

УДК 550.344.43

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ОЧАГОВЫХ СПЕКТРОВ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ К НЕКОТОРЫМ ТИПАМ ВУЛКАНИЧЕСКИХ (НА ПРИМЕРЕ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ)

© 2014 г. В. К. Лемзиков

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,  
e-mail: lemzikov@kscnet.ru*

Поступила в редакцию 16.04.2012 г.

Основой работы является применение моделей спектров тектонических землетрясений к вулканотектоническим (ВТ) и глубоким длиннопериодным вулканическим (ГД) землетрясениям. Для этих землетрясений проводится одновременный подбор параметров очаговых спектров и среды распространения сейсмических волн. Получены предварительные результаты, характеризующие модели очаговых спектров вулканических землетрясений вулкана Ключевской. Предложенный метод позволяет дополнительно оценивать параметры поглощения сейсмических волн, которые важны для оценок напряженно-деформированного состояния вулканической среды.

DOI: 10.7868/S0203030614020059

### ВВЕДЕНИЕ

Оценки параметров очага землетрясений являются одной из важнейших задач сейсмологии, особенно, для землетрясений средних и малых магнитуд. Размеры, скорость сдвига и другие параметры очага — по спектру смещения сейсмических волн определяются угловой частотой, уровнем низкочастотной и коэффициентом спада высокочастотной его частей. Однако влияние условий распространения сейсмических волн могут исказить спектры этих волн до такой степени, что выделение параметров очага может оказаться невозможным по записям землетрясений на станциях. Геометрическое расхождение и поглощение на пути пробега сейсмических волн существенно влияет на спектральные характеристики землетрясений [Boatwright, 1978; Boatwright et al., 1991; Moore, 2003; Hough et al., 1988; Humphrey, Anderson, 1990]. Выяснилось также, что даже поглощение сейсмических волн в поверхностных слоях грунтов непосредственно под станцией существенно искажает очаговый спектр землетрясения [Anderson, 1986; Field, Jacob, 1995; Hough et al., 1988]. Этот эффект получил название “станционной поправки”, который, к тому же, зависит от частоты колебаний почвы.

В целях определения параметров очага используются различные методы, в том числе метод спектральных отношений. В этих целях часто применяется отношение спектра сильного к спектру слабого землетрясения. Также применяется отношение спектров землетрясений, записанных на соседних участках, причем один из них должен иметь твердые, известные грунты. Неопределенность метода спектральных отношений состоит в том, что они

могут интерпретироваться только условно, например, предполагая, что низкочастотный очаговый спектр более слабого землетрясения является приблизительно постоянным или, что участок с твердыми породами почти не поглощает сейсмические волны [Boatwright et al., 1991].

В работах [Boatwright, 1985; Boatwright et al., 1991; Castro et al., 1990; Fletcher, Boatwright, 1991; Hough et al., 1988] применяется инверсная схема, которая позволяет по записям землетрясений на станциях получать очаговые спектры, параметры добротности среды и станционные поправки. В работе [Su et al., 1992] значения станционных поправок, определенные рекурсивным инверсным методом с использованием кода-волн, зависят от локальных особенностей поглощающих свойств грунтов в пунктах регистрации землетрясений. В работе [Boatwright et al., 1991] для сокращения количества неизвестных параметров процедура инверсии разделена на две взаимозависимые части, или подинверсии. Первая подинверсия использует весь диапазон частот для оценок параметров очага и поглощения сейсмических волн, в то время как вторая находит решение для очага и станционных поправок независимо для каждой частоты. Модель двухступенчатой инверсии позволяет одновременно определять параметры очага и физические свойства среды под станциями, причем такая взаимозависимость приводит к необходимости вычисления их значений, только при совместном анализе. Эти две подинверсии дополняют друг друга так, чтобы повторяющийся процесс, который находит решение поочередно в каждой подинверсии, был бы сходящимся.

Целью работы является определение параметров очагов некоторых типов вулканических землетрясений вулкана Ключевской методом инверсии [Boatwright et al., 1991]. Определение параметров среды распространения сейсмических волн является необходимым дополнительным условием нахождения параметров очагов с использованием этого метода.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Большое разнообразие вулканических сейсмических сигналов обуславливается многообразием проявления вулканической активности вулканов. С одной стороны, вулканическая активность проявляется на земной поверхности и видна визуально: выбросы паро-газовой смеси и лавовые потоки. Эти явления бывают различной силы в диапазоне от едва заметных до катастрофических. С другой – движение жидкого и газообразного вулканического вещества на земной поверхности не проявляется и происходит только внутри вулканических каналов и трещин. Все эти явления генерируют сейсмические сигналы различных типов [Токарев, 1966, 1986; Minakami, 1974]. По классификации Токарева и Минаками имеется явное отличие 1-го типа вулканических землетрясений от всех остальных. Последние имеют много общих свойств и отличаются по особенностям вулканической активности.

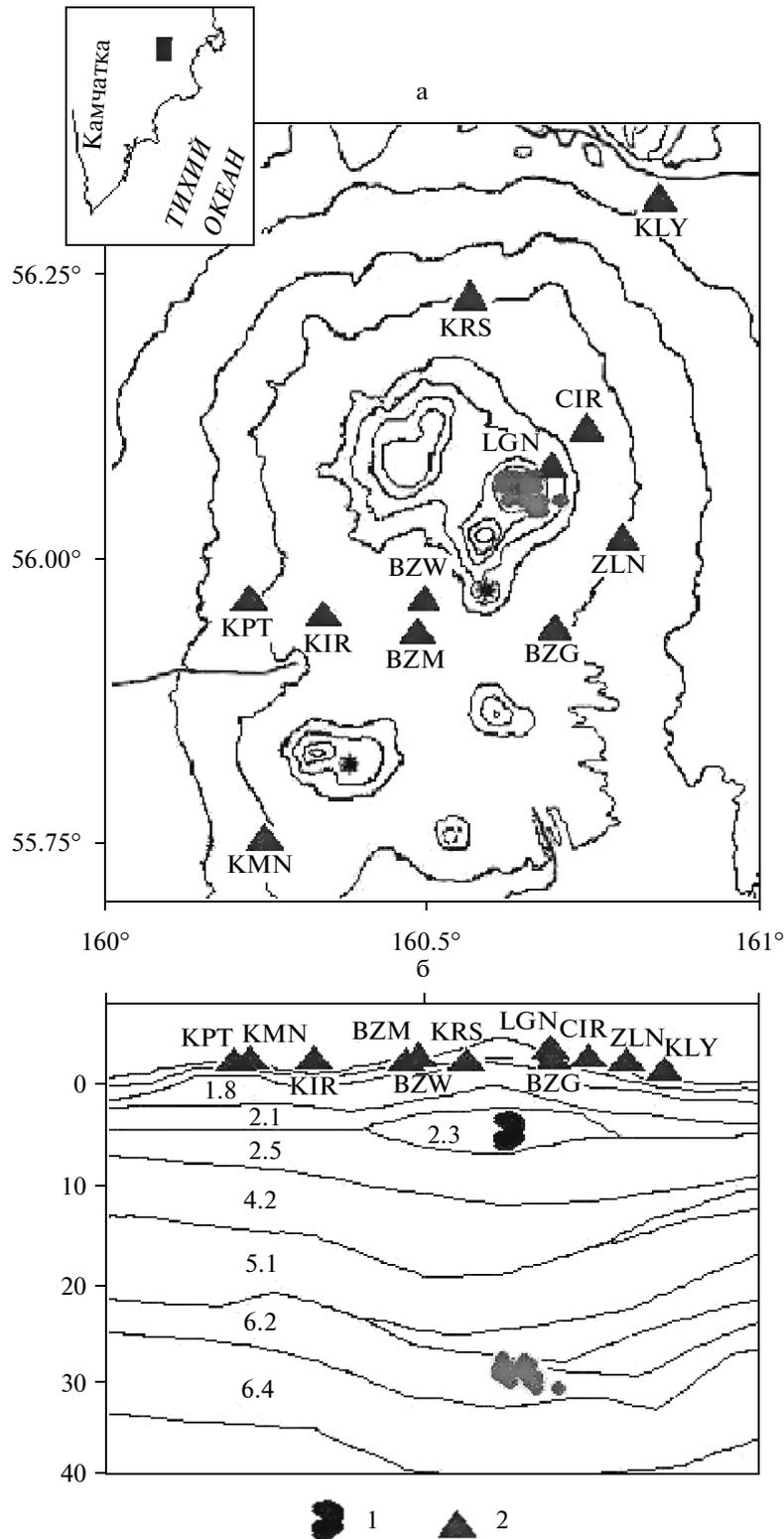
В последнее время все вулканические сейсмические сигналы стали делить на две группы: вулкано-тектонические (ВТ) и длиннопериодные (ДП) [Chouet, 1996; Lahr et al., 1994]. Обоснованность такого деления определяется разными механизмами их генерации. Если ВТ землетрясения есть результат хрупкого разрушения горных пород, то ДП – резкого изменения давления при движении парагазового флюида или расплавленных вулканических пород по каналам и трещинам. В [Горельчик, Сторчеус, 2001] отмечается, что на глубинах ~30 км под вулканом Ключевской в периоды покоя Ключевского вулкана происходят так называемые глубокие длиннопериодные вулканические землетрясения (ГД), которые вызваны изменением напряженно-деформированного состояния вулканических горных пород под действием движения магмы к земной поверхности. Как следует из [Горельчик, Сторчеус, 2001; Сторчеус, 2007], эти землетрясения не могут относиться к конкретному типу вулканических землетрясений по классификации Токарева и Минаками.

В работе выбраны ВТ землетрясения с очагами на глубинах ~5 и ГД землетрясения на глубинах ~30 км непосредственно под Ключевским вулканом (рис. 1). По данным за 2006–2008 гг. только в этих объемах пространства под вулканом Ключевской можно набрать достаточное для статистического анализа количество землетрясений, хотя про-

странственный разброс их очагов более широк. На вертикальной проекции (см. рис. 1б) нанесен скоростной разрез, составленный Г.И. Аносовым для расчетов синтетических сейсмограмм по результатам глубинного сейсмического зондирования района Ключевской группы вулканов [Утнасин и др., 1974; Балеста и др., 1974]. На вертикальной проекции цифрами отмечены скорости  $S$ -волн, в верхних слоях их значения равны около 1.1 км/с. Отмечается не случайное пространственное расположение очагов ВТ землетрясений, они находятся внутри скоростного слоя с  $V = 2.3$  км/с, который имеет форму “линзы”. Гипоцентры ГД землетрясений приурочены к скоростной границе с  $V = 6.2$  км/с (см. рис. 1б).

Выборка ВТ землетрясений состоит из 33-х землетрясений. В этой выборке в диапазоне энергетических классов от  $K_{S1,2}^{\Phi68} = 4.8$  до  $K_{S1,2}^{\Phi68} = 6.3$  среднее значение равно  $K_{S1,2}^{\Phi68} = 5.9 \pm 0.3$ , где  $K_{S1,2}^{\Phi68}$  – шкала энергетических классов местных землетрясений по [Федотов, 1972]. Выборка ГД землетрясений состоит из 27-ми землетрясений. Для этой выборки в диапазоне энергетических классов от  $K_{S1,2}^{\Phi68} = 5.4$  до  $K_{S1,2}^{\Phi68} = 6.5$  среднее значение равно  $K_{S1,2}^{\Phi68} = 5.9 \pm 0.2$ . Записи землетрясений получены по данным сети радиотелеметрических сейсмических станций Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН. Пункты регистрации установлены на склоне и вблизи вулкана Ключевской: LGN, CIR, KRS, ZLN, KMN, KPT, KLY, BZW, BZG, BZG и KIR (см. рис. 1). Каждая станция имеет три компоненты записи скорости колебаний грунта (SHE, SHN, SHZ): две горизонтальные и вертикальную. Сейсмические каналы сейсмических станций не позволяют эффективно использовать их в частотных диапазонах менее 1 Гц и более 20 Гц в результате сильного ограничения амплитудно-частотной характеристики сейсмических каналов в области нижних и верхних частот. Записи землетрясений представлены в цифровом виде с частотой дискретизации аналогового сигнала  $128 \text{ с}^{-1}$ .

Исследовались спектры  $S$ -волн землетрясений вулкана Ключевской по записям всех перечисленных станций (см. рис. 1). Обработывались записи землетрясений, у которых уровень полезного сигнала  $S$ -волн не менее чем в три раза превышал уровень помех, т.е. микросейсм. Выбранный для спектрального анализа участок сейсмограммы, содержащий  $S$ -волны, не превышал по длительности более чем 4 сек, как в [Горельчик и др., 1995; Горельчик, Гарбузова, 2001]. На рис. 2 приведены примеры ВТ и ГД землетрясений, из которых видны значительные различия в форме записи. Оценим очаговый спектр этих двух групп землетрясений.

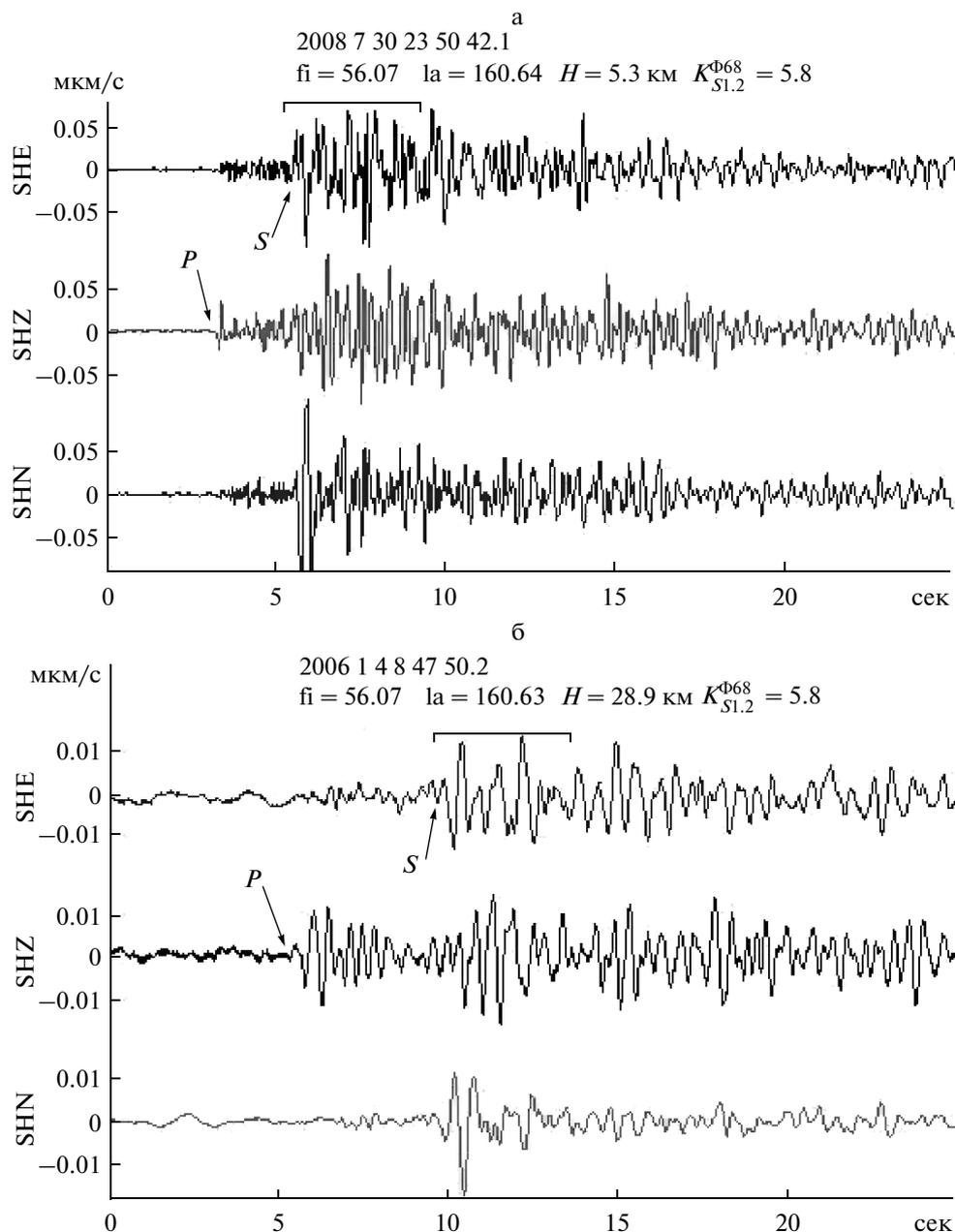


**Рис. 1.** Карта района исследования.

а – горизонтальная проекция, б – вертикальная проекция в направлении запад–восток через вершину вулкана Ключевской.

1 – области очагов вулканических землетрясений на глубинах 5 и 30 км, в горизонтальной проекции обе области совпадают с вершиной вулкана Ключевской; 2 – сейсмические станции.

На врезке расположение горизонтальной проекции на карте Камчатки.



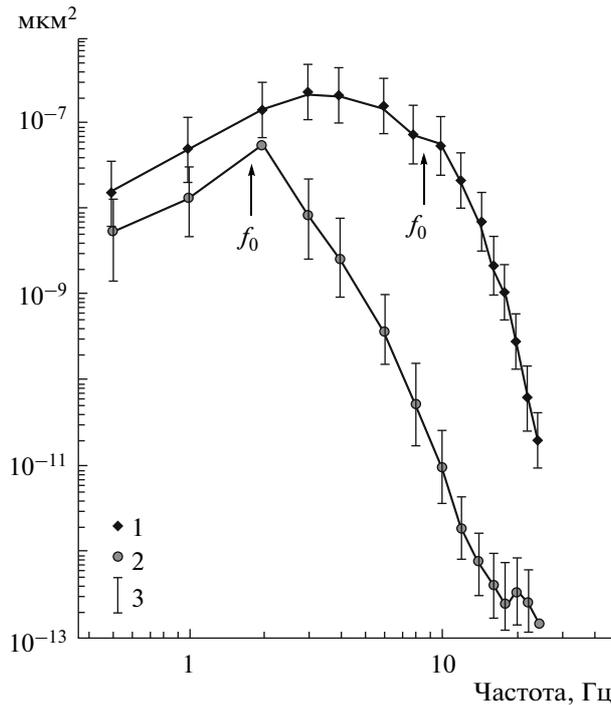
**Рис. 2.** Примеры вулканических землетрясений под вулканом Ключевской с очагами на глубинах 5 км (а) и 30 км (б) по трем компонентам регистрации сейсмической станции CIR. Параметры вулканических землетрясений обозначают время, координаты и энергетический класс очагов.

Выбранные участки сейсмограмм, содержащие  $S$ -волны, перед спектральным преобразованием подвергались стандартным процедурам: удалением нулевого и временного тренда, косинусообразной коррекцией концов анализируемого интервала. Экспериментальные спектры участков  $S$ -волн вулканических землетрясений для упрощения моделирования сглаживались кубическим сплайном в диапазоне частот 0.5–18 Гц и сглаженный спектр определялся по точкам 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14

Гц. На рис. 3 приведены спектры плотности мощности  $S$ -волн для землетрясений каждого типа.

#### МЕТОД АНАЛИЗА

Экспериментальные спектры землетрясений можно сравнить с некоторыми модельными спектрами. Смоделируем форму очагового спектра  $\dot{v}(f)$  приближением, предложенным в [Boat-



**Рис. 3.** Примеры сглаженных спектров участка S-волн ВТ землетрясения по станции CIR. Показано положение угловой частоты  $f_0$  для каждого спектра.  
1 – с очагами на глубине ~5 км; 2 – то же ~30 км; 3 – среднее квадратичное отклонение.

wright et al., 1991] для спектра сдвиговой волны Брюна [Brune, 1970]:

$$\dot{v}(f) = \frac{2\pi f \bar{u}_0}{(1 + (f/f_c)^4)^{1/2}} \quad (1)$$

Очаговый спектр в таком случае определен двумя параметрами: уровнем низко-частотной части  $\bar{u}_0$  и угловой частотой  $f_c$ . В этой модели очага высокочастотная часть спектра смещения уменьшается пропорционально  $f^{-2}$ . Учет поправок на расхождение и поглощение сейсмических волн уменьшает величину энергии спектра сейсмических волн на гипоцентральном расстоянии  $R$  км по формуле:

$$\dot{x}(f) = \frac{2\pi f \bar{u}_0}{(1 + (f/f_c)^4)^{1/2}} \frac{1}{G(R)D(f)S(f)}, \quad (2)$$

где  $G(R)$  – функция, характеризующая ослабление сейсмических волн из-за геометрического расхождения;  $D(f)$  – функция, описывающая поглощение сейсмических волн в среде;  $S(f)$  – станционная поправка.

Функция, характеризующая направленность излучения очага землетрясения, в уравнении (2) опущена, так как ею можно пренебречь в случае использования пунктов регистрации почти полностью окружающих очаг (см. рис. 1). Левая часть

в соотношении (2) при правильно подобранных корректирующих коэффициентах на расхождение и поглощение сейсмических волн будут в некоторых вариантах равны экспериментальным спектрам, а в общем случае соответствовать им. Таким образом, путем инверсии и сравнения реальных данных с модельным очагом можно подобрать неизвестные коэффициенты в соотношении (2). Зависимость от угловой частоты не линейна, поэтому соответствующая процедура инверсии является обязательно повторяющейся.

Все коэффициенты поглощения сейсмических волн в (2) могут быть смоделированы с использованием:

$$g(R, T, f) = r e^{\pi f(t^* + T/Q)}, \quad (3)$$

где  $r$  – коэффициент, характеризующий геометрическое расхождение;  $T$  – время пробега сейсмических волн;  $T/Q$  – поглощение, зависимое от расстояния;  $Q$  – добротность среды,  $t^*$  – поглощение вблизи приемника сейсмических волн (станционная поправка).

Коэффициент геометрического расхождения сейсмических волн, обозначенный  $r$ , может быть вычислен для известного скоростного разреза с учетом геометрии расположения очага и приемника. Но так как во многих случаях и, в частности, для вулкана Ключевской скоростная структура из-

вестна приблизительно, то для определения параметра  $r$  используется значение гипоцентрального расстояния  $R$ . В таком случае значению  $r$  в общем случае соответствует выражение  $1/R^\gamma$ . Подставив в соотношение (2) выражение для поглощения сейсмических волн (3), получим:

$$\dot{\chi}(f) = \frac{2\pi f \bar{u}_0}{(1 + (f/f_c)^4)^{1/2}} \frac{1}{R^\gamma} e^{-\pi f(t^* + T/Q)}. \quad (4)$$

Деление значения экспериментального спектра мощности  $\dot{\chi}(f)$  на правую часть соотношения (4) позволит рассчитать разницу между экспериментальным и модельным спектрами. Запишем в общем виде выражение для разницы между экспериментальным и модельным спектром, и для линеаризации получаемого соотношения относительно  $t^*$  и  $1/Q$ , прологарифмируем:

$$\chi^2 = \sum_{k,n} \left| \ln \dot{\chi}_k(f_n) - \ln \dot{\chi}_j(f_n) + \ln g(r_k, T_k, f_n) \right|^2 / \sigma_k^2(f_n), \quad (5)$$

где дисперсия данных  $\sigma_k^2(f_n)$  обозначает отношение сигнал/шум для диапазона частот и получена по микросейсам до начала записей первых вступлений продольных волн ВТ и ГД землетрясений и записью анализируемого сигнала.

Соотношение (5), выражающее разницу между экспериментальным и модельным спектрами, содержит в качестве неизвестных следующие параметры:  $f_c$ ,  $\bar{u}_0$ ,  $t^*$ ,  $Q$ . Кроме того, неизвестна функция геометрического расхождения, о ее виде и возможном подборе сказано выше. Выражение (5) можно составить для нескольких землетрясений и по записям нескольких станций и определить соответствующие параметры. Однако в целях упрощения можно использовать следующие обстоятельства. Во-первых, угловая частота  $f_c$  очагового спектра для одного землетрясения имеет только одно значение по записям всех станций для этого землетрясения. Во-вторых, если рассматривать записи землетрясений одной станции с примерно равной энергией и с очагами практически в одном месте, то параметры  $\bar{u}_0$ ,  $t^*$  и  $Q$  должны быть соответственно равными. Такие допущения значительно упрощают процедуру вычислений. В первой подинверсии определяется угловая частота  $f_c$  очагового спектра по записям всех станций с использованием всего диапазона анализируемых частот. Соотношение (5) в этом случае при выражении его членов в явном виде приводит к зависимости:

$$\chi_k^2 = \sum_n \left| \ln \dot{\chi}_k(f_n) - \ln(2\pi f_n) + \frac{1}{2} \ln(1 + (f/f_c)^4) + \ln R_k - \ln m \bar{u}_{0,k} + \pi f_n t_k^* + \pi f_n T_k / Q_k \right|^2 / \sigma_k^2(f_n), \quad (6)$$

где индекс  $k$  относится к  $k$ -ой станции, а по индексу  $n$  производится суммирование остатков по всему диапазону частот; коэффициент  $m$  обозначает увеличение амплитуды модельного спектра относительно реального.

Во второй подинверсии, которая выполняется после первой, уже при определенных значениях угловой частоты  $f_c$  определялись последовательно параметры  $\bar{u}_0$ ,  $t^*$ ,  $Q$  по набору записей нескольких землетрясений одной станции. Эти параметры определялись независимо на каждой частоте. Соотношение (5) в этом случае при выражении его членов в явном виде приводит к выражению:

$$\chi_k^2 = \left| \ln \dot{\chi}_k(f_n) - \ln(2\pi f_n) + \frac{1}{2} \ln(1 + (f/f_c)^4) + \ln R_k - \ln m \bar{u}_{0,k} + \pi f_n t_k^* + \pi f_n T_k / Q_k \right|^2 / \sigma_k^2(f_n), \quad (7)$$

где индекс  $k$  относится к  $k$ -ой записи землетрясения по станции, а индекс  $n$  обозначает частоту, по которой определяются остатки между модельным и реальным спектрами.

Следует отметить, что по сравнению с [Voatwright et al., 1991] применена модифицированная модель двухступенчатой инверсии. Показатель  $\gamma$  в соотношениях (6) и (7) принят равным единице, другие его значения плохо соответствуют использованным исходным данным.

В каждом случае составлялось матричное уравнение

$$Ax = d. \quad (8)$$

Столбец  $d$  составлялся для первой и второй подинверсий по соответствующим значениям правых частей из соотношений (6) или (7). Матрица  $A$  состоит из весов и невязок для одного землетрясения по записям всех станций в случае (6) или по всем землетрясениям по записям одной станции (7). Чтобы минимизировать соотношения (6) или (7), решение уравнений (8) выполняется методом SVD (Singular Value Decomposition). 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.

Параметры очага и среды в соотношениях (6) и (7) в конкретных условиях расположения сейсмических станций и очагов землетрясений на вулкане Ключевской имеют вполне определенные диапазоны значений. Пределы значений стационарных поправок  $t^*$  и добротностей среды  $Q$  при первоначальном расчете принимались по ранее

полученным результатам [Лемзиков, Гарбузова, 2010; Andrews, 1986; Anderson, 1986; Anderson, Hough, 1984]. Пределы значений угловой частоты  $f_c$  спектров оцениваются по записям землетрясений. Пределы значений коэффициентов  $m$ , на которые умножаются уровни экспериментальных спектров  $\bar{i}_0$ , определяются пространственным расположением станций и очагов землетрясений.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчеты для ВТ и ГД землетрясений выполнялись отдельно. Можно составить соотношения (6) и (7), используя все полупространство под вулканом Ключевской и решать их совместно. Однако в этом случае возникает неопределенность из-за необходимости определения множества параметров в условиях недостаточного количества исходных данных. Например, параметр  $Q$  в условиях сильной неоднородности среды под вулканом Ключевской, причем некоторые области имеют более высокие температуры по отношению к вмещающей геосреде. В то же время параметры  $m$ ,  $t^*$ ,  $Q$  по записям землетрясений одной станции с очагами, расположенными практически в одном и том же месте полупространства и примерно одинаковой энергии, должны быть одинаковыми. Учитывая, что ВТ и ГД землетрясения по внешнему виду различны, определение параметров  $f_c$ ,  $m$ ,  $t^*$ ,  $Q$  для них, естественно, вычислять отдельно. Это значительно упрощает процесс вычисления.

Диапазон изменений параметров  $f_c$ ,  $m$ ,  $t^*$ ,  $Q$  при первоначальном расчете определялся из следующих обстоятельств. Разброс значений угловой частоты  $f_c$  и коэффициента  $m$  определяется конкретными записями землетрясений. Для определения разброса параметров  $t^*$  и  $Q$  могут быть использованы результаты по таким же параметрам в различных средах. Для района вулкана Ключевской для этих целей использованы результаты из [Лемзиков, Гарбузова, 2010]. Выбранные методом предварительной оценки значения параметров  $f_c$ ,  $m$ ,  $t^*$ ,  $Q$  использовались в соотношениях (6) и (7) в первоначальном расчете в первой и второй подинверсиях. Первая подинверсия для каждого землетрясения по набору записей по нескольким станциям определяла угловую частоту  $f_c$  очагового спектра землетрясения, используя весь диапазон частот. Полученные в этом случае для каждого землетрясения значения угловых частот  $f_c$  очаговых спектров подразумеваются как “предварительные оценки”.

Вторая подинверсия определяет параметры  $m$ ,  $t^*$ ,  $Q$  отдельно на каждой частоте с использованием данных только одной станции. При этом урав-

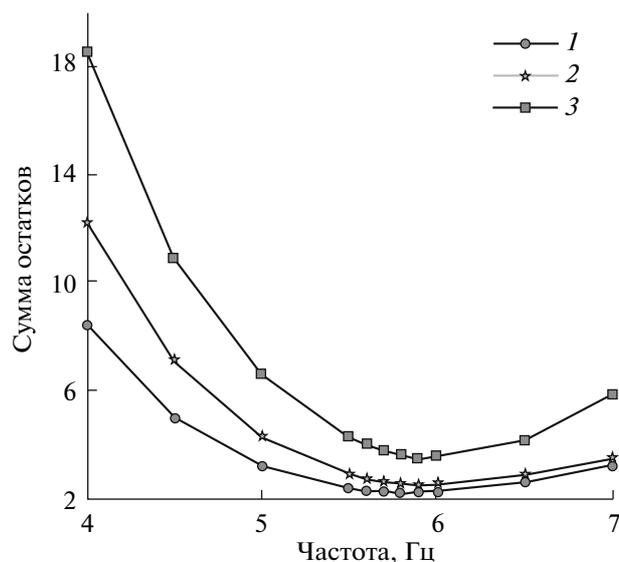
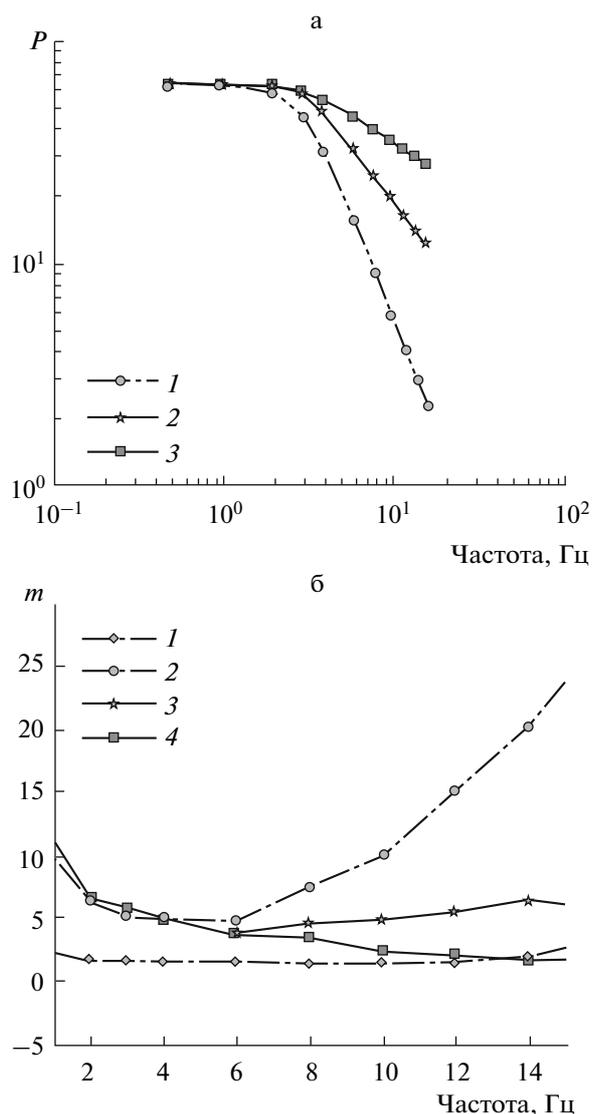


Рис. 4. Суммы остатков при моделировании значений угловой частоты  $f_c$  очаговых спектров при первой подинверсии.

1 — с использованием записей 7 станций, 2 — то же, 9 станций, 3 — то же, 11 станций.

нение (8) составлялось по записям нескольких землетрясений только одной станции. Значение угловой частоты  $f_c$  очагового спектра для каждого землетрясения в соотношении (7) используется по результатам первой подинверсии. Значения параметров  $m$ ,  $t^*$ ,  $Q$ , рассчитанные во второй подинверсии для каждой станции по всему диапазону частот спектра, подставляются в соотношение (6), и расчет по первой подинверсии повторяется, уточняя значение параметра  $f_c$  для каждого землетрясения. В нашем конкретном случае выполнялось 3–5 повторений для нахождения удовлетворительного решения.

В качестве индикатора наилучшего решения при выборе определенной комбинации параметров  $f_c$ ,  $m$ ,  $t^*$ ,  $Q$  использовалось свойство подбора линий к некоторой системе точек в пространстве, указанное в [Pearson, 1901], где показано, что к системе точек на плоскости можно подобрать такую линию, для которой сумма расстояний от всех точек до линии будет минимальной. Используя это правило поиска решения системы уравнений, приведем пример для некоторого ВТ землетрясения с очагом, в данном случае, на глубине 5 км под вулканом Ключевской (рис. 4), показывающий сходимость результата к некоторому минимуму при переборе значений угловой частоты  $f_c$  с использованием соотношения (6). Сходимость результата определялась суммой квадратов остатков в каждом решении системы уравнений. Для системы уравнений, составленной для ВТ земле-



**Рис. 5.** Модели очаговых спектров и их соответствие реальным ВТ землетрясениям.

а – модели очаговых спектров, номера соответствуют номеру модели; б – соответствие различных моделей очаговых спектров реальным землетрясениям по коэффициенту отношения  $m$  реальных и модельных очаговых спектров на разных частотах: 1 – для модели 1 и землетрясений с очагами на глубинах 5 км; 2 – то же, для землетрясений с очагами на глубинах 30 км; 3 – для модели 2 и для землетрясений с очагами на глубинах 30 км; 4 – то же, для модели 3.

трясения с очагом на глубине 30 км под вулканом Ключевской, модули суммы квадратов остатков другие, но решение имело такой же вид со своим минимальным значением. Значение угловой частоты  $f_c$  для наилучшего совпадения экспериментальных сглаженных спектров с модельным очаговым спектром выбирались с точностью до десятых долей частоты. Безусловно, значения угловой

частоты  $f_c$  зависят от комбинации параметров  $m$ ,  $t^*$  и  $Q$ . Также она может зависеть от объема исходных данных. Реально, не все 11 сейсмических станций (см. рис. 1) одинаково качественно регистрировали ВТ землетрясения вулкана Ключевской, но даже при неполных данных результат не должен сильно различаться от общей тенденции, так как специально анализировались несколько землетрясений с очагами примерно в одной точке пространства. Так как функция направленности очага не известна, то наибольшего доверия при первой подинверсии заслуживают результаты, которые получены по станциям, почти полностью окружающих очаг землетрясений.

На ошибки определения расчетных параметров  $f_c$ ,  $m$ ,  $t^*$ ,  $Q$  влияют ошибки определения параметров ВТ и ГД землетрясений: энергетический класс, координаты очага. Величины ошибок пространственных координат определяются плотностью сейсмической сети наблюдений, точностью оценок о среде распространения сейсмических волн и другими факторами. В целом влияние всех ошибок можно принять равными не более 10%. Таким образом, реально имеется разброс оценок расчетных параметров  $f_c$ ,  $m$ ,  $t^*$ ,  $Q$ , хотя ошибку расчета в каждой подинверсии можно сделать как угодно малой (см. рис. 4).

Угловые частоты  $f_c$  очаговых спектров участков S-волн ВТ землетрясений с глубиной очага 5 и 30 км под вулканом Ключевской с применением вышеуказанной модели Брюна определены на частотах соответственно  $6.6 \pm 0.6$  и  $4.6 \pm 0.2$  Гц. Отмечается, что для ВТ землетрясений с глубиной около 5 км вычисленные угловые частоты близки к угловым частотам отдельных записей землетрясений и их очаговые спектры, следовательно, близки к модели Брюна. Этот факт также отмечен для ВТ землетрясений вулкана Ключевской в [Зобин, 1979]. Модель Брюна также успешно использовалась при изучении спектров вулканических землетрясений вулкана Этна (Италия) [Sentamore et al., 1997]. Однако, для ГД землетрясений с глубиной очага около 30 км значения угловых частот очаговых спектров явно завышены (см. рис. 3). Кроме того, имеется второй параметр  $m$ , характеризующий степень совпадения реальных и модельных данных. Уточним, что этот параметр обозначает отношение амплитуд модельных и реальных спектров на определенной частоте. Если это отношение равно во всей полосе частот, то формы этих спектров совпадают. При оценке параметра  $m$  по спектрам модели Брюна, механизмы ВТ землетрясений с глубиной очага 5 км совпадают в широкой полосе частот, а с глубиной 30 км совпадают только в узком диапазоне частот 3–6 Гц (рис. 5б). То есть, по оценке двух парамет-

ров механизмы ГД землетрясений с глубиной очага 30 км не соответствуют модели Брюна.

Дополнительно использовались ряд других моделей механизмов очагов, которые выбирались, ориентируясь на работу [Booge, 2003]. При этом спектры, имеющие сложную форму, в частности, с несколькими характерными частотами, не рассматривались. Учитывались только крутизна спада высокочастотной части спектра и значение угловой частоты. Модель очага, спектр смещения которого выше угловой частоты уменьшается по закону  $\omega^{-3}$ , не соответствует сделанным выборкам ВТ и ГД землетрясений. В этом случае значение угловой частоты очаговых спектров смещалось в сторону высоких частот, что не позволяет проводить дальнейшие расчеты. Поэтому рассмотрены модели очагов, для которых спадание высокочастотной части спектра смещения было меньше чем  $\omega^{-2}$ . Обозначим рассмотренную ранее модель Брюна как модель 1 и введем модели 2 и 3 в виде следующих схем:

$$\begin{aligned} \text{модель 2} \rightarrow v(f) &= \frac{1}{(1 + (f/f_c)^8)^{1/8}}, \\ \text{модель 3} \rightarrow v(f) &= \frac{1}{(1 + (f/f_c)^4)^{1/8}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Примеры этих моделей в виде спектров смещения показаны на рис. 5а.

Угловые частоты  $f_c$  очаговых спектров для выборок ВТ землетрясений с глубиной очага около 30 под вулканом Ключевской по модели 2 определены на частоте  $2.7 \pm 0.4$  Гц. Это более соответствует реальным данным (см. рис. 3). Угловые частоты очаговых спектров для этих землетрясений по модели 3 определены примерно на той же частоте, но для соответствия этой модели реальным землетрясениям необходимо в широкой полосе частот учитывать значения коэффициента  $m$ .

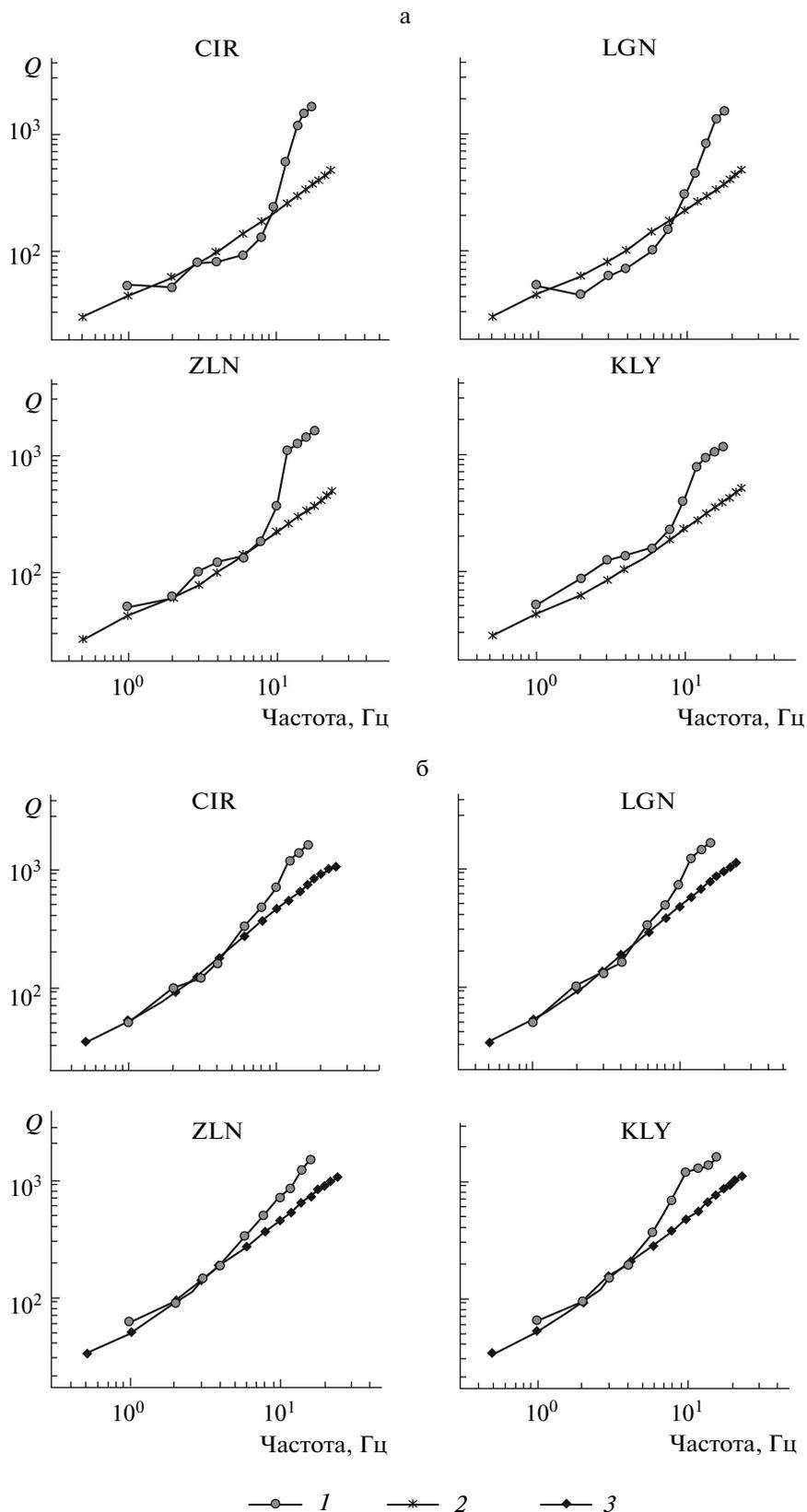
На рис. 5б приведены осредненные значения коэффициента  $m$ , который определяет, как указано выше, отношение амплитуд спектров мощности на соответствующих частотах модельных очаговых и реальных по станциям. Перед осреднением значения коэффициента  $m$  по станциям нормировались относительно станции С1Р. По параметрам  $f_c$  и  $m$ , модель номер 1 (модель спектра очага тектонического землетрясения Брюна) хорошо подходит для ВТ землетрясений с глубиной очага около 5 км, однако эта же модель не подходит для ГД землетрясений с глубиной очага около 30 км под вулканом Ключевской (см. рис. 5б). Для последних земле-

трясений удовлетворительно подходит модель номер 2 и не подходит модель 3.

Значение угловой частоты очагового спектра  $f_c$  при определенной модели очага для каждого пространственного положения очаг – станция определяло значение коэффициента добротности  $Q$  и стационарной поправки  $f^*$ . Наибольшего доверия заслуживали значения, которые соответствовали наиболее подходящим моделям очага. Значения стационарных поправок по выборкам землетрясений с очагами на глубинах 5 и 30 км по каждой станции в пределах ошибок близки, в то время, как значения коэффициента добротности для каждой станции и для ВТ и ГД землетрясений разные. На рис. 6 приведены коэффициенты добротности  $Q$ . В целях сравнения приведены данные по одним и тем же станциям для выборок землетрясений с очагами на глубинах около 5 и 30 км. Результаты сравниваются с [Лемзиков, Гарбузова, 2010], где эти же ВТ и ГД землетрясения исследовались с использованием других методов, в том числе и методом с использованием кода-волн. Полученные результаты сопоставимы с работой [Лемзиков, Гарбузова, 2010], поэтому представляет интерес оценить поведение добротности  $Q$  по частоте для разных станций по времени. На возможность использования этого параметра для оценки состояния системы очаг – магматический канал указано во многих работах [Gudmundsson et al., 2004; и др.].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вулканические землетрясения возникают за счет движения парогазового флюида и/или расплавленных пород по вулканическим каналам. В качестве механизма этих землетрясений рассматривался разрыв пород по трещине, заполненной жидкостью [Chouet, 1986; и др.]. По результатам работы следует признать, что вулканические очаги ВТ землетрясений под вулканом Ключевской соответствуют движению хрупких трещин. Это подтверждается тем, что уровень спада высокочастотной части очагового спектра землетрясений, пропорциональный  $\omega^{-2}$ , соответствует скорости разрыва трещин. По этому параметру ВТ землетрясения имеют меньшие значения скорости разрыва пород, чем для ГД землетрясений. В целом, по ряду параметров механизмы ГД землетрясений не соответствуют тектоническим. Можно вполне обоснованно предположить, что эти землетрясения возникают за счет движения расплавленных пород по дизъюнктивным нарушениям геосреды. Возможно, что причиной ГД землетрясений дополнительно является движение по вулканическим каналам парогазового флюида и глубинная дегазация магмы, что соответствует моделям в [Горельчик, Гарбузова, 2001; Сторчеус, 2007], по-



**Рис. 6.** Значения параметра добротности  $Q$  по некоторым станциям для вулканических землетрясений с очагами на глубине 5 км (а) и 30 км (б).

1 – полученные значения  $Q$ , 2 – значения  $Q$  для глубины 5 км из [Лемзиков, Гарбузова, 2010], 3 – то же для глубин 30 км из [Лемзиков, Гарбузова, 2010].

лученным по исследованию глубоких длиннопериодных землетрясений вулканов Ключевской и Карымский.

Предложен способ, который позволяет не только сравнивать реальные спектры ВТ землетрясений с некоторыми модельными, но и оценивать параметры поглощения сейсмических волн, которые полезны для оценки напряженно-деформированного состояния среды вулканической постройки.

Автор выражает благодарность д.ф.-м.н. П.П. Фирстову, к.ф.-м.н. В.А. Широкову за полезное обсуждение и ценные замечания, что позволило улучшить работу.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Балеста С.Т., Утнасин В.К., Аносов Г.И.* Строение земной коры под вулканами в различных геоструктурных зонах по геофизическим данным // Геодинамика, магмообразование и вулканизм. Петропавловск-Камчатский: АН СССР, 1974. С. 76–81.

*Горельчик В.И., Гарбузова В.Т.* Сейсмичность Ключевского вулкана как отражение современной магматической деятельности // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 352–370.

*Горельчик В.И., Сторчеус А.В.* Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом, Камчатка // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 373–389.

*Горельчик В.И., Чубарова О.С., Гарбузова В.Т.* Сейсмичность района Северной группы вулканов Камчатки 1971–1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4/5. С. 54–75.

*Зобин В.М.* Динамика очага вулканических землетрясений. М.: Наука, 1979. 92 с.

*Лемзиков В.К., Гарбузова В.Т.* Метод оценки поглощения сейсмических волн местных вулканических землетрясений под вулканом Ключевской // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 30–31 марта 2009 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2010. С. 167–177.

*Сторчеус А.В.* Рой длиннопериодных землетрясений, предвещающих извержение Карымского вулкана в 1996 г. // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28 марта–31 марта 2007, г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 75–82.

*Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118 с.

*Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1986. 164 с.

*Утнасин В.К., Балеста С.Т., Аносов Г.И., Будянский Ю.А.* Трехмерная сейсмическая модель Ключевской группы вулканов // Геодинамика вулканизма и гидротермаль-

ные процессы. Петропавловск-Камчатский: АН СССР, 1974. С. 41.

*Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука. 1972. 116 с.

*Andrews D.J.* Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size // Earthquakes Source Mechanics / Eds Das S., Boatwright J., Scholz C. American Geophysical Union. Washington. D.C. 1986. P. 259–267.

*Anderson J.G.* Implication of attenuation for studies of the earthquake source // Earthquakes Source Mechanics / Eds Das S., Boatwright J., Scholz C. American Geophysical Union. Washington. D.C. 1986. P. 311–319.

*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.

*Boatwright J.* Detailed spectral analysis of two small New York earthquake // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1978. V. 68. № 3. P. 1117–1131.

*Boatwright J.* Characteristics of the aftershock sequence of the Borah Peak, Idaho, earthquake, determined from digital recordings of the events // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1985. V. 75. № 3. P. 1265–1284.

*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 // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1991. V. 81. № 5. P. 1754–1782.

*Boore D.M.* Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method // Pure Appl. Geophys. 2003. V. 160. № 2. P. 635–676.

*Brune J.* Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. № 6. P. 4997–5009.

*Castro R.R., Anderson J.G., Singh. S.K.* Site response, attenuation and source spectra of S waves along the Guerrero, Mexico, subduction zone // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1990. V. 80. № 6. P. 1481–1503.

*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.

*Chouet B.A.* Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. № 6. P. 13967–13992.

*Chouet B.A.* Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting // Nature 1996. № 380. P. 309–316.

*Field E.H., Jacob. K.H.* A Comparison and Test of Various Site-Response Estimation Techniques, Including Three That Are Not Reference-Site Dependent // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1995. V. 85. № 4. P. 1127–1143.

*Fletcher J.B., Boatwright J.* Source parameters of Lorra Prieta aftershocks and wave propagation characteristics along the San Francisco peninsula from a joint inversion of digital seismograms // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1991. V. 81. № 5. P. 1783–1812.

- Gudmundsson O., Finlayson D.M., Itikarai I., Nishimura Y.* Seismic attenuation at Rabaul volcano, Papua New Guinea // *J. Volcanol. Geothermal Res.* 2004. V. 130. № 1. P. 77–92.
- Hough S.E., Anderson J.G., Brune J. et al.* Inverting for attenuation // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1988. V. 78. № 2. P. 672–691.
- Humphrey J.R., Anderson J.G.* Earthquake source parameters and site response from Guerrero, Mexico // *EOS.* 1990. V. 71. № 43. P. 1440.
- Lahr J.C., Chouet B.A., Stephens C.D. et al.* Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: Implications for the magmatic system of the 1989–1990 eruptions at Redoubt Volcano, Alaska // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1994. № 62. P. 137–151.
- Minakami T.* Seismology of volcanoes in Japan // *Physical Volcanology. Developments in Solid Earth Geophysics 6* Elsevier / Eds Civetta L., Gasperini P., Luongo G., Rappolla A. Amsterdam. 1974. P. 1–27.
- Pearson K.* On lines and planes of closest fit systems of points in space // *Philosophical Magazine.* 1901. № 2. P. 559–572.
- Su F., Aki K., Teng T. et al.* The relation between site amplification and surficial geology in central California // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1992. V. 82. № 2. P. 580–602.

## Models of Source Spectra for Tectonic Earthquakes in Application to Some Types of Volcanic Earthquakes: Klyuchevskoi Volcano

V. K. Lemzikov

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*

Received April 16, 2012

**Abstract**—This study makes use of spectral models for tectonic earthquakes in application to volcano-tectonic (VT) and deep-focus long period volcanic (DL) earthquakes. For these earthquakes we adjusted the parameters of source spectra, and simultaneously, the medium where seismic waves propagate. We derived preliminary results to characterize the models of source spectra for volcanic earthquakes that occur on Klyuchevskoi Volcano. This method can also be used to estimate the attenuation parameters of seismic waves, which are important for the assessment of stress and strain in a volcanic edifice.

---

Сдано в набор 16.01.2014 г.	Подписано к печати 25.03.2014 г.	Дата выхода в свет 12 четв.	Формат бумаги 60 × 88 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>
Цифровая печать	Усл. печ. л. 9.5	Усл. кр.-отт. 2.0 тыс.	Уч.-изд. л. 9.6
	Тираж 198 экз.	Зак. 36	Бум. л. 4.75
		Цена свободная	

---

Учредители: 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