

УДК 550.(343.62+348.3)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА

© 2014 г. А. В. Соломатин<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9

<sup>2</sup>Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга

683032 Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4,

e-mail: alf55@mail.ru, alf110111@gmail.com

Поступила в редакцию 26.11.2012 г.

На основе данных об активности вулканов Камчатки и северных Курильских островов за 1840–начало 2013 г. выделены наиболее существенные ее циклические компоненты. Полученные периодичности сопоставлены со спектром повторяемости сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) землетрясений Курило-Камчатского региона за 1841–2012 гг. Выделены 52.8–54.0, 8.58 и 5.72-летние циклы, общие как для сейсмической, так и для вулканической активности. Первый диапазон близок к утроенному значению лунного ритма 18.613 г. (55.84 г.). 8.58- и 5.72-летние периодичности, по-видимому, определяются вариациями солнечной активности и представляют вторую и третью гармоники 17.15-летнего цикла. Этот цикл и его гармоники используются для долгосрочного прогноза сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.7$  Курило-Камчатского региона в целом. Сделан вывод, что существующая повышенная опасность возникновения сильнейших землетрясений в Курило-Камчатском регионе продлится до II 2016 г. (40% вероятность сильнейшего землетрясения в этот период). Кроме того, до 2027 г. продлится длиннопериодная фаза повышенной сейсмической опасности, в течение которой вероятность сильнейших землетрясений в 1.6 раз выше средней долговременной.

DOI: 10.7868/S0203030614010052

### ВВЕДЕНИЕ

Вулканизм и сейсмичность являются наиболее яркими проявлениями глубинной активности Земли. В то же время, они являются элементами более общей системы, к которой можно отнести процессы в ее недрах, атмосфере и космосе. В связи с этим наиболее перспективным является комплексный подход к изучению.

К настоящему времени установлены корреляционные связи обоих явлений с солнечной активностью, лунным циклом, колебаниями уровня Мирового океана, изменениями угловой скорости вращения Земли и другими явлениями, но в настоящей статье используется подход, предложенный в работе [Хаин, Халилов, 2008], обобщающей имеющиеся данные о влиянии факторов различной природы на вулканизм и сейсмичность. В ней изучение спектральных характеристик вулканической и сейсмической активности осуществляется на основе усреднения мировых данных, без строгой привязки к периодичностям известных процессов. Основой другого подхода является гипотеза об определяющем влиянии последних. Показательными в этом отношении являются работы по исследованию связи периодичности вулканической активности и

сильных землетрясений Камчатского региона (а также других районов северо-западного участка Тихоокеанской тектонической зоны) с солнечным ритмом, лунным ритмом и его гармониками [Широков, 1977, 1978, 2008; Широков, Серафимова, 2006, 2008; Гусев, 2008; и др.].

Основным недостатком первого подхода являются трудности определения и неоднозначность интерпретации существенных компонент спектра с учетом сложного характера внешнего воздействия и реакции системы геодинамических процессов. Напротив, основной недостаток второго – не всегда обоснованное представление о пассивной реакции этой системы, сводящейся к точному (по периоду) воспроизведению отдельных компонент спектра воздействия. В то же время оба подхода являются в равной степени важными и хорошо дополняют друг друга, так как решают одну и ту же задачу.

Настоящее исследование направлено на развитие подхода, представленного в работе [Хаин, Халилов, 2008], в применении к Курило-Камчатскому региону и на основе более широкого класса проявлений активности вулканов Камчатки и северных Курильских островов, а также на основе сравнительного исследования периодичностей

временного ряда сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) курило-камчатских землетрясений. Предполагается, что такой подход позволит более детально и точно определять наиболее характерные периоды и фазы гармоник региональных вулканической и сейсмической активности. Это необходимо при сопоставлении достаточно изученного спектра воздействующих факторов и изучаемого спектра реакции на них геодинамической среды — фактической основы региональных прогнозов вариаций сейсмичности и вулканизма.

Важной, но вспомогательной задачей является демонстрация возможностей предлагаемой концептуальной модели описания вулканической активности обширных регионов на основе использования количества вулканов, для которых отмечается определенная степень активности, не обязательно соответствующая извержению.

### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЙОНЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемый в работе Курило-Камчатский регион расположен на стыке Евразийской и Тихоокеанской плит, характеризуется как высокой сейсмичностью, так и активным вулканизмом.

Первое описание вулканов Камчатки и их извержений, составленное С.П. Крашенинниковым, появилось в 1755 г. Однако, систематические вулканологические исследования на Камчатке были начаты только в 1931–1935 гг. работами экспедиции академика А.Н. Заварицкого, а также сотрудниками Камчатской вулканостанции, начавшими непрерывные исследования с 1935 г. на вулканах Ключевской, Плоский Толбачик, Авачинский, Горелый и др. [Федотов, 2013].

В 1993 г. была создана Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (KVERT). Информация о состоянии вулканов Камчатки стала распространяться еженедельно, а в случае начала сильного извержения — несколько раз в сутки. Современная система наблюдений за вулканами Камчатки и методы прогноза позволяют успешно предсказывать большинство сильных и более слабых извержений Камчатки в режиме краткосрочного прогноза (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>). Спутниковый мониторинг позволяет оперативно регистрировать проявления вулканической активности.

Из-за больших трудностей наблюдения за вулканами Курильских островов данные по вулканической активности в этом районе имеют более короткую историческую базу, а Сахалинская группа реагирования на вулканические извержения — SVERT, аналогичная Камчатской, в этом районе начала работать только в 2006 г.

Данные о землетрясениях исследуемого региона представлены, начиная с 1742 г. в районе Курильских островов и с 1737 г. — в районе Камчатки [Новый каталог ..., 1977]. Полные сведения о сильнейших землетрясениях региона имеются для периода не ранее 1900 г. Наиболее же полные сейсмологические данные, связанные с наблюдениями сетью региональных сейсмических станций, имеются с 1958 г. для области Курильских островов и с 1961 г. для Камчатки.

### КРАТКИЙ ОБЗОР ПОЛУЧЕННЫХ РАНЕЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В исследованиях временных свойств вулканической и сейсмической активности часто рассматриваются определенные циклические воздействия — внешние факторы, связанные с влиянием Луны и Солнца, в частности, 18.6-летний лунный цикл и 22-летний цикл Хейла. Приведенный ниже обзор подобных исследований относится в большей части к Курило-Камчатскому региону. Более полный обзор приведен в [Хаин, Халилов, 2008].

Показательным результатом таких исследований является выявленная привязка на протяжении уже 275 лет вулканических и сейсмических процессов Камчатского региона к разным фазам 6.2-летней (18.6/3) гармоники лунного цикла, а также долгосрочный прогноз на основе выделенных закономерностей для Курило-Камчатской дуги и северо-восточной Японии [Широков, 1977, 1978; и др.].

В работе [Широков, Серафимова, 2006] на основе фазовых диаграмм выявлена статистическая значимая приуроченность сильных землетрясений к фазам лунного цикла и солнечного цикла Хейла, описана методика и дан на этой основе прогноз для Японии, Курильских о-вов, Камчатки, Алеутско-Аляскинской зоны на ближайшие 20 лет.

Данный подход развивается также в [Широков, 2008; Широков, Серафимова, 2008; Серафимова, Широков, 2012; Гусев, 2008]. В работе [Гусев, 2008] выявлена значимая периодичность сильнейших камчатских землетрясений на основе 55.8-летней гармоники лунного цикла, а также рассмотрен ряд других периодичностей.

В [Федотов и др., 2011] в качестве наиболее четкой выделена известная уже более 30 лет 5-летняя (5.06 лет) квазипериодичность сильнейших Курило-Камчатских землетрясений, принципиально не сводимая к близкой гармонике лунного цикла 4.7 года (18.6/4), выделенной И.Н. Тихоновым на основе данных об извержениях вулканов Курильской островной дуги [Тихонов и др., 2011].

Таким образом, влияние космических факторов на сейсмичность и вулканизм не подлежит сомнению, однако в некоторых случаях, в частности, в на-

стоящей работе, возникает проблема интерпретации выделенных периодичностей. При этом возможны два подхода в определении роли внешних факторов: реакции относительно простой вулканогенной и сейсмогенной среды в виде фильтрации определенных периодичностей, возможно со сдвигом их фаз; реакция сложной, обладающей собственным спектром периодичностей среды.

Подход в работах А.А. Гусева, В.А. Широкова, И.Н. Тихонова, указанных выше, предполагает первый вариант простой и пассивной среды. Однако, существует ряд фактов, указывающих на ее более сложную роль. Прежде всего, это факт несводимости указанной выше 5.06-летней гармонике, определенной для всей Курило-Камчатской дуги, к гармоникам лунного цикла, хотя для ее отдельных частей близкие гармоники выделены другими авторами.

Кроме этого, результаты [Хаин, Халилов, 2008] прямо указывают на значительный разброс периодичностей вулканической и сейсмической активности для различных, в том числе и однотипных, регионов Земли. И, наконец, в этой же работе указано на квазипериодичность хода как вулканической, так и сейсмической активности, проявляющуюся в виде групп двух или нескольких пиков с почти постоянным периодом следования, разделенных переменными временными интервалами с несколько большим периодом. Можно также указать на аналогичное явление в виде квазипериодичности 5.06 лет, характерной для временного ряда Курило-Камчатских землетрясений [Федотов и др., 2011]. Важно отметить, что такое явление, в принципе, может отражать процесс подстройки фазы реакции среды на основе одного периода под внешнее воздействие с близким периодом.

Вопрос о роли геодинамической среды в передаче спектра внешнего воздействия сложен, но для целей настоящей работы вполне достаточно следующего факта: подход, допускающий некоторые отклонения периодичностей вулканической и сейсмической активности от их расчетных значений, является вполне обоснованным, а сами подобные отклонения могут быть реальными.

Главная задача настоящего исследования состоит в выделении на основе периодичностей наиболее общих региональных закономерностей вулканической и сейсмической активности Курило-Камчатской дуги. Такая задача важна для понимания связи определяющих эти процессы геодинамических процессов с известными воздействующими факторами. Полученные результаты могут быть использованы также для прогноза вулканической и сейсмической активности в пределах Курильской и Камчатской частей региона в качестве дополнения к другим методам, а также стать основой для подобных исследований в некоторых других регионах.

## ИСХОДНЫЙ МАТЕРИАЛ, ЕГО ОБРАБОТКА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Традиционно понятие “вулканическая активность” связывают с количеством и силой вулканических извержений — достаточно редких явлений. В то же время для изучаемого региона имеются гораздо более полные данные о неэксплозивных проявлениях вулканической активности. По аналогии с сейсмической активностью логично расширить понятие “вулканическая активность” и на эти проявления.

В работе использована гипотеза о том, что все отдельные проявления вулканической активности характеризуют в среднем ее общий уровень для обширных регионов, таких как Камчатка, Курильские острова или весь Курило-Камчатский регион. Вся Курило-Камчатская дуга в последнем случае рассматривается как однородная в первом приближении система [Федотов, 2005; Федотов и др., 2007, 2008].

Задача определения числовой характеристики вулканической активности, аналогичная определению сейсмической активности на основе количества событий, превосходящий заданный нижний уровень, в настоящее время может быть решена далеко не всегда, и, в основном, только для эксплозивных извержений. Тем не менее, эта задача может решаться для более широкого класса вулканических активизаций приближенно.

Во-первых, существует естественное ограничение нижнего уровня наблюдаемой вулканической активности, определяемое конкретными возможностями ее регистрации. Во-вторых, представление о большом масштабе вулканических процессов удовлетворительно устраняет естественный недостаток ранних наблюдений, касающийся их пространственной неоднородности. В-третьих, учет полноты данных достаточно эффективно осуществляется на уровне исключения временного тренда. Такое решение является грубым, но, как показано в настоящей статье, иногда вполне удовлетворительным.

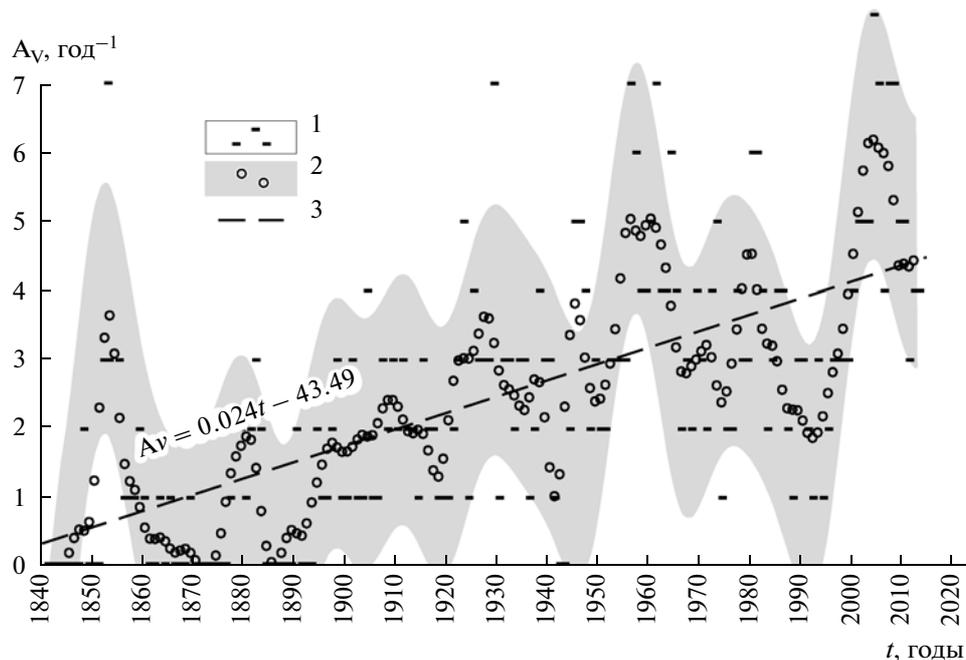
В работе использовались данные об активности вулканов Камчатки и северных Курильских островов за период 1840–2012 гг. (табл. 1). Эти данные представлены группой KVERT по интернет-адресу ([www.kscnet.ru/ivs/kvert/volcanoes/index.php](http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volcanoes/index.php)). Наиболее полные данные об извержениях вулканов мира из фундаментальной работы [Гущенко, 1979] учтены косвенным образом при сопоставлении полученных результатов с результатами [Хаин, Халилов, 2008; Широков, Серафимова, 2008].

Экстраполяция результатов на район Курильских островов предполагалась на основе представлений об однородном в первом приближении строении Курило-Камчатского региона, а также о глобальном характере воздействующих факторов.

**Таблица 1.** Годы активности вулканов Камчатки и Северных Курильских о-вов с 1840 г.\*

Название	№ по IAVCEI	Годы активности
Северная Камчатка		
Шивелуч	1000-27	1854, 1879–1883, 1897–1929, 1944–1950, 1964, 1980, 1993, 2001, 2004–2005, 2007, 2010
Ключевской	1000-26	1840, 1848, 1852–1854, 1865, 1877–1879, 1882–1883, 1890, 1896–1898, 1904, 1907, 1909–1911, 1913, 1915, 1922–1923, 1925–1926, 1929, 1931–1932, 1935–1939, 1944–1946, 1949, 1951, 1953–1954, 1956, 1958–1966, 1968–1974, 1977–1990, 1993–2000, 2002–2005, 2007–2010, 2012
Ушковский	1000-261	1890, 1980
Безымянный	1000-25	1955–1965, 1977, 1979–1986, 1989–1990, 1992–1993, 1995, 1997, 1999, 2000–2012
Плоский Толбачик	1000-24	1904, 1931, 1937, 1939–1941, 1954, 1956–1957, 1959–1962, 1964, 1967–1970, 1975–1977, 2012–2013
Центральная Камчатка		
Кизимен	1000-23	1928–1929, 2010–2013
Кроноцкий	1000-20	1922–1923
Крашенинникова	1000-19	1963
Карымский	1000-13	1852, 1854, 1908, 1911–1912, 1915, 1921, 1923, 1925, 1929, 1932–1935, 1938, 1940, 1945–1947, 1952, 1955–1957, 1960–1967, 1970–1973, 1976–1982, 1985, 1996–2013
Жупановский	1000-12	1882, 1925, 1929, 1940, 1956–1957
Авачинский	1000-10	1855, 1878, 1881, 1894–1895, 1901, 1909, 1926–1927, 1938, 1945, 1991, 2001
Корякский	1000-09	1956–1957, 2008–2009
Южная Камчатка		
Опала	1000-08	1854, 1894
Горелый	1000-07	1855, 1869, 1929–1932, 1947, 1961, 1980–1981, 1984–1986
Мутновский	1000-06	1848, 1852–1854, 1898, 1904, 1916–1917, 1927–1929, 1938–1939, 1945, 1960–1961, 1996, 2000–2008
Ксудач	1000-05	1907
Желтовский	1000-04	1923, 1972–1973
Ильинский	1000-03	1901
Северные Курилы		
Алаид	0900-39	1854, 1860, 1894, 1933–1934, 1972, 1981
Эбеко	0900-38	1859, 1934–1935, 1946–1959, 1963, 1965, 1967, 1969, 1975, 1987, 1989–1991, 1998, 2004–2009
Чикурачки	0900-36	1853–1859, 1958, 1961, 1964, 1973, 1986, 2002–2003, 2005, 2007–2008
Татарина	–	1953–1959, 1962, 1973, 2004
Карпинского	0900-35	1946, 1952–1953, 1973, 2004
Пик Фусса	0900-34	1854, 1969, 1978, 1981, 1982, 2004

Примечание. \* Данные взяты с [www.kscnet.ru/ivs/kvert/volcanoes/index.php](http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volcanoes/index.php).



**Рис. 1.** Годовые числа вулканов Камчатки и Северных Курильских о-вов, на которых отмечены признаки активизации и их сглаженный временной ход.

1 – годовые числа “активных” (пояснения – в тексте) вулканов Камчатки и Северных Курильских о-вов  $A_V$ ; 2 – сглаженные значения  $A_V$  и область их стандартных отклонений; 3 – линейный временной тренд. Среднее годовое значение  $A_V$ , приведенное к 2013 г., равно 4.4.

С использованием изложенных представлений оценки вулканической активности  $A_V$  (рис. 1) были получены на основе общего числа вулканов Камчатки и северных Курильских островов, проявляющих в течение года ту или иную активность (см. табл. 1).

Таким образом, для построения  $A_V$  используется следующая шкала, определяющая активность каждого отдельного вулкана: “активен”, “неактивен”. По сути – это достаточно приближенные экспертные оценки, и их реальная ценность может быть обоснована только ценностью полученного на их основе результата.

Тренд значений  $A_V$  отражает повышение детальности и полноты наблюдений со временем. Уровень верхней части линии тренда ( $A_V = 4.4$ ) определяет оценку среднегодового числа вулканов Камчатки и северных Курильских островов, которые находятся в стадии извержения или повышенной активности (“активны”), при современном уровне детальности и полноты наблюдений. После вычитания тренда получают значения относительной вулканической активности  $A'_V$ , характеризующие ее кратковременные вариации.

Важно, что возможные ошибки в оценке тренда могут привести к существенным ошибкам только в области длиннопериодных гармониче-

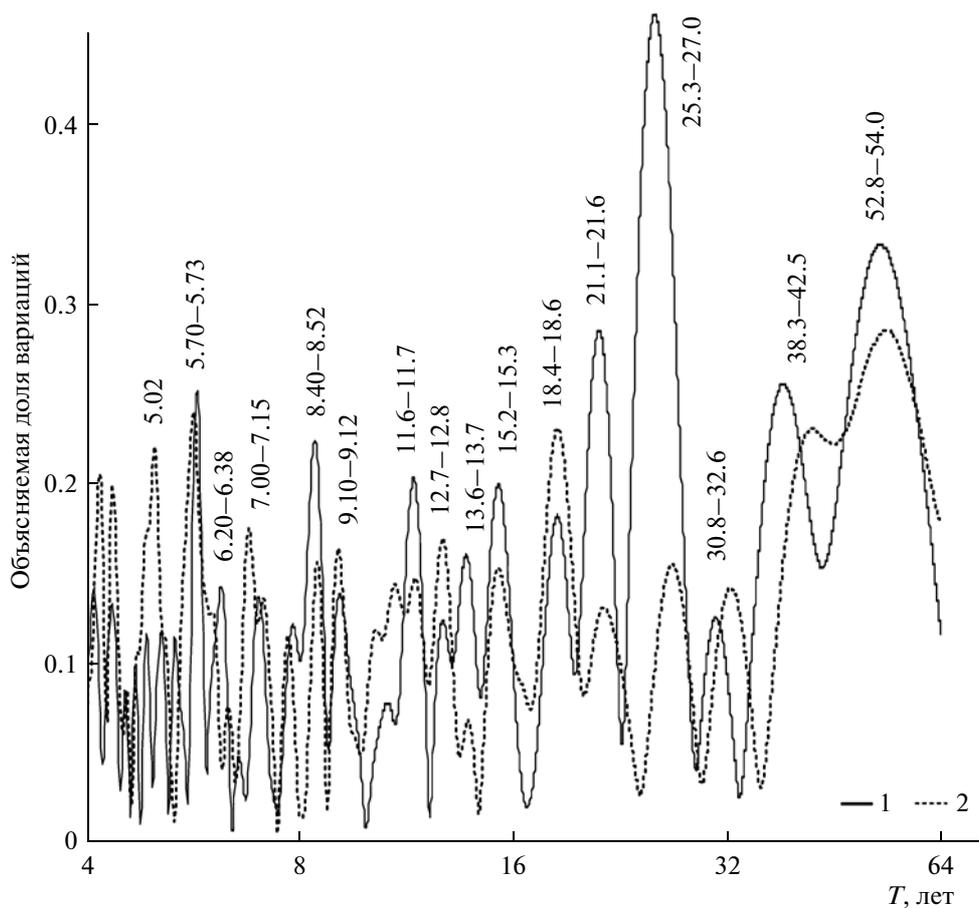
ских составляющих, что для целей настоящей работы не является критичным.

Аддитивное представление параметра  $A_V$  в виде тренда и вариаций  $A'_V$  представляется допустимым в качестве первого приближения. В дальнейшем вместо понятия “относительная вулканическая активность” ( $A'_V$ ), отражающего в большей степени методические особенности исследования, будет использоваться термин “вулканическая активность” ( $A_V$ ).

С целью получения большей точности в области малых периодов спектрального разложения данные  $A_V$  не сглаживались. Процедура спектрального разложения прекрасно изложена по адресу: [http://www.cognitivist.ru/er/kernel/prologi\\_spectr\\_fourier.xml](http://www.cognitivist.ru/er/kernel/prologi_spectr_fourier.xml).

Из построенной периодограммы (рис. 2) видно, что вариации активности вулканов Камчатки и северных Курильских островов представлены основными гармониками: 52.8, 38.3, 25.3, 21.1, 15.2, 11.6, 8.4, 5.7 лет. Выделяется также гармоника, близкая по периоду к лунному циклу: 18.4 года. На рисунке не представлена значимая 91.2-летняя гармоника, исследование природы которой на основе используемых данных сомнительно.

Периодичности 52.8, 18.4 и 21.1 года, по-видимому, представляют гармоники приливного цикла Луны и цикл Хейла, уменьшенные в среднем



**Рис. 2.** Периодограммы: 1 – вулканической активности; 2 – сейсмической активности. По вертикальной оси - доля вариаций временного хода, которая может быть объяснена гармоникой с соответствующим периодом (строго периодическому сигналу будет соответствовать значение 1). Подписи на графике – диапазоны значений периодов, определяемые близкими пиками вулканической и сейсмической активности.

на 3.6%. Подобное смещение для периодов более 20 лет представляется значимым. Гармоника 11.6 лет, возможно, представляет 11-летний солнечный цикл. Гармоника с периодом 25.3 года хорошо соответствует 25-летнему периоду вулканической активности, полученному для Камчатки и для зон сжатия Земли [Хаин, Халилов, 2008]. 38.3-летняя гармоника – 40-летнему периоду, отмеченному там же. Для всех зон субдукции указанные значения варьируют в пределах 21–28, 39–54 лет соответственно, отражая региональные особенности [там же].

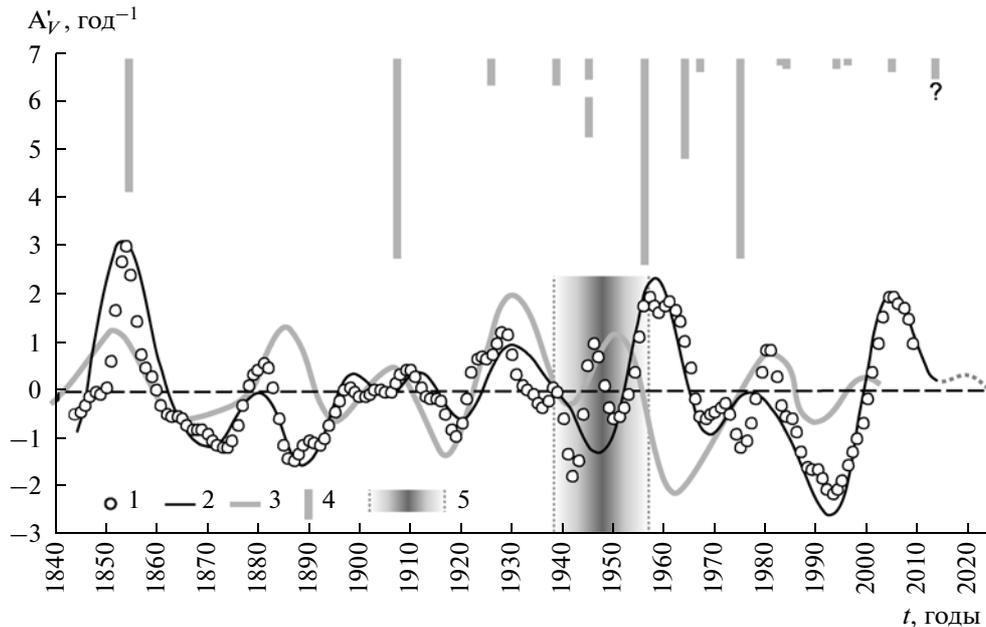
Необходимо заметить, что в [Хаин, Халилов, 2008] выделены циклы вулканической активности, соответствующие вариациям чисел Вольфа (в скобках): 14 (14), 10 (11.2), 8 (8.4), 6 (5.6) лет – для зон субдукции. Две последних периодичности хорошо согласуются с гармониками 8.5 и 5.7 лет, выделенными в настоящей работе далее.

Процедура синтеза идеализированного хода вулканической активности на основе наиболее длиннопериодных основных гармоник позволяет

компенсировать возможное влияние эпизодичности ранних наблюдений на данные о временном ходе вулканической активности и представить “истинный” ее ход. Хорошая аппроксимация была получена (рис. 3) на основе шести гармоник: 91.2, 52.8, 38.3, 25.3, 21.1, 15.2 лет.

Полученный идеализированный ход вулканической активности может быть использован для ее прогноза. Заметно, что вулканическая активность, в том смысле, в котором она определена выше, в 2004 году была близка к максимальному уровню за предыдущие 40 лет. Можно также предположить, что в ближайшие несколько лет вулканическая активность на Камчатке и Северных Курилах уменьшится до среднего уровня (см. рис. 3).

Необходимо отметить, что ход вулканической активности на рис. 3 не совсем согласуется со следующими фактами: предыдущее сильное вулканическое извержение на Камчатке было отмечено в 1975–1976 гг. [Большое трещинное ..., 1984] на локальном минимуме вулканической активности; в 1996 г. вблизи абсолютного минимума про-



**Рис. 3.** Оценки вариаций вулканической активности в период с 1840 по начало 2013 гг. и прогноз ее хода до 2025 г.

1 – сглаженные значения относительной активности; 2 – аппроксимация ее значений основными гармоническими компонентами; 3 – график вариаций активности вулканов поясов сжатия Земли из работы [Хаин, Халилов, 2008, с. 73, рис. 12] с вычетом линейного тренда; 4 – времена извержений и относительные величины объемов изверженных пород камчатских вулканов в соответствии с работой [Широков, Серафимова, 2008], приведены также текущие оценки для Толбачинского извержения, начавшегося в 2012 г.; 5 – область существенной иррегулярности геомагнитной активности [Киселев, Киселев, 2006] (подробности – в тексте).

изошло единственное за историческое время извержение вулкана Академия Наук; извержение вулкана Толбачик 2012–2013 гг. происходит на фоне значимого, до среднего уровня, спада вулканической активности (однако, в полном соответствии с прогнозом В.А. Широкова [1978] на основе лунного цикла).

Более полные данные о вулканических извержениях, взятые из [Широков, Серафимова, 2008], схематично также представлены на рис. 3. Очевидно, что в область максимумов вулканической активности, тем не менее, попадает значимая часть наблюдаемых извержений.

С учетом данных о нестрогой, но прямой зависимости длительности промежутков времени до извержения и его силой, отмеченных в работе [Хаин, Халилов, 2008], неполное соответствие наиболее мощных проявлений вулканизма и периодов максимальной вулканической активности вполне объяснимо. Этот факт подчеркивает аналогию вулканической и сейсмической активности. Таким образом, соотношение понятий вулканической активности в качестве частоты вулканических проявлений и вулканической активности в качестве их интенсивности – неоднозначная функция, заслуживающая отдельного изучения.

В связи с оценками адекватности используемого представления хода вулканической актив-

ности полезно сравнить его с ходом вулканической активности, полученным на основе общих данных об извержениях вулканов областей сжатия Земли [Хаин, Халилов, 2008]. Как видно на рис. 3, совпадение вполне удовлетворительно: значимое различие наблюдается лишь в периоды 1880–1894 гг. и 1940–1967 гг. Кроме того, для периодов 1938–1949 гг. и 1970–1981 гг. характерна существенная иррегулярность вариаций значений с периодом около 11 лет (см. рис. 3).

В работе [Киселев, Киселев, 2006] по данным 1868–1997 гг. для периода 1938–1957 гг. выявлено значимое уменьшение параметра Херста для аиндекса геомагнитной активности, в то время, когда тот же показатель для чисел Вольфа практически не изменялся. Это означает, что в указанный период изменялась рекуррентная структура вариаций геомагнитного поля. От процесса с памятью со значением параметра Херста  $H \sim 0.9-1.0$  произошел переход к значениям  $H \sim 0.6$ , т.е. в сторону процесса, характеризующегося отсутствием памяти ( $H = 0.5$ ). На рис. 3 область аномалии отмечена градиентной заливкой, в которой минимальному уровню  $H \sim 0.6$  соответствует темная полоса. По данным этой работы к концу изученного периода – в интервале 1978–1997 гг. также отмечено пониженное ( $H \sim 0.8$ ) значение этого параметра.

Отмеченные факты, первый – полностью, второй – отчасти, на уровне предположения, согла-

суются с иррегулярностью хода вулканической активности в периоды 1938–1949 и 1970–1981 гг. соответственно.

Можно также отметить, что находясь почти в противофазе со средним для зон субдукции ходом вулканической активности в 1950 г., уже к следующему максимуму 1976 г. ход региональной вулканической активности практически синхронизовался с ним.

Отмеченные факты указывает на возможную связь вулканической активности с геомагнитной: региональная вулканическая активность следует ее возмущениям, но в короткое время восстанавливает синхронизацию со средней. Возможно, этот вывод дополняет представление о более мощном механизме подобного воздействия за счет влияния на конвекцию в мантии, который может быть связан с процессами расширения и сжатия Земли [Хаин, Халилов, 2008].

Хотя полученные выше результаты основаны на изучении активности вулканов Камчатки и Северных Курил, предполагается, что значительная часть гармоник вариации вулканической активности, вызванной внешним воздействием, имеет более общий характер. Для целей настоящей работы подобное обобщение очень важно.

Полученные результаты указывают также на сходимость в пределе оценок вулканической активности на основе предлагаемого концептуальной модели и метода, основанного на использовании эксплозивных извержений (см. рис. 3). Это обстоятельство определяет принципиальную возможность прогноза на основе предлагаемой модели наиболее опасных вулканических проявлений – сильных извержений.

Анализ спектра вулканической активности и описанной ниже сейсмической представляет самостоятельную задачу. В настоящей работе использованы только некоторые из гармоник, показывающие наиболее очевидную связь сейсмического и вулканического процессов. Детальное изучение полученного спектрального разложения, возможно, даст дополнительную информацию о региональных свойствах геодинамического процесса.

При построении спектра периодов сейсмической активности региона (см. рис. 2) использовались данные о сильнейших землетрясениях (табл. 2), взятые из каталога [Новый каталог ..., 1977] для землетрясений 1841–1975 гг., и из каталога NEIC (<http://www.usgs.gov>) для землетрясений 1976–2012 гг.

Спектральное представление сейсмической активности определялось на основе времен сильнейших курило-камчатских землетрясений. Фактически рассматривалось их распределение между “положительным” и “отрицательным” полу-периодами на основе некоторой начальной фазы

и заданного периода повторяемости. Наиболее характерными в полученном спектре сейсмической активности (см. рис. 2) выделяются гармоники с периодами 54.0, 42.5, 18.6, 8.52, 5.70, 5.02 лет.

18.6-летняя гармоника совпадает с 18.6-летним периодом лунного цикла. Вероятно, с 55.8-летней гармоникой лунного цикла связана периодичность 54 года. 5-летняя квазипериодичность курило-камчатских сильнейших землетрясений была отмечена в работе [Федотов и др., 2011]. 42.5-летняя гармоника близка к 45-летней, выделенной для мирового каталога в работе [Хаин, Халилов, 2008].

Из рассмотренных выше наиболее близкими являются следующие гармоники сейсмической и вулканической активности: 54.0 (52.8), 18.6 (18.4), 8.5 (8.4), 5.7 (5.7). В целом, периоды спектра вулканической активности для периодов более 20 лет меньше в среднем на 5.6% и практически совпадают с ними для меньших периодов (см. рис. 2).

Как и для вулканической активности, в [Хаин, Халилов, 2008] также выделены периодичности наиболее сильных землетрясений ( $M \geq 7.7$ ), близкие к гармоникам чисел Вольфа, в том числе гармоники с периодами 8 и 6 лет, вероятно, представленные выше периодами 8.5 и 5.7 лет. Этот факт подчеркивает их важность, а их свойства являются основой приведенного ниже метода прогноза сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) курило-камчатских землетрясений.

Самым заметным отличием обоих полученных спектров является низкая значимость в ходе сейсмической активности гармоники с периодом, близким к 25.3 годам, наиболее выраженной для вулканической активности (см. рис. 2).

На основе рассматриваемой модели спектрального разложения возможны следующие объяснения этого факта: существует специфическая реакция вулканической активности с данным периодом; реакция сейсмического процесса на воздействие с данным периодом существует, но меняет свою фазу. В последнем случае возможно появление второй гармоники с периодом 12.5–12.7 лет. Похожие гармоники с периодами 12.6 (12.7) лет в спектрах присутствуют, но практически на уровне шума.

Можно предположить реакцию на данную периодичность и в виде гармоники с периодом 8.4–8.5 лет, однако, близкая периодичность в настоящей работе рассматривается в качестве второй гармоники 17-летнего цикла.

Надо заметить, что в данной работе не рассматриваются гармоники с периодом менее 5 лет, так как в этом диапазоне уже достаточно высок уровень шумовой компоненты. Для дальнейших исследований можно заметить, что в этом диапазоне наиболее уверенно выделяется гармоника с периодом 2.0–2.2 года.

Таблица 2. Сильнейшие ( $M \geq 7.7$ ) курило-камчатские землетрясения с 1840 г.\*

№	Время землетрясения				Координаты гипоцентра			M
	год	мес.	день	час	$\varphi^\circ$ с.ш.	$\lambda^\circ$ в.д.	H, км	
1	1841	5	17	21	52.5	159.5	30	8.4
2	1843	4	25	—	44.7	149.7	40	8.2
3	1894	3	22	—	42.5	146.0	40	8.8
4	1902	6	11	5	50.0	148.0	600	8.0
5**	1904	6	25	14	52.0	159.0	30	7.7
	1904	6	25	21	52.0	159.0	30	7.7
6	1906	4	6	10	42.0	146.0	40	7.8
7	1912	1	3	19	41.8	144.3	40	7.7
8	1915	5	1	5	48.4	155.5	30	8.3
9	1916	10	31	15	45.5	153.9	30	7.7
10**	1918	9	7	17	45.6	151.1	40	8.2
	1918	11	8	4	44.9	151.4	40	7.9
11**	1923	2	3	16	53.0	161.0	20	8.5
	1923	2	24	7	55.0	162.4	20	7.7
12	1929	1	13	0	50.6	154.7	135	7.8
13	1935	9	11	14	43.3	146.5	50	7.7
14	1950	2	28	10	45.6	143.5	340	7.8
15	1952	3	4	1	41.9	143.7	50	8.3
16	1952	11	4	16	52.3	161.0	20	8.5
17	1956	10	11	2	45.9	150.5	105	7.8
18	1958	11	6	22	44.5	148.5	40	8.2
19	1963	10	13	5	44.8	149.5	47	8.1
20	1968	5	16	10	41.4	142.8	40	7.7
21**	1969	8	11	21	43.6	147.8	40	8.2
	1969	8	11	21	43.6	147.2	38	7.8
22	1971	12	15	8	55.9	163.4	30	7.9
23	1973	6	17	3	43.2	145.9	55	7.9
24**	1978	3	23	3	44.1	149.3	28	7.8
	1978	3	24	19	44.2	149.0	31	7.9
	1978	12	6	14	44.6	146.7	118	7.8
25	1994	10	4	13	43.7	147.4	28	8.3
26	1997	12	5	11	54.8	162.0	25	7.8
27	2003	9	25	19	41.7	143.9	33	8.3
28**	2006	11	15	11	46.7	153.2	12	8.3
	2007	1	13	4	46.2	154.5	23	8.1
29	2008	7	5	2	53.9	152.9	646	7.7
30	2012	8	14	2	49.8	145.1	583	7.7

Примечание. \* Параметры землетрясений взяты за период 1841–1975 гг. из [Новый каталог ..., 1977] и из каталога NEIC (<http://www.usgs.gov>) за период 1976–2012 гг. \*\* Серым фоном выделены параметры землетрясений, которые считаются основными в соответствующей группе и используются при расчетах спектра и прогноза.

Необходимо отметить также, что в работе [Хаин, Халилов, 2008] рассматривается целый ряд других процессов, которые могут повлиять на вулканизм и сейсмичность: колебания уровня Мирового океана, изменения угловой скорости вращения Земли, связанные с ее расширением и сжатием, погодные и другие явления. Ряд периодических процессов рассмотрен также в работе [Гусев, 2008].

### ВЫДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ВОЗНИКНОВЕНИЕ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ

В настоящей работе, как уже было отмечено, в качестве показателя вулканической активности выбрано число наиболее активных в течение годового интервала времени вулканов Камчатки и северных Курильских островов. В качестве индикаторов сейсмической активности выбраны сильнейшие ( $M \geq 7.7$ ) землетрясения — потенциально наиболее опасное явление для Курило-Камчатского региона в целом.

Такое сочетание оправдано, прежде всего, используемыми в работе представлениями о большом масштабе общих факторов воздействия. Кроме того, в настоящей работе считается, что влияние этих факторов в первом приближении подобно на всех уровнях изучаемых явлений: от слабых вулканических активизаций до извержений и от слабых до сильных землетрясений. Использование спектров двух различных процессов позволяет увереннее выделять общие воздействующие факторы.

Подтверждением значительных пространственных масштабов факторов, влияющих на возникновение тектонических землетрясений, служит их удаленное взаимодействие не только вдоль тектонического разлома, но и на расстояниях в сотни километров от него. Например, в работе [Моги, 1988] выявлено взаимодействие между сильнейшими глубокими и неглубокими землетрясениями.

В качестве примера взаимосвязи вулканизма и сейсмичности можно привести достаточно очевидную связь редких событий: землетрясения 5.VII 2008 с  $M_w = 7.7$ ,  $H = 630$  км и активизации вулкана Корякская сопка в 2008–2009 гг. Детально процессы, сопутствующие этим явлениям, рассмотрены в [Широков, Дубровская, 2010].

Существуют и другие модели связи таких явлений. В работе [Zlobin, Polets, 2011] предполагается связь извержения вулкана Пик Сарычева 11.VI 2009 с землетрясениями 2006–2009 гг. в сейсмогенной зоне на Средних Курилах как следствие трещинообразования и проникновения в магматические очаги порций флюидов [Ребеч-

кий, 2008]. В [Хаин, Халилов, 2008] рассматривается механизм активизации вулканизма в зонах субдукции за счет подвижек в литосфере и длительного сжатия — механизма, применяемого также в модели возникновения сильнейших землетрясений.

В рамках концептуальной модели автор использует следующее общее представление о механизме связи вулканизма и сейсмичности: геодинамические процессы влияют на сейсмичность за счет изменения напряженного состояния сейсмоактивной среды в региональном масштабе, одновременно эти напряжения определяют проницаемость продуктов вулканизма протяженных участков в вулканически активных областях.

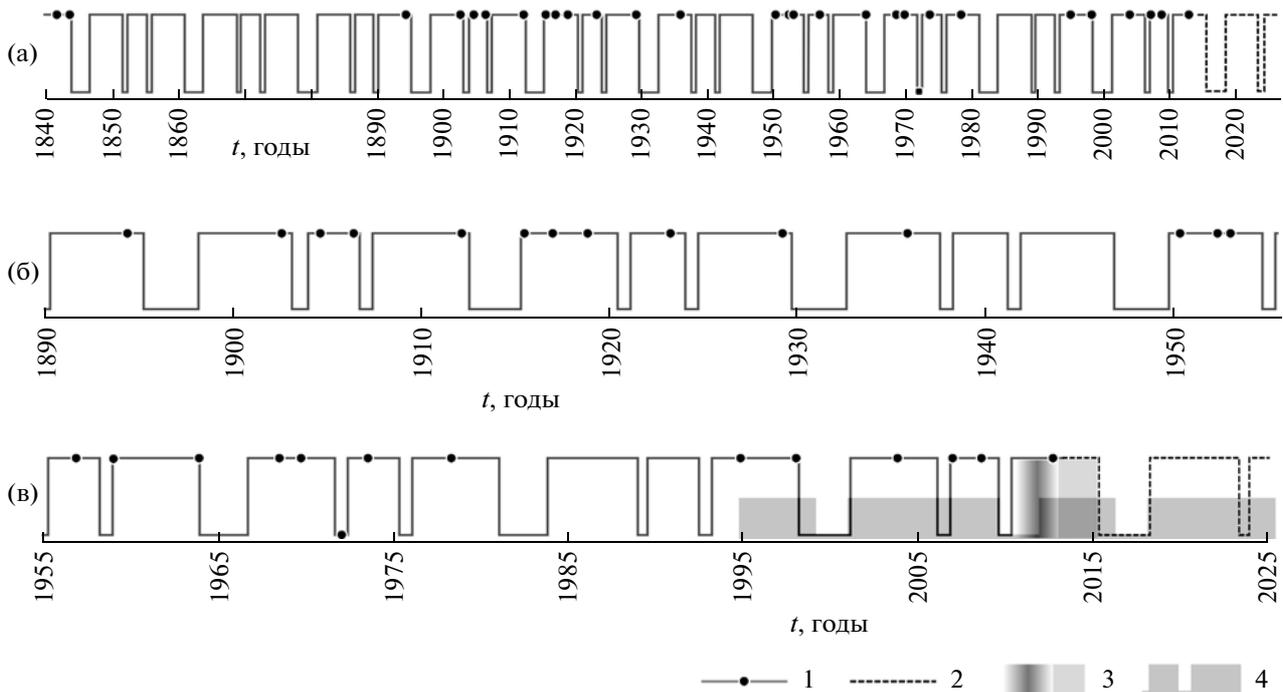
Выше на основе данных о сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) курило-камчатских землетрясениях и активности вулканов Камчатки и Северных Курильских островов была выявлена гармоника 5.7 лет (см. рис. 2). Фазы гармоника с близким периодом 5.717 лет позволяют получить удовлетворительный ретроспективный прогноз 22 из 30, т.е. 73% (без учета одновременно близких и повторяющихся в течение года) землетрясений (см. табл. 2), при времени ожидания 50%.

При рассмотрении 8-ми выпадающих землетрясений было отмечено, что 5 из них (1902, 1918, 1935, 1952, 1969 гг.) отстоят друг от друга на интервалы 16.2, 17.0, 17.1, 16.8, т.е. в среднем 16.8 лет. В полном же виде этот ряд представлен следующими 7-ю землетрясениями: 1902, 1918, 1935, 1952, 1969, 1994, 2012 гг. (см. табл. 2).

Заметим, что отмеченный выше период 5.717 лет близок к третьей гармонике 17-летнего цикла (17/3). Выявленная 17-летняя периодичность меняет фазу на временном отрезке 1969–1994 гг. — единственном отрезке между последовательными сильнейшими землетрясениями приведенного выше ряда, близком по продолжительности полуторному 17-летнему периоду. Эта инверсия служит основанием выбора для уточнения 17/2-летней гармоника.

Временной интервал 1973–1984 гг., относящийся к периоду предполагаемой инверсии 17-летней периодичности, характеризуется также иррегулярностью вулканической активности (см. рис. 3). Этот факт служит еще одним указанием на потенциальную роль геомагнитных процессов в активизации вулканизма и сейсмичности.

Использование 8.576-летней гармоника ( $5.717 \times 3/2$ , начальная фаза — 1898.77 г. получена на основе средней фазы указанных выше “выпадающих” землетрясений — 1899.187 г.) совместно с 5.717-летней (начальная фаза 1903.77 г. получена на основе фазы спектрального разложения 1903.561 г.) позволяет охватить ретроспективным прогнозом на основе условных положительных фаз 29 из 30 сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) курило-камчат-



**Рис. 4.** Соответствие сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) землетрясений Курило-Камчатской дуги (см. табл. 2) прогнозным интервалам на основе периодичностей 5.717 и 8.576 лет, предположительно являющихся гармониками 17-летнего (17.15 лет) цикла.

а – представление для интервала 1840–2025 гг.; б – представление для интервала 1890–1955 гг.; в – то же для интервала 1955–2025 гг.

1 – графическое представление прогнозных интервалов и соответствия им времен сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) курило-камчатских землетрясений (см. табл. 2), верхние участки линии прогноза отмечают наиболее вероятные временные интервалы их возникновения; 2 – то же на период 2013–2025 гг.; 3 – 67%-прогнозный интервал сильнейших (неглубоких) курило-камчатских землетрясений на основе 5-летних квазипериодичностей [Федотов и др., 2011] и его продление на основе результатов настоящей работы до начала 2015 г.; 4 – второе решение для прогнозных интервалов.

ских землетрясений при 75% длительности ожидания (рис. 4). Вероятность случайности такого попадания точек в прогнозные интервалы по биномиальному закону – 0.2%\*, что может служить оценкой неслучайности полученного результата при отсутствии подбора фаз. При этом максимумам значений гармоники 8.5 лет соответствуют точки пересечения гармоникой 5.7 лет нулевых значений, т.е. максимальных скоростей ее изменений.

Не попадает в условную положительную фазу землетрясение 1971 г., расположенное на стыке Курило-Камчатской и Алеутской дуг, и произошедшее вследствие этого, в несколько отличных условиях [Федотов и др., 2012]. Таким образом, данным пропуском при прогнозе курило-камчатских землетрясений можно пренебречь.

\* Эта оценка была бы верна для случая одной “активной” фазы и одной “неактивной”. У автора их не две, а шесть, поэтому необходимо вводить поправочный множитель (Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее применения. Том 1. Перевод с англ. М.: Мир, 1984. 528 с.). В результате оценка становится незначимой (замечание научного редактора – В.А. Широкова).

Проверка полученной оценки неслучайности распределения времен землетрясений по использованным “активным” и “неактивным” интервалам проведена на основе метода Монте-Карло в предположении равной вероятности времен 29 сильнейших землетрясений на промежутке времени 1900–2012 г., но при дополнительном требовании, чтобы интервалы времени между ближайшими по времени землетрясениями были не меньше 1 года. Всего было рассчитано 20000 случайных выборок по 29 значений времен землетрясений.

Влияние подбора варианта фаз, обеспечивающих минимальное число землетрясений, попавших в “неактивные” периоды, оценивалось случайными дополнительными фазовыми сдвигами. Для гармоники 5.7 лет в пределах ошибки определения ее фазы (0.27 лет) использованы 15 реализаций таких сдвигов. Для гармоники 8.5 лет в качестве верхней оценки рассчитывались 60 подобных реализаций в пределах ошибки на 0.92 года. В качестве нижней оценки для гармоники 8.5 подбора фазы не проводилось, что ближе к реальной использованной методике. Для каждой из 20000 реализаций выборок землетрясений по  $15 \times 60$  ре-

ализациям сдвигов фаз отбиралось одно минимальное значение числа землетрясений, попавших в “неактивные” интервалы.

При получении верхней оценки в “неактивные” интервалы менее 2 точек попало в 92 случаях из 20000 (0.46%). Нижняя оценка — 0.22% (44 случая), подобна расчетной. Оценка случайности полученного результата с учетом реального варианта подбора находится в диапазоне 0.2–0.5%. В случае снятия ограничения на временные промежутки между последовательными землетрясениями (для более корректного сопоставления с приведенным выше теоретическим значением 0.2%) полученные значения вероятности находятся в диапазоне 0.6–1.5%.

Прогноз следующего сильнейшего землетрясения Курило-Камчатской дуги на основе полученных результатов выглядит следующим образом. В период III 2010–III 2015 гг. в регионе существует повышенная опасность сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) землетрясений. Вероятность попадания в этот период следующего такого землетрясения — около 7/21–7/17, или 33–41%. В дальнейшем до I 2018 г. такая вероятность менее 1/14, или 7%. Окончание следующего опасного периода — II 2023 г. (см. рис. 4).

Было найдено и второе аналогичное решение — с использованием фазы 8.576-летней гармонике, полученной на основе спектрального разложения (1900.20 г.). При этом минимумам значений гармонике 8.576 лет соответствуют нулевые точки гармонике 5.717 лет. Выпадающим в этом случае является землетрясение 1958 г. Это решение признано худшим, несмотря на то, что в нем короткие “асейсмичные паузы” объединены.

Возможно, проблема согласования полученных решений нуждается в дополнительном рассмотрении, но для данной статьи важно, что прогноз на ближайшие годы во втором варианте практически такой же: текущий опасный интервал продлится на 11 месяцев дольше: до II 2016 г., а следующий начнется также с I 2018 г.

На рис. 4 представлена также 67% область прогноза следующего землетрясения Курило-Камчатской дуги, полученная в работе [Федотов, 2011] на основе 5-летней квазипериодичной последовательности сильнейших курило-камчатских землетрясений. В указанной работе, с учетом специфики проводимых в ней оценок, не учитывались глубокие землетрясения, поэтому землетрясение 2012 г. в Охотском море к указанному прогнозу формально отношения не имеет. Показательно же, что начало интервала прогноза в указанной работе совпадает с началом опасного интервала на основе результатов настоящей работы (см. рис. 4).

С учетом данных в [Федотов и др., 2011] о большой энергии, накопленной в пределах Кам-

чатского участка Курило-Камчатской сейсмогенной зоны (фактически равной энергии максимального, наблюдавшегося в этой зоне, землетрясения с  $M = 8.5$  (см. табл. 2)), полученный в настоящей работе результат позволяет продлить наиболее опасный период в этом районе до II 2016 г. Это согласуется и с данными о сохраняющейся очень высокой сейсмической опасности в регионе и, прежде всего, в районе г. Петропавловск-Камчатский (Камчатка), полученными на основе последнего опубликованного долгосрочного сейсмического прогноза [Федотов и др., 2012].

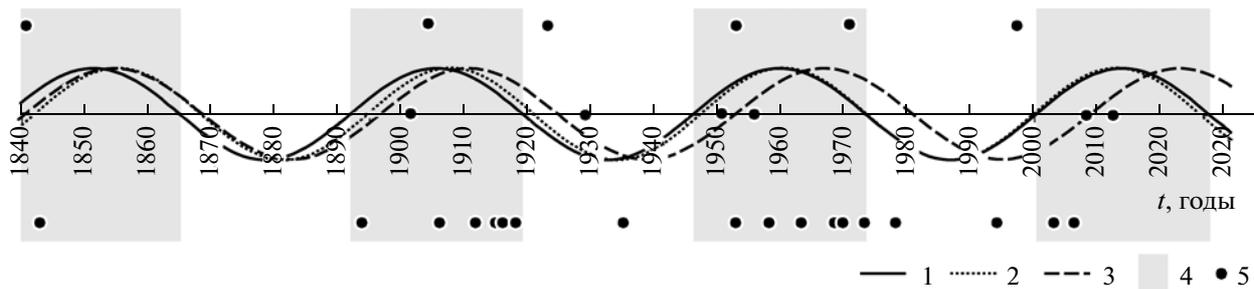
Полученная 17.15-летняя периодичность, вполне вероятно, соответствует 17-летним вариациям магнитного поля Солнца [Juckett, 1998].

Уместно сравнить полученный прогноз с аналогичным прогнозом, данным до 2030 г. для Камчатки и Курильских островов в работе [Серафимова, Широков, 2012]. В ней выделены следующие сейсмически опасные периоды: Камчатка VIII 2015–VII 2017 гг. ( $M \geq 7.6$ ); Курильские острова: IX 2013–II 2016 гг. и XI 2024–I 2026 гг. ( $M \geq 7.5$ ). Вероятность сильнейшего землетрясения в регионе в целом, таким образом, повышена с IX 2013 до VII 2017 г. Здесь пренебрегается различие во включении в сравниваемые прогнозы с одной стороны — глубоких землетрясений, с другой землетрясений с  $M = 7.5–7.6$ , т.к. и те и другие относительно редки.

Расхождение результатов прогноза наблюдается, прежде всего, в период: III 2016–VI 2017 гг., когда, по полученным в настоящей работе данным, вероятность сильнейших землетрясений во всем регионе сильно понижена. Можно заметить, что достоверность прогноза интервалов затишья в настоящей работе, вероятно, выше достоверности прогноза землетрясений в цитируемой<sup>\*\*</sup>. *Пересечение опасных периодов, полученных обоими методами, наблюдается с IX 2013 г. до II 2016 г. в районе Курильских островов и с VIII 2015 г. по II 2016 г. на Камчатке.* Примечательно, что для Курильских островов окончание опасного периода по обоим методам совпадает.

При сопоставлении методов важно учесть, что в настоящей работе не использованы лунные цикличности, что указывает на независимость полученных результатов и результатов [Серафимова, Широков, 2012]. При этом, если воздей-

<sup>\*\*</sup> При прогнозах землетрясений важно оценить их эффективность  $I$  (Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности. Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109–119). Величина  $I$  определяется отношением доли “спрогнозированных” землетрясений (29/39–0.967) к доле “тревожного” времени (0.75), т.е.  $I = 1.29$ . При случайном прогнозе “наугад”  $I = 1$ . Прогноз является статистически значимым, если  $I > 2.0$ , поэтому прогноз автора не является значимым (замечание научного редактора — В.А. Широкова).



**Рис. 5.** Сопоставление времен сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) землетрясений Курило-Камчатской дуги с ходом гармонических компонент, соответствующих спектральным пикам сейсмической и вулканической активности региона, близким к 56-летней гармонике лунного цикла (см. рис. 2).

1 — график хода гармонической компоненты с периодом 54.0 года, полученной на основе временного ряда сильнейших курило-камчатских землетрясений, в том числе глубоких (см. рис. 2, табл. 2); 2 — то же для 52.8-летней гармонике вулканической активности (см. рис. 2) со сдвигом на четверть периода к началу временной оси; 3 — ход периодичности, соответствующей 56-летней (55.8 лет) гармонике лунного цикла и построенной для прогноза сильных неглубоких камчатских землетрясений [Гусев, 2008]; 4 — временные границы положительной фазы 54.0-летней компоненты; 5 — времена сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги (см. табл. 2), внизу — землетрясения Курильской части, вверху — землетрясения Камчатки, в середине — глубокие (более 80 км) землетрясения.

стве гармоник лунного цикла различно по фазе для Курильских островов и Камчатки, то предполагаемые гармоники 17-летнего цикла менее избирательны.

Оценим также долговременное взаимоотношение вулканической и сейсмической активностей всего рассматриваемого Курило-Камчатского региона, включая его продолжение у восточного побережья острова Хоккайдо, на основе гармоник с периодами 52.8 и 54.0 года, выделенных на выше (см. рис. 2).

На рис. 5 представлена гармоника 52.8 года со сдвигом на четверть периода к началу временной оси от первоначальной фазы, полученной на основе спектрального разложения, а также 54-летняя гармоника сейсмической активности (см. рис. 2). Здесь же приведена 55.8-летняя гармоника, предложенная в работе [Гусев, 2008] для прогноза неглубоких камчатских землетрясений. На рисунке приведены также времена сильнейших землетрясений (табл. 2). Необходимо заметить, что до 1900 г. вероятны их пропуски.

Очевидно прекрасное совпадение в большей части 50-летних гармоник сейсмической и вулканической активностей со сдвигом на четверть периода. Такой сдвиг указывает на различный характер влияния предполагаемого общего фактора с периодом около 50 лет: если в одном случае имеет значение его уровень, то во втором — скорость его изменения. Этот факт важен для выяснения механизма воздействия.

Очевидно также, что 24 из 30 (80%) зарегистрированных в период 1840–2012 гг. землетрясений (исключая парные) (см. табл. 2) относятся к положительной фазе гармоники. Вероятность случайного появления данного факта на основе биноми-

нального распределения — 0.2%, однако, с учетом группировки событий она может быть больше.

Различие графиков 52.8–54.0 и 55.8-летних периодичностей достаточно велико в конце рассматриваемого временного интервала, и отражает, по-видимому, уход текущей фазы региональной активности от вычисляемой на основе лунной цикличности [Гусев, 2008], с вероятной “подстройкой” в дальнейшем.

Оценка фазового сдвига между ходом вулканической и сейсмической активности рассматривалась также в важном для прогноза сильнейших землетрясений диапазоне периодов 4.9–6.4 года, включающем средний период повторяемости сильнейших курило-камчатских землетрясений 5.0 лет, спектральный пик, соответствующий периоду 5.7 лет, и третью гармонику лунного цикла 6.2 года (рис. 6).

Наиболее устойчивая разность фаз вулканической и сейсмической активности — 1.6 года (вулканическая активность также запаздывает по отношению к сейсмической) — отмечается в области периода 5.7 лет. Тем не менее, прогнозная ценность такого результата низка, так как вариации вулканической активности с таким периодом относительно малы, а связь этого периода со временами эксплозивных извержений в настоящей работе не изучалась. Для двух остальных спектральных пиков фазовые сдвиги определяются хуже.

В целом, приведенные факты подтверждают существующее представление об опосредованной связи вулканических и сейсмических процессов в широком диапазоне временных интервалов, а также уточняют ее характер. Важную роль в проявлении этой связи в виде их согласованных вариаций, по-видимому, играют космические факторы.

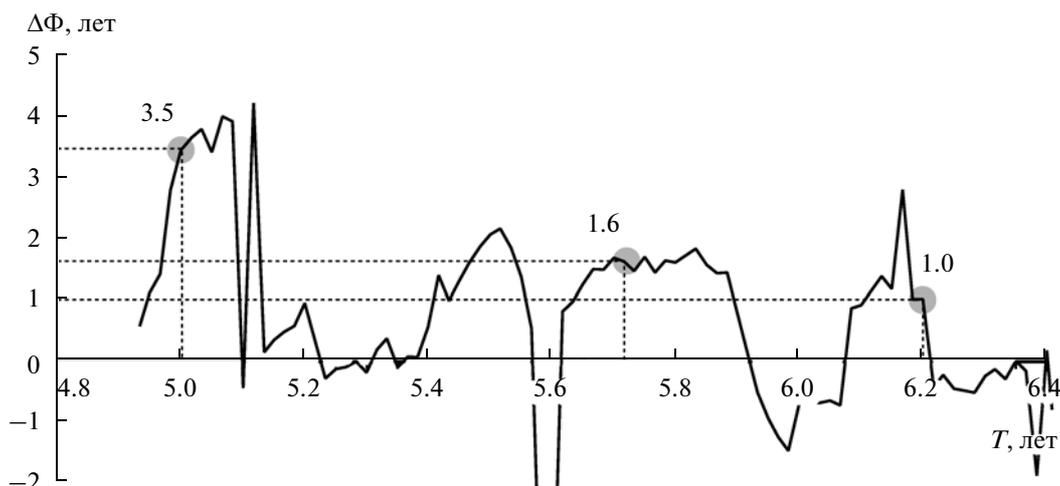


Рис. 6. Разность фаз  $\Delta\Phi$  хода вулканической и сейсмической (на основе землетрясений Курило-Камчатской дуги (см. табл. 2)) активности для ряда гармоник в диапазоне периодов  $T = 5\text{--}6$  лет.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на концептуальном уровне представлена методика определения вулканической активности как частоты вулканических проявлений широкого масштаба. Результаты ее применения относятся, прежде всего, к вулканам Камчатки и северных Курильских островов, но, как предполагается, они принципиально применимы и для всего Курило-Камчатского региона. На это позволяет надеяться общность факторов космического воздействия как основы относительно короткопериодных вариаций вулканической активности, и однородность в первом приближении геодинамических условий.

Точность определения периодов циклических компонент вулканической активности подтверждается: сравнением со среднемировыми данными; сравнением периодограмм вулканической и сейсмической активности.

Выявлен факт уменьшения значений периодов гармоник спектра вулканической активности по отношению к предполагаемым соответствующим периодам внешнего воздействия, наиболее значимый для больших периодов. При сравнении спектров вулканической и сейсмической активности оказывается, что значения соответствующих пиков периодов для первой также меньше при периодах около и более 20 лет.

На основе полученных фактов на уровне гипотезы предполагается, что и вулканическая, и сейсмическая активность отражают реакцию сложной активной среды на внешнее воздействие в виде спектра гармоник, принципиально отличающегося от спектра воздействующих факторов. Согласование фаз гармоник реакции и воздействия происходит за счет периодических фазовых сдвигов — “подстройки” первой. Такой подход дает основание ис-

пользовать полученные на основе спектрального разложения значения периодов, в общем случае не равные значениям периодов известных внешних факторов воздействия.

Наиболее значимой из всех выявленных является гармоника вулканической активности с периодом 25.3 года. Примечательно, что эта гармоника не нашла адекватного отражения в периодичности сильнейших землетрясений региона. Ее природа не определена.

Сделан вывод, что в 2004 г. наблюдалась максимальная вулканическая активность за последние 40 лет. В 2013–2023 гг. она, по-видимому, будет оставаться в области средних значений. Надо отметить, что данный прогноз не тождественен прогнозу отсутствия сильных извержений.

Результаты настоящей работы позволили выявить также опосредованную на основе гармоник с периодом 52.8–54.0 года связь между вулканической активностью и уровнем опасности сильнейших землетрясений в регионе. Сдвиг между максимумами соответствующих гармоник составляет  $1/4$  периода, что указывает на принципиально разный механизм воздействия некоторого общего фактора, вероятно — 55.8-летней гармонике лунного цикла, на вулканизм и сейсмичность.

Отличием настоящей работы является также демонстрация значительного влияния на вероятность возникновения сильнейших землетрясений 17-летних вариаций, предположительно — магнитного поля Солнца, а также представление о большом масштабе подобного воздействия (Курило-Камчатский регион). В этом плане данные о влиянии лунного цикла являются хорошим уточняющим фактором.

В работе также получен прогноз сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона на

основе данной периодичности. Хотя предполагается его практически 100% оправданность по ретроспективным данным, платой за это является продолжительный, 75% период времени тревоги. По-видимому, значительно уменьшить последний без уменьшения надежности прогноза возможно за счет разбиения региона на более однородные по геодинамическим условиям участки и дополнительного использования других периодичностей. Для получения необходимой детальности относительно сейсмичности возможно использование большого массива данных по землетрясениям средней силы. Приведенные в настоящей работе спектры могут быть использованы в этом случае в качестве опорных.

Полученные результаты свидетельствуют в первом приближении о том, что существующая с 2000 г. повышенная долговременная сейсмическая опасность в Курило-Камчатском регионе продлится еще около 15 лет (см. рис. 5). Наиболее же опасным в настоящее время является период до II 2016 г. (см. рис. 3). Последний результат согласуется с данными долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги по методу С.А. Федотова [Федотов и др., 2011, 2012]. По отношению к прогнозу, данному в [Серафимова, Широков, 2012], отмечены следующие перекрывающиеся опасные интервалы: период IX 2013–II 2016 гг., определяющий временной интервал вероятного сильнейшего землетрясения на Курилах, и период VIII 2015–II 2016 гг. – на Камчатке. Согласно прогнозу, данному в настоящей работе, в период III 2016–VI 2017 гг. вероятность землетрясений с  $M \geq 7.7$  во всем регионе уменьшается в несколько (около 5) раз. Затем период повышенной вероятности таких событий продлится до II 2023 г.

Предложенная методика может быть распространена и на другие вулканически и сейсмически активные регионы.

Работа выполнена при поддержке проектов 12-1-П4-04 ДВО РАН, 11-05-00602 РФФИ и по проекту “Снижение экологических рисков в энергетике и оценка ресурсов водорода на территории Камчатского края”, выполняемому в рамках государственного задания (Регистрационный номер 5.3799.2011).

Автор благодарит академика С.А. Федотова, к.ф.-м.н. В.А. Широкова, к.г.-м.н. О.А. Гирину за очень полезные замечания, позволившие существенно дополнить и улучшить работу, и к.г.-м.н. И.Ф. Делемена, предложившего данное направление исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976 / Под ред. Федотова С.А. М.: Наука, 1984. 637 с.

Гусев А.А. О реальности 56-летнего цикла и повышенной вероятности сильных землетрясений в Петропавловске-Камчатском в 2008–2011 гг. согласно лунной цикличности // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 55–65.

Гущенко И.И. Извержения вулканов мира: Каталог. М.: Наука, 1979. 475 с.

Киселев Б.В., Киселев В.Б. Различия в динамике солнечной и геомагнитной активности // Вопросы геофизики. Вып. 39. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. С. 130–139. [http://geo.phys.spbu.ru/Problems\\_of\\_geophysics/2006/11\\_Kiselev\\_39\\_2006.pdf](http://geo.phys.spbu.ru/Problems_of_geophysics/2006/11_Kiselev_39_2006.pdf).

Мози К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Отв. редакторы Кондорская Н.В. и Шебалин Н.В. М.: Наука, 1977. С. 374–447.

Ребецкий Ю.Л. Разломы как особое геологическое тело. Модель развития крупномасштабного хрупкого разрушения. Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы // Материалы Всероссийской конференции, Москва, 22–25 апреля. М.: Геос, 2008. С. 418–420.

Серафимова Ю.К., Широков В.А. Прогнозирование сильных землетрясений, вулканических извержений и цунами для различных регионов Земли на основе изучения их связи с лунным приливом 18.6 г. и 22-летним Хейловским циклом солнечной активности // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений / Под ред. Гордеева Е.И., Чеброва В.Н. Владивосток: Новая книга, 2012. С. 305–328.

Тихонов И.Н., Рыбин А.В., Чибисова М.В. Некоторые закономерности времени возникновения сильных извержений вулканов Курильской островной дуги // Литосфера. 2011. № 3. С. 134–143.

Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской зоны. М.: Наука. 2005. 302 с.

Федотов С.А. Даты 50 лет исследований Института вулканологии СО АН СССР – Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 1962–2012 годы, его предыстории, деятельности и достижений // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 3–11.

Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2006–2011 гг. и успешный прогноз Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г.,  $M \geq 8.2$  // Вулканология и сейсмология. 2007. № 3. С. 3–25.

Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Афтершоки и область очага Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г.,  $M \geq 8.2$ ; долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV.2008–III.2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 3–23.

Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2010–VIII 2015 гг., достоверность предыдущих прогнозов и их применение // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 3–27.

Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2011–VIII 2016 гг.; вероятное место, время и развитие следующего сильнейшего землетря-

сения Камчатки с  $M \geq 7.7$  // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С. 3–26.

Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической и вулканической активности. Burgas, Bulgaria, SWB, 2008. 304 с.

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.

Широков В.А. Влияние девятнадцатилетнего прилива на возникновение больших камчатских извержений и их долгосрочный прогноз // Геологические и геофизические данные о БТГИ, 1975–1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 164–170.

Широков В.А. Влияние общепланетарных космических факторов на возникновение сильных вулканических извержений Земли и проблема их долгосрочного прогноза // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта 2008, Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 305–314.

Широков В.А., Дубровская И.К. О планетарной сейсмоструктурной природе роев вулканических землетрясений, связанных с подготовкой извержения Корякского вулкана в 2008 г. // Проблемы комплекс-

ного геофизического мониторинга Дальнего Востока России // Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 11–17 октября 2009 г. / Отв. ред. Чебров В.Н. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 249–253. <http://www.emsd.ru/konf091011/pdf/predv/10.pdf>

Широков В.А., Серафимова Ю.К. О связи 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного циклов с сильными землетрясениями и долгосрочный сейсмический прогноз для северо-западной части Тихоокеанского тектонического пояса // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. Вып. 8. № 2. С. 120–133.

Широков В.А., Серафимова Ю.К. Прогноз сильных извержений вулканов Тихоокеанского тектонического пояса на ближайшие 20 лет на основе применения метода фазовых траекторий // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. Вып. 12. № 2. С. 154–163.

Juckett D.A. Evidence for a 17-year cycle in the IMF directions at 1 AU, in solar coronal hole variations, and in planetary magnetospheric modulations // Solar Physics. 1998. V. 183. Iss. 1. P. 201–224.

Zlobin T.K., Polets A.Yu. Relations of geodynamic processes, tectonic stresses and strong earthquakes on the Middle Kuril from 2006 through 2009 with eruption of the Sarychev Peak Volcano // Geodynamics & Tectonophysics. 2011. V. 2. № 2. P. 161–174.

## A Study of the Relationship between Volcanic Activity and Great Earthquakes: The Kuril–Kamchatka Region

© 2014 г. А. В. Solomatina<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia

<sup>b</sup> Vitus Bering State University of Kamchatka, ul. Pogranichnaya 4 Petropavlovsk-Kamchatskii, 683032 Russia  
e-mail: [alf55@mail.ru](mailto:alf55@mail.ru), [alf110111@gmail.com](mailto:alf110111@gmail.com)

Received November 26, 2012

**Abstract**—We used the data on the activity of volcanoes in Kamchatka and the North Kuril Islands for the period from 1840 to early 2013 to identify the most significant cyclic components. The resulting periodicities were compared with the recurrence spectrum for great ( $M \geq 7.7$ ) earthquakes in the Kuril–Kamchatka region for 1841–2012. We detected 52.8–54.0, 8.58, and 5.72-year cycles, which are common both to seismicity and to volcanic activity. The first interval is close to the three times the value of the 18.613-year lunar rhythm (55.84 years). The 8.58 and 5.72-year periodicities seem to be controlled by solar activity variations and are the second and third harmonics in the 17.15-year cycle. This cycle and its harmonics are used for long-term prediction of great ( $M \geq 7.7$ ) earthquakes in the Kuril–Kamchatka region as a whole. It was concluded that the existing increased hazard of great earthquake occurrence in the Kuril–Kamchatka region will last until February 2016 (a 40% probability of a great earthquake during that period). In addition, the long-period phase of increased seismic hazard will last until 2027 with the probability of great earthquakes being 1.6 times the long-term average value.

---

Сдано в набор 07.11.2013 г.	Подписано к печати 20.01.2014 г.	Дата выхода в свет 12 четн.	Формат 60 × 88 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>
Цифровая печать	Усл. печ. л. 9.5	Усл. кр.-отт. 2.0 тыс.	Уч.-изд. л. 9.5
	Тираж 196 экз.	Зак. 2003	Цена свободная

---

Учредитель: Российская академия наук, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

---

Издатель: Российская академия наук. Издательство “Наука”, 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90  
Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”  
Отпечатано в ППП «Типография “Наука”», 121099 Москва, Шубинский пер., 6