# ВАРИАЦИИ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН СВЯЗАННЫЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНА КИЗИМЕН

Лемзиков В. К. <sup>1</sup>, Шакирова А. А. <sup>2</sup>, Лемзиков М. В. <sup>1</sup>, Гарбузова В. Т. <sup>2</sup>, Ящук В.В. <sup>2</sup>, Дрознин Д. В. <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, <u>lemzikov@kscnet.ru</u>
<sup>2</sup>Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский

### Введение

Кизимен (Шапинская сопка) абсолютной высотой 2375 м является действующим вулканом Камчатки. Стратовулкан конической формы. Склоны покрыты рыхлыми пирокластическими образованиями, изрезаны барранкосами, осложнены лавовыми потоками крупноглыбового характера, ледниками и рытвинами. Последнее эксплозивное извержение вулкана происходило в 1928-1929 гг. Все остальное время вплоть до 2010 года вулкан находился в стадии активной фумарольносольфатарной деятельности. В середине ноября 2010 года началось новое извержение вулкана Кизимен, сейсмическая подготовка которого началась в апреле 2009 года. По сейсмическим данным за 2010 – 2013 гг. наблюдались спокойные периоды и периоды режима активизации этого вулкана. Уровень поглощения энергии сейсмических волн в вулканических зонах являются одним из важнейших параметров, характеризующий ее напряженно-деформированное состояние. Для изучения поглощения энергии сейсмических волн вулканических землетрясений в вулканогенных горных породах вулкана Кизимен в данной работе мы используем спектры этих волн, волновые формы которых изменяются в зависимости от влияния на них условий распространения в вулканогенных горных породах. Целью работы является определение параметров вулканогенных горных пород вулкана Кизимен в которых распространяются сейсмических волн вулканических землетрясений с использованием инверсионного метода предложенного в [7].

#### Исходные данные

В работе использованы вулканические землетрясения очаги, которых сконцентрированы в очень ограниченном пространстве под вулканом Кизимен. Это пространство определяется координатами:  $55,0^{\circ} < \phi < 55,3^{\circ}, 160,1^{\circ} < \lambda < 160,6^{\circ}$ , где обозначено  $\phi$  координата с.ш. и  $\lambda$  - в.д. Положение очагов выбранных вулканических землетрясения за 2010-2012 гг. в пространстве показано на рис.1. Хотя облако очагов землетрясений по глубине представляет единое целое, однако в методических целях они в диапазоне глубин под вулканом от -2 до 2 км (среднее значение 0 км)

составляли одну выборку, а в диапазоне — от 2 до 9 км - (среднее значение около 5 км) - другую.

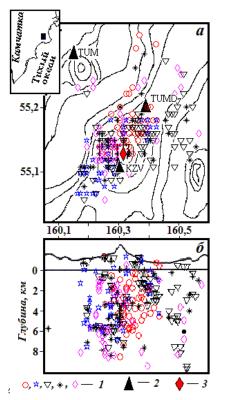


Рис. 1. Карта района исследования (a — горизонтальная и  $\delta$  — вертикальная проекции). На вкладке черным квадратом показано расположение исследуемого района на карте Камчатки. 1— очаги вулканических землетрясений соответственно в порядке следования за 2010, 2011, 2012<sub>1</sub>(1-3), 2012<sub>2</sub>(4-8) и 2012<sub>3</sub>(8-12 месяцы); 2 — сейсмические станции; 3 — вершина вулкана Кизимен в горизонтальной проекции.

Всего выбрано 116 вулканических землетрясения вулкана Кизимен за 2010-2012 г.г. с очагами на глубине 0 км, а на глубине 5 км – 193. В этих выборках энергетические классы землетрясений находятся в диапазоне от  $K_{S1,2}^{\phi 68}$ =5.8 до  $K_{S1,2}^{\phi 68}$ =6.3, где  $K_{S1,2}^{\phi 68}$ - шкала энергетических классов местных землетрясений [4]. Записи радиотелеметрических землетрясений выполнены сетью (PTCC) сейсмических станций Камчатского Геофизической службы (КФ ГС) РАН. Пункты регистрации сейсмических сигналов установлены на склоне и вблизи вулкана: «Кизимен» - KZV, «Тумрок» - ТUМ и «Тумрок-источники» -TUMD (см. рис. 1). На двух станциях: KZV и TUM – установлен трехкомпонентный комплект короткопериодных каналов на базе сейсмометров СМ-3 (T<sub>s</sub> = 1.2c) для регистрации скорости смещения грунта в полосе 0.8-20 Гц В работе использовались

сейсмограммы трех сейсмометрических каналов: двух горизонтальных (SHE, SHN) и одного вертикального (SHZ). Станция TUMD модернизирована в 2010-2011 гг. и оснащена современными цифровыми сейсмическими датчиками. В числе сейсмометрических каналов у станции TUMD есть два горизонтальных (BHE, BHN) и один вертикальный (BHZ), сейсмограммы этих сейсмометрических каналов использовались в работе.

В работе использовались спектры *S*-волн вулканических землетрясений вулкана Кизимен которые были взяты в небольшом временном интервале на сейсмометрических каналах всех перечисленных станций (см. рис. 1). Выбранный для спектрального анализа участок сейсмограммы, содержащий *S*-волны, не превышал по длительности более 4 сек, также как в работах [1,2]. На рис. 2 приведены примеры волновых форм вулканического землетрясения вулкана Кизимен, которые были получены во время последнего извержения. Интенсивность только *S*-волн на сейсмометрических каналах по всем станциям значительно превышает уровень микросейсм. На каждой станции выделяются вступления *S*-волн, которые только для станции KZV сравнимы по интенсивности с *P*-волнами. Поэтому по оценке сигнал/шум выбор участков поперечных волн для спектрального анализа более предпочтителен по сравнению с участками продольных волн. Обрабатывались записи вулканических землетрясений, у которых уровень полезного сейсмического сигнала *S*-волн не менее чем в три раза превышал уровень помех, т.е. микросейсм.

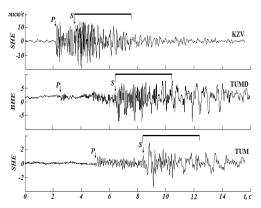


Рис. 2. Примеры волновых форм вулканического землетрясения вулкана Кизимен по записям станций KZV, TUMD и TUM, произошедшего 29 марта 2001 г. в 8:57 UTC, с  $K_{S1,2}^{\Phi 68}$  = 6,1, на глубине H=5,5 км под вулканом Кизимен. На записях всех станций отчетливо видны вступления P– и S–волн. Отношение сигнал/шум для участков S–волн превышает уровень шума в 3 раза. Уровень шума определялся по амплитуде микросейсм в небольшом временном интервале перед вступлением P–волн.

Выбранные участки сейсмограмм, содержащие *S*– волны вулканических землетрясений, перед спектральным преобразованием подвергались стандартным процедурам:

удалением нулевого и временного тренда, косинусообразной коррекцией концов анализируемого интервала записи сигнала. Сейсмический сигнал также корректировался на амплитудно-частотную характеристику сейсмометрического канала станции, где была выполнена регистрация. Экспериментальные спектры участков S-волн вулканических землетрясений для упрощения моделирования сглаживались кубическим сплайном в диапазоне частот 0.5–18  $\Gamma$ ц и сглаженный спектр определялся по точкам 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12  $\Gamma$ ц.

### Метод анализа

Метод анализа приведен в [7], здесь кратко отметим только некоторые основные положения использованного метода. Основа метода заключается в сравнении экспериментальных спектров S-волн вулканических землетрясений с теоретическими спектрами Брюна [8]. Модельные спектры корректируются на параметры расхождения и поглощения энергии сейсмических волн в среде их распространения. Эти параметры подбираются в заранее известных диапазонах их изменений путем перебора. В качестве поставленных целей, определяются угловая частота  $f_c$  очагового спектра вулканического землетрясения и параметры  $t^*$  и Q среды. Однако из-за неопределенности этих параметров удовлетворительного решения может быть не получено. В целях упрощения используем следующие обстоятельства. Во-первых, угловая частота  $f_c$  очагового спектра толчка имеет только одно значение по записям этого землетрясения всех станций. Во-вторых, для одной станции значения параметров  $t^*$  и Q для землетрясений с очагами практически в одном и том же месте должны быть приблизительно равными. Такие допущения значительно упрощают процедуры определения параметров на две подинверсии.

В первой подинверсии определяется угловая частота  $f_c$  очагового спектра по записям всех станций с использованием всего диапазона анализируемых частот. В этом случае выполняется подбор угловой частоты модельного спектра Брюна, скорректированный на значения поглощение сейсмических волн, и сравнение его с экспериментальными спектрами записи конкретного землетрясения по всем станциям. Во второй подинверсии уже при определенных значениях угловой

частоты  $f_c$  последовательно на фиксированных частотах определялись параметры  $t^*$ , Q по набору записей нескольких землетрясений одной станции. В каждом случае выполнялся подбор неизвестных параметров путем перебора и составлялись уравнения.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{1,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{2,2} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & a_{k,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_k \end{bmatrix}$$
 (1)

Столбец d для первой и второй подинверсий обозначает разницу между экспериментальными спектрами S-волн вулканических землетрясений и модельными спектрами. Члены диагонали определяются по соотношению сигнал/шум для каждой записи. Решение уравнений (1) выполняется методом SVD (Singular Value Decomposition) путем минимизиции. В первой подинверсии матричное уравнение составлялось с задачей определения угловой частоты  $f_c$ , а во второй - для определения параметров  $t^*$ , Q. Процесс нахождения параметров очага и среды повторялся, причем полученные значения в предыдущем решении служили ориентировочными данными для очередного решения. Этот переменный процесс последовательного вычисления первой и второй подинверсий продолжался до тех пор, пока не определялась наиболее оптимальная комбинация параметров, определяющих очаг землетрясений и среду. В нашем конкретном случае выполнялось 3–5 повторений для нахождения удовлетворительного решения.

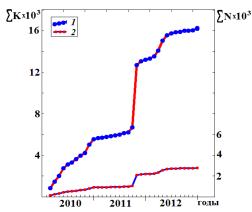


Рис. 3. Кумулятивный график накопления сейсмической энергии (1) и количества вулканических землетрясений (2) вулкана Кизимен в 2010 - 1012 гг.

В качестве индикатора наилучшего решения при выборе определенной комбинации параметров  $f_c$ ,  $t^*$ ,  $\boldsymbol{Q}$  использовалось свойство подбора линий к некоторой системе точек в пространстве, указанное в [10], где показано, что к системе точек на плоскости можно подобрать такую линию, для которой сумма расстояний от всех точек до линии будет минимальной.

Активность вулкана Кизимен в 2010 — 2012 гг. постоянно изменялось (рис 3). Выборки вулканических землетрясений выполнялись в соответствии с изменением уровня вулканической и сейсмической активностью вулкана Кизимен. Таким образом, выборка исходных данных является частью методических вопросов обработки. Выборки вулканических землетрясений сделаны в двух диапазонах глубин (как отмечено выше) в соответствии с изменением сейсмической активности вулкана и определяются как: 2010, 2011, 2012<sub>1</sub>, 2012<sub>2</sub> и 2012<sub>3</sub>.

# Результаты и обсуждение

Каждое вулканическое землетрясение вулкана Кизимен имеет характерный только для него очаговый спектр поперечных волн. Этот факт используется для определения угловой частоты  $f_c$  очагового спектра S-волн вулканического землетрясения. Для одного вулканического землетрясения вулкана Кизимен, с использованием записей всех трех сейсмических станций: KZV, TUM и TUMD – определяется угловая частота  $f_c$  очагового спектра S-волны.

При составлении уравнений необходимо использовать вполне определенные значения параметров поглощения сейсмических волн. Пределы значений станционных поправок  $t^*$  и добротностей среды Q при первоначальном расчете принимались по ранее полученным результатам [3, 5, 6, 7, 10]. Пределы значений угловой частоты  $f_c$  спектров оцениваются по записям землетрясений. Это часть обработки составляет первую подинверсию.

Вторая подинверсии использовалась для вычисления параметров  $t^*$ , Q отдельно на каждой частоте с использованием данных только одной станции. Значение угловой частоты  $f_c$  очагового спектра для каждого землетрясения в этом случае используется по результатам первой подинверсии. Уравнение (1) составлялось по записям нескольких землетрясений только одной станции. Значение

станционной поправки  $t^*$  должно быть одинаковым для данной станции по записям любых землетрясений. Значение параметра Q по одной станции с очагами, расположенными практически в одном и том же месте полупространства, должны быть так же примерно равными по всем записям вулканических землетрясений. Эти начальные условия упрощают поиск решений в условиях многих неопределенностей. И специально для соблюдения этих условий делались выборки вулканических землетрясений вулкана Кизимен. С этой целью все вулканические землетрясения с очагами в конусе вулкана Кизимен и до глубины 9 км разделены на две группы с граничной глубиной 2 км. Дополнительное деление их в диапазоне от 2 до 9 км не производилось. Разные результаты для поверхностных вулканических землетрясений, тем более с очагами в конусе вулкана, от таких же с очагами на глубинах 4-6 км вполне ожидаемые. Исходные данные позволили сделать эти выборки вулканических землетрясений. Выборка за 2010 год является дополнительной ко всем остальным, так как в этот год работали только две станции. В 2012 году сделаны три выборки вулканических землетрясений, они помечены соответственно индексами. Это определялось различным уровнем сейсмической активности в этом году.

Спектральные станционные поправки  $t^*$  характеризуют спектральные свойства осадочного слоя под сейсмической станцией. На графиках рис.4 показаны значения станционных поправок для трех станций по двум диапазонам глубин по всем выборкам.

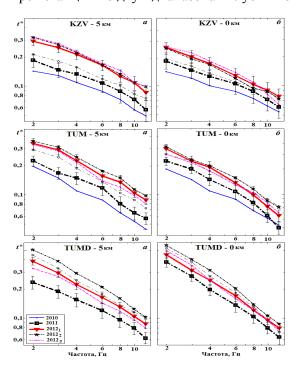


Рис.4 График спектральных станционных поправок  $t^*$  по двум диапазонам глубин для станции KZV, TUM и TUMD по выборкам 2010, 2011, 2012<sub>1</sub>, 2012<sub>2</sub> и 2012<sub>3</sub>.

Отмечается существенное изменение станционных поправок  $t^*$  в 2012 году по сравнению с предыдущими годами для выборок со средней глубиной очагов 5 км. Эти изменения на некоторых частотах превосходят уровень среднеквадратичного отклонения. Эта тенденция отмечается и для выборок со средней глубиной очагов 0 км. Но в этом случае различие статистически плохо подтверждается.

Учитывая, что на концах частотных интервалов возможны искажения, выполним расчет статистической значимости различий станционных поправок  $t^*$  для станции KZV по выборкам 2011 и 2012, для частоты 6 Гц для выборок со средней глубиной очагов 5 км. Среднее значение для точки 6 Гц для 2011  $t^*$ =0.108, среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  = 0.041. Среднее значение для точки 6 Гц для 2012,  $t^*$ =0.168, среднее

квадратичное отклонение  $\sigma=0.036$ . При уровне значимости  $\alpha=0.01$  проверим нулевую гипотезу о том, что средние значения станционных поправок  $t^*$  за 2011 и  $2012_1$  равны. Размеры выборок равны 23 и 27 соответственно. Определим конкурирующую гипотезу о том, что эти средние не равны. По таблицам функций Лапласа находим  $\mathbf{z}_{\rm kp}=2.58$ . По приведенным данным  $\mathbf{z}_{\rm haбn}=4.95$ . Так как  $\mathbf{z}_{\rm haбn}>\mathbf{z}_{\rm kp}$  то нулевую гипотезу отвергаем. Средние значения станционных поправок  $t^*$  за 2011 и и  $2012_1$  не равны. Следует отметить, что уменьшение параметра  $t^*$  обозначает уменьшение поглощения сейсмических волн в среде, в то же время уменьшение параметра  $\mathbf{Q}$  обозначает увеличение поглощения сейсмических волн в среде.

Большое увеличение по модулю параметра  $t^*$  означает увеличение поглощающих свойств поверхностных слоев вулкана Кизимен в 2012 году по сравнению с предыдущими годами. В августе 2011 года началось существенное увеличение вулканической и сейсмической активности вулкана Кизимен. К сожалению, представленные в работе исходные данные не позволяют проследить за предвестниковыми изменениями параметра  $t^*$  в течение 2011 года. Данные после августа 2011 года по техническим причинам практически не обработаны. Но данные за 2012 год показывают, что произошли существенные изменения в поверхностных слоях вулкана Кизимен после августа 2011 года.

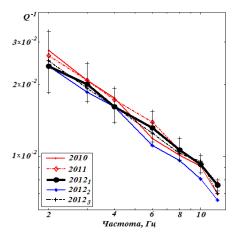


Рис.5 Значения параметра добротности Q по станциям вблизи вулкана Кизимен по данным станции KZV по вулканическим землетрясениям с очагами на глубине 5 км.

Представленный метод определения добротности среды, как и многие другие, позволяют определять только среднее значение параметра Q по всему пути сейсмического луча. Поэтому для более дальних гипоцентральных расстояний значение параметра Q больше, так как в этом случае в более глубокие зоны среды проникают сейсмические волны. Таким образом, вполне очевидно, что для станций TUMD и TUM

значение параметра Q по модулю на всех частотах больше по сравнению со станцией KZV. Это отличие в значениях параметра Q по другим станциям по отношению к KZV получено в результате расчетов; больше никаких особых отличий не получено.

На рис. 5 приведена зависимость параметра добротности Q от частоты колебаний сейсмических волн для станции KZV по выборкам со средней глубиной очагов 5 км. При сравнении значений параметров  $t^*$  (рис. 4) и Q (рис. 5) не отмечается каких-либо изменений в оценках параметра Q связанных с увеличением вулканической активности вулкана Кизимен во второй половине 2011 года.

Анализа рис. 4 показал, что наиболее сильное влияние на очаговые спектры вулканических землетрясений вулкана Кизимен оказывают грунтовые условия под сейсмическими станциями. Т.е изменение параметра  $t^*$  оказывает более существенное влияние на очаговые спектры S-волн вулканических землетрясений, чем изменение параметра Q. И это вполне понятно, так как анализировались поверхностные вулканические землетрясения, сейсмические волны которых распространяются в поверхностных слоях вулканической зоны вулкана Кизимен.

#### Заключение

Таким образом, предложенный способ анализа формы спектров вулканических землетрясений позволяет оценить поглощающие свойства вулканогенных горных пород не только на пути распространения сейсмических волн, но и в верхних слоях под станциями (станционные поправки). Получено увеличение поглощающих свойств среды под станцией в период увеличения вулканической активности вулкана Кизимен в августе 2011 и 2012 гг.

## Список литературы

- 1. Горельчик В.И., Гарбузова В.Т. Сейсмичность Ключевского вулкана как отражение современной магматической деятельности // Геодинамика и вулканизм Курило Камчатской островодужной системы. П К.: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 352-370.
- 2. Горельчик В.И., Чубарова О.С., Гарбузова В.Т. Сейсмичность района Северной группы вулканов Камчатки 1971-1983 гг. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4/5. С. 54 75.
- 3. Лемзиков В.К., Гарбузова В.Т. Метод оценки поглощения сейсмических волн местных вулканических землетрясений под вулканом Ключевской // Тез. докл. Ежегодная конференция, посвященная дню вулканолога, 30 31 марта 2009 года. П–К.: ИВиС ДВО РАН, 2010. С. 167–177.
- 4. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука. 1972. 116 с.
- 5. Andrews D.J. Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size // Earthquakes Source Mechanics. W.:American Geophysical Union, 1986. P. 259 267.
- 6. Anderson J.G. Implication of attenuation for studies of the earthquake source // Earthquakes Source Mechanics. W.:American Geophysical Union, 1986. P. 311 319.
- 7. Boatwright J., Fletcher J.B., Fumal T.E. A general inversion scheme for source, site and propagation characteristics using multiply recorded sets of moderate-sized earthquakes // Bulleten Seismological Society of the American. 1991. V. 81.  $N_2$  5. P. 1754 1782.
- 8. Brune J. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research. 1970. V.75. N 6. P. 4997 5009.
- 9. Hough S.E., Anderson J.G., Brune J. et al. Attenuation near Anza, California // Bulleten Seismological Society of the American. 1988. V. 78. N 2. P. 672 691.
- 10. Pearson K. On lines and planes of closest fit systems of points in space // Philosophical Magazin. 1901. No 2. P. 559 572.