

УДК 530.34

А.Ю. ПОЛЕЦ

Глубокофокусные землетрясения и тектоническое поле современных напряжений в Курило-Охотском регионе

Рассмотрены пространственное распределение глубокофокусных землетрясений в Курило-Охотском регионе, взаимосвязь сейсмичности в глубоких и верхних областях сейсмогенной зоны. Выполнена реконструкция поля тектонических напряжений для глубин 300–660 км. Получены новые данные о глубокофокусных землетрясениях Курило-Охотского региона и особенностях регионального поля тектонических напряжений для глубин 300–660 км.

Ключевые слова: Курило-Охотский регион, землетрясения, тектоническое напряжение.

The deep-focus earthquakes and the tectonic stress field of the Kuril-Okhotsk region. A.Yu. POLETS (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk).

The spatial distribution of the deep-focus earthquakes in the Kuril-Okhotsk Region, the relationship between shallow and deep-focus earthquakes within the seismogenic area are considered in this paper. The reconstruction of the tectonic stress field at depths 300–660 km has been done. New data on deep-focus earthquakes in the Kuril-Okhotsk Region and the tectonic stress field has been obtained for the depth ranges 300–660 km.

Key words: Kuril-Okhotsk Region, earthquakes, tectonic stress.

Введение

На Земле распределение сейсмических толчков по глубине неравномерно. На одних глубинах сосредоточены очаги землетрясений, на других они отсутствуют или встречаются редко. В зависимости от глубины расположения гипоцентров землетрясения условно разделяют на три группы: мелкофокусные, или поверхностные (0–70 км), среднефокусные, или промежуточные (70–300 км), и глубокофокусные (≥ 300 км). Очаги практически всех глубокофокусных землетрясений расположены в Тихоокеанском поясе. При этом, по данным каталога NEIC (USGS National Earthquake Information Center; <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>), за весь период инструментальных наблюдений зарегистрировано только 7 землетрясений с глубиной $h \geq 700$ км; из них 6 расположены в регионе Фиджи и одно самое глубокое (735,8 км, землетрясение 8.04.2004 г., магнитуда объемных волн $m_b 4,2$) – в районе островов Вануату.

Отсутствие сверхглубоких землетрясений в мантии В.Н. Жарков [4] объясняет особенностями распределения в ней с глубиной эффективной вязкости и температуры: рост напряжений заметно понижает вязкость, что в свою очередь приводит к релаксации напряжений. Как только в какой-то зоне вязкость мантии снижается до $\eta < 10^{21}$ Па·с, она переходит из статического состояния в конвективное. Происходят вынос тепла и резкое

ПОЛЕЦ Анастасия Юрьевна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск). E-mail: polec84@mail.ru

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ (МК-6640.2015.5) и гранта РФФИ (№ 15-05-08903 а).

понижение температуры, что способствует возвращению мантии в исходное состояние – $\eta < 10^{22}$ Па·с. Таким образом, физические условия в сверхглубокой мантии ($h > 700$ км) таковы, что вязкость в ней поддерживается на уровне $\sim 10^{22}$ – 10^{23} Па·с, что и объясняет отсутствие сверхглубоких землетрясений в мантии.

Глубокофокусные землетрясения, происходящие на глубинах $h \geq 300$ км, связаны со многими процессами в мантии Земли, в частности с конвекцией в мантии, ее химической эволюцией, полиморфными переходами, перемещениями литосферных плит. При сравнительном анализе распределения глубокофокусных землетрясений в Северном и Южном полушариях за 1963–1979 гг. показано [3], что в Северном полушарии за данный временной интервал было зарегистрировано 1315 землетрясений, а в Южном 5029, т.е. в 3,8 раза больше. Исходя из нашего анализа данных о глубокофокусных ($h \geq 300$ км) землетрясениях каталога NEIC, за период с 1963 по 2016 г. в Северном полушарии зарегистрировано 5735 землетрясений, а в Южном – 19 834. То есть количество событий в Южном полушарии кратно (в 3,5 раз) превышает количество глубокофокусных землетрясений в Северном. Полученный в обоих исследованиях результат указывает на то, что процессы в мантии происходят, по-видимому, различно в Северном и Южном полушариях Земли, а неоднородность сейсмичности свидетельствует о различной скорости протекания этих процессов. Максимальное число землетрясений Северного полушария происходит на глубинах 350–450 км (с максимумом 350–400 км) (рис. 1а), т.е. на глубинах полиморфных переходов оливин–шпинель, а в Южном полушарии – на глубинах 500–600 км (с максимумом 500–550 км) (рис. 1б), к которым относятся полиморфные переходы шпинель–постшпинель и где, возможно, происходят изменения химического состава мантии.

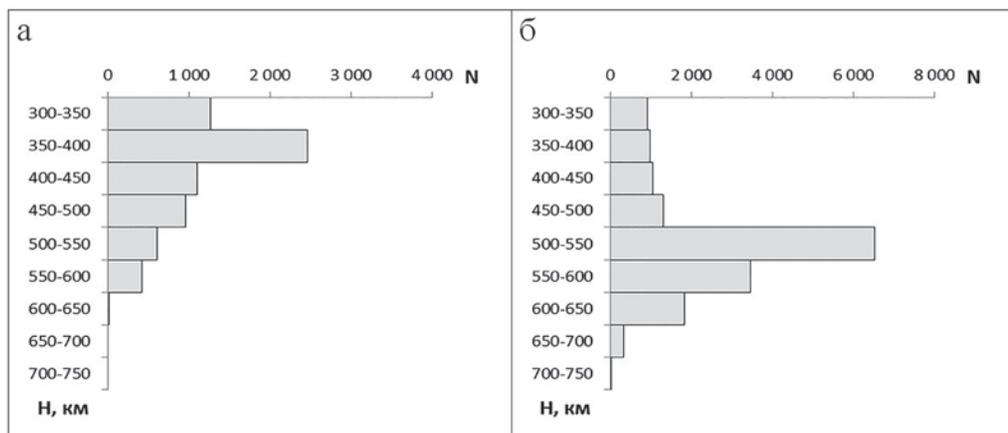


Рис. 1. Диаграммы распределения глубокофокусных землетрясений по глубине: а – в Северном полушарии, б – в Южном (по данным каталога NEIC – <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>)

По данным каталога Global CMT (<http://www.globalcmt.org/>), с 1976 по 2016 г. на глубинах более 300 км в мире зарегистрировано всего 52 глубокофокусных землетрясения с $M_w \geq 7,0$. Из них 14 с $M_w \geq 7,5$ и 2 – с $M_w > 8,0$: в Боливии 9.06.1994 ($M_w = 8,2$) и в Охотском море к западу от п-ова Камчатка 24.05.2013 ($M_w = 8,3$). 6 землетрясений с $M_w \geq 7,0$ отмечены в Курило-Охотском регионе: 12.05.1990 ($M_w = 7,2$), 17.11.2002 ($M_w = 7,3$), 5.07.2008 ($M_w = 7,7$), 24.11.2008 ($M_w = 7,3$), 14.08.2012 ($M_w = 7,7$) и 24.05.2013 ($M_w = 8,3$) (рис. 2). Причем из 14 сильных глубокофокусных землетрясений 9 произошли в Южном полушарии, 5 – в Северном (3 – в Курило-Охотском регионе; 1 – в Японии в районе Бонинских островов, 30.05.2015, $M_w = 7,9$, и 1 – в районе о-ва Минданао, Филиппины, 23.07.2010, $M_w = 7,6$). Таким образом, на сегодняшний день в Северном полушарии больше всего сильных глубокофокусных землетрясений зарегистрировано в Курило-Охотском регионе.

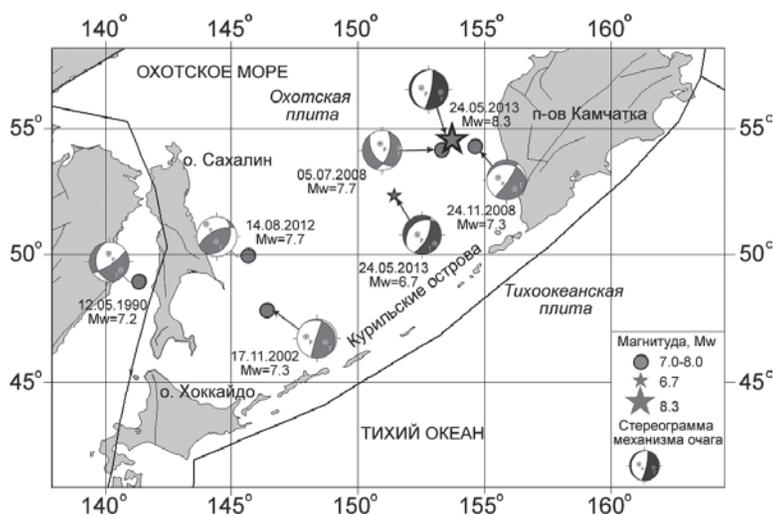


Рис. 2. Карта эпицентров сильных глубоководных ($h > 300$ км) землетрясений Курило-Охотского региона с 1976 по 2017 г. (по данным каталога Global CMT)

Цель данного исследования – изучить особенности глубоководных землетрясений и поля тектонических напряжений в Курило-Охотском регионе на глубинах $h \geq 300$ км.

Пространственное распределение глубоководных землетрясений Курило-Охотского региона

Очаги землетрясений Курило-Камчатской дуги располагаются в пределах фокальной зоны, наклоненной от глубоководной впадины к материк под углом около 50° к горизонту. Эта зона ослаблена многочисленными нарушениями и представляет сложную систему протяженных глубинных разломов. Она разделяет материковые и океанические структуры и является, по-видимому, главным фактором, определяющим тектоническую жизнь островной дуги. Эпицентры глубоководных землетрясений протягиваются широкой полосой от западного побережья Камчатки до пересечения в Приморье с Идзу-Бонинской зоной глубоководных землетрясений [12].

Анализ пространственного распределения глубоководных землетрясений в Курило-Охотском регионе на основе данных каталога NEIC за период 1950–2016 гг. показал, что большая часть очагов землетрясений в интервале глубин 300–400 км локализована от участка между островами Сахалин и Хоккайдо до участка напротив средних Курильских островов (рис. 3а). Далее на север количество глубоководных землетрясений заметно уменьшается. Однако с увеличением глубины (400–500 км и более) наблюдается обратная тенденция (рис. 3б–г): в направлении на север количество глубоководных землетрясений увеличивается, а на юге – уменьшается, т.е. подавляющее количество глубоководных землетрясений расположено в области к западу от п-ова Камчатка до участка напротив средних Курильских о-вов. Западнее южной Камчатки и Северных Курильских островов преобладающая глубина очагов составляет 400–500 км. Напротив средних Курильских островов очаги землетрясений концентрируются в основном на глубинах > 500 км, напротив о-ва Уруп – на глубинах в основном 300–500 км, южнее о-ва Сахалин – 300–400 км. При этом нужно отметить, что в интервале глубин 400–500 км и более землетрясения между Сахалином и Хоккайдо отсутствуют, максимальная глубина очагов землетрясений для этого района около 396 км.

Объяснение отсутствия на этих глубинах глубоководных землетрясений впервые было предложено С. Миямурой [6]. По его мнению, сейсмическая активность и глубина до

подошвы фокального слоя зависит от возраста островной дуги, т.е. сейсмичность дуговой тектоники распространяется в мантию на наибольшую глубину тогда, когда дуга наиболее активна, когда же активность уменьшается или дуга становится старше, активность отступает уже к меньшим глубинам. К относительно древним дугам Миямура относит Японскую и Сахалино-Хоккайдскую, максимальная глубина очагов в пределах которых не превышает 400 км. Относительно более молодыми и наиболее активными в тектоническом отношении с максимумами глубин очагов 600–650 км являются Идзу-Бонинская и Курило-Камчатская островные дуги.

Связь поверхностных структур земной коры с глубинными

Впервые взаимосвязь сейсмичности в глубоких и верхних областях сейсмогенной зоны рассмотрена в работах японского сейсмолога К. Моги [7, 19], подобная взаимосвязь отмечена также в работах [5, 15]. По данным Моги, важными свидетельствами связи между глубокофокусными и мелкофокусными сильными землетрясениями являются возрастание глубинной сейсмической активности перед коровыми землетрясениями и возникновение сильного толчка после глубинной активизации, т.е. возрастание глубинной

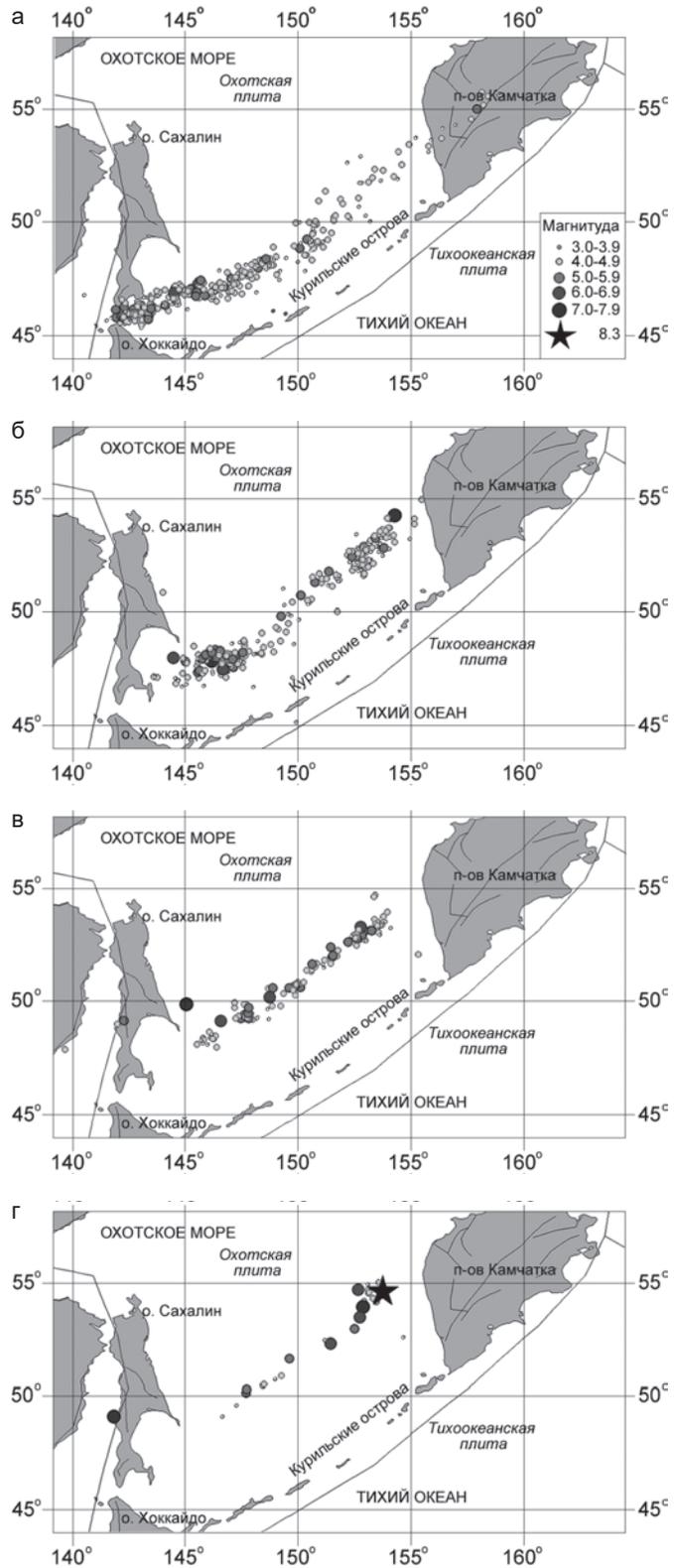


Рис. 3. Пространственное распределение глубокофокусных землетрясений в Курило-Охотском регионе в 1950–2016 гг. (по данным каталога NEIC)

сейсмичности можно рассматривать как один из предвестников сильных мелкофокусных землетрясений. Изучая пространственно-временные распределения землетрясений, Моги разделил сейсмичность до главного толчка на несколько групп: слабые толчки, происходящие непосредственно перед событием в окрестности эпицентра; глубокофокусные толчки, возникающие в отдаленных от очага местах; зоны сейсмического затишья в очаговой области; проявление роев землетрясений (при этом рои могут происходить как за несколько лет до сильного землетрясения (длительные роевые активности), так и непосредственно перед ним); возрастание напряжения и активности в коре на обширной территории вокруг очаговой области.

Усиление сейсмической активности на больших глубинах перед сильнейшим мелкофокусным землетрясением в нескольких сотнях или в тысяче километров от его очага К. Моги объясняет следующим образом: сильнейшие мелкофокусные землетрясения в зоне желобов происходят вследствие смещений по пологим надвигам вдоль границы, по которой океаническая плита пододвигается в процессе субдукции под континентальную плиту. Океаническая плита, двигаясь под континентальную, встречает сопротивление вдоль границы (рис. 4). В момент, когда назревает сильнейшее мелкофокусное землетрясение, на границе между континентальной и океанической плитами происходит предваряющая его неупругая сдвиговая деформация (первая стадия). По мере возрастания сдвиговой деформации вдоль границы образуется разрыв, в то время как сдвиговое сопротивление по направлению движения плиты уменьшается, вследствие чего движение плиты вниз ускоряется. На глубине возрастает напряжение и усиливается глубинная сейсмическая активность (вторая стадия). Повышенная глубинная сейсмическая активность приводит к возникновению сильного глубокофокусного землетрясения. В результате этого землетрясения плита смещается (третья стадия), создавая пусковой импульс для возникновения сильнейшего мелкофокусного землетрясения (четвертая стадия).

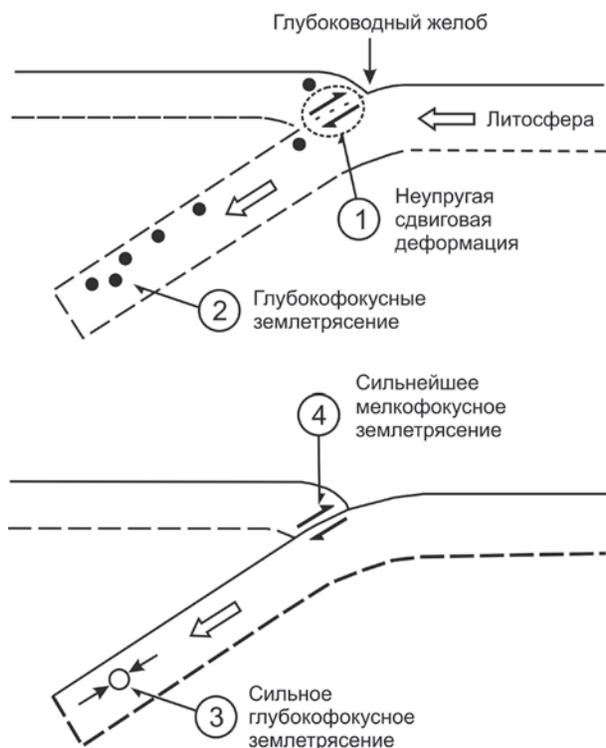


Рис. 4. Механизм образования сильного корового землетрясения на островной дуге и его связь с глубинной сейсмической активацией [7]

Таким образом, возрастание глубинной сейсмичности можно рассматривать как один из предвестников сильных мелкофокусных землетрясений. В качестве примера можно выделить сильнейшие глубокофокусные землетрясения в Охотском море 5.07.2008 ($M_w = 7,7$), 14.08.2012 ($M_w = 7,7$), 24.05.2013 ($M_w = 8,3$) и реакцию на них в виде удаленных форшоков и афтершоков в участках Курило-Камчатской сейсмогенной зоны за многие сотни километров.

В работе [13] отмечается, что сразу же за глубокофокусным землетрясением 5.07.2008 ($M_w = 7,7$) последовали рой землетрясений (6–16.07.2008) в участках сейсмических брешей, землетрясение 24.07.2008 ($M_w = 6,2$) и началось извержение вулкана Корякский вблизи г. Петропавловск-Камчатский. После сильного глубокофокусного землетрясения 14.08.2012

($M_w = 7,7$) также наблюдались отклики в участках сейсмических брешей (октябрь–ноябрь 2012 г.) и произошли два землетрясения: 16.10.2012 ($M_w = 5,6$) и 16.11.2012 ($M_w = 6,5$). Землетрясение 24.05.2013 на сегодняшний день является сильнейшим глубокофокусным землетрясением не только в Курило–Охотском регионе, но и в мире. Перед этим уникальным событием (28.02–9.03.2013) у мыса Лопатка на юге Камчатки наблюдался сильный рой неглубоких землетрясений, наиболее сильное из них имело магнитуду $M_w = 6,9$ [14]. Затем 24–25.03.2013 и 13–21.04.2013 последовали новые рои неглубоких землетрясений, $M_w = 5,9–6,1$ [13], а накануне сильнейшего глубокофокусного землетрясения 24 мая 2013 г. (18–22.05.2013) наблюдалась сейсмическая активизация в виде роя с магнитудами $M_w \leq 6,0$, локализовавшегося около сейсмической брешы в Авачинском заливе, находящейся вблизи г. Петропавловск–Камчатский. В течение 19–21 мая поток землетрясений в рое шел приблизительно с постоянной скоростью, а 22 мая произошел переход в режим снижения скорости потока землетрясений, что обычно соответствует афтершоковому характеру сейсмического процесса [14]. После землетрясения 24.05.2013 рой прекратился. На сегодняшний день рой 18–22.05.2013 самый сильный из зарегистрированных камчатской региональной сетью за период детальных сейсмологических наблюдений с 1962 г. [14].

Анализ сейсмичности перед другими сильными ($M_w \geq 7,0$) глубокофокусными землетрясениями Курило–Охотского региона 1990, 2002, 2008 и 2012 гг. также обнаружил незадолго до них сейсмоактивность либо в виде роя, либо в виде предыдущего недавнего сильного мелкофокусного землетрясения с афтершоками (рис. 5). После сильнейшего глубокофокусного землетрясения 24 мая 2013 г. (25.05.2013–31.12.2016) в северной части Курило–Охотского региона зарегистрировано 5 землетрясений с $M_w \geq 6$, моментная магнитуда самого сильного из этих событий (30.01.2016) $M_w = 7,2$.

По данным С.А. Федотова и А.В. Соломатина [13], в Авачинском заливе и у берегов южной Камчатки находится самая большая сейсмическая брешь Курило–Камчатской дуги, длина которой 350 км; по оценкам авторов, в пределах брешы не исключено землетрясение с магнитудой $M \geq 8,3$. В работе также отмечается, что в 2011 г. за неделю до мегаземлетрясения Тохоку 11.03.2011 ($M_w = 9,0$) у Авачинского залива наблюдалась сейсмическая активизация с $M_w \leq 5,2$, в том же самом месте, где происходил рой 18–22.05.2013. По прогнозам авторов, такое совпадение также повышает вероятность того, что следующее сильное землетрясение Курило–Камчатской дуги с $M \geq 7,7$ произойдет в Авачинском заливе.

Авторы также отмечают, что сейсмические рои могут указывать на области повышенной концентрации напряжений либо на области, ослабленные существующими в данный момент разломами, причем в обоих случаях они указывают на вероятные места следующих сильных землетрясений. В работе Г.П. Авдейко и А.А. Палуевой [1] показано, что рои камчатских землетрясений и эпицентры землетрясений, генерирующих цунами, приурочены к одним и тем же морфоструктурным поднятиям на континентальном склоне восточной Камчатки, которые представляют собой взбросо–надвиговые блоки на консолидированном литосферном выступе Охотской плиты. Авторами предложена модель, согласно которой формирование взбросов и взбросо–надвиговых блоков обусловлено сильным сейсмическим сцеплением (трением) между подвигаемой Тихоокеанской и надвигаемой (нависающей) Охотской литосферными плитами. В рельефе дна взбросо–надвиговые блоки проявлены в виде хребтов–барьеров и подводных гор на этих хребтах, отделяющих впадины Авачинского, Кроноцкого и Камчатского заливов от Курило–Камчатского глубокоководного желоба. При срыве сильного сейсмического сцепления между Тихоокеанской и Охотской плитами либо в пределах Охотской плиты происходит резкое движение надвигового блока с изменением рельефа дна и, соответственно, формированием цунами. При слабом сцеплении блоков с уже сформированными разрывами в надвиговых блоках происходят более частые движения, сопровождаемые роями землетрясений. Согласно работе [2], в зависимости от преобладающего процесса в очаге для форшоково–афтершоковых последовательностей характерен механизм «взламывания» перемычки, который

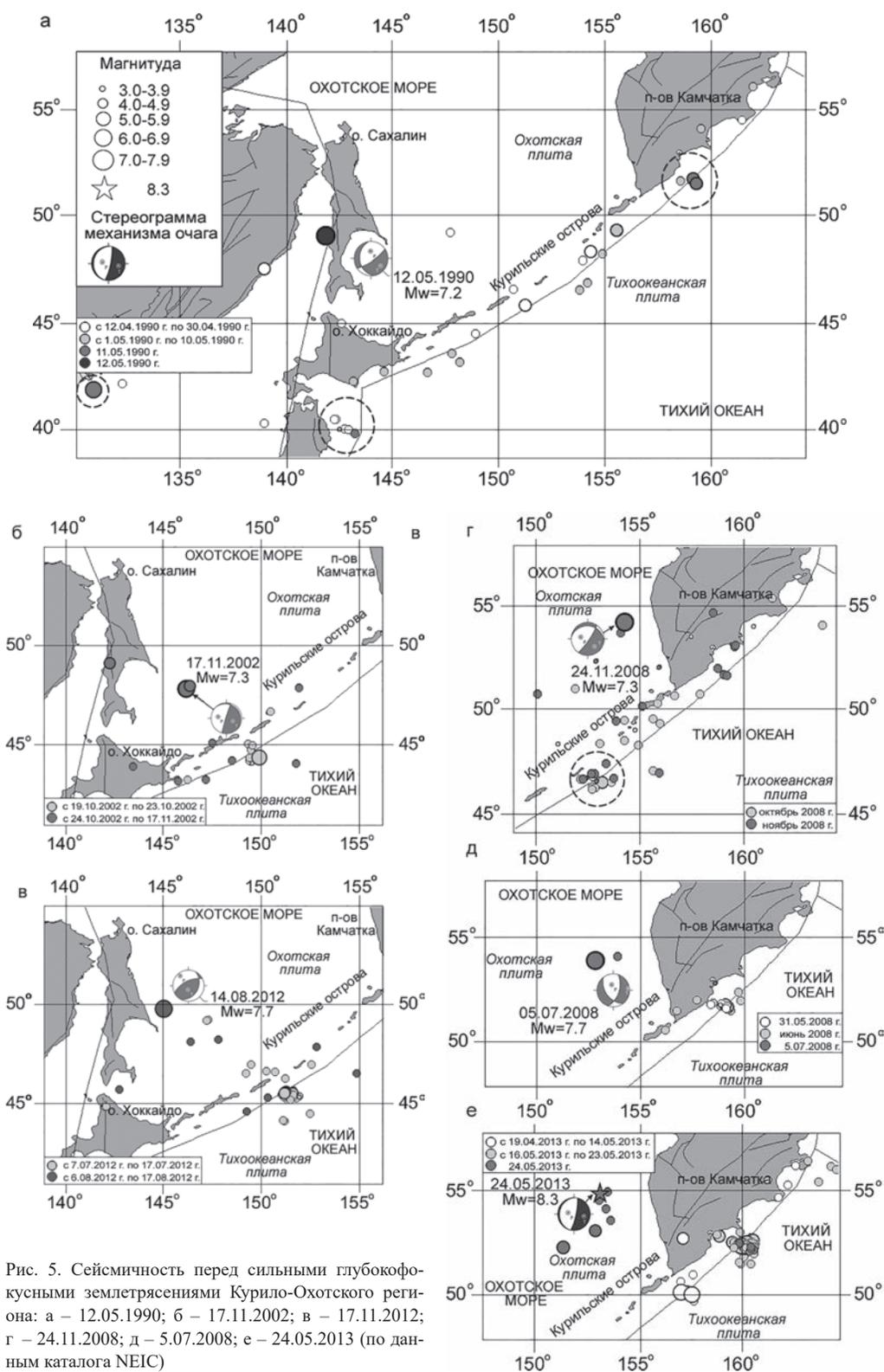


Рис. 5. Сейсмичность перед сильными глубокофокусными землетрясениями Курило-Охотского региона: а – 12.05.1990; б – 17.11.2002; в – 17.11.2012; г – 24.11.2008; д – 5.07.2008; е – 24.05.2013 (по данным каталога NEIC)

представляется в виде последовательного образования разломов, а для роевых последовательностей – движение по готовому разлому. По К. Моги [7], пространственная приуроченность роев землетрясений к одним и тем же местам объясняется наличием связи между типом последовательности землетрясений и состоянием среды по степени нарушенности (раздробленности, трещиноватости) и приложенным напряжением. Предполагается, что главный толчок с последующими афтершоками происходит в условиях относительно однородной малонарушенной среды и постоянного тектонического напряжения, тогда как рои – в сильно раздробленной среде и при направленном «концентрированном» приложении напряжения, как в случае движения магмы.

Реконструкция параметров поля современных напряжений

Для изучения особенностей современного поля напряжений в Курило-Охотском регионе применялся метод катакластического анализа разрывных смещений (МКА) [11], который лежит в основе нового направления экспериментального изучения тектонического напряженно-деформированного состояния и свойств массивов горных пород в их естественном залегании. МКА состоит из четырех этапов и позволяет определять не только параметры эллипсоида напряжений, как это делается в широко известных методах [16–18 и др.], но и величины напряжений. На сегодняшний день МКА единственный из методов, где расчет всех параметров тензора напряжений и приращений сейсмостектонических деформаций выполняется в рамках единой методики. В качестве исходного материала для восстановления поля действующих тектонических напряжений используются структурно-кинематические данные о трещинах и разрывах, либо данные о механизмах очагов землетрясений (СМТ – Centroid Moment Tensor – решения тензора момента центра деформации). Расчеты компонент тензора напряжений выполняются в доменах, выделяемых в качестве квазиоднородных по их деформационному состоянию. Каждому из таких доменов отвечает своя однородная выборка очагов землетрясений.

Реконструкция напряженного состояния выполнялась на основе данных Global CMT. Обработка исходных сейсмологических данных производилась в пределах области $44\text{--}57^\circ$ с.ш. и $139\text{--}159^\circ$ в.д., в узлах сетки $0,1 \times 0,1^\circ$ в латеральном направлении в диапазоне глубин 300–660 км. При реконструкции использовались механизмы с магнитудой $M_w = 5,0\text{--}6,8$ (6 сильнейших с $M_w > 7,0$ глубокофокусных землетрясений Курило-Охотского региона были исключены из выборки). Опыт работы алгоритма МКА показывает [9], что использование диапазона магнитуд большего, чем 2,5–3 единицы, приводит к завышению сильных землетрясений за счет того, что размер их области упругой разгрузки начинает доминировать над землетрясениями меньших магнитуд. Механизмы этих сильных событий начинают участвовать в определении напряжений большинства доменов, существенно усредняя результаты расчетов. Реконструкция выполнялась для разных временных интервалов (рис. 6): 06.01.1976–31.12.1992; 06.01.1976–31.12.1994; 06.01.1976–31.12.1996; 06.01.1976–17.11.2002; 06.01.1976–5.07.2008; 06.01.1976–14.08.2012; 06.01.1976–24.05.2013; 06.01.1976–01.10.2016. Подобное разделение на интервалы обусловлено следующими причинами: начиная только с 1992 г. (рис. 6а) для 18 квазиоднородных доменов (область напротив островов Уруп и Итуруп) удалось завершить выполнение всех процедур формирования однородных выборок (отсутствие данных о напряжениях за период 1976–1992 гг. связано с отсутствием данных о механизмах очагов землетрясений); начиная с 1994 г. (рис. 6б) проявилась область между островами Сахалин и Хоккайдо (11 доменов) и с 1996 г. (рис. 6в) – область западнее южной Камчатки и Северных Курильских о-вов (19 доменов). В последующие временные интервалы реконструкции выполнялись за период до сильного глубокофокусного землетрясения (до 17.11.2002; 05.07.2008; 14.08.2012; 24.05.2013) (рис. 6г–ж). Последний временной интервал (06.01.1976–01.10.2016) отражает состояние современного поля напряжений на 2016 г. (рис. 6з). Для каждого из доменов рассчитывались средние за весь период наблюдений параметры тензора напряжений.

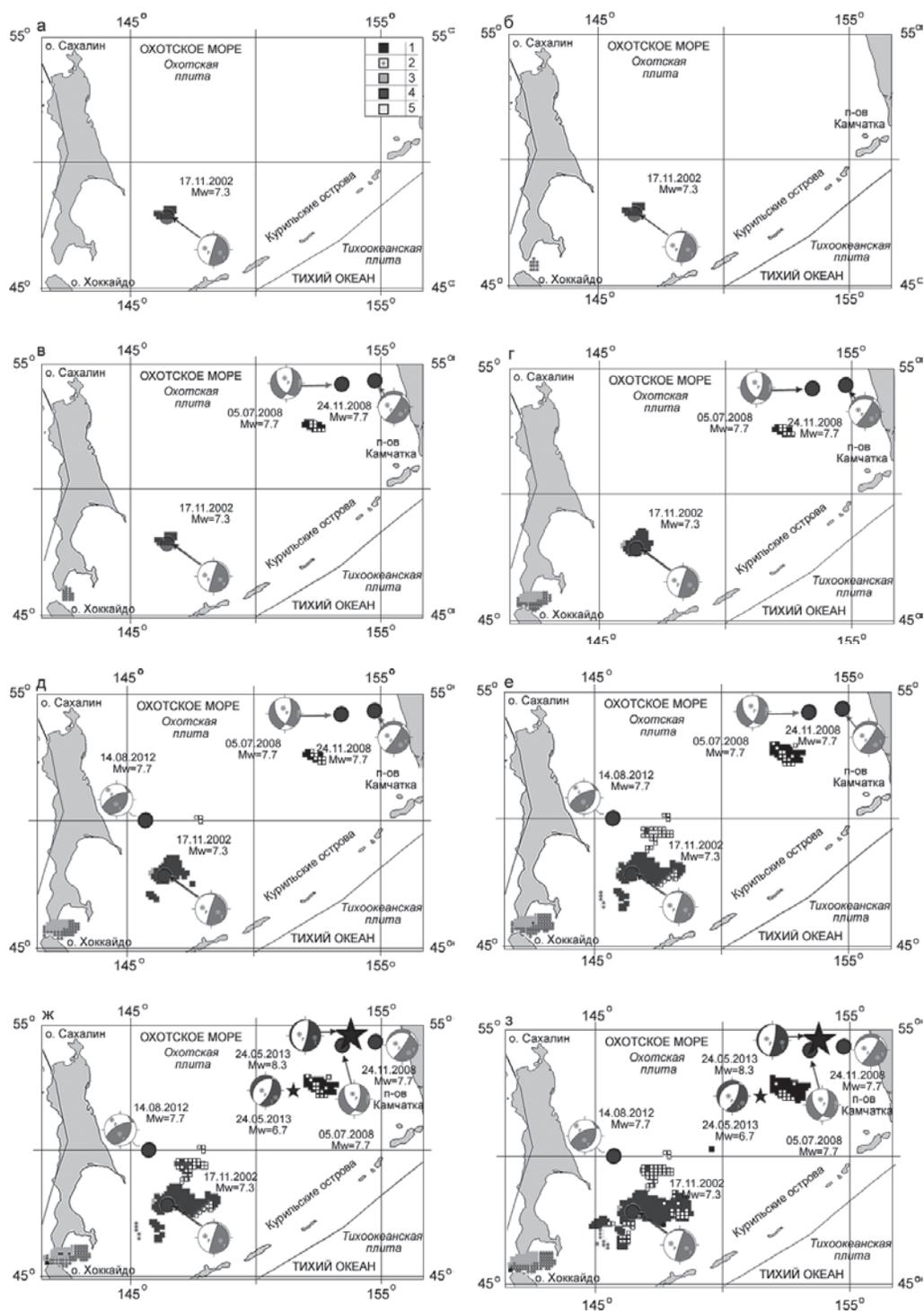


Рис. 6. Тип напряженного состояния, характеризующий геодинамический режим района исследований для разных временных интервалов: а – 06.01.1976–31.12.1992; б – 06.01.1976–31.12.1994; в – 06.01.1976–31.12.1996; г – 06.01.1976–17.11.2002; д – 06.01.1976–05.07.2008; е – 06.01.1976–14.08.2012; ж – 06.01.1976–24.05.2013; з – 06.01.1976–1.10.2016. 1 – растяжение; 2 – сдвиг; 3 – сжатие-сдвиг; 4 – сжатие; 5 – вертикальный сдвиг. Остальные усл. обозначения см. рис. 2

Согласно ранее выполненным реконструкциям [8] для глубинных диапазонов 0–30, 30–60, 60–90 км в земной коре и в верхней мантии, поле напряжений характеризуется практически неизменным на протяжении всей зоны типом напряженного состояния – горизонтального сжатия. Основной вид тензора напряжений для всех глубинных интервалов – чистый сдвиг. Однако с увеличением глубины (более 90 км) установлено изменение ориентации, угла наклона осей главных напряжений и, соответственно, изменение типа напряженного состояния.

По результатам реконструкций для исследуемого глубинного диапазона 300–660 км, в направлении с юга на север выделены три области с разными геодинамическими режимами: у южной оконечности о-ва Сахалин – горизонтальный сдвиг в сочетании с горизонтальным сжатием; район напротив о-вов Уруп и Итуруп – горизонтальное сжатие в сочетании с вертикальным сдвигом; на траверзе Северных Курильских островов – область горизонтального растяжения в сочетании с вертикальным сдвигом (рис. 6). Анализ механизмов очагов глубокофокусных землетрясений 17.11.2002 и 14.08.2012, расположенных рядом с зоной сжатия, и землетрясений 05.07.2008, 24.05.2013, расположенных рядом с зоной растяжения, показал их соответствие существующим геодинамическим режимам.

Наиболее устойчивым параметром по его распределению в пространстве оказалась ориентация поддвиговых касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках с нормалью, направленной к центру Земли. Ориентации этих напряжений отражают воздействие со стороны верхней мантии. Траектории поддвиговых касательных напряжений для глубин 0–120 км имеют упорядоченное направление от океанической плиты к континентальной, для глубинного интервала 300–660 км их траектории имеют противоположную ориентировку – от континентальной плиты к океанической. При этом между островами Сахалин и Хоккайдо оси этих напряжений ориентированы параллельно простиранию желоба.

Результаты расчета относительных значений эффективного давления показали, что повышение значений этих параметров наблюдается с северо-востока на юго-запад (рис. 7). Соответственно максимальные значения эффективного всестороннего давления (8–12) были в области между островами Сахалин и Хоккайдо, а минимальные (0–4) – вблизи восточного побережья п-ова Камчатка (рис. 7б–ж). По результатам реконструкций для временного интервала 06.01.1976–1.10.2016 отмечено уменьшение значений эффективного всестороннего давления в области между Сахалином и Хоккайдо (рис. 7з). Напряженное состояние областей подготовки сильных глубокофокусных землетрясений 17.11.2002, 5.07.2008, 24.11.2008, 14.08.2012, 24.05.2013 и сильного афтершока 24.05.2013 характеризуется наименьшими величинами относительного эффективного всестороннего давления. Согласно работам [9, 10, 11], наличие большой площади напряженного состояния с низким и средним уровнем эффективного давления может привести к формированию сильного землетрясения. Подобные области также присутствуют для верхней части сейсмофокальной зоны (глубины 0–60 км) в северной части Курило-Охотского региона [8], что может указывать на опасные места будущих сильных землетрясений. Можно предположить, что после сильного глубокофокусного землетрясения характер напряженного состояния в коре изменится. В частности, сильное землетрясение 30 января 2016 г. ($M_w = 7,2$), произошедшее на глубине 180 км, попадает в область коры с относительно высоким уровнем эффективного давления. Возможно, в результате произошедших изменений напряжений данный участок коры резко понизил уровень эффективного давления.

Таким образом, землетрясения обнаруживают прямую связь с проявлениями современных тектонических движений. Наибольший вклад в создание современного поля напряжений в самой верхней оболочке Земли вносит взаимодействие литосферных плит. В исследуемом регионе причиной возникновения землетрясений является погружение Тихоокеанской плиты в мантию Земли. Выполненные исследования позволили изучить особенности глубокофокусной сейсмичности в Курило-Охотском регионе и получить новые результаты о региональном тектоническом поле напряжений для глубин 300–660 км.

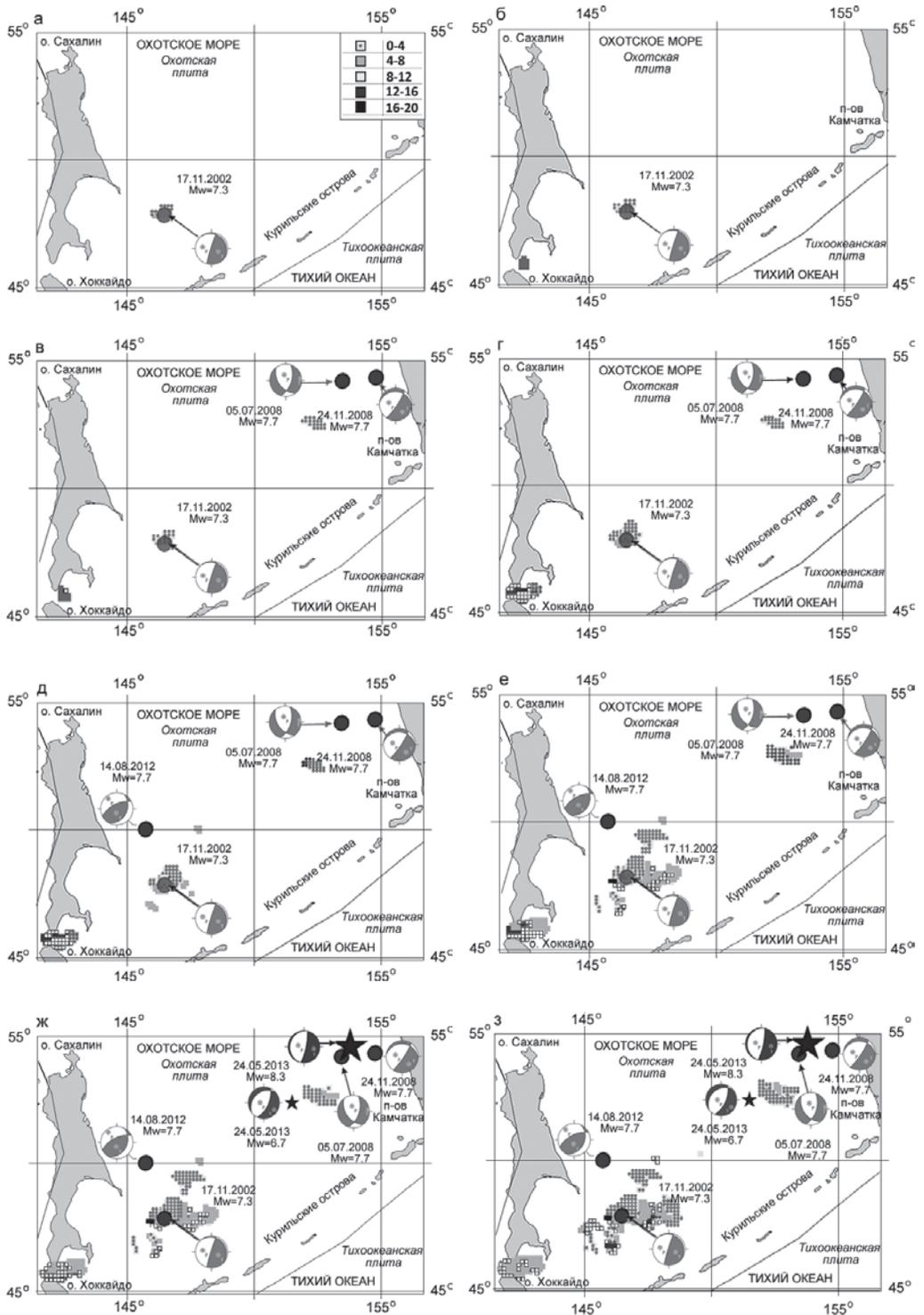


Рис. 7. Распределение относительного эффективного всестороннего давления для разных временных интервалов. Обозначения интервалов см. на рис. 6

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдейко Г.П., Палуева А.А. Рои землетрясений камчатской зоны субдукции и оценка возможных мест зарождения цунами // *Вулканология и сейсмология*. 2012. № 4. С. 65–78.
2. Добрынина А.И., Саньков Е.А. Скорости и направления распространения разрывов в очагах землетрясений Байкальской рифтовой системы // *Геофиз. исслед.* 2010. Т. 11, № 2. С. 52–61.
3. Гольфанд Я.Ю., Коган С.Я., Поликарпова Л.А. О некоторых особенностях распределения числа глубокофокусных землетрясений // *Физика Земли*. 1986. № 2. С. 16–25.
4. Жарков В.Н. Об отсутствии сверхглубоких землетрясений и о распределении вязкости и температуры в мантии Земли // *Докл. АН СССР*. 1980. № 6. С. 1350–1353.
5. Захарова А.И., Рогожин Е.А. Соотношение магнитуд сильных землетрясений с параметрами процессов их глубокофокусных форшоков // *Геофиз. исслед.* 2005. № 2. С. 7–32.
6. Миямура С. Сейсмичность Японии и окрестностей // *Физика Земли*. 1969. № 7. С. 21–50.
7. Могги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир. 1988. 382 с.
8. Полец А.Ю., Злобин Т.К. Анализ поля тектонических напряжений северной части Курило-Охотского региона перед глубокофокусным землетрясением 24.05.2013 года // *Тихоокеан. геология*. 2017. Т. 36, № 1. С. 69–78.
9. Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. // *Геодинамика и тектонофизика*. 2014. Т. 5, № 2. С. 469–506.
10. Ребецкий Ю.Л. Оценка относительных величин напряжений – второй этап реконструкции по данным о разрывных смещениях // *Геофиз. журн. Киев*, 2005. Т. 27, № 1. С. 39–54.
11. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.
12. Тараканов Р.З. Строение фокальной зоны Курило-Камчатской островной дуги // *Земная кора островных дуг и дальневосточных морей*. М.: Наука, 1971. С. 215–234.
13. Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013–VIII 2018 гг.; особенности сейсмичности дуги в период предшествовавших глубоких Охотоморских землетрясений 2008, 2012 и 2013 гг. с $M = 7.7, 7.7$ и 8.3 // *Вулканология и сейсмология*. 2015. № 2. С. 3–19.
14. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др. Глубокое охотоморское землетрясение 24.05.2013 с магнитудой $M_w = 8.3$ – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений // *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2013. Вып. 21, № 1. С. 17–24.
15. Юнга С.Л., Рогожин Е.А., Родина С.Н. Алгоритм и методика анализа механизмов глубокофокусных очагов для выявления зон подготовки сильных землетрясений Курило-Охотского региона // *Сейсмические приборы*. 2011. Т. 47, № 3. С. 31–43.
16. Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets // *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. B89. P. 5835–5848.
17. Carey-Gailhardis E., Mercier J.L. A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake population: microseismicity of Southern Peru // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1987. Vol. 82. P. 165–179.
18. Gephart J.W., Forsyth D.W. An improved method for determining regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence // *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. B89. P. 9305–9320.
19. Mogi K. Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms – the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena // *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.* 1963. N 41. P. 615–658.