

ПОГЛОЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В КОНУСЕ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ

Лемзиков В. К.¹, Лемзиков М. В.¹, Гарбузова В. Т.²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, lemzikov@kscnet.ru

²Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Введение

Одной из важнейших задач является оценка поглощения энергии сейсмических волн в вулканогенных горных породах вулканических зон. На спектрах смещения почвы сейсмических сигналов вулканических землетрясений определяются все те же элементы, которые отмечаются на аналогичных спектрах сейсмических сигналов тектонических землетрясений: плоская низкочастотная часть, угловая частота и спад высокочастотной части по некоторой степени частоты. Учитывая это, возможно применение в качестве модели очагового спектра вулканического землетрясения модель Брюна, предложенную в [13] для спектров тектонических землетрясений. Эта модель уже была применена к записям вулcano-тектонических землетрясений вулкана Ключевской [3], при анализе микроземлетрясений вулкана Этна (Италия) [16] и при оценке параметров очагов вулканических землетрясений вулкана Этна (Италия) в период его извержения в 1991-1993 гг. [18].

Целью работы является применение модели спектра Брюна к спектрам S-волн вулканических землетрясений вулкана Ключевской. В результате этого применения определить параметры вулканогенных горных пород на пути распространения сейсмических волн и в верхних слоях под станциями (станционные поправки) с использованием инверсионного метода предложенного в [12].

Исходные данные

Исходными данными в работе являются вулканические землетрясения вулкана Ключевской, которые можно отнести ко 2-му или 3-му типам по классификации П.И. Токарева [6,7]. Очаги выбранных вулканических землетрясений расположены в очень ограниченном объеме под вулканом Ключевской. Этот объем определяется на земной поверхности координатами: широтой $56.06^{\circ} < \varphi \text{ с.ш.} < 56.10^{\circ}$; долготой: $160.60^{\circ} < \lambda \text{ в.д.} < 160.70^{\circ}$. Диапазон энергетического класса выбранных землетрясений составляет $5.5 < K_{S1,2}^{\phi 68} < 6.3$, где $K_{S1,2}^{\phi 68}$ - шкала энергетических классов землетрясений согласно работе [8]. Вулканические землетрясения выбирались в нескольких интервалах глубин в интервале отмеченных координат в основании вулкана Ключевской. В диапазоне глубин: $-0.4 < H < 0.4$, где H глубина очагов в км, было выбрано 114 событий. В диапазоне глубин: $-1.2 < H < -0.4$ было выбрано 113 событий. В диапазоне глубин: $0.4 < H < 1.2$ было выбрано 42 события (рис. 1). Все землетрясения выбирались за период 2000 – 2004 гг. Обозначим эти три выборки как: -0.8 км , 0 км и $+0.8 \text{ км}$ – по признаку среднего положения глубин очагов вулканических землетрясений.

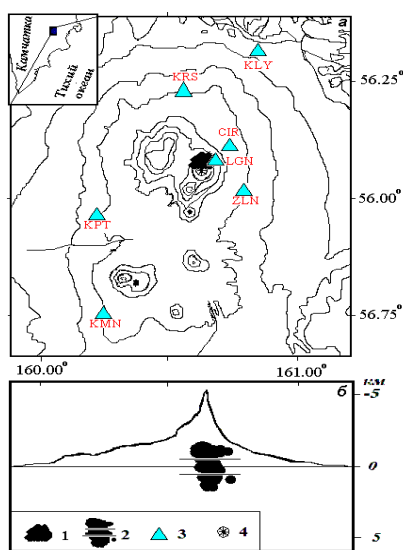


Рис. 1 Карта района исследования. *a* – горизонтальная, *b* – вертикальная проекции по линии запад-восток через вулкан. 1 – область эпицентров вулканических землетрясений, которые в горизонтальной проекции почти совпадают с вершиной вулкана Ключевской; 2 – очаги этих землетрясений в вертикальной проекции в трех выборках (см. текст); 3 – сейсмические станции; 4 – вершина вулкана в горизонтальной проекции. На врезке, расположение горизонтальной проекции на карте Камчатки.

Записи вулканических землетрясений, выполнены сетью радиотелеметрических сейсмических станций (далее, РТСС) Камчатского Филиала Геофизической Службы Российской Академии Наук (КФ ГС РАН). Использовались материалы РТСС: «Цирк» – (CIR), «Крестовский» – (KRS), «Логинов» – (LGN), «Зеленая» – (ZLN), «Ключи» – (KLY), «Каменистая» – (KMN) и «Копыто» – (KPT). На всех РТСС установлен трехкомпонентный комплект короткопериодных каналов на базе сейсмометров СМ–3 ($T_s = 1,2\text{с}$) для регистрации скорости смещений грунта в полосе частот 0.8 - 20 Гц. В работе использовались сейсмограммы трех сейсмометрических каналов: двух горизонтальных (SHE, SHN) и одного вертикального (SHZ). Частота дискретизации вулканических

сейсмических сигналов на РТСС равна 128 сек^{-1} . Длительность участка для спектрального анализа сейсмограмм вулканических землетрясений, содержащего S-волны, не превышала по длительности 4 сек [1,2] (рис.2).

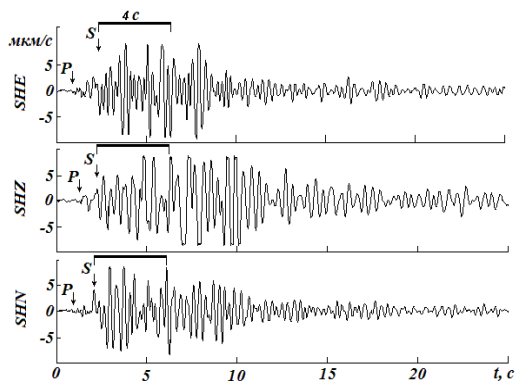


Рис. 2 Пример записи вулканического землетрясения 2-го типа, произошедшего 5 августа 2001 г. в 19:48 UTC, с $K_{S1,2}^{\Phi 68} = 5.7$, на глубине $H=0.36 \text{ км}$ под вулканом Ключевской, зарегистрированного станцией LGN. Пояснения в тексте.

Сейсмограммы вулканических землетрясений корректировались на амплитудно-частотные характеристики сейсмометрических каналов РТСС. Перед спектральным преобразованием участков сейсмограмм, содержащих S-волны, выполнялась стандартная процедура: удаление нулевого и временного

тренда, косинусообразная коррекция концов анализируемого интервала записи сейсмического сигнала. Экспериментальные спектры участков S-волн вулканических землетрясений для упрощения моделирования сглаживались кубическим сплайном в диапазоне частот 0.5 – 18 Гц и сглаженный спектр оценивался в точках с частотами: 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12 Гц.

Метод анализа

В работе используется инверсионный метод анализа к волновым формам вулканических землетрясений вулкана Ключевской. Применение этого метода к волновым формам тектонических землетрясений подробно изложено в работе [12]. И к вулканическим землетрясениям в работах, которые сданы в печать в 2010 и 2013 гг. Кратко этот метод для вулканических землетрясений изложен в статье (Лемзиков В.К. , Шакирова А.А. , Лемзиков М.В., Гарбузова В.Т., Яшук В.В. , Дроздин Д.В.) представленного сборника. Все же отметим некоторые детали метода анализа вулканических землетрясений, применительно к поискам параметров вулканогенных горных пород, в которых распространяются сейсмические волны вулканических землетрясений и в верхних слоях под станциями (станционные поправки).

Основа метода заключается в сравнении экспериментальных спектров S-волн вулканических землетрясений с теоретическими спектрами Брюна [13]. Теоретические спектры необходимо скорректировать на эффекты поглощения энергии сейсмических волн в среде в которой они распространяются. Можно наоборот, экспериментальные спектры сейсмических волн скорректировать на те же эффекты. В любом случае, скорректированные спектры можно уже сравнивать. Разница между модельными и экспериментальными спектрами показывает степень соответствия их друг другу. Наилучшее соответствие устанавливает значения коэффициентов поглощения энергии сейсмических волн в среде их распространения.

Коэффициенты поглощения энергии сейсмических волн подбираются для использования в расчетах. В числе этих искомых величин значения добротности среды, параметр Q , и станционной поправки, этот параметр обозначен как t^* . Пределы значений этих параметров известны по литературным данным. Однако при расчетах значение параметра Q выбирались для частот от 2 до 12 Гц в намеренно широком диапазоне изменений для вулканических сред: 20 до 500. Так же для значений параметра t^* выбран диапазон – от 0.001 до 0.6. Шаг расчетов по параметру ΔQ равен 1, а по параметру $\Delta t^* = 0.001$. Выбраны для расчетов запредельные значения обоих параметров и очень маленькие шаги их изменения. Это значительно увеличивает процесс вычисления на компьютере, даже некоторые вычисления выполняются с избыточной детальностью. Однако, анализ полученных результатов позволяет безошибочно выбрать наиболее оптимальные значения искомых параметров.

Для поиска параметров среды в условиях многих неопределенностей будем выбирать очаги землетрясений примерно в одной точке пространства. В этом случае возможно составление переопределенной системы уравнений, которая позволит определить неизвестные параметры.

Результаты моделирования

Минимальная ошибка определения положения в пространстве очага вулканического землетрясения в условиях расстановки сейсмических станций около вулкана Ключевской составляет

± 300 м (рис.1). Максимальная такая ошибка оценивается на порядок больше. Минимальное гипоцентральное расстояние от очагов вулканических землетрясений вулкана Ключевской, использованных в работе, до станции составляет 3–4 км (LGN, CIR). Максимальное гипоцентральное расстояние – почти на порядок больше (KMN, KLY и KPT). Таким образом, в первом случае сейсмические волны от очага до станции распространяются в поверхностных осадочных слоях, а во втором – преимущественно в поверхностных слоях геологического фундамента вулкана Ключевской. Поэтому влияние параметра t^* на поглощение энергии сейсмических волн при их распространении в данных конкретных условиях больше, чем параметра Q .

Опираясь на минимальные ошибки определения положения в пространстве очага вулканического землетрясения, будем считать, что все они в объемном пространстве с диаметром в 800 м определяются примерно в одной точке. С этой целью выполнены выборки вулканических землетрясений вулкана Ключевской. Все использованные в работе вулканические землетрясения по значению глубины очагов разделены на три группы, как отмечено ранее. С одной стороны каждая такая выборка очагов вулканических землетрясений, содержала достаточное для статистического анализа объемы данных, что позволяло получить устойчивое решение при поиске параметров поглощения энергии сейсмических волн в среде. С другой стороны преследовалась цель сравнения станционных поправок t^* , полученных в разных выборках при различном положении в пространстве очагов вулканических землетрясений.

В первой подинверсии по набору записей по нескольким станциям определялась угловая частота f_c очагового спектра S -волн вулканического землетрясения, используя весь диапазон частот. При вычислении параметра f_c очагового спектра землетрясения необходимо использовать некоторые значения параметров t^* и Q . Для района вулкана Ключевской для этих целей использованы результаты из [4, 9,10,11,14,15,16,17].

Во второй подинверсии определялись параметры t^* , Q отдельно на каждой частоте с использованием данных только одной станции. При этом система уравнений 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. Значение угловой частоты f_c очагового спектра для каждого землетрясения в системе уравнений используется по результатам первой подинверсии. Значения параметров t^* , Q , рассчитанные во второй подинверсии для каждой станции по всему диапазону частот спектра, используются для повторения расчета первой подинверсии, уточняя значение параметра f_c для каждого землетрясения. В нашем конкретном случае выполнялось 3–5 повторений для нахождения удовлетворительного решения.

На рис. 3 показано сравнение спектральных станционных поправок t^* по выборкам: –0,8 км, 0 км и +0,8 км – для станций Ключевской группы.

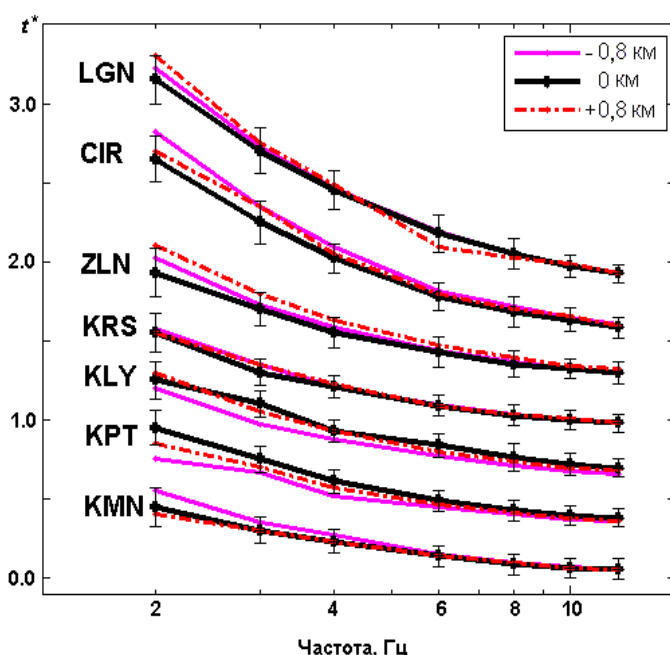


Рис. 3 Станционные поправки по станциям Ключевской вулканической зоны по разным выборкам. Результаты по станциям произвольно смещены по вертикали.

На рис. 3 значение среднего квадратического отклонения (СКО) приведено только для выборки 0 км. По другим выборкам значения СКО примерно такие же соответственно для каждой станции. Для каждой станции значения параметра t^* по всем трем выборкам: –0.8 км, 0 км и +0.8 км – не имеют отличий. Этот факт ожидался и только подтвержден экспериментом. На ближайших к вулкану Ключевской станциях (LGN, CIR) и, следовательно, на малых гипоцентральных расстояниях проявляется

более сильная зависимость параметра t^* от частоты, чем на более удаленных станциях (KMN, KPT, KLY). Рис. 3 не позволяет сравнить станционные поправки t^* станций между собой, так как спектральные графики произвольно смещены по вертикальной координате.

На рис. 4 показано сравнение спектральных станционных поправок t^* между станциями Ключевской группы, полученные по вулканическим землетрясениям. График показывает абсолютные значения станционных поправок t^* для каждой станции. Самые большие значения спектральных станционных поправок t^* отмечается по станции (LGN). Далее по порядку следует станция (CIR). В целом, самые большие значения станционных поправок имеют самые ближние к вулкану Ключевской станции. В то же время для станций (KMN, KPT, KLY) и даже (KRS) разницы в спектральных станционных поправках практически не наблюдается. Небольшие отличия их незначительны. Результаты по станции (ZLN) занимают промежуточное положение.

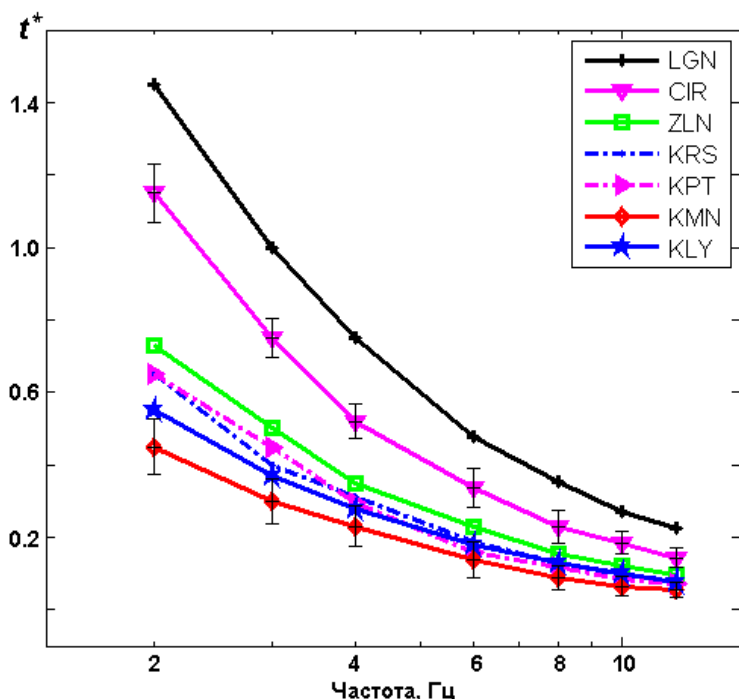


Рис. 4 Станционные поправки по станциям Ключевской вулканической зоны.

На рис. 5 приведены оценки добротности Q полученные по вулканическим землетрясениям. Самые низкие значения Q получены для станции (LGN). Для станций (CIR, ZLN и KRS) получены одинаковые значения Q . Для станций (KMN, KPT и KLY) значения Q показывают, что сейсмические волны проникают в более консолидированные слои среды.

На этом рисунке же приведены для сравнения литературные данные. Типичный диапазон изменений параметра Q для вулканов Redoubt (США, Аляска) и Kilauea (США, Гавайские острова) для частот колебаний около 1 Гц находится между 20 и 50. Для вулканов в Kusatsu-Shirane (Япония) и Galeras (Южная Америка)

на этих же частотах нижняя граница изменений параметра Q равна 100 [15]. Вулканические землетрясения вулкана Ключевской подобны по внешнему виду таким же землетрясениям вулканов Redoubt (США, Аляска) и Kilauea (США, Гавайские острова). Оценки параметра Q в диапазоне между 20 и 50 для частотной полосы колебаний около 1 Гц этих вулканов согласуются с такими же оценками для вулкана Ключевского по станциям (LGN, CIR, KRS, ZLN).

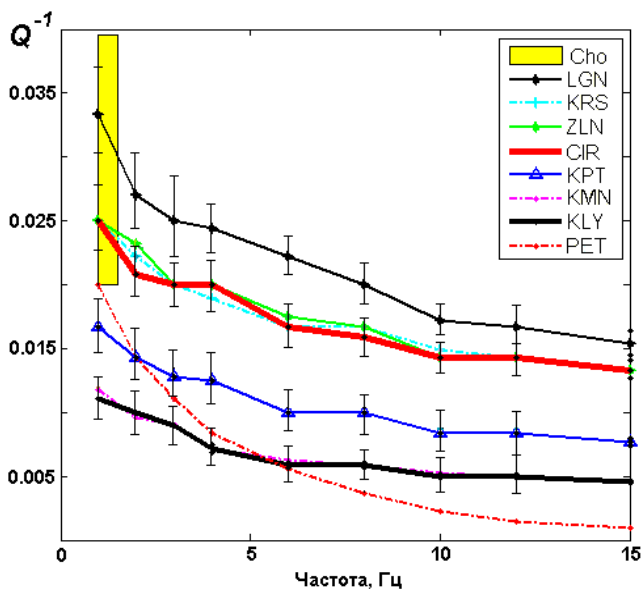


Рис. 5 Значения параметра добротности Q по станциям для вулканических землетрясений с очагами в конусе и основании вулкана Ключевской. Пояснение в тексте.

На рис. 5 приведены данные параметра Q для Восточно-Камчатской сейсмоактивной зоны (PET), полученные по тектоническим землетрясениям [5]. Данные приведены для сравнения с результатами, полученными в районе вулканогенных горных пород вулкана Ключевской. На низких частотах можно найти общие черты, но на частотах выше 5 Гц наблюдается большое различие.

Заключение

В работе показано, что модель спектра Брюна тектонических землетрясений может быть применена к спектрам *S*-волн вулканических землетрясений вулкана Ключевской. Предложен метод, который позволяет сделать оценку поглощения энергии сейсмических волн вулканических землетрясений и станционных поправок под станцией в районе вулканической зоны вулкана Ключевской. Получены оценки станционных поправок. Наиболее сильное влияние на поглощение энергии сейсмических волн вулканических землетрясений оказывают поверхностные слои вулканической платформы.

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. Зобин В.М. Динамика очага вулканических землетрясений. М.: Наука, 1979. 92 с.
4. 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.
5. Лемзиков В.К. Поглощение и рассеяние поперечных сейсмических волн в литосфере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2007. № 3. С. 50 – 63.
6. Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118 с.
7. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1986. 164 с.
8. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило–Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
9. Anderson J.G., Hough S.E. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1984. V.74. № 5. P. 1969 – 1994.
10. Anderson J.G. Implication of attenuation for studies of the earthquake source // Earthquakes Source Mechanics. W.: American Geophysical Union, 1986. P. 311 – 319.
11. 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.
12. 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 // Bulletin Seismological Society of the American 1991. V. 81. № 5. P. 1754 – 1782.
13. Brune J. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research. 1970. V.75. № 6. P. 4997 – 5009.
14. Castro R.R., Anderson J.G., Singh S.K. Site response, attenuation and source spectra of S waves along the Guerrero, Mexico, subduction zone // Bulletin Seismological Society of the American. 1990. V. 80. № 6. P. 1481 – 1503.
15. Chouet B. Volcano Seismology // Pure Appl. Geophys. 2003. V. 160. № 2. P. 739 – 788.
16. Centamore C., Montalto A., Patane G. Self-similarity and scaling relations for microearthquakes at Mt. Etna volcano (Italy) // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1997. V. 103. P. 165 – 177.
17. Hough S.E., Anderson J.G., Brune J. et al. Attenuation near Anza, California // Bulletin Seismological Society of the American. 1988. V. 78. № 2. P. 672 – 691.
18. Patane G., Coco G., Carrao M., Imposa S., Montalto A. Source parameters of seismic events at Mount Etna volcano, during the outburst of the 1991–1993 eruption // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1995. V. 89. P. 149 – 162.