



УДК 550.344.43

В. К. Лемзиков, М. В. Лемзиков

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: lemzikov@kscnet.ru*

Спектральные особенности длиннопериодных вулканических сигналов вулкана Ключевской

Исследуются спектральные особенности длиннопериодных вулканических сигналов вулкана Ключевской и их зависимость от активности вулкана за календарный период 2000–2012 гг. Применено несколько методов исследования. Среди которых, во-первых, параметр, характеризующий отношение амплитуд спектра вулканического сигнала на частотах 2 Гц и 10 Гц. Во-вторых, параметр, характеризующий отношение амплитуд спектра вулканического сигнала на частоте 2 Гц вертикального и горизонтальных сейсмических каналов. И, в-третьих, параметр, характеризующий уровень вулканического сигнала на частоте 2 Гц. Третий параметр в спокойный период соответствует уровню микросейсм, а в вулканически-активный период дополнительно включает вулканическое дрожание, уровень которого может значительно превосходить уровень микросейсм. Вариации всех параметров по календарному времени совпадают с периодами вулканической активности вулкана Ключевской.

Введение

Вулканические сейсмические сигналы характеризуются большим разнообразием спектрального состава колебаний и форм. Длиннопериодные вулканические землетрясения и вулканическое дрожание по классификации в [5, 9, 10, 18] относятся к вулканическим сейсмическим сигналам выше первого типа. По схеме, предложенной в [16, 17] вулканические землетрясения делятся на две группы. В первую группу входят вулканические землетрясения, которые и по предыдущему делению составляют первый тип вулканических землетрясений, вторую — все остальные типы. Такое деление вулканических сейсмических сигналов дополнительно характеризуется спектральным составом колебаний. Первая группа, содержащая вулканотектонические (ВТ) землетрясения, представляет вулканические сигналы, связанные с реакцией сдвига (хрупкое разрушение) вулканических пород на усилия, вызванные движениями жидкого и/или газообразного магматического вещества в пределах вулканической постройки или под ней. Эти землетрясения содержат более высокочастотные колебания, по сравнению со всеми остальными вулканическими сигналами. Все остальные, включающие и вулканическое дрожание, характеризуются содержанием в основном длиннопериодных колебаний, поэтому объединяются как длиннопериодные (ДП).

Исследованию спектральных и спектрально-временных характеристик сейсмических сигналов посвящено много работ [1, 2, 3, 4, 7, 17, 19]. В этих работах, кроме всего прочего, отмечается, что перед сильным землетрясением изменяется частот-

ное содержание слабых местных землетрясений. В работах [12, 13, 14] предложен параметр, характеризующий изменение спектрального состава слабых землетрясений, и показано, что этот параметр изменяется перед сильным землетрясением. Спектральный состав вулканических землетрясений также изучался. В частности, в работе [6] показано, что спектральный состав вулканических сигналов изменяется в связи с изменением вулканической активности вулкана Ключевской.

В работе поставлена задача изучения несколько параметров, характеризующие спектральные особенности ДП вулканических землетрясений, включая вулканическое дрожание, и прослеживания их вариаций с изменением вулканической активности вулкана Ключевской.

Использованные данные

Обработаны записи ДП вулканических землетрясений, которые включают и вулканическое дрожание за календарный период 2000–2012 гг. Так же использованы участки сейсмических записей микросейсм и вулканического дрожания перед ДП вулканическими землетрясениями. Эти участки в фоновый период вулканической активности представляют записи микросейсм. Но в периоды вулканической активности, эти участки в той или иной мере представляют варианты вулканического дрожания. Записи выполнены радиотелеметрическими сейсмическими станциями Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН), расположенными на склоне и вблизи вулкана (рис. 1).

Каждая станция имеет три компоненты записи скорости колебаний грунта (SHE, SHN, SHZ): две

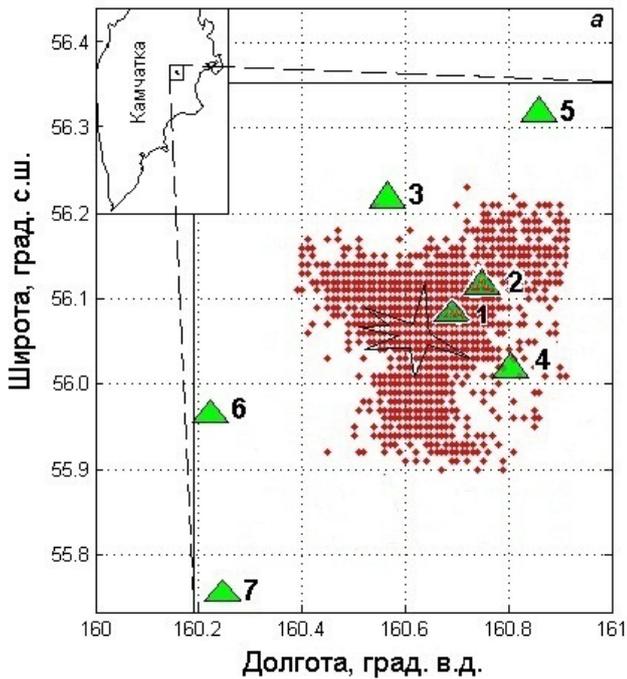


Рис. 1. Карта-схема распределения слабых вулканических землетрясений 2-го и 3-го типов вулкана Ключевской. Треугольниками показаны радиотелеметрические сейсмические станции КФ ГС РАН: 1 – LGN, 2 – CIR, 3 – KRS, 4 – ZLN, 5 – KLY, 6 – KPT, 7 – KMN. Многоугольником обозначена вершина вулкана Ключевской. На врезке показано географическое положение вулкана Ключевской.

горизонтальные (SHE, SHN) и одну вертикальную (SHZ). Четыре станции: LGN, CIR, KRS и ZLN — расположены на склонах вулкана, а KMN, KPT и KLY — более удаленно (см. рис. 1). Вулканические землетрясения и интервалы микросейсм исследовались в диапазоне частот 0,5–10,0 Гц. Сейсмические каналы радиотелеметрических сейсмических станций не позволяют эффективно использовать записи сейсмических сигналов в частотном диапазоне менее 0,2 Гц и выше 15 Гц в результате сильного ограничения амплитудно-частотной характеристики сейсмических каналов в области нижних и верхних частот. Однако в частотном диапазоне 0,5–15 Гц эти станции соответствуют требованиям поставленной в работе задачи. Записи землетрясений выполняются в цифровом виде с частотой дискретизации аналогового сигнала 128 с^{-1} .

Амплитуды колебаний ДП вулканических землетрясений быстро затухает с расстоянием, что отражается на записях ближних (LGN, KRS, CIR, ZLN) и более удаленных (KLY, KMN, KPT) от вулкана станций. Кроме того, локальные особенности пунктов установки станций также влияют на записи землетрясений. Для демонстрации примеров ДП вулканических землетрясений и вулканического дрожания при различных уровнях активности вулкана приведён пример по станции LGN (рис. 2). На рис. 2в запись по существу представляет непре-

рывную серию ДП вулканических сигналов, которые в целом составляют вулканическое дрожание; на фоне последнего можно выделить или пропустить отдельные вулканические землетрясения.

ДП вулканические землетрясения за 2000–2012 гг. исследовались в узком диапазоне энергетических классов $5,5 < K_{S1,2}^{Ф68} < 6,3$, где $K_{S1,2}^{Ф68}$ — шкала энергетических классов местных землетрясений С. А. Федотова [11]. События выбирались в диапазоне глубин очагов $-5 \text{ км} < H < 2 \text{ км}$. Ось координат, обозначающая глубину очага землетрясений, имеет направление положительного значения к центру Земли и стандартного положения нуля координат на уровне моря.

За изучаемый период вулканическая активность вулкана Ключевской постоянно изменялась и несколько раз определялась как умеренное извержение. Вулканическая активность вулкана Ключевской оценивалась по визуальным и сейсмологическим данным сотрудниками лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности КФ ГС РАН. Данные об активизации вулкана Ключевской, связанные с вершинными извержениями взяты из работы [8, таблица 3, 2] и приведены в табл. 1.

Метод исследования

Вариации спектральных и спектрально-временных характеристик очагов землетрясений определены уже несколько десятилетий назад. Эти исследования выполнялись по записям землетрясений не только стандартных сейсмических станций, но и специально разработанных частотно-избирательных сейсмических станций (ЧИСС). Частотно-временные поля позволяют описать дискретный характер развития очагового процесса во время землетрясения [например, 3]. Среди прогностических признаков, предвещающих сильное землетрясение, имеется вариации спектрального состава колебаний, которое проявляется в форме записей сейсмических волн землетрясений. В работе [12] предложен параметр $N_{сп} = A_{0,1}/A_{1,0}$ равный отношению спектральной амплитуды на частоте $f = 0,1 \text{ Гц}$ к спектральной амплитуде на частоте $f = 1,0 \text{ Гц}$. Как показано в работе [6] в частотном диапазоне энергия ДП вулканических землетрясений и вулканического дрожания вулкана Ключевской в основном содержится 1–2 Гц. Поэтому в работе в качестве основных амплитуд, характеризующие энергию спектров этих землетрясений и вулканическое дрожание, выбрана частота 2 Гц. В соответствии со спектральным содержанием ДП вулканических землетрясений определялся коэффициент отношения амплитуд спектра на частотах 2 и 10 Гц, который аналогично с ранее отмеченным можно записать как $N_{сп} = A_2/A_{10}$. Такие измерения выполнялись по спектрам S-волн ДП вулканических землетрясений.

Также определялся коэффициент отношения амплитуд спектра на частоте 2 Гц между вертикальной и горизонтальной составляющими одной сейсмической станции. Этот параметр в соответствии

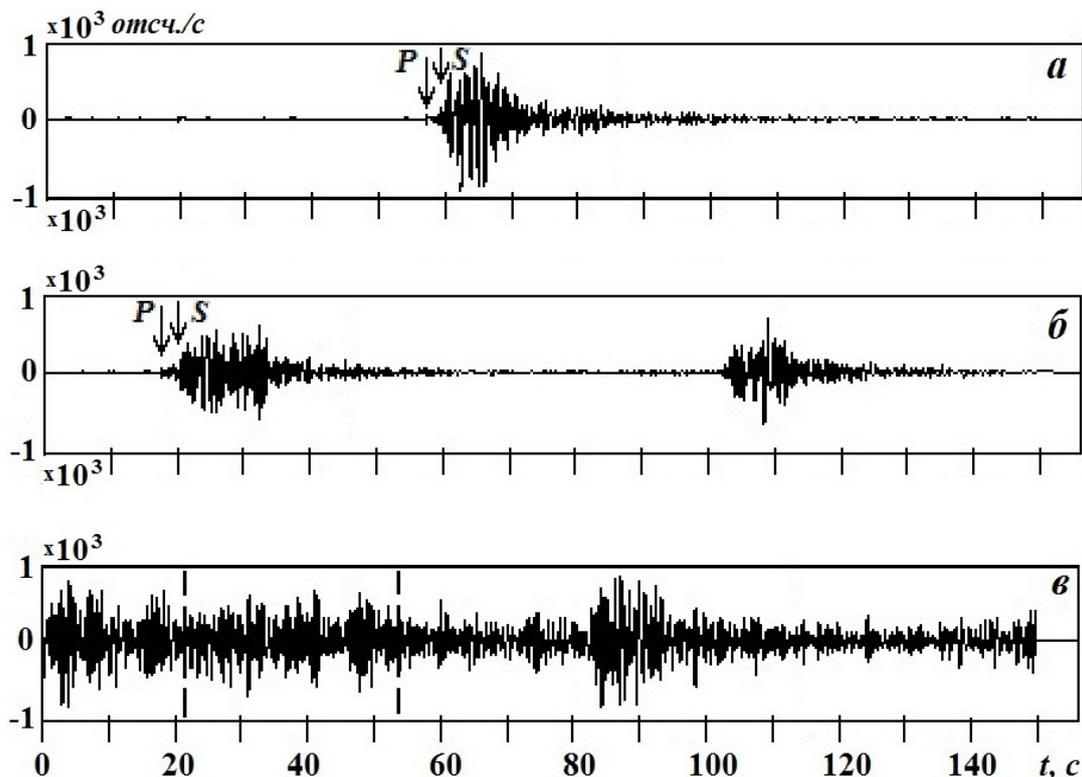


Рис. 2. Примеры записей ДП вулканических землетрясений при различных уровнях вулканической активности вулкана Ключевской: а — одно землетрясение, б — два подряд, в — вулканическое дрожание (ДП вулканические сигналы) на фоне которого проявляются отдельные вулканические землетрясения. Отмечены вступления *P* и *S*-волн на верхних записях, а на нижней — 32-секундный интервал, используемый для спектрального анализа уровня микросейсм или вулканического дрожания.

Таблица 1. Периоды активизации вулкана Ключевской, связанные с его вершинными извержениями.

Периоды активизации	1	2	3	4	5
Даты начала	28 окт. 2002 г.	12 янв. 2005 г.	15 дек. 2006 г.	4 июн. 2008 г.	30 июл. 2009 г.
и конца	27 фев. 2004 г.	28 апр. 2005 г.	27 июл. 2007 г.	1 фев. 2009 г.	7 дек. 2010 г.

с аналогией с ранее введённым обозначением можно записать как $N_{ZH} = A_2^Z/A_2^H$. Измерения также выполнялись по спектрам *S*-волн ДП вулканических землетрясений. Этот параметр ранее успешно применялся; например, в работе [20] этот параметр применён для оценки резонансов и уровнем возбуждаемых и естественных микросейсм.

Дополнительно выполнялись измерения амплитуды спектров микросейсм и вулканического дрожания на частоте 2 Гц. Для повышения состоятельности оценок измеряемых амплитуд на частоте 2 Гц, участки микросейсм по длительности равны 32 с. В активный период эти участки микросейсм превращались в участки вулканического дрожания, амплитуды которого увеличивались с повышением вулканической активности. Кроме того уровень вулканического дрожания зависит от расстояния от очага вулканического дрожания и соответственно зависят от географического расположения пунктов регистрации по отношению к вулкану Ключевской.

Примеры выбора временного отрезка, длительностью 32 секунды на записях землетрясений показаны на рис. 2. Использовался метод случайной выборки участков микросейсм или вулканического дрожания. Конечно, эффективно использовать метод сплошной непрерывной оценки уровня амплитуд микросейсм, что возможно при цифровых записях сейсмического сигнала и компьютерной обработке. Однако при выборках не менее 20–30 штук в месяц метод случайной выборки не допускал пропусков характерных оценок амплитуд. Заметим, что в календарный период с 2000 г. по 2005 г. выполнялась более полная выборка ДП вулканических землетрясений и участков вулканического дрожания, чем в последующие годы. Однако и по меньшим по объёму выборкам ставилась задача получения состоятельных значений соответствующих параметров.

Перед проведением спектрального анализа выбранный временной отрезок записи землетрясения корректировался стандартными процедурами: уstra-

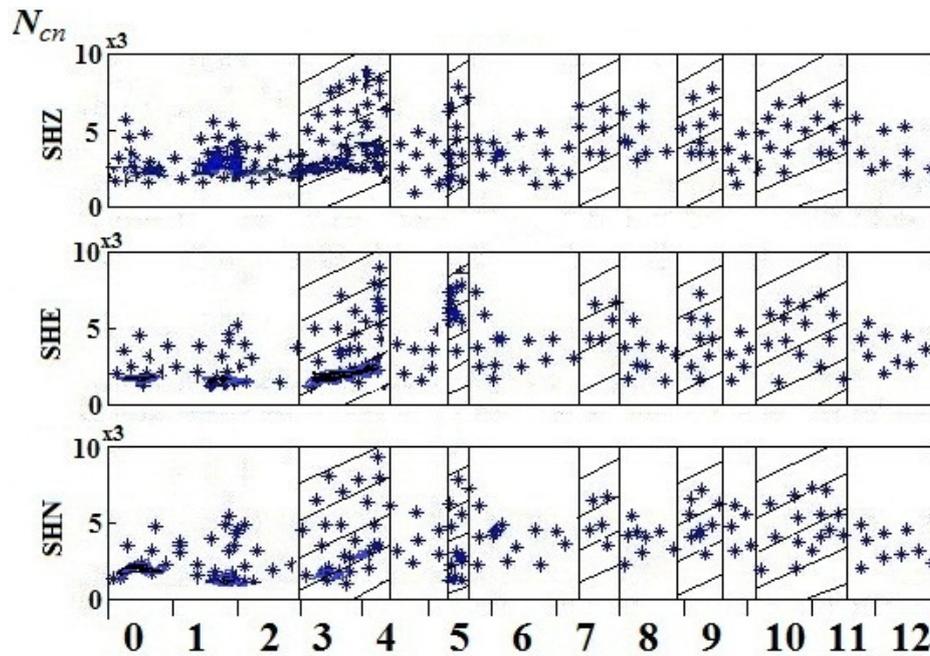


Рис. 3. Временной ход параметра N_{cp} для станции LGN. По оси абсцисс обозначено календарное время в годах и числа обозначают год, начиная с 2000 г.

нением временного тренда, выравниванием нулевой линии и сглаживанием концов отрезка косинусным окном. Полученный спектр корректировался дополнительно с учётом амплитудно-частотной характеристики сейсмического канала станции в полосе частот 0,2–15 Гц. Экспериментальные спектры участков S-волн вулканических землетрясений и вулканического дрожания для уменьшения ошибок измерения амплитуд сглаживались кубическим сплайном в диапазоне частот 0,5–18 Гц и сглаженный спектр определялся в точках 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12 Гц.

Результаты

Графики временного хода параметра N_{cp} для станции LGN для вертикального и горизонтальных сейсмических каналов приведены на рис. 3. На временных графиках отмечены периоды, которые в табл. 1 отмечаются календарными периодами увеличения вулканической активности вулкана Ключевской и связаны с его вершинными извержениями. Обозначим периоды увеличения активности вулкана Ключевской по годам, которые определяют их начало, как: 2002, 2005, 2006, 2008 и 2009. По графикам временного хода параметра N_{cp} можно сделать вывод, что его уровень повышался в отмеченные периоды вулканической активности вулкана Ключевской. Но сделать заключение о том, что этот уровень в отдельные периоды был больше или меньше нельзя, возможно, потому, что за календарный период 2000–2012 гг. активность вулкана Ключевской в периоды повышенной активности была примерно одинаковая и оценивалась как умеренная вулканическая активность. Результаты

по вертикальному и горизонтальным сейсмическим каналам практически идентичны. Поэтому дальнейшие результаты приведены по данным одного сейсмического канала — вертикального.

График временного хода параметра N_{cp} для некоторых станций Ключевской группы вулканов приведены на рис. 4. Здесь также отмечены периоды, которые в табл. 1 отмечаются календарными периодами увеличения активности вулкана Ключевской и связаны с его вершинными извержениями. Как видно, что в эти периоды повышается уровень параметра N_{cp} по данным всех станций. Можно отметить, что уровень вариаций параметра N_{cp} для станций LGN и CIR гораздо больше, чем для станции КРТ и тем более для станции KMN. Эти станции находятся на разных расстояниях от вулкана Ключевской (рис. 1), для которых соответственно уменьшается уровень амплитуд вулканического сейсмического сигнала за счёт поглощения и расхождения сейсмических волн. Примечательно, что соответственно уменьшается по модулю уровень параметра N_{cp} . Уточним дополнительно, что параметра N_{cp} обозначает отношение спектров S-волн ДП вулканических землетрясений на частотах 2 и 10 Гц. Следовательно, модуль этого отношения уменьшается в точках регистрации более удалённых от очагов этих землетрясений. Также можно сделать вывод, что по приведённым данным нельзя оценить уровень вулканической активности вулкана Ключевской. Возможно потому что за календарный период 2000–2012 гг. активность вулкана в периоды повышенной активности: 2003, 2005, 2007, 2008 и 2009 — была примерно одинаковая и оценивалась как умеренная вулканическая активность. Полученные оцен-

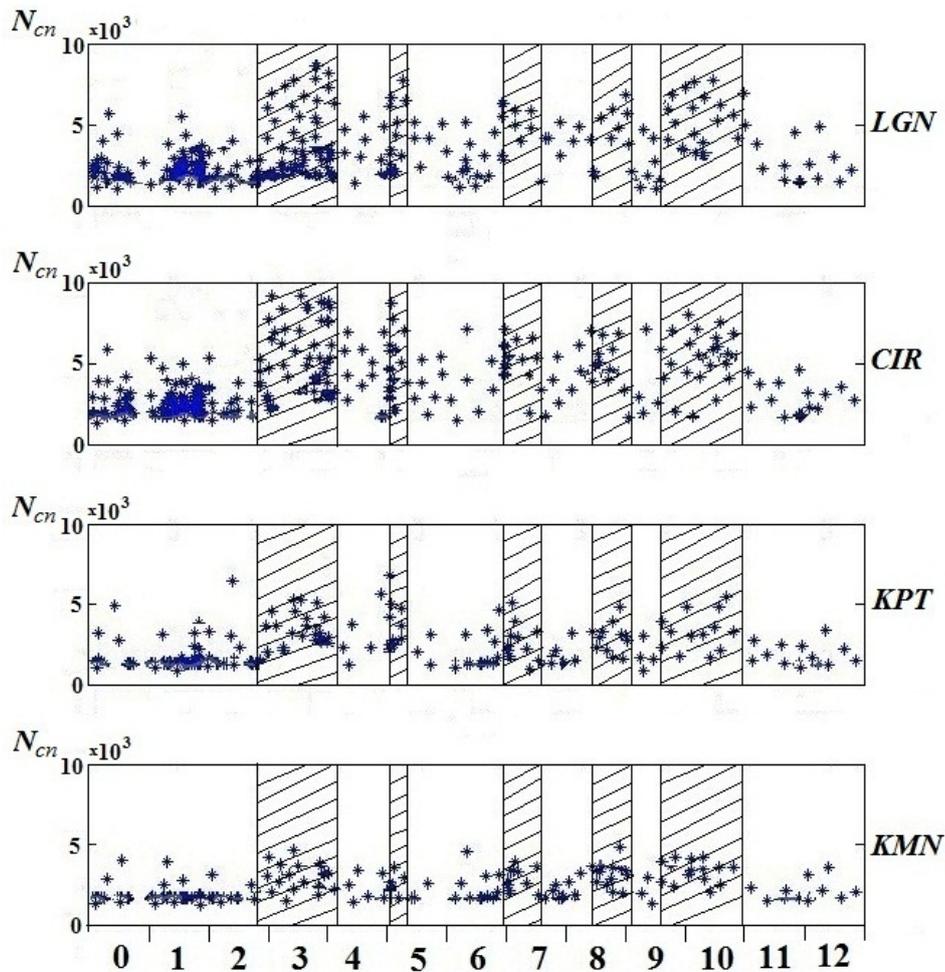


Рис. 4. Временной ход параметра N_{cn} для некоторых станций Ключевской группы вулканов. По оси абсцисс обозначено календарное время в годах и числа обозначают год, начиная с 2000 г.

ки параметра N_{cn} подтверждают вывод о том, что в период повышения вулканической активности вулкана Ключевской повышается по модулю и уровень параметра этого параметра.

Результаты по параметру $N_{ZH} = A_2^Z/A_2^H$, который характеризует разность амплитуд спектров на разных сейсмических каналах, приведены (рис. 5). Графики временного хода этого параметра аналогичны графикам временного хода параметра N_{cn} , показанного на рис. 4. Так же отмечается увеличение уровня этого параметра в периоды повышенной вулканической активности вулкана Ключевской в соответствии с таблицей 1. Так же отмечается, что амплитуды спектров на вертикальном сейсмическом канале были равны или больше соответствующих значений амплитуд на горизонтальных каналах.

Наконец покажем результаты по исследованию уровня микросейсм и вулканического дрожания. На рис. 6 показаны графики временного хода амплитуд микросейсм и вулканического дрожания по данным некоторых станций Ключевской группы вулканов. Как и ожидалось ранее, уровень амплитуд вулканического дрожания в периоды повышенной

активности вулкана Ключевской растёт. Также отмечается, что на станциях, которые расположены на склонах вулкана Ключевской, амплитуды вулканического дрожания выше, чем на более удалённых станциях. Эти два фактора отмечались и ранее. К тому же всегда отмечалось, что повышение уровня вулканического дрожания является прогностическим фактором подготовки существенного изменения в фазе вулканической активности конкретного вулкана. По приведённым результатам это не отмечается. Возможно потому, что надо производить не выборочное, а непрерывное измерение амплитуд вулканического дрожания.

Фазы повышенной ДП вулканической сейсмичности наблюдались ещё в 2000–2001 гг. Этот период не входит в табл. 1, так как в это время не наблюдалась активизация вулкана Ключевской, связанная с вершинным извержением. Однако активизация ДП вулканической сейсмичности отмечается по всем графикам временного хода изученных параметров.

Уровни вариаций всех изученных параметров в периоды повышенной ДП вулканической сейсмичности статистически значимы. При уровне значи-

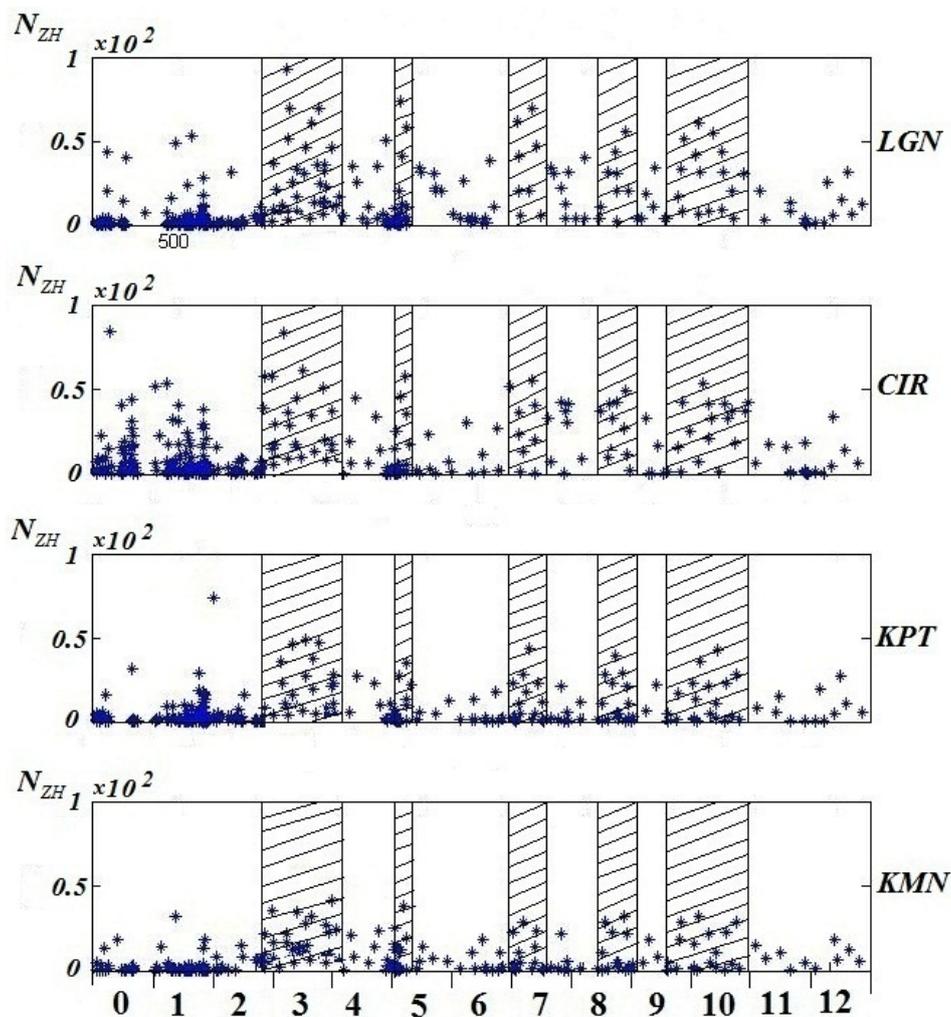


Рис. 5. Временной ход параметра N_{ZH} для некоторых станций Ключевской группы вулканов. По оси абсцисс обозначено календарное время в годах и числа обозначают год, начиная с 2000 г.

мости 0,1 наблюдаемые значения $Z_{набл.}$ по модулю во всех случаях значительно больше значения $Z_{кр.} = 2,58$. т. е. нулевая гипотеза о том, что средние значения параметров в фоновый период равна такому же значению в период повышенной активности вулкана Ключевской отвергается. Эти средние не равны.

Заключение

Таким образом, исследование параметров, характеризующие спектральные особенности ДП вулканических землетрясений, включая вулканическое дрожание, показало, что вариаций их связаны с изменением вулканической активности вулкана Ключевской. Непрерывное измерение приведённых параметров позволит использовать их в качестве прогностических признаков в изменениях хода вулканической активности действующих вулканов.

Список литературы

1. Болдырев С. А. Сейсмологические неоднородности активных окраин океана и их возможный тектонический эффект // Строение сейсмофокальных зон. М.: Наука, 1987. С. 189–198.
2. Запольский К. К. Частотно-временные поля и динамические характеристики очаговых функций сильных землетрясений // Докл. АН СССР. 1973. Том. 210, №6. С. 1338–1341.
3. Запольский К. К., Жбрыкунова Н. А., Жбрыкунов В. Я., и др., Спектральный состав Р – волн сильных землетрясений (по данным станции «Обнинск») // Землетрясения в СССР в 1969 г. М.: Наука, 1973. С. 220–227.
4. Запольский К. К., Нерсесов И. Л., Раутиан Т. Г., и др., Физические основы магнитудной классификации землетрясений: В 2 т. М., 1974. Т. I. С. 79–129.
5. Горельчик В. И., Зобин В. М., Токарев П. И. Сейсмичность вулканов // Вулканология и сейсмология. 1987. №6. С. 16–77.
6. Лемзиков В. К., Яцук В. В., Лемзиков М. В., и др., Спектральные особенности длиннопериодных вулканических сигналов вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология. 2011. № 1. С. 45–54.
7. Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. С. 77–146.

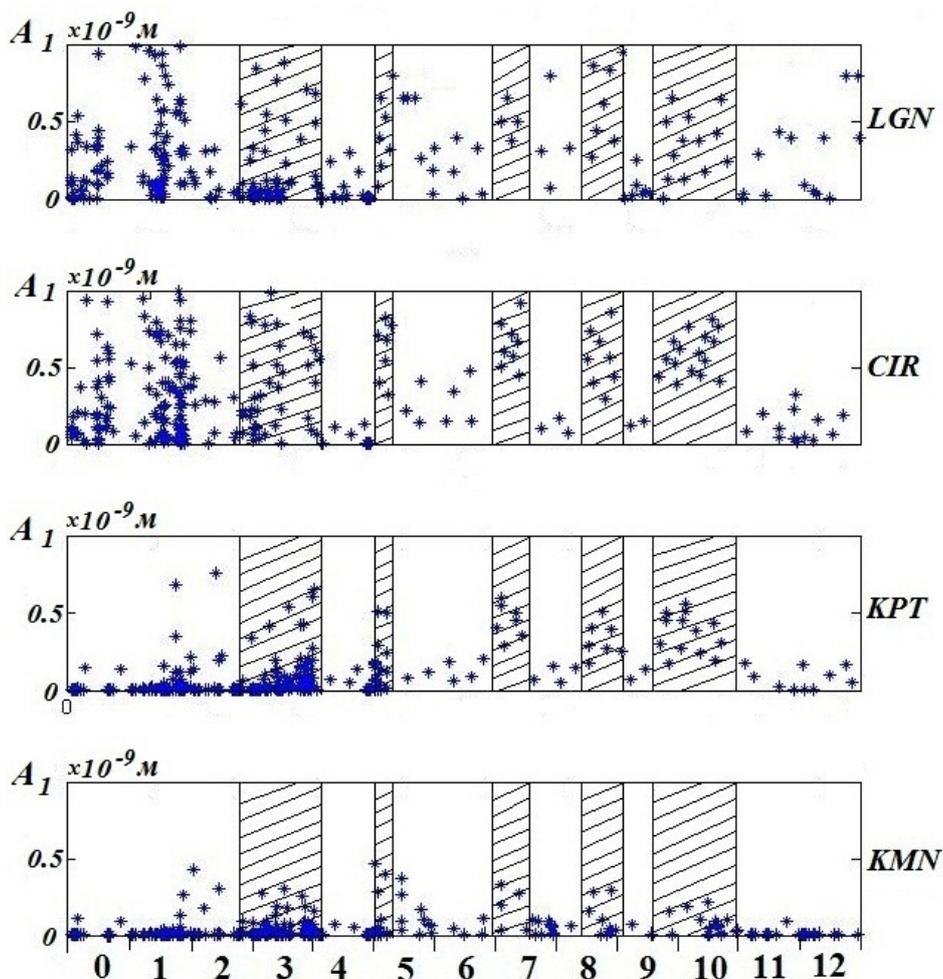


Рис. 6. Временной ход уровня амплитуд вулканического дрожания для некоторых станций Ключевской группы вулканов. По оси абсцисс обозначено календарное время в годах и числа обозначают год, начиная с 2000 г.

8. Сенюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевского и Безымянного на Камчатке. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 144 с.
9. Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1967. 118 с.
10. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
11. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатский землетрясений и проблема магнитуд М.:Наука, 1972. 116 с.
12. Чепкунас Л.С., Рогожин Е.А., Рыжикова М.И., и др., Мониторинг спектральных параметров продольных волн сильнейших землетрясений 2011 г. В Японии, о.Хонсю // Сейсмические приборы. 2012. Том. 48, № 1. С. 41–52.
13. Чепкунас Л.С., Рогожин Е.А. Спектральные параметры форшоков сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги как прогностический признак времени главного толчка // Докл. РАН. 2002. Том. 387, № 1. С. 108–110.
14. Чепкунас Л.С., Рогожин Е.А., Беникова В.И. Использование спектральных характеристик форшоков сильнейших землетрясений на Курило-Камчатской дуге для прогноза времени главного толчка // Russian Journal of Earth Sciences. 2001. Vol. 3, N 3.¹
15. Chouet B. A seismic model for the source of long-period events and harmonic tremor // Volcanic seismology. 1992. Vol. 87. P. 133–156.
16. Chouet B. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting // Nature. 1996. Vol. 380. P. 309–316.
17. Ishida M., Kanamori H. Temporal variation of seismicity and spectrum of small earthquake // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1980. Vol. 70. P. 509–527.
18. Minakami T. Fundamental research for prediction of the volcanic eruptions // Bull. Earthquake Res. 1960. Vol. 38. P. 497–544.
19. Utsu T. Spatial and temporal distribution of low-frequency earthquake in Japan // Phys. Earth. 1980. Vol. 28. P. 361–384.
20. Yuncha Z.A., Luzon F., Posadas A., et al., The Use of Ambient Seismic Noise Measurements for the Estimation of Surface Soil Effects: The Motril City Case (Southern Spain) // Pure appl. Geophys. 2004. T. 161. P. 1549–1559. doi 10.1007/sov024-004-2520-7.

¹<http://elpub.wdcd.ru/journals/rjes/v03/tje01064/tj01064.htm>