М.: Науч. мир, 2002. — С. 184–187.
28. *Захаров В. С.* Анализ корреляционной размерности временных рядов выделения сейсмической энергии: сб. тр. студентов, аспирантов и преподавателей кафедры общей и прикладной геофизики ун-та «Дубна». — М.: РАЕН, 2007. — С. 76.

29. *Захаров В. С.* Анализ фрактальных свойств временных рядов выделения сейсмической энергии (на примере Японии) // Прикладная синергетика в нанотехнологиях: материалы V Междунар. междисциплинарного симп. ФИПС — 08, Москва, 17–20 ноября 2008 г. — М., 2008а. — С. 434.
30. *Захаров В. С.* Фрактальный анализ временных рядов выделения сейсмической энергии // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики: материалы 41-й Междунар. техн. конф. — М.: Геос, 2008б. — С. 320–324.
31. *Захаров В. С., Савчук О. В.* Самоподобные свойства сети активных разломов и сейсмичности: материалы 41-й Междунар. техн. конф. Т. 1. — М.: Геос, 2008в. — С. 324–329.
32. *Николаевский В. Н.* Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Докл. РАН. — 1995. — Т. 341. — № 3. — С. 403–405.
33. *Николаевский В. Н.* Геомеханика и флюидодинамика. — М.: Недра, 1996. — 447 с.
34. *Николаевский В. Н.* Упруго-вязкие модели тектонических и сейсмических волн в литосфере // Физика Земли. — 2008. — № 6. — С. 92–96.
35. *Опарин В. Н., Танайно А. С., Юшкин В. Ф.* О дискретностных свойствах объектов геосреды и их каноническом представлении // Физико-техн. пробл. разработки полезных ископаемых. — 2007. — № 3. — С. 6–24.
36. *Панин В. Е.* Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. — 1998. — № 1. — С. 5–22.
37. *Пейве А. В.* Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. Геологическая. — 1961. — № 3. — С. 36–54.
38. *Пономарев В. С.* Энергонасыщенность геологической среды / ред. Ю. Г. Леонов. — М.: Наука, 2008. — 379 с.
39. *Потапов А. И.* Волны деформации в среде с внутренней структурой // Нелинейные волны-2004 / ред. А. В. Гапонов-Грехов, В. И. Некоркин. — Н. Новгород, 2005. — С. 125–140.
40. *Потапов А. А., Герман В. А.* Современные методы экспериментальных исследований фрактальных объектов и физических процессов // Синергетика геосистем: материалы симпозиума, Москва, 16–19 апреля 2007 г. — М.: ИГЕМ РАН, 2007. — С. 134.
41. *Ризниченко Ю. В.* Проблемы сейсмичности: избр. тр. — М.: Наука, 1985. — 408 с.
42. *Ротационные процессы в геологии и физике* / ред. Е. Е. Милановский. — М.: КомКнига, 2007. — 528 с.
43. *Рыбин В. В.* Закономерности формирования мезоструктур в ходе развитой пластической деформации // Вопр. материаловедения. Спец. вып. — 2002. — № 1 (29).
44. *Садовский М. А.* Геофизика и физика взрыва: избр. тр. — М.: Наука, 2004. — 440 с.
45. *Седов Л. И.* Механика сплошной среды. Т. 1. — М.: Наука, 1973. — 536 с.
46. *Токарев П. И.* Характеристика и повторяемость вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. — 1987. — № 6. — С. 110–118.
47. *Токарев П. И.* Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в XX в. и ее долгосрочный прогноз // Вулканология и сейсмология. — 1991. — № 6. — С. 52–58.
48. *Федоров В. М.* Особенности широтного распределения вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. — 2002. — № 4. — С. 39–43.
49. *Федотов С. А.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. — М.: Наука, 2005. — 302 с.
50. *Цубои Ч.* Энергия землетрясений, объем гипоцентральной области, площадь афтершоков и прочность земной коры // Слабые землетрясения / ред. Ю. В. Ризниченко. — М.: Иностран. лит., 1961. — С. 160–164.
51. *Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effect* / eds. R. Teisseyre, M. Takeo, E. Majewski. — Heidelberg; Deutschland: Springer, 2006. — 582 p.
52. *Rotational seismology and engineering applications* // Bulletin Seism. Soc. of America. — 2009. — Vol. 99. — № 2B. — P. 945–1485.

А. В. Викулин

МОМЕНТНАЯ ГЕОДИНАМИКА, ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ И СВЕРХТЕКУЧЕСТЬ ГЕОСРЕДЫ

История изучения влияния ротации Земли на процессы, связанные с ее внутренней глубинной структурой, привела к установлению факта существования взаимосвязи между деформацией земной коры, ротационными силами планеты и гравитацией. В последнее десятилетие на фоне успехов Новой глобальной тектоники резко усилился интерес к вихревым геологическим структурам и геофизическим движениям [Вихри..., 2004; Колосков, Аносов, 2006; Мирлин, 2009; Ротационные..., 2007; и др.]. Все физические явления внутри Земли и на ее поверхности тектонофизика полагает установленными и известными [Гзовский, 1975; Гончаров, Талицкий, Фролова, 2005], что вступает в противоречие с имеющимися данными [234; 240; Николаев, 2003; Пономарев, 2008]. Получили интенсивное развитие ротационная геология и геофизика [Вихри..., 2004; Ротационные..., 2007] и ротационная сейсмология [Bulletin, 2009; Lee, Igel, Trifunac, 2009; Teisseyre, Nagahama, Majewski, 2008; Teisseyre, Takeo, Majewski, 2006]. По этой причине физика Земли в последние десятилетия «прирастала» геодинамикой [240]. В таких условиях исследование геодинамических процессов необходимо проводить на качественно новом уровне [240; Николаев, 2003]. Узловые моменты предлагаемой в настоящей работе новой геодинамической концепции и некоторые ее следствия в тезисной форме сводятся к следующему.

В соответствии с современными представлениями [240; Вихри..., 2004; Николаев, 2003; Ротационные..., 2007] геосреда (геологическая и геофизическая) является блоковой, самоорганизованной, нелинейной, энергонасыщенной, содержащей вихревые структуры. Строение и свойства такой среды в значительной степени определяются вращением Земли вокруг своей оси, блоки и плиты могут поворачиваться под действием *собственных моментов*. Такие свойства в соответствии с представлениями А. В. Пейве, Л. И. Седова, М. А. Садовского и В. Е. Панина позволяют предложить модель геосреды — модель ПССП (по первым буквам их фамилий) [I.13, 233; III.35, 212]*.

Изучение распределений чисел сильнейших землетрясений (e) и катастрофических извержений вулканов (v) в составленной нами базе данных [213; 253–256; Акманова, 2008] показало наличие для этих совокупностей общих свойств [240, с. 91, 321; 253, 254, 256]: «энергетических» — однотипные графики повторяемости; временных — равные основные периоды $T_{0,e} = 260 \pm 20$ лет $\approx T_{0,v} = 240 \pm 60$ лет ≈ 250 лет = T_0 ; пространственно-временных — близкие по порядку величины скорости миграции (рис. 1, 2).

В периоды региональных катастроф сейсмичность и вулканизм происходят субсинхронно [Мелекесцев, 2005]. Исследование фор-афтершокового процесса в очагах протяженных (около 1000 км и более) землетрясений показало [I.8, 110; I.11, 225], что скорость миграции форшоков и афтершоков в западном направлении превышает скорость их миграции в восточном направлении на величину эффекта Доплера, связанного с вращением Земли вокруг своей оси. Скорости же их миграции в северном и южном направлениях равны. Эти данные определяют миграцию очагов землетрясений и извержений вулканов (см. рис. 1, 2) как единый волновой, планетарный, с характерным периодом T_0 сейсмовулканический процесс, протекающий в замкнутых друг на друга поясах [240, с. 320–328].

Детальный анализ скоростей миграции очагов тихоокеанских землетрясений показал существование двух волновых решений (рис. 3), характеризующих соответственно глобальную миграцию вдоль всей окраины Тихого океана (I) и локальную миграцию форшоков и афтершоков

* Римско-арабская и арабская цифры, как и ранее, обозначают соответственно номер главы, порядковый номер статьи в настоящем сборнике и порядковый номер статьи в общем списке литературы в прил. 2 в заключительной части сборника.

в очагах сильных землетрясений (II) [I.9, 113; I.13, 233; 240]: $M_1 \approx 2 \text{ Lg } V_1$, $M_2 \approx 2 \text{ Lg } V_2$. Переход от магнитуд M к протяженностям очагов L позволяет получить «корпускулярное» представление взаимодействия очагов землетрясений между собой (см. рис. 3):

$$\text{Lg } L_1 \approx 0,8 \cdot \text{Lg } V_1; \quad (1.1)$$

$$\text{Lg } L_2 \approx 0,4 \cdot \text{Lg } V_2. \quad (1.2)$$

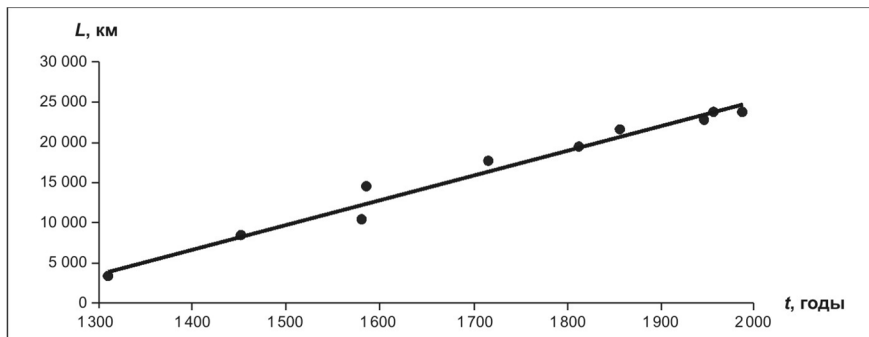


Рис. 1. Миграционная цепочка вулканических извержений тихоокеанского огненного кольца, характерная для объемов выброшенных продуктов $0,1 \text{ км}^3$ и более:

L — расстояние вдоль окраины Тихого океана; наклон прямой соответствует скорости миграции извержений вулканов $V = 31 \text{ км/год}$

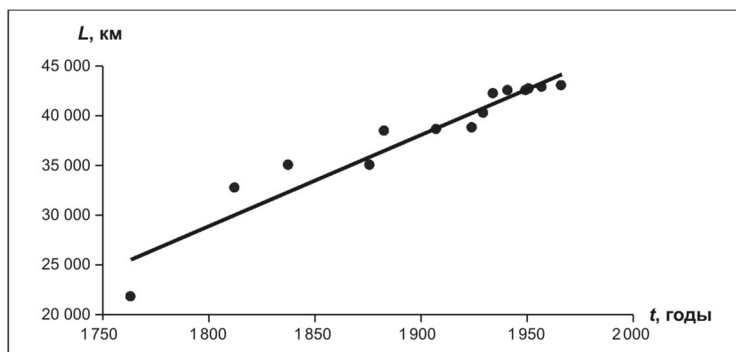


Рис. 2. Миграционная цепочка очагов тихоокеанских землетрясений, характерная для диапазона магнитуд $M \geq 7$:

L — расстояние вдоль окраины Тихого океана; наклон прямой соответствует скорости миграции очагов землетрясений в цепочке $V = 89 \text{ км/год}$

Переходя от магнитуд M к упругим энергиям E , получаем «волновое» представление (рис. 4):

$$E_1 \approx V_1^4, \quad 0 < V_1 \leq V_0; \quad (2.1)$$

$$E_2 \approx V_2^2, \quad E_0 > 0, \quad V_0 \leq V_2 \leq V_S, \quad (2.2)$$

где $V_0 \approx V_{1, \text{max}} = 1\text{--}10 \text{ см/с}$ — характерная скорость процесса (рис. 3, 4); $V_S = 4 \text{ км/с}$ — скорость поперечных сейсмических волн. Уравнения (1.1–2.1) и (1.2–2.2) попарно физически эквивалентны друг другу. Решение $E(V_2 = 0) = E_0 > 0$ определяет природу взаимосвязи сейсмотектоники с нутацией полюса планеты — колебаниями Чандлера [IV.29, 151].

Анализ данных ($N = 61$) о размерах плит ($650 \leq L [\text{км}] \leq 18\,000$) и скоростях (субдукции, рифтинга и спрединга) их движения ($5 \leq V [\text{мм/год}] \leq 112$) за последние 150 млн лет позволил выявить две статистически значимые зависимости [IV.34, 199; IV.35, 212]:

$$\text{Lg } L_1 \approx (0,7 \pm 0,3) \text{Lg } V_1, \quad 5 < \tau_1 \leq 150 \text{ млн лет}, \quad (3.1)$$

$$\text{Lg } L_2 \approx (0,4 \pm 0,1) \text{Lg } V_2, \quad 0 < \tau_2 \leq 5 \text{ млн лет}, \quad (3.2)$$

где $\tau_{1,2}$ — продолжительности «относительных» интервалов времени, определенных по номерам магнитных аномалий. Для процессов спрединга и субдукции корреляционная зависимость $\text{Lg } L \approx \text{Lg } V$, близкая соотношению (3.1), была получена многими исследователями [240, с. 330–

339; Жарков, 1983; Новая..., 1974, с. 89, 165; Forsyth, Uyeda, 1975]; зависимость $V \approx L^3$ или $Lg L \approx 0,33 Lg V$, определяющая «самосогласованную активизацию разломов Центральной Азии» — по сути (3.2), в работе [Шерман, Горбунова, 2008]. Существование зависимости $L(V)$ — принципиальный момент, определяющий физику механизма перемещения плит и блоков и моментную природу сейсмического, вулканического и тектонического процессов, волновая энергетика которых описывается одинаковыми уравнениями (2.1 — 2.2) [240, с. 295; IV.36, 237].

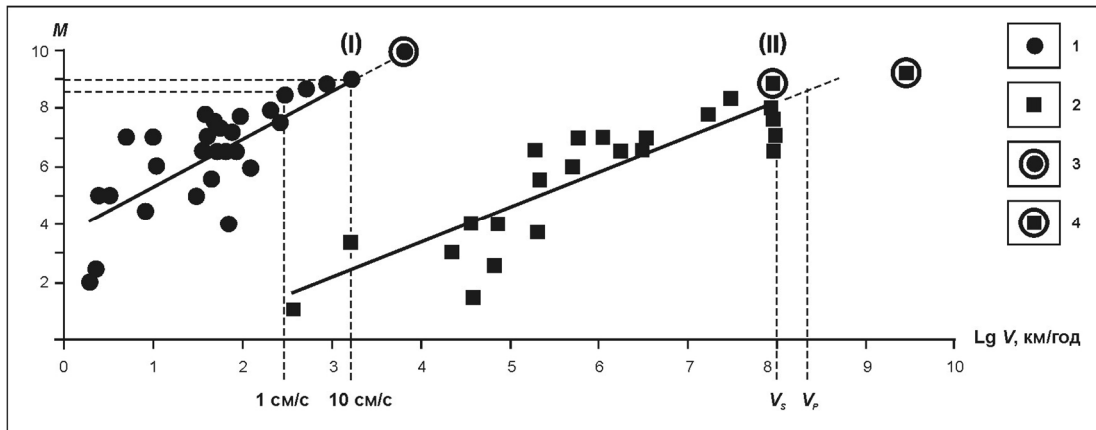


Рис. 3. Значения скоростей миграции тихоокеанских землетрясений и определенные по ним «корпускулярные» (1.1–1.2) зависимости $M(Lg V)$ в соответствии с [240, с. 296; 255]:

1, 2 — данные о миграции очагов землетрясений вдоль окраины Тихого океана (глобальная миграция) и миграции форшоков и афтершоков в очагах сильных землетрясений (локальная миграция); 3 — скорости миграции сильнейших землетрясений-дуплетов с $M = 8,1-8,7$ в 1897–1901 гг. вдоль окраины Тихого океана; 4 — скорости, соответствующие миграции главных толчков в дуплетах 04.11.1952 г., Камчатка, $M_W = 9,0$, и 13.10.1963 г., Курилы, $M_W = 8,7$; (I) и (II) — зависимости магнитуды землетрясения от скорости «глобальной миграции» их очагов вдоль окраины Тихого океана $M_1(Lg V_1)$ и от скорости «локальной» миграции форшоков и афтершоков в очагах сильных землетрясений $M_2(Lg V_2)$, определенные методом наименьших квадратов; $V_{1,max} = 1-10$ см/с — максимальное значение глобальных скоростей миграции (I); $V_p \approx 8$ км/с и $V_s \approx 4$ км/с — продольная и поперечная сейсмические скорости (максимальные скорости локальной миграции)

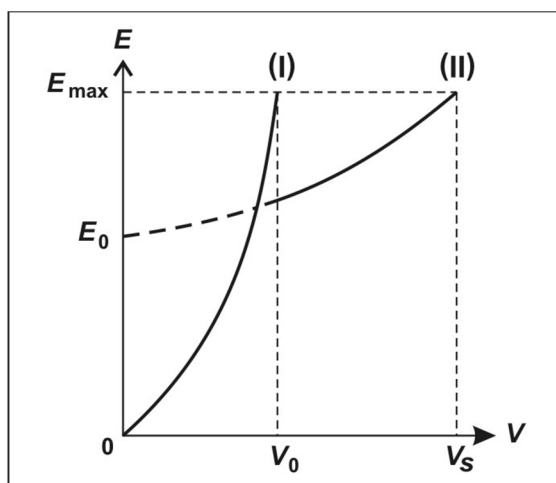


Рис. 4. «Волновые» (2.1–2.2) представления решений упругих энергий E , сбрасываемых в очагах тихоокеанских землетрясений, как функций скоростей их миграции V :

I — солитоны, II — экситоны; V_0 — характерная скорость геодинамического процесса как максимальная скорость солитонного (s) решения при $M \rightarrow M_{max,s} = 8,5-9,0$ (рис. 3, I); V_s — скорость поперечных сейсмических волн как максимальная скорость экситонного решения при максимальных магнитудах форшоков (f) и афтершоков (aft) $M \rightarrow M_{max,f-aft} = 8,3$ (рис. 3, II) [240, с. 318]

Для среды ПССП построена модель сейсмического процесса, протекающего в пределах окраины Пацифики, для чего аналитически решены задачи о полях упругих напряжений вокруг одного-двух и феноменологически — вокруг цепочки поворачивающихся под действием собственных моментов шаровых блоков [I.9, 113; 240, с. 311–320]. Теоретически получено выражение для характерной скорости геодинамического процесса [I.13, 233]:

$$c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \Omega R_0 \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx V_R V_S, \quad (4)$$

где $V_S = \sqrt{G/\rho}$ — поперечная скорость упругих волн; $V_R = \Omega R_0$ — центробежная скорость; R_0 — протяженность «элементарного» блока среды или очага сильнейшего землетрясения; Ω — угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси; ρ — плотность среды; G — модуль сдвига среды. При параметрах модели $\rho = 3 \text{ г/см}^3$, $G = 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $\Omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$ и $R_0 = 100 \text{ км}$, соответствующих очагам землетрясений с магнитудами $M \approx 8$, получаем $c_0 \approx (1 \div 10) \text{ см/с}$, или

$$c_0 \approx V_{1, \max} \approx V_0. \quad (5)$$

Соотношения (4) и (5) определяют новый тип циркулярно поляризованных (спиновых) ротационных упругих волн, существующих в блоковых вращающихся геосредах ПССП [I.13, 233; 252].

Земля и ее фигура стремятся к равновесию. Вулканизм, сейсмичность и тектоника — главные геодинамические процессы, определяющие фигуру Земли. Такие процессы в течение всей истории Земли проявлялись разнообразными по своей природе, но едиными по своей сути циклоническими и антициклональными движениями в атмосфере и гидросфере, а также вихревыми структурами в «твердой» Земле. Согласно задаче Дирихле и ее решениям Дедекинда — Римана равновесная эллипсоидальная форма вращающейся гравитирующей капли жидкости обеспечивается вихревыми течениями, возникающими внутри капли и на ее поверхности [240; Ротационные..., 2007; Кондратьев, 2003]. Земля на больших (геологических) временных интервалах является «жидким» телом. Поэтому существующие в атмосфере и гидросфере Земли и на ее «твердой» поверхности вихревые движения могут рассматриваться как такие течения и сейсмотектонические спиновые волны (1), (2), (4), (5), которые соответствуют решениям задачи Дирихле — Дедекинда — Римана (ДДР) [IV.34, 199].

Таким образом, блоковая геосреда ПССП и полученные нами для нее решения (1)–(6) могут рассматриваться как основа такой моментной по физической сути концепции, в рамках которой аналитически и феноменологически могут описываться геодинамические процессы [I.9, 113; I.13, 233; 240].

Моментная природа взаимосвязи сейсмического и вулканического процессов с очевидностью вытекает из данных, характеризующих особенности распределения чисел извержений вулканов и гипоцентров землетрясений по долготе и широте (рис. 5).

Особенности широтных распределений чисел извержений вулканов и землетрясений (рис. 5) подтверждают данные, полученные ранее в работах [Гущенко, 1983; Левин, Чирков, 1999; Фридман, Клименко, 2003; и др.].

Из данных, представленных на рис. 5, видно, что распределения чисел и землетрясений, и извержений вулканов практически идентичны друг другу и имеют четкие максимумы на меридианах $120^\circ (\pm 10^\circ) \text{ E}$, $90^\circ (\pm 10^\circ) \text{ W}$ и широтах $20\text{--}40^\circ (\pm 10^\circ) \text{ N}$, $10\text{--}20^\circ (\pm 10^\circ) \text{ S}$. Волновой характер миграции извержений вулканов (см. рис. 1) и очагов землетрясений (см. рис. 2, 3), волновой характер распределения чисел извержений по широте [Федоров, 2002], выделенные на рис. 5 максимумы распределений определяют как «пучности», по сути, стоячих геодинамических волн.

Как можно видеть на рис. 5, абсолютный максимум сейсмической + вулканической активности планеты приходится на область $A_{\max, 1}$ с координатами $20\text{--}40^\circ \text{ N}$, $120 \pm 10^\circ \text{ E}$; второй по амплитуде максимум активности располагается примерно в «противоположной» относительно центра Земли области $A_{\max, 2}$ с координатами $10\text{--}20^\circ \text{ S}$, $90 \pm 10^\circ \text{ W}$. Согласно мировой карте высот квазигеоида [240, с. 62; Демьянов, Назарова, Майоров и др., 1996] область $A_{\max, 1}$ является такой зоной на поверхности Земли, в которой наблюдается максимальный на планете градиент

изменения высот квазигеоида от максимальных $+(60-75)$ м до минимальных $-(75-90)$ м (рис. 6, см. также цветную иллюстрацию на обороте форзаца в конце книги). Следует отметить, что в этой же зоне и прилегающим к ней областям располагаются глобальная вихревая система Индо-Тихоокеанского региона Земли [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993] и мощные вихревые тектоно-магматические структуры [Колосков, Аносов, 2006].

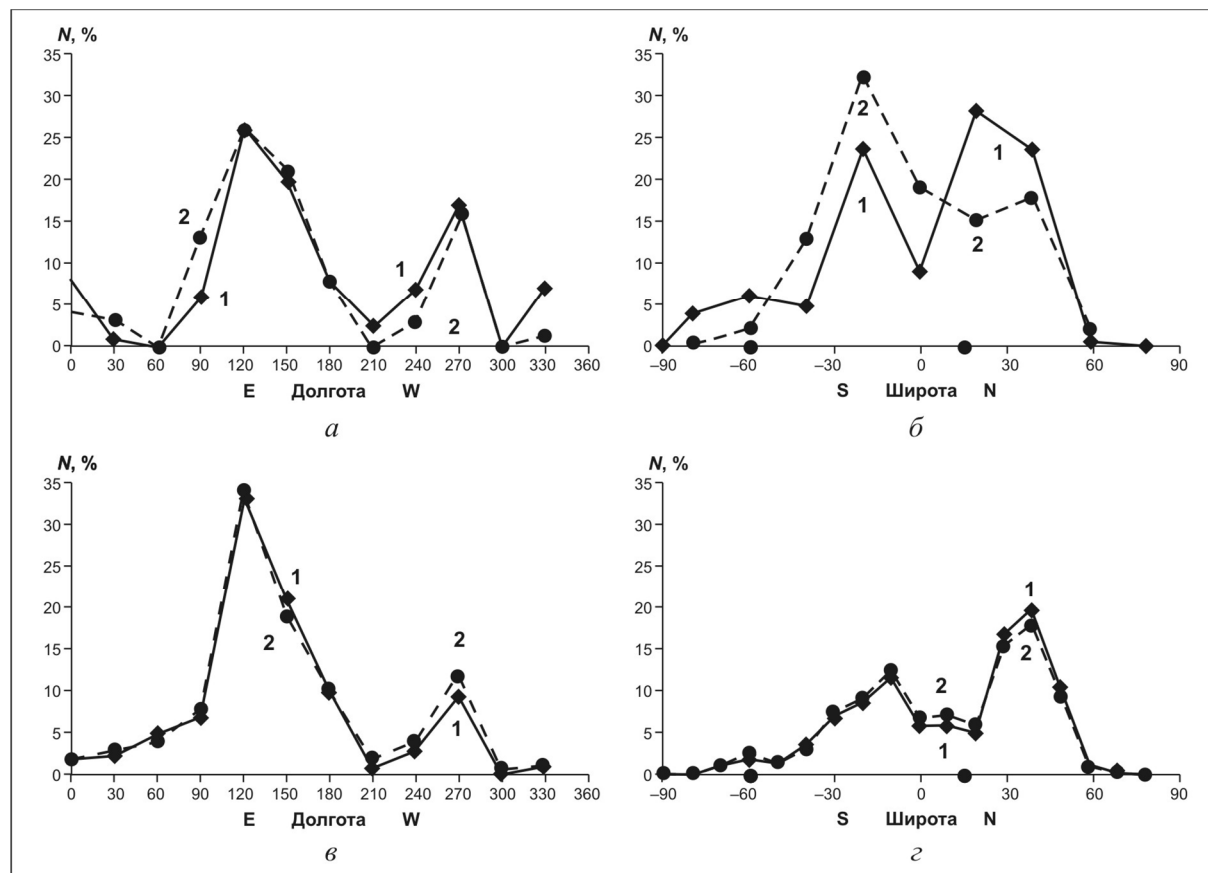


Рис. 5. Долготное (а, в) и широтное (б, з) распределения чисел извержений вулканов (а, б) и гипоцентров землетрясений (в, з) Земли, содержащихся в базе данных [213; 240; Акманова, 2008]:

1 — все извержения 630 вулканов, 9650 до н. э. — 2008 г., $N = 6499$ (а, б), и все землетрясения 2150 до н. э. — 2008 г., $N = 12393$ (в, з); 2 — все извержения вулканов с объемом выброшенного материала $V \geq 0,01 \text{ км}^3$ ($V_{\text{max}} = 100 \text{ км}^3$), 1870—2008 гг., $N = 513$ (а, б), и все землетрясения с магнитудами $M \geq 6$ ($M_{\text{max}} = 9,5$) 1900—2008 гг., $N = 9521$ (в, з). Рисунок построен Д. Р. Акмановой и Н. А. Осиповой

Область второго по величине максимума сейсмовулканической активности $A_{\text{max}, 2}$ согласно [240, с. 62; Демьянов, Назарова, Майоров и др., 1996] располагается в зоне с одним из наименьших на планете градиентов изменения высот квазигеоида (рис. 6). Вблизи этой зоны (у берегов Южной Америки) произошло в XX в. самое сильное на планете Чилийское 1960 г. землетрясение с $M = 9,5$ и ряд землетрясений на «предельных» глубинах $H = 600-700$ км с «максимальными» для таких глубин магнитудами $M \approx 8$. Рядом с этой зоной располагается и уникальный природный объект — остров Пасха протяженностью 200–400 км. Этот остров вращается вокруг проходящей через него оси и за время своей «жизни» (5 млн лет) уже повернулся почти на 90° , что в геофизических полях проявляется изолиниями, имеющими вид раскручивающихся спиралей [Международный..., 2003].

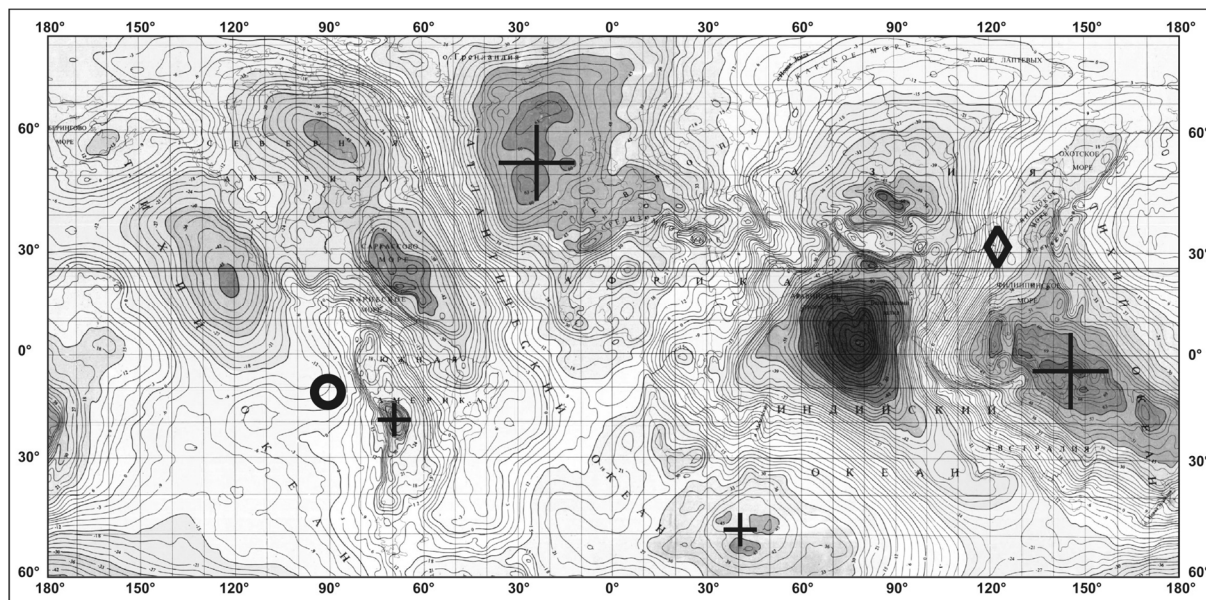


Рис. 6. Мировая карта высот квазигеоида (М 1 : 5 000 000)
[240, с. 62; Демьянов, Назарова, Майоров, Таранова 1996]

Карта построена по значениям высот квазигеоида для регулярной сетки с шагом 1° по широте и долготе, полученным по аномалиям силы тяжести для трапеций $1^\circ \times 1^\circ$ в области с $R \approx 500$ км и по модели гравитационного поля Земли ЦНИИГАиК ГАО-94 в более дальних зонах. Аномалии силы тяжести для трапеций $1^\circ \times 1^\circ$, собранные и систематизированные в ЦНИИГАиК, снимались с гравиметрических карт масштаба 1 : 1 000 000 — 1 : 5 000 000. Модель ГПЗ ЦНИИГАиК (ГАО-94), содержащая сферические гармоники разложения аномалий силы тяжести до 180-го порядка, получена с использованием результатов совместного уравнивания гравиметрических (наземных и морских) и спутниковых (орбитальных и альтиметрических) данных. Средняя квадратичная погрешность высот квазигеоида на карте составляет $\pm(1,3-1,5)$ м.

Крестами обозначены максимальные высоты квазигеоида: большими крестами — наибольшие превышения высот (до 60–75) м, малыми — до 42–45 м. Минимальные высоты квазигеоида, также отчетливо видимые по сгущению изолиний, особо не выделялись. Область с наибольшим минимумом высоты квазигеоида — до $-(75-90)$ м — расположена в Индийском океане. «Система» из трех минимумов высоты квазигеоида меньшей амплитуды располагается вблизи Североамериканского континента: в Карибском море — до $-(45-60)$ м, в Тихом океане — до -45 м, в пределах его северной части — до -45 м. Ромбом и кружком обозначены центры областей соответственно максимальной (30° N, 120° E) и минимальной (15° S, 90° W) сейсмovolканической активности Земли.

Такое «соседство» максимумов сейсмovolканической активности (см. рис. 5), с одной стороны, и вихревых сейсмо-вулкано-тектонических структур с максимальными энергиями — с другой, и определяет их как геодинамическую «особенность» Земли.

Основное отличие предложенной в настоящей работе моментной (и/или волновой и/или вихревой) геодинамики от Глобальной тектоники [Новая..., 1974], в которой определено только относительное перемещение плит, а механизм их абсолютного движения неизвестен, заключается в следующем. Стремление вращающейся Земли к равновесной эллипсоидальной фигуре и возможность существования вихревых движений ДДР «включает» основной «движитель» волновой геодинамики — собственномоментный механизм вращения ее «элементарных» объемов. Тем самым генерируется планетарное (самоорганизованное) упругое поле, в котором *взаимодействие* плит и блоков и, как следствие, их *движение* осуществляется посредством ротационных (спиновых, циркулярно поляризованных) геодинамических волн (1)–(5). Другими словами, моментная геодинамика есть вращение Земли вокруг своей оси плюс Глобальная тектоника.

Предложенная в настоящей работе концепция «созвучна» тектоническому вихревому подходу в работе [Мирлин, 2009], но имеет существенное отличие — она содержит *принципиально новый*, физически, геофизически и геологически обоснованный моментный (не трансляционно-глобальнотектонический [Мирлин, 2009; Новая..., 1974]) механизм «генерации» вихревых и/или волновых движений геосреды. Именно моментный механизм, как показывают имеющиеся геолого-физические данные [240; Вихри..., 2004; Ротационные..., 2007; и др.], позволяет в рамках за-

дачи ДДР [IV.34, 199; Кондратьев, 2003] связать такие движения геосреды с геодинамическими аномалиями, в том числе с гравитационными аномалиями в виде моментных по своей природе волн геоида [240, с. 62, 160–161, рис. 6].

Геофизическая и геологическая среда является блоковой (А. В. Пейве, М. А. Садовский), что позволяет интерпретировать временные вариации геодинамических полей как нелинейный отклик дискретной фрактальной среды [Лукк, Дещеревский, Сидорин и др., 1999]. Фрактальное описание равносильно введению формализма дробной размерности пространства [Mandelbrot, 1982], в котором и реализуются геофизические и геологические процессы. В свою очередь, инструментальные наблюдения и их интерпретация приводят к выводу об изменении со временем величины дробной фрактальной размерности [Гангаадорж, 2010; Лукк, Дещеревский, Сидорин и др., 1999; Лунина, 2009; Паровик, 2009; Sherman, Gladkov, 1999] — фактически *размерности пространства*, в котором происходят геодинамические процессы, связанные в том числе и с глобальными гравитационными аномалиями (см. рис. 6).

Изменение метрики (кривизны) пространства согласно общей теории относительности должно сопровождаться перемещением массы или энергии-импульса и, как следствие, гравитационными волнами [Вебер, 1965; Эйнштейн, 1965]. Таким образом, приходим к выводу о существовании физически обоснованной взаимосвязи между моментными геодинамическими (тектоническими) движениями и гравитационными волнами.

На существование взаимосвязи между геодинамическими и гравитационными движениями Земли указывают следующие данные.

Во-первых, это данные о поплавковых колебаниях Земли как целой, под которыми понимается перемещение планеты на орбите в направлении оси ее вращения. Существование таких колебаний вытекает из анализа дрейфа нуля сейсмографов и гравиметров и асинфазности океанических приливов северного и южного полушарий [Линьков, 1987, с. 144–163]. Очевидно, что объяснение поплавковых колебаний Земли, как геодинамических движений, возможно лишь во взаимосвязи с гравитационными движениями других тел Солнечной системы. При этом все геодинамические движения, включая и поплавковые колебания [Линьков, 1987, с. 144–163], коррелируют с величиной солнечной активности, которая, в свою очередь, определяется орбитальными и вращательными вокруг своих осей движениями планет, в основном планет-гигантов Юпитера и Сатурна. Это подтверждает моментный характер таких геодинамо-гравитационных движений [240, с. 380–381].

Во-вторых, минимизируя гравитационную энергию Земли, можно определить величину ее «поверхностного натяжения» [Кузнецов, 2008, с. 101], являющегося, по определению, балансом между гравитацией и геодинамическим полем, определяющим для вещества поверхности геоида структуру, которая *по сути своей* должна быть планетарной — *дальнодействующей*. Гравитация в таком балансе может быть представлена волнами геоида [Магницкий, 1965; 2006, с. 215–221]. Дальнодействующим же геодинамическим полем, которое «управляет» движением блоковой вращающейся среды, как показано нами ранее, является ротационное поле. Поверхностное натяжение геоида достигает большой величины 10^{19} эрг/см² [Кузнецов, 2008, с. 101], значительно (на много порядков по величине) превышающей коэффициенты поверхностного натяжения «лабораторных» жидкостей и твердых тел, которые лежат в пределах $1-10^4$ эрг/см², что может указывать на существование «очень сильной» взаимосвязи между гравитацией (волнами геоида, имеющими моментную природу [240, с. 160–161]) и геодинамическими циркулярно поляризованными движениями.

Как видим, имеющиеся данные не только подтверждают взаимосвязь геодинамики и гравитации — такие данные указывают на существование сильной взаимосвязи между геодинамическими и гравитационными волновыми движениями. В таком случае становится понятным, почему, несмотря на гигантские усилия, гравитационные волны, как и геодинамические (тектонические), до сих пор так и не были обнаружены — это, возможно, «сильно» взаимосвязанные явления, требующие совместной регистрации [243].

На возможность сверткеющего течения геосреды указывают следующие данные.

Если движения вдоль поверхности Земли больших по амплитуде и протяженности (длине) «горбов», отмеченных многими исследователями после сильнейших землетрясений, можно пытаться понять в рамках модели упругой среды, хотя и здесь мы сталкиваемся с трудностями

принципиального характера [231; I.13, 233; 234, с. 222–224; 235], то такого же рода более мелкоаппаратные движения уже не поддаются объяснению. Действительно, после землетрясения «...по поверхности террасы прошла волна высотой 20–30 см — совершенно бесшумно, и земная твердь на мгновение превратилась в пластическую субстанцию... а еще через мгновение поверхность террасы опять стала плоской и абсолютно ровной. И никаких следов деформации!» [Леонов, 2008, с. 5]; или: «Во время землетрясения... по бетонному шоссе и тротуарам шли волны высотой 1,2–1,8 м и длиной 3 м, но на бетоне не появилось ни одной трещины» [Каррыев, 2009, с. 77]. Описание аналогичного движения, зафиксированного кинокамерой, приводится Г. Тазиевым [Леонов, 2008, с. 5]. Как видим, движения «горбов» вдоль поверхности Земли не редкость [Шебалин, 2003]. Они являются достаточно характерными движениями при землетрясениях и проявляются в большом диапазоне масштабов.

Породы, слагающие вихревые структуры, формировались «в твердом состоянии на месте и за счет вещества верхней мантии» и «с самого начала формировались как дугообразные, а не механически изгибались из первоначально прямолинейных структур» [Слензак, 1972, с. 73, 92]. «Имеются факты, показывающие, что фундамент платформ» и «нижние горизонты земной коры обладают значительной внутренней подвижностью... горные породы обладают способностью к связному течению при любой комбинации физических условий, возникающих в коре и мантии, ...этой способностью обладают... условно жесткие... в относительно холодном состоянии горные породы» [Леонов, 2008, с. 7–8, 19, 229].

Все такого рода геологические данные, рассматриваемые в совокупности, и позволили ввести в рассмотрение реидные, *сверхпластичные* деформации геологической среды «как течение материала в твердом состоянии» [Леонов, 2008, с. 15–16, 229, 251–255].

Возможность находиться геологической среде в таком сверхпластичном состоянии есть прямое следствие ее энергонасыщенности [Пономарев, 2008]. «Довести горную породу до энергонасыщенного состояния действием внешних сил затруднительно... нагружаемое тело разрушится раньше, чем его субстрат достигает энергонасыщенного состояния. Природа реализует другой путь... Он состоит в способности горных пород и твердых тел вообще механически связывать, накапливать и длительно хранить запасы упругой энергии. <...> Она может длительно сохраняться в теле и после того, как факторы, сообщившие ее телу, больше на него не действуют. <...> Образно говоря, она как бы „застревает“ в твердом теле» и в результате «среда располагает *собственным энергетическим потенциалом*» [Пономарев, 2008, с. 12–13]. Созвучным результатом многолетних геологических исследований является вывод М. Г. Леонова [2008, с. 454]: «Парадигма внутренней объемной мобильности... консолидированной земной коры... должна стать одной из основ... геодинамики». К выводу о собственном потенциале геологического тела независимым образом и из других соображений ранее пришел А. В. Пейве [1961]. Значимость и важность задач механики сплошной среды с собственными моментами макроскопических по размеру слагающих ее блоков обосновал Л. И. Седов [1973, с. 146–148]. Очевидно, что такой «собственный» в течение длительного времени сохраняющийся в породах Земли потенциал может быть только моментной (вращательной, не поступательной) природы [I.9, 113; I.13, 233].

Ранее мы рассматривали «необходимые» геологические условия, указывающие на возможность течения горных пород практически без трения. «Достаточным» физическим условием существования такого квантового по сути течения в геосреде может являться близкое к нулю значение характерной для нее температуры Дебая, при которой энергия нулевых колебаний отдельно взятых частиц среды (мезообъемов, блоков) физически не играет роли, но наблюдается связанное с ней движение совокупности слагающих среду частиц [Займан, 1974, с. 82; Физический..., 1983, с. 145–146], в нашем случае — блоков.

Согласно обзору развития представлений о реологических свойствах геосреды [240, с. 243–246] температура Дебая θ_d для вещества Земли может быть записана в виде [Жарков, 1983, с. 199]

$$\theta_d \approx 10^{-3} \bar{V}(H) \sqrt[3]{\rho(H)}, \quad (6)$$

где \bar{V} — средняя скорость возбуждений в геосреде, см/с; ρ — плотность среды, г/см³; H — глубина. При средней скорости, определяемой продольной и поперечной сейсмическими скоростями

(для литосферы и верхней мантии изменяющимися в пределах 1–10 км/с), температура Дебая достаточно высока. Для глубины $H = 100$ км $\theta_d \approx 660$ К $\approx 1000^\circ$ С и хорошо соответствует физической модели Земли [Жарков, 1983, с. 199–207].

Ситуация кардинальным образом меняется при переходе к ротационной моде, определяемой коллективным движением совокупности геофизических блоков и тектонических плит. Характерное значение скорости c_0 такой моды значительно меньше скоростей сейсмических волн $c_0 = (1 - 10)$ см/с (см. (4–5), рис. 3). Скорость c_0 определена в рамках классической теории упругости с симметричным тензором напряжений [I.9, 113; IV.37, 239; 240; 252]. Результаты, полученные в последние годы ротационной геологией и геофизикой [Вихри..., 2004; Ротационные..., 2007], ротационной сейсмологией [Bulletin..., 2009; Lee, Igel, Trifunac, 2009; Teisseyre, Nagahama, Majewski, 2006; Teisseyre, Takeo, Majewski, 2006] и нелинейной механикой [Порубов, 2009], инструментально подтверждают существование в геосреде волн крутильной (поворотной) поляризации. Потому ротационные волны для блоковых вращающихся геосред являются такими же физически обоснованными, как и сейсмические волны. Температура Дебая, соответствующая ротационной моде, на основании (6) составляет ничтожно малую величину $\theta_d \approx 10^{-2}$ К, которая и определяет возможность квантового (без трения) движения геосреды — ее сверхтекучесть.

Температура Дебая по своей сути пропорциональна максимально возможной частоте колебаний слагающих среду частиц (мезообъемов, блоков) [Займан, 1974, с. 82]. Для геосреды такой частотой, как показано нами [I.9, 113; IV.29, 151], является частота, с которой колеблются все слагающие сейсмический пояс блоки в совокупности. Эта частота соответствует колебанию всего сейсмического пояса как целого, определяется энергией «нулевых» колебаний $E_0 > 0$ (см. рис. 4) и является частотой Чандлера.

Таким образом, возможность ротационного течения геосреды в режиме без трения определяется значением частоты нутации ее полюса. Такой вывод подтверждается данными для Венеры. Действительно, на Венере, практически не вращающейся вокруг своей оси и имеющей почти нулевой период и соответственно бесконечную частоту нутации ее полюса, характерная температура Дебая должна быть достаточно высокой, исключающей возможность вихревых движений в режиме без трения, что и подтверждается имеющимися данными и для атмосферы, и для вещества «твердой» части планеты [Спарроу, 2008, с. 30–47]. Следует отметить, что на Марсе, вращающемся вокруг своей оси с той же угловой скоростью, что и Земля, на полярной ледяной шапке отчетливо фиксируется вихревая структура в виде системы разломов спиральной формы, раскручивающихся из Северного полюса [Спарроу, 2008, с. 116–117].

Нами было показано [IV.34, 199], что ротационные движения могут рассматриваться как характерные для задачи ДДР вихревые решения, определяющие состояние Земли в целом. Поэтому в рамках ротационной модели вывод о возможности вихревого геодинимического течения вещества в режиме без трения может быть распространен на всю мантию, а возможно, и на ядро. Представляется, что в рамках ротационной геодинимики окажется возможным обосновать и вихревые сверхпроводящие движения вещества мантии и ядра, что в результате позволит решить проблему магнитного поля Земли и планет. На такую возможность указывают данные для Юпитера, угловая скорость вращения которого вокруг своей оси значительно больше земной — около 10 часов, что определяет его достаточно высокую «геодинимическую» активность в виде гигантской системы циклонов, один из которых (Большое красное пятно Юпитера), по размерам больше Земли, непрерывно наблюдается со времен Г. Галилея. По-видимому, достаточно высокая ротационная «геодинимическая» активность Юпитера в его недрах проявляется в том числе и интенсивными вихревыми «сверхпроводящими» движениями, которые, очевидно, могут объяснить большую напряженность его магнитного поля, в десять превышающую земную.

Полученные данные позволяют заложить основы термодинамики ротационной геодинимики и ее статистической физики [17, 52].

Как видим, именно в рамках моментной геодинимики оказывается возможным непротиворечивым образом связать воедино гравитацию и квантовые явления и, как следствие, разрешить ряд фундаментальных проблем физики и наук о Земле.

Литература

1. Акманова Д. Р. Особенности вулканической активности окраин Тихого океана за последние 12 тыс. лет // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: тр. регион. науч.-техн. конф., Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. Т. 2. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. — С. 151–155.
2. Вебер Дж. Гравитационные волны // Гравитация и относительность. — М.: Мир, 1965. — С. 179–201.
3. Вихри в геологических процессах / под ред. А. В. Викулина. — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. — 297 с. — [Электронный ресурс]. — URL: www.kscnet.ru. (дата обращения: 15.06.2010).
4. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. — М.: Наука, 1975. — 536 с.
5. Гончаров М. А., Галицкий В. Г., Фролова Н. С. Введение в тектонофизику. — М.: УКД, 2005. — 496 с.
6. Гангаадорж Б. Сейсмичность Монголии и сопредельных территорий: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — Иркутск, 2010. — 16 с.
7. Гущенко И. И. Закономерности размещения центров вулканической активности по земному шару // Вулканология и сейсмология. — 1983. — № 6. — С. 10–29.
8. Демьянов Г. В. Мировая карта высот квазигеоида / Г. В. Демьянов, Н. Г. Назарова, А. Н. Майоров, В. А. Таранов — М.: ЦНИИГАиК, 1996.
9. Дмитриевский А. Н., Володин И. А., Шипов Г. И. Энергоструктура Земли и геодинамика. — М.: Наука, 1993. — 154 с.
10. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. — М.: Наука, 1983. — 416 с.
11. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. — М.: Мир, 1974. — 472 с.
12. Каррыев Б. С. Вот пришло землетрясение. — М.: СИБИС, 2009. — 410 с.
13. Колосков А. В., Аносов Г. И. Особенности геологического строения и позднекайнозойский вулканизм Восточно-Азиатской окраины в рамках концепции вихревой геодинамики. Фундаментальные исследования океанов и морей. Кн. 1. — М.: Наука, 2006. — С. 278–291.
14. Кондратьев Б. П. Теория потенциала и фигуры равновесия. — М.; Ижевск: Ин-т компьютерных технологий, 2003. — 624 с.
15. Кузнецов В. В. Введение в физику горячей Земли. — Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2008. — 367 с.
16. Левин Б. В., Чирков Е. Б. Особенности широтного распределения сейсмичности и вращения Земли // Вулканология и сейсмология. — 1999. — № 6. — С. 65–69.
17. Леонов М. Г. Тектоника консолидированной коры // Тр. Геол. ин-та РАН. — Вып. 575. — М.: Наука, 2008. — 457 с.
18. Линьков Е. М. Сейсмические явления. — Л.: ЛГУ, 1987. — 248 с.
19. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде / А. А. Лукк, А. В. Дещеревский, А. Я. Сидорин, И. А. Сидорин. — М.: ОИФЗ РАН, 1999. — 210 с.
20. Лунина О. В. Сейсмическое поле района Баргузинской впадины и полуострова Святой Нос: результаты фрактального анализа // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия: материалы Всерос. сов., Иркутск, 18–21 августа 2009 г. Т. 1. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. — С. 168–170.
21. Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. — М.: Недра, 1965. — 380 с.
22. Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли / под ред. А. О. Глико. — М.: Наука, 2006. — 390 с.
23. Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана. — М.; СПб: Межправительственная океанографическая комис., 2003. — 120 с.
24. Мелекесцев И. В. Природная катастрофа 1737–1742 гг. на Камчатке как модель будущих региональных катастроф на островных дугах Северо-Западной Пацифики // Новейший и современный вулканизм на территории России. — М.: Наука, 2005. — С. 553–571.
25. Мирлин Е. Г. // Докл. РАН. — 2009. — Т. 426. — № 5. — С. 649–652.

26. Николаев А. В. Черты геофизики XXI века // Пробл. геофизики XXI века. Кн. 1 / под ред. А. В. Николаева. — М.: Наука, 2003. — С. 7–16.
27. Новая глобальная тектоника (тектоника плит). — М.: Мир, 1974. — 472 с.
28. Паровик Р. И. Математическое моделирование процессов переноса радона в системе «грунт — атмосфера»: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Комсомольск-на-Амуре, 2009. — 112 с.
29. Пейве А. В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. Геологическая. — 1961. — № 3. — С. 36–54.
30. Пономарев В. С. Энергонасыщенность геологической среды / Тр. ГИНа РАН. — Вып. 582. — М.: Наука, 2008. — 379 с.
31. Порубов А. В. Локализация нелинейных волн деформации. Асимптотические и численные методы исследования. — М.: Физматлит, 2009. — 208 с.
32. Ротационные процессы в геологии и физике / под ред. Е. Е. Милановского. — М.: ДомКнига, 2007. — 528 с.
33. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1. — М.: Наука, 1973. — 536 с.
34. Слензак О. И. Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. — Киев: Наук. думка, 1972. — 182 с.
35. Снарроу Д. Планеты. Путешествие по Солнечной системе. — СПб.: Амфора, 2008. — 224 с.
36. Шебалин Н. В. Количественная макросейсмика. Вычислительная сейсмология. — Вып. 34. — М.: Геос, 2003. — С. 57–200.
37. Шерман С. И., Горбунова Е. А. // Физическая мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 1. — С. 115–122.
38. Федоров В. М. Особенности широтного распределения вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. — 2002. — № 4. — С. 39–43.
39. Физический энциклопедический словарь. — М.: Сов. энцикл., 1983. — 928 с.
40. Фридман А. М., Клименко А. В. Две компоненты сейсмической активности Земли и их связь с особенностями суточного вращения // Нелинейные волны-2002. — Н. Новгород: ИПФ РАН, 2003. — С. 133–155.
41. Эйнштейн А. О гравитационных волнах // Собр. науч. тр. Т. 1. — М.: Наука, 1965. — С. 631–649.
42. *Bulletin Seismological Society of America*. — 2009. — Vol. 99. — № 2B. — P. 945–1486.
43. Lee W. H. K., Igel H., Trifunac M. D. Recent advances in rotational seismology // *Seismological Research Letters*. — 2009. — Vol. 80. — № 3. — P. 479–490.
44. Mandelbrot B. *The fractal geometry of nature*. — New York: W.H. Freeman and Co., 1982. — 468 p.
45. Forsyth D., Uyeda S. On the relative importance of the driving forces of plate motion // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* — 1975. — Vol. 43. — P. 163–200.
46. Sherman S. I., Gladkov A. S. Fractals in studies of faulting and seismicity in the Baikal rift zone // *Tectonophysics*. — 1999. — Vol. 308. — № 1–2. — P. 133–142.
47. Teisseyre R., Nagahama H., Majewski E. (Eds.) *Physics of asymmetric continua: extreme and fracture processes: earthquake rotation and soliton waves*. — Berlin & Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
48. Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects / eds. R. Teisseyre, M. Takeo, E. Majewski. — Heidelberg, Germany: Springer, 2006. — 582 p.

Приложение 2

**СПИСОК
ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ АВТОРА
(1980–2009 гг.)***

1. (Ш.23) *Викулин А. В., Гордеев Е. И., Викулина С. А.* Исследование источника вулканического дрожания на заключительной стадии Толбачинского извержения // *Вулканология и сейсмология.* — 1980. — № 1. — С. 79–81.
2. Уточнение границ очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги / С. А. Федотов, С. Д. Чернышев, Г. В. Чернышева, А. В. Викулин // *Вулканология и сейсмология.* — 1980. — № 6. — С. 52–67.
3. *Викулин А. В.* О закономерностях расположения шлаковых конусов в районе Северного прорыва // *Современные движения земной коры на геодинамических полигонах.* — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1981. — С. 98.
4. *Викулин А. В.* Об энергетических классификациях курило-камчатских землетрясений // *Сейсмичность, сейсмический прогноз и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке.* — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1981. — С. 9.
5. *Викулин А. В.* Зоны молчания на Камчатке // *Сейсмичность, сейсмический прогноз и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке.* — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1981. — С. 10.
6. (I.1) *Викулин А. В.* Зоны молчания камчатских землетрясений // *Физика очага и предвестники землетрясений.* — М.: ИФЗ АН СССР, 1982. — С. 255–281.
7. *Викулин А. В.* О взаимодействии эпицентральных областей курило-камчатских землетрясений // *Сейсмический прогноз и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке.* — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1982. — С. 11–12.
8. *Викулин А. В., Ким Ч. У.* Об оценке магнитуд курило-камчатских землетрясений // *Сейсмический прогноз и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке.* — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1982. — С. 12–13.
9. *Викулин А. В., Чернобай И. П.* О двух толчках Урупского землетрясения 13 октября 1963 г. // *Сейсмический прогноз и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке.* — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1982. — С. 13–15.
10. *Викулин А. В., Смирнов В. С.* Возмущения электромагнитного поля, сопровождавшие Большое Трещинное Толбачинское извержение // *Сейсмический прогноз и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке.* — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1982. — С. 15–16.
11. *Викулин А. В.* Особенности цунами, возбужденного Урупским землетрясением 13 октября 1963 г. // *Краткосрочный и долгосрочный прогноз цунами.* — М.: ИО АН СССР, 1983. — С. 92.
12. *Викулин А. В.* О соотношении между энергетическими и магнитудными классификациями землетрясений Камчатки, Курил и Японии // *Вулканология и сейсмология.* — 1983. — № 3. — С. 90–98.
13. (I.2) *Викулин А. В., Ким Ч. У.* О магнитудной классификации землетрясений Камчатки, Курил и северо-восточной части Японии в 1911–1961 гг. // *Вулканология и сейсмология.* — 1983. — № 5. — С. 96–102.
14. *Викулин А. В., Ким Ч. У.* Курило-камчатские землетрясения. Данные наблюдений. 1911–1952 гг. — М.: ММЦД Б, 1983. — 82 с.
15. *Викулин А. В., Ким Ч. У.* Курило-камчатские землетрясения. Данные наблюдений. 1953–1961 гг. — М.: ММЦД Б, 1983. — 84 с.

* После порядкового номера в скобках обозначены статьи, помещенные в соответствующих разделах настоящего сборника: в I разделе — 13 статей, во II — 9, в III — 4, в IV — 11, в V — 4. Всего в сборнике приведена 41 статья.

16. Викулин А. В. О возможности изучения тонкой структуры очага и источника цунами // Совещание по цунами: тез. докл. — Горький: ИПФ АН СССР, 1984. — С. 25.
17. Викулин А. В. О новом методе решения геофизических задач // Прогноз сейсмической опасности на Дальнем Востоке. — Южно-Сахалинск, 1984. — С. 93–94.
18. Викулин А. В. О магнитудной классификации Алеутских землетрясений // Прогноз сейсмической опасности на Дальнем Востоке. — Южно-Сахалинск, 1984. — С. 95.
19. Викулин А. В. Свойства эпицентральных областей курило-камчатских землетрясений // Сейсмические процессы на Северо-Востоке СССР. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1984. — С. 54–78.
20. (III.29) Викулин А. В., Смирнов В. С. Об электромагнитных эффектах и вулканическом дрожании на заключительной стадии Северного прорыва Толбачинского извержения 1975 года // Сейсмические процессы на Северо-Востоке СССР. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1984. — С. 157–161.
21. (III.25) Викулин А. В. О длине приповерхностной трещины, через которую осуществляется питание конусов Северного прорыва // Вулканология и сейсмология. — 1984. — № 3. — С. 82–87.
22. (V.38) Викулин А. В., Синельникова Л. Г. Начало сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. — 1985. — № 6. — С. 102–106.
23. Викулин А. В. Некоторые особенности сейсмического режима островных дуг // Количественная сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1985. — С. 10–11.
24. Викулин А. В., Синельникова Л. Г. О регистрации землетрясений на Камчатке: ист. справка // Количественная сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1985. — С. 24.
25. Викулин А. В., Лобковский Л. И. Интерпретация зон молчания камчатских землетрясений // Количественная сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1985. — С. 48–49.
26. Викулин А. В. Закон повторяемости сейсмических брешей // Количественная сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1985. — С. 73–74.
27. Викулин А. В. О некоторых особенностях сейсмичности в очагах курило-камчатских землетрясений с $M = 8,0$ // Вулканизм и связанные с ним процессы. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1985. — С. 198–200.
28. Викулин А. В., Синельникова Л. Г. Об истории сейсмологических наблюдений на Камчатке // Сейсмичность и сейсмический прогноз на Дальнем Востоке. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 19–21.
29. Викулин А. В. Уточнение положения очагов сильнейших землетрясений и долгосрочный сейсмический прогноз для Алеутской островной дуги и Южной Аляски // Сейсмичность и сейсмический прогноз на Дальнем Востоке. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 71–72.
30. Федотов С. А., Чернышев С. Д., Викулин А. В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Северо-Восточной Японии // Сейсмичность и сейсмический прогноз на Дальнем Востоке. — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 120–122.
31. Викулин А. В. О дополнении к долгосрочному сейсмическому прогнозу для района стыка Курило-Камчатской и Алеутской дуг // Физические поля и свойства горных пород Северо-Востока СССР. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 23–43.
32. (I.3) Викулин А. В., Чернобай И. П. О некоторых особенностях двух сильнейших курило-камчатских землетрясений // Физические поля и свойства горных пород Северо-Востока СССР. — Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 44–59.
33. Викулин А. В., Чернобай И. П. Механизм очага Урупского (1963 г.) и Большого Камчатского (1952 г.) землетрясений // Динамические процессы в дискретных геофизических системах. — Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1986. — С. 58–66.
34. (II.14) Викулин А. В. Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова // Вулканология и сейсмология. — 1986. — № 3. — С. 72–83.

35. Викулин А. В. Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана // Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1987. — 54 с. — Препринт.
36. Викулин А. В., Журавлев В. И. Статистический анализ распределения курило-камчатских землетрясений во времени и в пространстве — Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1987. — 28 с. — Препринт.
37. Викулин А. В., Семенец Н. В., Широков В. А. Землетрясение будет завтра // Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ АН СССР, 1987. — 82 с.
38. Викулин А. В. Пространственные, временные и энергетические особенности сейсмического режима северо-западной части Тихого океана: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М.: МГУ, 1988. — 201 с.
39. Викулин А. В. О взаимодействии между землетрясениями // Развитие сейсмологии и геофиз. исслед. в Сибири и на Дальнем Востоке. — Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1988. — С. 11–12.
40. Викулин А. В., Викулина С. А. Миграция очаговых областей сильнейших землетрясений вкост желоба Нанкай // Развитие сейсмологии и геофиз. исслед. в Сибири и на Дальнем Востоке. — Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1988. — С. 13–14.
41. Викулин А. В., Викулина С. А. О прогнозе времени и места будущего сильнейшего землетрясения в Авачинском заливе // Развитие сейсмологии и геофиз. исслед. в Сибири и на Дальнем Востоке. — Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1988. — С. 14–15.
42. Викулин А. В. Феноменологическая модель сейсмического процесса // Развитие сейсмологии и геофиз. исслед. в Сибири и на Дальнем Востоке. — Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1988. — С. 12–13.
43. (I.4) Баранов Б. В., Викулин А. В., Лобковский Л. И. Мелкофокусная сейсмичность в тылу Курило-Камчатской островной дуги и ее связь с сильнейшими землетрясениями в зоне подвига // Вулканология и сейсмология. — 1989. — № 6. — С. 73–84.
44. Викулин А. В. Еще раз о долгосрочном сейсмическом прогнозе для Камчатского залива // Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ДальНИИС Госстроя СССР, 1989. — С. 14–15.
45. Викулин А. В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса и пути ее дальнейшего развития // Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ДальНИИС Госстроя СССР, 1989. — С. 15–17.
46. Викулин А. В., Викулина С. А. Камчатка: сейсмические дыры, форшоки, прогноз // Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ДальНИИС Госстроя СССР, 1989. — С. 17–18.
47. Викулин А. В., Мелекесцев И. В. О вероятности и повторяемости 10-балльных землетрясений в Петропавловске-Камчатском // Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ДальНИИС Госстроя СССР, 1989. — С. 66–67.
48. Викулин А. В. Migration of the largest earthquake sources across the Nankai trench // Proceedings of International Tsunami Symposium. — Novosibirsk: CC SD USSR AS, 1989. — P. 141–148.
49. Викулин А. В. Phenomenological wave model of seismic process // Proceedings of International Tsunami Symposium. — Novosibirsk: CC SD USSR AS, 1989. — P. 149–159.
50. Сейсмическая активность на краях очагов сильнейших курило-камчатских землетрясений и долгосрочный сейсмический прогноз / А. В. Викулин, Б. В. Баранов, К. А. Кечекезян, Л. И. Лобковский // Геофиз. исслед. при решении геологических задач. — Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1989. — С. 24–42.
51. Викулин А. В. Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана // Геофиз. исслед. при решении геологических задач. — Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1989. — С. 43–57.
52. Викулин А. В., Викулина С. А. Закономерности размещения очагов сильнейших землетрясений в районе желоба Нанкай. — Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ АН СССР, 1989. — 44 с. — Препринт № 5.
53. Викулин А. В. Phenomenological wave model of seismic process and ways to its further development // Geodesy-Seismology, Deformation and Prognosis International Symposium. — Erevan, 1989. — P. 148.

54. *Vikulina A. V., Vikulina S. A.* Kamchatka: Seismic Holes, Foreshocks, Forecast // Geodesy-Seismology, Deformation and Prognosis International Symposium. — Erevan, 1989. — P. 149.
55. (I.5) *Викулин А. В.* Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 310. — № 4. — С. 821–824.
56. *Викулин А. В.* Динамика сейсмических брешей у берегов Камчатки // Количественная оценка сейсмической опасности на Дальнем Востоке. — Южно-Сахалинск, 1991. — С. 14–15.
57. *Викулин А. В., Викулина С. А.* Временное распределение афтершоков и форшоков в очагах сильнейших камчатских, курильских и японских землетрясений // Количественная оценка сейсмической опасности на Дальнем Востоке. — Южно-Сахалинск, 1991. — С. 15–16.
58. *Викулин А. В., Гусяков В. К., Титов В. В.* Исследование взаимодействия очагов сильнейших землетрясений // Количественная оценка сейсмической опасности на Дальнем Востоке. — Южно-Сахалинск, 1991. — С. 42–43.
59. *Викулин А. В., Чуриков В. А.* Сопоставление результатов нивелирования в районе Петропавловска-Камчатского с сейсмическими данными // Количественная оценка сейсмической опасности на Дальнем Востоке. — Южно-Сахалинск, 1991. — С. 43.
60. *Викулин А. В., Митякин В. П.* Динамические параметры очагов камчатских землетрясений // Количественная оценка сейсмической опасности на Дальнем Востоке. — Южно-Сахалинск, 1991. — С. 62–63.
61. *Викулин А. В., Викулина С. А.* Камчатка: сейсмические дыры, форшоки, прогноз // Сейсмичность и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ДальНИИС, 1991. — С. 3–17.
62. *Викулин А. В., Митякин В. П.* Сейсмичность и параметры сильных землетрясений Камчатки // Сейсмичность и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. — Владивосток: ДальНИИС, 1991. — С. 17–48.
63. *Викулин А. В., Викулина С. А., Митякин В. П.* Сценарий возможного сейсмического воздействия на Петропавловск-Камчатский в результате катастрофического землетрясения. — М.: ИЛ АН СССР, 1991. — 55 с.
64. *Викулин А. В.* О понятии и величине сейсмического риска // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1. — № 3. — С. 118–123.
65. *Викулин А. В.* Сейсмичность и вращение Земли // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1. — № 3. — С. 124–130.
66. (II.15) *Викулин А. В., Гусяков В. К., Титов В. В.* О природе максимального цунами // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1. — № 3. — С. 31–134.
67. (I.6) *Викулин А. В.* Миграция очагов сильнейших камчатских и северо-курильских землетрясений и их повторяемость // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 46–61.
68. (II.16) *Викулин А. В.* Прогноз времени сильнейших землетрясений у берегов Камчатки и Северных Курил // Вулканология и сейсмология. — 1992. — № 1. — С. 62–69.
69. *Vikulin A. V.* Forecast of the Largest Earthquakes at the Costs of Kamchatka and North Kuriles // Hazard assessment, Risk Evaluation, loss Reduction and Earthquake Insurance. — Bangkok, Thailand, 1992. — P. 72.
70. *Vikulin A. V., Solomatina A. V., Semenets N. V.* A seismic Risk and a Problem of Insurance // Hazard assessment, Risk Evaluation, loss Reduction and Earthquake Insurance. — Bangkok, Thailand, 1992. — P. 72.
71. *Викулин А. В.* Физика волнового сейсмического процесса // Природа. — 1992. — № 7. — С. 11–19.
72. (II.17) *Викулин А. В., Соломатин А. В., Семенец Н. В.* Сейсмический риск и вопросы страхования // Жилищное стр-во. — 1993. — № 3. — С. 12–15.
73. *Vikulin A. V., Ivanchin A. G.* A model of inertial earthquake's sours // L. P. Zonenshain memorial conference on plate tectonic. — M.: IO RAS, 1993. — P. 12.
74. *Vikulin A. V., Gertsenshein S. Y., Nekrasov I. V.* Phenomenological model of the Pacific ocean plate tectonics // L. P. Zonenshain memorial conference on plate tectonic. — M.: IO RAS, 1993. — P. 61.
75. *Vikulin A. V.* On the Nature of Australian earthquakes // 8th International Seminar Earthquake Prognostics. — Iran: Natural Disaster Prevention Center, 1993. — P. 42–43.

76. *Vikulin A. V.* The Physics of Seismic process // 8th International Seminar Earthquake Prognostics. — Iran: Natural Disaster Prevention Center, 1993. — P. 44–45.
77. (I.7) *Викулин А. В.* О природе австралийских землетрясений // Вулканология и сейсмология. — 1994. — № 2. — С. 99–108.
78. *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Ротационная модель сейсмического процесса в пределах окраины Тихого океана // Закономерности строения и эволюции геосфер. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 1994. — С. 49–50.
79. *Викулин А. В.* Сейсмический процесс, тектоника плит и вращение планеты // Закономерности строения и эволюции геосфер. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 1994. — С. 51–52.
80. *Vikulin A. V., Zobin V. M., Melekestsev I. V.* Seismic zonation of the Western coast of the Bering Sea // Proceedings of the First International Conference on Seismic Zonation. — France: Nice, 1995. — P. 1432–1438.
81. *Vikulin A. V., Melekestsev I. V.* Earth Rotation, Magmatism and Seismicity of Pacific Rim // 5th L. P. Zonenshain memorial conference on plate tectonic. — M.: IO RAS, 1995. — P. 131–132.
82. *Vikulin A. V.* The social consequences of the Khailino Earthquake and Hazard of nature catastrophes // 5th L. P. Zonenshain memorial conference on plate tectonic. — M.: IO RAS, 1995. — P. 132.
83. The Seismicity of Koryak on data of detailed observation // 5th L. P. Zonenshain memorial conference on plate tectonic / A. V. Vikulin, V. N. Ghebrev, V. I. Levina [et al.]. — M.: IO RAS, 1995. — P. 132.
84. Khailinskoe Earthquake of March 8, 1991 and it Macro seismic Effect / A. V. Vikulin, V. M. Zobin, V. I. Levina, V. S. Borisenko [et al.] // 5th L. P. Zonenshain memorial conference on plate tectonic. — M.: IO RAS, 1995. — P. 132.
85. *Vikulin A. V., Gertsenshtein S. Ya., Nekrasov I. V.* The Protection of Coastal Zone from Big waves // 5th L. P. Zonenshain memorial conference on plate tectonic. — M.: IO RAS, 1995. — P. 133.
86. *Vikulin A. V., Gertsenshtein Ya. S., Romashova V. H.* Convection in Magnetic Field and Possible Mechanism of Ocean Bottom Remanence // 5th L. P. Zonenshain memorial conference on plate tectonic. — M.: IO RAS, 1995. — P. 216–217.
87. *Викулин А. В.* Миграция очагов и долгосрочный прогноз сильнейших землетрясений северо-западной части Тихого океана (Япония — Камчатка — Алеутские о-ва) // Развитие и окружающая среда: материалы рос.-яп. симп. — Петропавловск-Камчатский: Адм. Камчатской обл., 1995. — С. 20–21.
88. *Викулин А. В.* Опыт по уменьшению опасности от природных катастроф на территории Корякии (север Камчатки) // Развитие и окружающая среда: материалы рос.-яп. симп. — Петропавловск-Камчатский: Адм. Камчатской обл., 1995. — С. 23–24.
89. *Викулин А. В.* Долгосрочный прогноз, миграция и пары землетрясений — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1996. — 31 с. — Препринт № 1.
90. *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Ротационная модель сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1996. — 41 с. — Препринт № 2.
91. *Викулин А. В.* О возможности построения теории сейсмического прогноза. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1996. — 34 с. — Препринт № 3.
92. (II.18) *Викулин А. В.* Южно-курильское землетрясение 4 октября 1994 г. как предвестник сильнейшего землетрясения на юге Камчатки // Вулканология и сейсмология. — 1996. — № 5. — С. 106–112.
93. *Vikulin A. V., Ivanchin A. G.* Rotational model of the seismic process // Bulgarian Geophys. J. — 1996. — Vol. XXII. — № 3. — P. 36–43.
94. *Викулин А. В., Мелекесцев И. В.* Вращение земли, магматизм и сейсмичность обрамления Тихого океана // Сейсмическая безопасность урбанизированных территорий. — Петропавловск-Камчатский, 1996. — С. 13.
95. Сейсмичность Корякии по данным детальных наблюдений / А. В. Викулин, В. Н. Чебров, В. И. Левина [и др.] // Сейсмическая безопасность урбанизированных территорий. — Петропавловск-Камчатский, 1996. — С. 14.
96. *Викулин А. В.* Социальные последствия Хаилинского землетрясения // Сейсмическая безопасность урбанизированных территорий. — Петропавловск-Камчатский, 1996. — С. 58.

97. Хаилинское землетрясение 8 марта 1991 г. и его макросейсмический эффект / А. В. Викулин, В. М. Зобин, В. И. Левина [и др.] // Сейсмическая безопасность урбанизированных территорий. — Петропавловск-Камчатский, 1996. — С. 60.
98. *Vikulin A. V., Porotov A. V.* The natural hazard assessment on coastal zone of the Koriak Region // Partnership in Coastal Zone Management, 1996 / eds. Tausik and J. Mitchel; Supl. Iss. Univ. — Portsmouth, 1996. — P. 1–6.
99. *Vikulin A. V.* The October 4, 1994, Southern Kuril earthquake — a Precursor of a great earthquake in southern Kamchatka // *Volcanology and Seismology*. — 1997. — Vol. 18. — P. 195–204.
100. *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Модель сейсмического процесса // Вычислительные технологии. — 1997. — Т. 2. — № 2. — С. 20–25.
101. *Викулин А. В.* Природный риск территории Корякии (север Камчатки) // Геологическая среда и сейсмический процесс. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 1997. — С. 73–74.
102. *Викулин А. В.* Сейсмический процесс, тектонические и деформационные волны и проблема прогноза землетрясений // Геологическая среда и сейсмический процесс. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 1997. — С. 74–75.
103. *Викулин А. В.* Сейсмический процесс и проблема прогноза землетрясений // Стихия. Строительство. Безопасность. — Владивосток: ДВО РАН, 1997. — С. 58–59.
104. *Викулин А. В.* Миграция сейсмичности, тектонические волны и собственные колебания планеты. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1997. — 20 с. — Препринт № 4.
105. К землетрясению без риска / А. В. Викулин, В. Н. Дроздок, Н. В. Семенец, В. А. Широков. — Петропавловск-Камчатский: СЭТО–СТ, 1997. — 120 с.
106. *Vikulin A. V., Melekestsev I. V.* Seismicity, volcanism of the Pacific Ocean and the planets' rotation // *Bulgarian Geophys. J.* — 1997. — Vol. XXIII. — № 1. — P. 62–68.
107. Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г.: предвестники, особенности, последствия / ред. А. В. Викулин, Е. И. Гордеев, Б. В. Иванов. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1998. — 294 с.
108. (IV.27) *Викулин А. В., Мелекесцев И. В.* Сейсмичность и вулканизм Тихого океана и вращение планеты // *Bulgarian Geophys. J.* — 1997. — Т. XXIII. — № 1. — P. 62–68.
109. Состояние сейсмологических наблюдений на Камчатке и перспектива их развития / А. В. Викулин, Е. И. Гордеев, В. Н. Чебров [и др.] // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г.: предвестники, особенности, последствия. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1998. — С. 12–24.
110. (I.8) *Викулин А. В., Сенюков С. Л.* Миграция форшоков и афтершоков в очаге Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. с $M = 7,5–7,7$ // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г.: предвестники, особенности, последствия. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1998. — С. 80–88.
111. (II.19) *Викулин А. В.* Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. с $M = 7,5–7,7$ (Камчатка) в схеме долгосрочного сейсмического прогноза // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г.: предвестники, особенности, последствия. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1998. — С. 90–98.
112. (II.20) *Викулин А. В.* Природный риск Северной Камчатки // Тихоокеанская геология. — 1998. — Т. 17. — № 2. — С. 85–92.
113. (I.9) *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. — 1998. — Т. 17. — № 6. — С. 95–103.
114. *Викулин А. В., Быков В. Г., Лунева М. Н.* Ротационная геодинамическая модель // Методы изучения, строение и мониторинг литосферы. — Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1998. — С. 163–165.
115. *Vikulin A. V., Bykov V. G., Luneva M. N.* Strain waves in rotational model of seismic process // *Problems of Geocosmos*. — St. Petersburg, 1998. — P. 194.
116. *Викулин А. В., Быков В. Г., Лунева М. Н.* Волны деформации и геодинамика Земли // Современный вулканизм Курило-Камчатской и Алеутско-Аляскинской островных дуг. — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 1998. — С. 90.

117. *Викулин А. В., Кролевец А. Н.* Сейсотектонический процесс и колебания Чандлера // *Соврем. вулканизм Курило-Камчатской и Алеутско-Аляскинской островных дуг.* — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 1998. — С. 91.
118. *Викулин А. В.* Волны деформации и геодинамика Земли / А. В. Викулин, В. Г. Быков, М. Н. Лунева, А. Г. Иванчин. — Томск: ТГУ, 1998. — С. 44–45.
119. *Викулин А. В., Иванчин А. Г.* Ротационный механизм накопления упругих напряжений в литосфере // *Соврем. сейсмология: достижения и пробл.* — М.: РФФИ, 1998. — С. 10–11.
120. *Викулин А. В., Быков В. Г., Лунева М. Н.* Волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса // *Соврем. сейсмология: достижения и пробл.* — М.: РФФИ, 1998. — С. 14.
121. *Викулин А. В.* Сейсмическая опасность как составная часть природного риска (на примере Корякии) // *Соврем. сейсмология: достижения и пробл.* — М.: РФФИ, 1998. — С. 24–25.
122. *Викулин А. В., Семенец Н. В.* Сейсмический риск и проблемы страхования на примере Камчатки // *Соврем. сейсмология: достижения и пробл.* — М.: РФФИ, 1998. — С. 28–29.
123. *Викулин А. В., Быков В. Г., Лунева М. Н.* Волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса // *Закономерности строения и эволюции геосфер.* — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 1998. — С. 75–76.
124. *Современная геодинамика сейсмических поясов Земли / А. В. Викулин, В. Г. Быков, А. Г. Иванчин [и др.] // Закономерности строения и эволюции геосфер.* — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 1998. — С. 77.
125. *Викулин А. В., Кролевец А. Н.* Колебания Чандлера и сейсотектонический процесс // *Закономерности строения и эволюции геосфер.* — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 1998. — С. 77–78.
126. *Викулин А. В., Сигова К. И., Ламыкина Г. Г.* Ротационная модель блоковой тектоники и геодинамики азиатско-тихоокеанской зоны перехода // *Закономерности строения и эволюции геосфер.* — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 1998. — С. 370–371.
127. *Vikulin A. V., Ivanchin A. G.* Rotational Model of Seismic Process // *Geol. of Pac. Ocean.* — 2000. — Vol. 15. — P. 1225–1240.
128. *Vikulin A. V., Lamykina G., Sigova K., Ranguelov H. B.* Geodynamics of seismofocal zones in the Japan and Kuril-Kamchatka arc-trench system // *Proceedings of International Symposium on new concepts in global tectonics.* — Tsukuba, Japan, 1998. — P. 256–261.
129. *Викулин А. В.* Сейсмический цикл как результат взаимодействия тектонической волны и сейсмофокального блока // *Строение и эволюция востока Азии.* — Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 1999. — С. 301–306.
130. *Факторы сейсмической опасности в зоне возведения ответственных объектов на территории Камчатской области / А. В. Викулин, А. А. Гусев, В. М. Павлов, В. П. Хворостов // Пробл. сейсмичности Дальнего Востока.* — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. — С. 21.
131. *Викулин А. В.* Физика волнового сейсмического процесса // *Пробл. сейсмичности Дальнего Востока.* — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. — С. 39.
132. *Викулин А. В., Семенец Н. В.* Сейсмическая опасность, риск и проблема страхования // *Пробл. сейсмичности Дальнего Востока.* — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. — С. 97.
133. *Викулин А. В.* Форшоки, афтершоки и главный толчок как результат взаимодействия тектонических волн деформации с сейсмофокальным блоком // *Пробл. сейсмичности Дальнего Востока.* — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. — С. 105.
134. *Викулин А. В., Быков В. Г., Лунева М. Н.* Форшоки, афтершоки и главный толчок в ротационной модели сейсмического процесса // *Пробл. сейсмичности Дальнего Востока.* — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. — С. 106.
135. *Викулин А. В. Б. Рангелов, А. Кейс, Г. Г. Ламыкина.* Пояс сейсмичности — новый инструмент геодинамических исследований // *Пробл. сейсмичности Дальнего Востока.* — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. — С. 107.
136. *Викулин А. В.* Кольцевая (вихревая) сейсмическая структура в Авачинском заливе (Камчатка) // *Пробл. сейсмичности Дальнего Востока.* — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. — С. 121–122.

137. Викулин А. В. О работе экспертной группы КЦМСИВА: взгляд изнутри // Опыт прогнозирования сейсмической опасности на Камчатке в 1995–1996 гг. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. — С. 21–24.
138. (II.21) Викулин А. В. Роль и значение долгосрочного прогноза // Опыт прогнозирования сейсмической опасности на Камчатке в 1995–1996 гг. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. — С. 25–31.
139. Схема сейсмического районирования / А. В. Викулин А. Ф. Литвинов, М. Г. Патока [и др.] // Карта полезных ископаемых Камчатской обл. М 1 : 5 000 000. — СПб.: ВСЕГЕИ, 1999.
140. Проблемы сейсмичности Дальнего Востока / под ред. А. В. Викулина. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. — 318 с.
141. Сейсмический пояс — новый способ геодинамических исследований в сейсмической зоне / А. В. Викулин, Б. Рангелов, А. Кейс, Г. Г. Ламыкина // Пробл. сейсмичности Дальнего Востока. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. — С. 91–95.
142. Викулин А. В. Квант сейсмотектонической активности // Пробл. сейсмичности Дальнего Востока. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. — С. 220–234.
143. Викулин А. В. Землетрясение как результат взаимодействия тектонической волны с сейсмофокальным блоком // Пробл. сейсмичности Дальнего Востока. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. — С. 243–254.
144. (V.39) Викулин А. В. Сейсмические вехи // Пробл. сейсмичности Дальнего Востока. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. — С. 276–281.
145. Викулин А. В., Степанов В. В., Токарев Е. П. Хроника образования и развития инструментальной сейсмологии на Камчатке // Пробл. сейсмичности Дальнего Востока. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. — С. 282–313.
146. (IV.28) Викулин А. В., Быков В. Г., Лунева М. Н. Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса // Вычислительные технологии. — 2000. — Т. 5. — № 1. — С. 31–39.
147. Волновая геодинамика литосферы Земли / А. В. Викулин, В. Г. Быков, М. Н. Лунева, А. Г. Иванчин // Сопряженные задачи механики и экологии. — Томск: ТГУ, 2000. — С. 28–39.
148. Викулин А. В. Механика волнового сейсмического процесса // Сейсмология в Сибири на рубеже тысячелетий. — Новосибирск: ОИГГиМ, 2000. — С. 258–260.
149. Викулин А. В. Начало квантовой сейсмотектоники // Сейсмология в Сибири на рубеже тысячелетий. — Новосибирск: ОИГГиМ, 2000. — С. 261–263.
150. *Vikulin A. V.* Natural hazards in northern Kamchatka // *Geol. of Pac. Ocean.* — 2000. — Vol. 15. — P. 351–366.
151. (IV.29) Викулин А. В., Кролевец А. Н. Чандлеровское колебание полюса и сейсмотектонический процесс // Геология и геофизика. — 2001. — № 6. — С. 996–1009.
152. (IV.30) Викулин А. В., Дуда С. Длиннопериодные движения при землетрясениях // Пробл. сейсмичности Дальнего Востока. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. — С. 24–26.
153. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса // Пробл. сейсмичности Дальнего Востока. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. — С. 27–30.
154. Викулин А. В. Миграция и осцилляции сейсмической активности и волновые движения земной коры // Пробл. сейсмичности Дальнего Востока. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. — С. 205–224.
155. Викулин А. В. Землетрясения как результат взаимодействия тектонической волны с сейсмофокальным блоком // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород. — Красноярск, 2001. — С. 117.
156. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород. — Красноярск, 2001. — С. 118.
157. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Ротация и упругость // Мезоструктура. — СПб.: Прометей, 2001. — С. 72.
158. Calibration of the IMS Station at Petropavlovsk (PET) on the Kamchatka peninsula and other IMS Stations in the Transition zone from Eastern Eurasia to the Pacific ocean / A. V. Vikulin, D. R. Baumgard, V. Ryaboy, A. A. Gusev // Third Workshop on IMS Location Calibration: NORSAR. — Oslo, Norway, 23–27 April, 2001.

159. 3-D modeling of the Transition zone from Northern Eurasia to the Pacific ocean for the International monitoring system calibration / A. V. Vikulin, D. R. Baumgard, V. Ryaboy, A. A. Gusev // Four Workshop on IMS Location and Scareening: NORSTAR. — Oslo, Norway, 22–26 April, 2002.
160. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — СПб., 2001. — 37 с.
161. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — СПб., 2002. — 224 с.
162. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Ротация и упругость // Вопр. материаловедения. — 2002. — 1(29). — С. 435–441.
163. Викулин А. В., Иванчин А. Г. По поводу статьи В. Б. Спиртуса «Уединенные волны поворотных колебаний — перерождение Додда?» (Ответ на критические замечания) // Геофиз. журн. — 2002. — № 3. — Т. 24. — С. 113–117.
164. (IV.31) Викулин А. В. Уединенные тектонические волны поворотной деформации как результат вращения планеты // Геофиз. журн. — 2002. — № 4. — Т. 24. — С. 90–101.
165. Vikulin A. V. Big Kamchatkan earthquake — 50 years later // The International Workshop Local Tsunami warning and mitigation. — Petropavlovsk-Kamchatsky, 2002.
166. Викулин А. В. Тектонические плиты как мезоструктура твердого вещества Земли // Строение, геодинамика и металлогения Охотского региона и прилегающих частей северо-западной тихоокеанской плиты. Т. 1. — Южно-Сахалинск, 2002. — С. 30.
167. Vikulin A. V., Krolevets A. N. Seismotectonic processes and the Chandler oscillation // Acta Geoph. Polonica. — 2002. — Vol. 50. — № 3. — P. 395–411.
168. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород. — Красноярск: СГАУ, 2002. — С. 221–228.
169. Викулин А. В. Ротационная модель очага землетрясения // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород. — Красноярск: СГАУ, 2002. — С. 276–282.
170. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003. — 150 с.
171. Викулин А. В. Геодинамика окраины Тихого океана и вращение Земли // Геодинамика, магматизм и минералогия континентальных окраин Севера Пацифики. — Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. — С. 223–227.
172. Викулин А. В. О природе вихревых движений // Материалы ежегодной конф., посв. Дню вулканолога. — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2003. — С. 52–56.
173. Викулин А. В. Блочное строение литосферы и вращение Земли // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. — Новосибирск: СО РАН, 2003. — С. 28–31.
174. Викулин А. В. Тектонические волны как результат взаимодействия литосферных блоков и плит в условиях вращающейся планеты // Сейсмоакустика переходных зон: материалы 3-го Всерос. симп. — Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2003. — С. 18–21.
175. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса // Математические методы в геофизике. Ч. 1. — Новосибирск: ИВМиМГ (ВЦ) СО РАН, 2003. — С. 87–92.
176. Викулин А. В. Тектонические плиты как мезоструктура литосферы // Геодинамика и геоэкол. пробл. высокогорных регионов. — М.; Бишкек, 2003. — С. 69–73.
177. Викулин А. В. Упругие напряжения во вращающихся блочных твердых телах и их прочность // Науч.-техн. пробл. прогнозирования надежности и долговечности конструкций и меры их решения. — СПб.: ГПУ, 2003. — С. 92–101.
178. Викулин А. В. Ротация и геодинамика // Тектоника, глубинное строение и геодинамика Востока Азии. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2003. — С. 198–203.
179. Викулин А. В. (редактор). Вихри в геологических процессах — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. — 297 с.
180. Викулин А. В. Взгляд физика: вращательное движение как характерное свойство пространства — времени Вселенной // Вихри в геологических процессах. — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. — С. 8–19.
181. Викулин А. В. О скоростях движения тектонических плит // Вихри в геологических процессах. — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. — С. 83–92.

182. *Викулин А. В.* Вращение, упругость и геодинамика // Вихри в геологических процессах. — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. — С. 98–111.
183. (IV.32) *Викулин А. В.* Ротация и прогноз напряженного состояния недр Земли // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2004. — С. 19–25.
184. *Викулин А. В.* Крутильные сеймотектонические колебания, их влияние на здания и сооружения // Будивельни конструкции. Вип. 61. Т. 2. — Киев: НДИБК, 2004. — С. 291–293.
185. *Викулин А. В.* Введение в физику Земли: учеб. пособие. — Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. — 297 с.
186. *Викулин А. В.* Вращение Земли, вихри материи и геодинамика // Пробл. и перспективы развития горных наук. Т. 1. Геомеханика. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2005. — С. 40–49.
187. *Викулин А. В.* Вихревые структуры в геологическом процессе // Материалы ежегодной конф., посв. Дню вулканолога. — Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2005. — С. 22–30.
188. *Викулин А. В., Водинчар Г. М.* Спектр энергии потока сейсмичности // Материалы ежегодной конф., посв. Дню вулканолога. — Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2005. — С. 167–174.
189. *Викулин А. В., Водинчар Г. М.* Спектр энергии потока сейсмичности // Сейсмоакустика переходных зон: материалы 4-го Всерос. симп. — Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2005. — С. 98–102.
190. *Викулин А. В.* Вихревые структуры литосферы и общие проблемы тектоники // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. — Вып. 3. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2005. — С. 16–18.
191. *Викулин А. В.* Крутильные сейсмические колебания и их регистрация // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. — Вып. 3. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2005. — С. 180–181.
192. *Викулин А. В.* Инновационный путь развития региона как необходимое и достаточное условие увеличения благосостояния его жителей // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2005. — № 5. — С. 10–16.
193. (IV.33) *Тверитинова Т. Ю., Викулин А. В.* Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2005. — № 3. — С. 59–77.
194. *Викулин А. В.* Крутильные землетрясения и их регистрация // Современные аспекты развития сейсмостойкого строительства и сейсмологии: тр. Междунар. науч. конф., посв. 50-летию комплексной сейсмологической экспедиции ИФЗ АН СССР и 25-летию создания центра прогноза землетрясений Средней Азии и Казахстана. — Душанбе: Дониш, 2005. — С. 37–39.
195. *Викулин А. В., Водинчар Г. М.* Волновые свойства поля сейсмической энергии северо-западной окраины Тихого океана // Современные аспекты развития сейсмостойкого строительства и сейсмологии: тр. Междунар. науч. конф., посв. 50-летию комплексной сейсмологической экспедиции ИФЗ АН СССР и 25-летию Центра прогноза землетрясений Средней Азии и Казахстана. — Душанбе: Дониш, 2005. — С. 65–69.
196. Место и роль города Петропавловска-Камчатского в инновационном развитии Камчатского региона // Материалы науч.-практ. семинара / ред. А. В. Викулин. — Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2005. — 84 с.
197. *Викулин А. В.* Инновационный путь развития как необходимое и достаточное условие увеличения благосостояния его жителей // Место и роль города Петропавловска-Камчатского в инновационном развитии Камчатского региона. — Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2005. — С. 25–37.
198. *Викулин А. В.* Инновационный путь развития как необходимое и достаточное условие увеличения благосостояния его жителей // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2005. — № 5. — С. 10–16.
199. (IV.34) *Викулин А. В.* Ротационные упругие поля в твердых телах и вихревые решения проблемы Дирихле: тождественные системы? // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2005. — № 6. — С. 89–99.
200. *Викулин А. В.* Камчатскому технопарку год: достижения и проблемы // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2005. — № 6. — С. 10–13.

201. Викулин А. В. О проблеме вихревых структур и процессов в геологии // Система «планета Земля»: нетрадиционные вопр. геологии. — М.: МГУ, 2005. — С. 249–264.
202. *Vikulin A. V.* Earth rotation, elasticity and geodynamics: earthquake wave rotary model // Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects / eds. R. Teisseyre, M. Takeo, E. Majewski. — Heidelberg, Germany: Springer, 2006. — 582 p.
203. Викулин А. В. Ротационные упругие поля в твердых телах // Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2006. — С. 85–88.
204. Викулин А. В., Водинчар Г. М. Волны миграции сейсмической энергии // Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2006. — С. 206–209.
205. Викулин А. В. Волновая природа ротационного упругого поля литосферы // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2006. — С. 401–419.
206. (II.22) Викулин А. В., Мелекесцев И. В. Уроки Хаилинского землетрясения 1991 г., $M=7,0$ и Олюторского 2006 г., $M=7,8$ землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2006. — № 1. — Вып. 7. — С. 36–49.
207. Викулин А. В. 40-е Тектоническое совещание // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2007. — № 1. — Вып. 9. — С. 60.
208. Викулин А. В., Милановский Е. Е. Предисловие // Ротационные процессы в геологии и физике / под ред. Е. Е. Милановского. — М.: ДомКнига, 2007. — С. 9–14.
209. Викулин А. В., Мелекесцев И. В. Вихри и жизнь // Ротационные процессы в геологии и физике / под ред. Е. Е. Милановского. — М.: ДомКнига, 2007. — С. 39–101.
210. Тверитинова Т. Ю., Викулин А. В. Волновая ротационно-упругая тектоника планет // Ротационные процессы в геологии и физике / под ред. Е. Е. Милановского. — М.: ДомКнига, 2007. — С. 271–278.
211. Викулин А. В., Водинчар Г. М., Тверитинова Т. Ю. Геодинамика и проблема Дирихле // Ротационные процессы в геологии и физике / под ред. Е. Е. Милановского. — М.: ДомКнига, 2007. — С. 363–382.
212. (IV.35) Викулин А. В., Тверитинова Т. Ю. Энергия тектонического процесса и вихревые геологические структуры // Докл. РАН. — 2007. — Т. 413. — № 3. — С. 372–374.
213. Моделирование геодинамических процессов окраины Тихого океана / А. В. Викулин, И. В. Мелекесцев, Г. М. Водинчар [и др.] // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений. — Петропавловск-Камчатский: ИКИРР ДВО РАН, 2007. — С. 275–279.
214. Викулин А. В. Землетрясения-дуплеты 2006–2007 и 1780 гг. на Средних Курилах: закономерность или случайность? // Пробл. сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири. — Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2007. — С. 10–11.
215. Викулин А. В., Акманова Д. Р., Осипова Н. А. О миграции сейсмической и вулканической активности вдоль окраины Тихого океана // Пробл. сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири. — Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2007. — С. 34–35.
216. Викулин А. В., Викулина С. А. Эффект Доплера и геодинамика // Пробл. сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири. — Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2007. — С. 36–37.
217. Викулин А. В., Мелекесцев И. В. Вихри и жизнь. — Саранск: Ин-т этнологии и антропологии РАН: Правительство респ. Мордовия, 2007. — С. 357.
218. Викулин А. В., Водинчар Г. М. Тектонические процессы как «вихревые» решения проблемы Дирихле для Земли // Фундамент. пробл. геотектоники. — М.: Геос, 2007. — С. 142–145.
219. Викулин А. В. Ротационно-упругая тектоника планет // Фундамент. пробл. геотектоники. — М.: Геос, 2007. — С. 257–261.
220. Викулин А. В. Циркулярно-поляризованные (спиновые) волны в литосфере // Пробл. комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. — С. 7.
221. Викулин А. В., Викулина С. А., Водинчар Г. М. Землетрясения-дуплеты и пары землетрясений — закономерность сейсмического процесса // Пробл. комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. — С. 36.

222. Викулин А. В., Викулина С. А. Эффект Доплера, нутация полюса и фор-, афтершоки // Пробл. комплексного геофиз. мониторинга Дальнего Востока России. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. — С. 37.
223. (I.10) Викулин А. В., Викулина С. А., Аргас Л. Новые данные о Лиссабонском землетрясении 01.11.1755 г. // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2007. — № 2. — Вып. 10. — С. 74–86.
224. Викулин А. В. Хроника развития естественнонаучных представлений о ротационных и вихревых движениях // Вестник КамчатГТУ. — 2007. — Вып. 6. — С. 64–77.
225. (I.11) Викулин А. В., Викулина С. А. Афтершоки и эффект Доплера. — Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. — С. 300–311.
226. Викулин А. В. Упругие волны крутильной поляризации в литосфере // Физика геосфер: материалы 5-го Всерос. симп. — Владивосток: ДальНаука, 2007. — С. 136–140.
227. Викулин А. В., Акманова Д. Р., Осипова Н. А. Сейсмическая и вулканическая активность окраины Тихого океана // Физика геосфер: материалы 5-го Всерос. симп. — Владивосток: ДальНаука, 2007. — С. 140–145.
228. Викулин А. В., Водинчар Г. М. Проблема Средних Курил и структура всего тихоокеанского пояса // Физика геосфер: материалы 5-го Всерос. симп. — Владивосток: ДальНаука, 2007. — С. 145–149.
229. Викулин А. В., Викулина С. А. Эффект Доплера, нутация полюса и фор-афтершоки // Физика геосфер: материалы 5-го Всерос. симп. — Владивосток: ДальНаука, 2007. — С. 149–154.
230. (I.12) Викулин А. В., Викулина С. А., Водинчар Г. М. Землетрясения-дуплеты и пары землетрясений — закономерность сейсмического процесса // Геофиз. мониторинг и пробл. сейсмической безопасности Дальнего Востока России. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. — С. 145–149.
231. Викулин А. В. Циркулярно поляризованные (спиновые) волны // Геофиз. мониторинг и пробл. сейсмической безопасности Дальнего Востока России. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. — С. 55–58.
232. Викулин А. В., Викулина С. А. Эффект Доплера, нутация полюса и фор-афтершоки // Геофиз. мониторинг и пробл. сейсмической безопасности Дальнего Востока России. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. — С. 140–144.
233. (I.13) Викулин А. В. Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика. — 2008. — Т. 49. — № 6. — С. 559–570.
234. (V.39) Викулин А. В. Мир вихревых движений: монография. — Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008. — 230 с.
235. Викулин А. В. Ротационная вихревая геодинамика: геологический и физический аспекты // Тектонофизика и актуальные вопр. наук о Земле. Т. 1. — М.: ИФЗ РАН, 2008. — С. 19–21.
236. Викулин А. В., Акманова Д. Р., Осипова Н. А. Миграция сейсмической и вулканической активности как тектонофизический процесс // Тектонофизика и актуальные вопр. наук о Земле. Т. 2. — М.: ИФЗ РАН, 2008. — С. 205–207.
237. (IV.36) Викулин А. В., Тверитинова Т. Ю. Моментная волновая природа геологической среды // Вестн. МГУ. Сер. Геологическая. — 2008. — № 6. — С. 16–16.
238. (V.40) Викулин А. В., Надольская Н. И. История развития образования и науки в мире, России и на Камчатке // Вестник КамчатГТУ. — 2008. — Вып 8. — С. 92–100.
239. (IV.37) Викулин А. В. Вихревые движения и структуры: физический и геологический аспекты проблемы // Материалы конф., посв. Дню вулканолога. — Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. — С. 42–51.
240. Викулин А. В. Физика Земли и геодинамика: учеб. пособие // Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2009. — 463 с.
241. Новый тип упругих волн в геофизических средах / А. В. Викулин, Д. Р. Акманова, Н. А. Осипова [и др.] // 100-летие Камчатской экспедиции Рус. геогр. о-ва 1908—1910 гг.: материалы Всерос. науч. конф. — Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. — С. 67–75.
242. (V.41) Викулин А. В., Викулина С. А. Экспедиция Рябушинского и становление сейсмологии и демографии на Камчатке // 100-летие Камчатской экспедиции Рус. геогр. о-ва 1908—1910 гг.:

- материалы Всерос. науч. конф. — Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. — С. 76–85.
243. Викулин А. В. Волновая ротационная геодинамика: сейсмический, вулканический и тектонический процессы // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. — С. 12–14.
244. Викулин А. В., Акманова Д. Р., Осипова Н. А. Миграция сейсмической и вулканической активности как индикатор геодинамических движений // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. — С. 48–50.
245. (III.26) Викулин А. В., Акманова Д. Р., Осипова Н. А. Вулканизм как индикатор геодинамических процессов // Вулканизм и геодинамика. — Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. — С. 46–49.
246. Комплексная (катастрофические вулканические + сильнейшие сейсмические события) электронная база данных как основа для модифицированной геодинамической парадигмы (на примере Пацифики) / А. В. Викулин, И. В. Мелекесцев, В. К. Гусяков [и др.] // Пробл. комплексного геофиз. мониторинга Дальнего Востока России. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2009. — С. 13.
247. Викулин А. В. Новый тип упругих ротационных геодинамических волн // Пробл. комплексного геофиз. мониторинга Дальнего Востока России. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2009. — С. 73.
248. Викулин А. В., Викулина С. А. Два типа взаимодействия между очагами землетрясений // Пробл. комплексного геофиз. мониторинга Дальнего Востока России. — Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2009. — С. 74.
249. A complex electronic database as basis for new geodynamic methods / A. V. Vikulin, V. K. Gusiakov, I. V. Melekestsev [et al.] // 24th International Tsunami Symposium, July 14–16, 2009. — Novosibirsk: ICMMG, 2009. — P. 97.
250. Акманова Д. Р., Викулин А. В., Осипова Н. А. Миграция сейсмической и вулканической активности как индикатор геодинамической активности планеты // Новые идеи в науках о Земле: материалы 9-й Междунар. конф., 14–17 апреля 2009 г. — М.: РГГРУ, 2009. — С. 36.
251. Викулин А. В., Акманова Д. Р., Осипова Н. А. Волны миграции сейсмической и вулканической активности как проявления планетарного геодинамического процесса // Геология и минеральные ресурсы европейского Северо-Востока России: материалы 15-го геологического съезда республики Коми, 13–16 апреля 2009 г. — Сыктывкар: ИГ КНЦ УО РАН, 2009. — С. 48.
252. Викулин А. В. Новый ротационный тип упругих волн в блоковых геофизических средах // Вестник КамчатГТУ. — 2009. — № 9. — С. 24–33.
253. Периодичность катастрофических извержений и их миграция вдоль окраины Тихого океана / А. В. Викулин, Д. Р. Акманова, Н. А. Осипова [и др.] // Вестн. КамчатГТУ. — 2009. — № 10. — С. 7–16.
254. Повторяемость сильных землетрясений и миграция их очагов вдоль сейсмического пояса / А. В. Викулин, Д. Р. Акманова, Н. А. Осипова [и др.] // Вестн. КамчатГТУ. — 2009. — № 10. — С. 17–24.
255. Акманова Д. Р., Викулин А. В., Осипова Н. А. Миграция сейсмической и вулканической активности как тектонофизический процесс // Тектонофизика и актуальные вопр. наук о Земле: материалы докл. Всерос. конф., Москва, 13–17 октября 2008 г. Т. 2. — М.: ИФЗ РАН, 2009. — С. 265–270.
256. Викулин А. В., Акманова Д. Р., Осипова Н. А. Ротационно-упругие волны: сейсмический, вулканический и тектонический процессы // Тектоника и глубинное строение Востока Азии. 6-е Косыгинские чтения: материалы Всерос. конф., Хабаровск, 20–23 января 2009 г. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2009. — С. 260–263.
257. Вулканизм и сейсмичность как индикатор геодинамических процессов / Д. Р. Акманова, А. В. Викулин, Н. А. Осипова, С. В. Чебанюк // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя: материалы XLIII Тектонического сов. Т. 1. — М.: Геос, 2010. — С. 10–13.
258. Викулин А. В. Волновая геодинамика // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя: материалы XLIII Тектонического сов. Т. 1. — М.: Геос, 2010. — С. 111–115.

Научное издание

Викулин Александр Васильевич
Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика
Избранные труды

Редактор Г. Ф. Майорова
Технический редактор, верстка М. А. Острейко
Художественный редактор М. А. Острейко

Редакционно-издательский отдел
Камчатского государственного университета имени Витуса Беринга
683032, Петропавловск-Камчатский, Пограничная, 4
Тел. (4152) 427-078, www.kamgu.ru

Подписано в печать 29.04.2011. Формат 60 × 84/8
Бумага типографская. Печать цифровая.
Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 47,41. Уч.-изд. л. 38,15.
Тираж 500 экз. Заказ № 2049

Отпечатано в КамГУ им. Витуса Беринга