

УДК 550.344.43

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Лемзиков В.К.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,

Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: lemzikov@kscnet.ru

Аннотация

Предложен способ определения параметров землетрясений и среды распространения сейсмических волн. Спектры скорости движения почвы вулканотектонических землетрясений вулкана Ключевской интерпретируются итерационным методом с использованием двухступенчатой инверсии. Получены предварительные результаты, характеризующие механизм очагов вулканотектонических землетрясений и среду. Механизмы очагов некоторых вулканотектонических землетрясений вулкана Ключевской подобны очагам тектонических землетрясений.

Введение

Идентификация по землетрясениям параметров очага является главной задачей сейсмологии, особенно это важно для землетрясений средних и малых магнитуд. Параметры очага по спектру смещения сейсмических волн определяются уровнем его низкочастотной части, угловой частотой и коэффициентом спада высокочастотной части. Однако влияние условия распространения сейсмических волн по пути от очага до точки регистрации искажает спектры этих волн до такой степени, что выделить параметры очага по записям землетрясений на станциях в большинстве случаев невозможно. В частности выяснилось, что даже поглощение сейсмических волн в поверхностных слоях почвы непосредственно под станцией сильно искажает очаговый спектр землетрясения [6, 14, 17]. Этот эффект известен как «станционная поправка», и в общем зависит от частоты. Кроме того, геометрическое расхождение и поглощение сейсмических волн по пути пробега от очага до точки регистрации также в той или иной мере искажают спектры землетрясений [8, 11, 10, 18].

В целях определения параметров очага использовались различные методы. В частности использовался метод спектральных отношений [5]. В этих целях для очаговых исследований спектр больших землетрясений разделялся на спектр маленького землетрясения, зарегистрированного на тех же самых станциях; а для исследований станционных поправок спектр, зарегистрированный на осадочном участке, разделялся на спектр того же самого землетрясения, зарегистрированного на соседнем участке с твердыми грунтами. Неопределенность метода спектральных отношений состоит в том, что получающиеся отношения могут интерпретироваться только условно, например, предполагая, что низкочастотный очаговый спектр меньшего землетрясения является приблизительно постоянным или что участок с твердыми породами приблизительно не поглощает сейсмические волны [10].

В работах [9, 10, 13, 15, 17] применяется инверсная схема, которая позволяет по записям землетрясений на станциях получать очаговые спектры, параметры добротности среды и станционных поправок. В работе [20] станционные поправки, определенные рекурсивным инверсным методом с использованием кода-волн, зависят от локальной геологии точки регистрации землетрясений. В работе [10] процедура инверсии разделена на две вза-

имозависимых части, или подинверсии, для сокращения количества параметров в наибольшей инверсии. Первая подинверсия использует весь диапазон частот для поиска решения для параметров очага и поглощения, в то время как вторая находит решение для очага и стационарных поправок независимо на каждой частоте. Предложенная модель двухступенчатой инверсии происходит из необходимости одновременного определения параметров очага и физических свойств среды, в которой пробегают сейсмические волны. Взаимозависимость этих параметров определяет необходимость определения их только при совместном процессе нахождения. Эти две подинверсии служат дополнением друг другу и при этом так, чтобы повторяющийся процесс, который находит решение поочередно в каждой подинверсии, сходился.

Высокий уровень сейсмической активности вулкана Ключевской позволяет иметь достаточную информацию для нахождения параметров очагов землетрясений и среды распространения сейсмических волн. Целью работы является, определить параметры очагов вулcano-тектонических землетрясений и среды, модифицируя инверсионный метод, предложенный в [10].

Метод анализа

Экспериментальные спектры землетрясений можно сравнить с некоторыми модельными спектрами. Смоделируем форму очагового спектра $\dot{v}(f)$ приближением, предложенным в работе [10] для спектра сдвиговой волны Брюна [12]:

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

Каждый очаговый спектр в таком случае определен двумя параметрами: уровнем низко-частотной части \bar{u}_0 и угловой частотой f_c . В этой модели очага спектры смещения выше угловой частоты уменьшаются как ω^{-2} . Влияние поправок на расхождение и поглощение сейсмических волн приведет к величине энергии спектра сейсмических волн на гипоцентральном расстоянии R км в виде:

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

Функция, характеризующая направленность излучения очага землетрясения, в уравнении (2) опущена, так как ею можно пренебречь в случае использования точек регистрации почти полностью окружающих очаг. Левая часть в соотношении (2), при правильно подобранных корректирующих коэффициентах на расхождение и поглощение сейсмических волн, будет в некоторых вариантах равна экспериментальным спектрам, а в общем случае – соответствовать им. Таким образом, путем инверсии и сравнения с модельным очагом, можно подобрать неизвестные коэффициенты в соотношении (2). Зависимость от угловой частоты нелинейна, поэтому соответствующая процедура инверсии является обязательно повторяющейся.

Все коэффициенты поглощения сейсмических волн в (2) могут быть смоделированы, при использовании функции

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

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

Коэффициент геометрического расхождения сейсмических волн, обозначенный как r , может быть вычислен явно для известной скоростной структуры и геометрии расположения очага и приемника. Но так как часто скоростная структура известна приблизительно, для определения параметра r используется значение гипоцентрального расстояния R . В тоже время, уточнение параметра r с использованием примерной скоростной структуры и геометрии расположения очага и приемника возможно методом проб и ошибок. Две модели для параметра поглощения: Q и t^* представляют практическое упрощение из [16] подогнанное к поглощению, наблюдаемому на ряде станций около области Anza, в Калифорнии. Подставляя в соотношение (2) выражение для поглощения сейсмических волн (3), получим:

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

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

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

где дисперсия данных $\sigma_k^2(f_n)$ обозначает отношение сигнал/шум для диапазона частот и получена по микросейсам перед записью первых вступлений продольных волн вулканотектонического землетрясения и записью анализируемого сигнала.

Соотношение (5), выражающее разницу между экспериментальным и модельным спектром, содержит в качестве неизвестных следующие параметры: f_c , \bar{u}_0 , t^* , Q . Кроме того, неизвестна функция геометрического расхождения, но 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 воспользоваться следующими обстоятельствами. 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 равны. Такие допущения значительно упрощают процедуру вычислений, тем более разделяя процесс на две подинверсии. В первой подинверсии определяется угловая частота f_c очагового спектра по записям всех станций. В этом случае использовался весь диапазон анализируемых частот. Соотношение (5) в этом случае при выражении его членов в явном виде приводит к выражению

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

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.

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

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

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.

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. Чтобы минимизировать соотношения в (6) или (7) решение уравнения (8) выполняется методом SVD (уточним, что используется общепринятое матричной алгебре обозначение SVD – Singular Value Decomposition). Задание начальных параметров определялось экспериментально и по литературным данным. Процесс нахождения параметров очага и среды повторялся, причем полученные значения в предыдущем решении служили ориентировочными данными для задания очередного решения. Этот переменный процесс продолжался до тех пор, пока не определялся минимум, который определял наиболее оптимальную комбинацию параметров, определяющих очаг землетрясений и среду.

Исходные данные

В работе использованы вулcano-тектонические землетрясения вулкана Ключевской за 2006–2008 гг. Вулканические землетрясения этого вулкана происходят роями, в соответствии с периодами усиления сейсмической и вулканической активности. Вместе с тем, очаги вулканических землетрясений вулкана Ключевской пространственно располагаются в строго определенных зонах. Взрывные вулканические землетрясения происходят в конусе, а вулcano-тектонические – роятся под вулканом в двух местах с центрами на глубинах 5 и 30 км. Вне отмеченных зон очаги вулканических землетрясений вулкана Ключевской очень редки [1, 2].

Выборка вулcano-тектонических землетрясений с очагами на глубине 5 км включает 33 землетрясения. Для этой выборки среднее значение $K_{SI,2}^{\Phi 68} = 5.85 \pm 0.29$, где $K_{SI,2}^{\Phi 68}$ – шкала энергетических классов местных землетрясений С.А.Федотова. Выборка вулка-

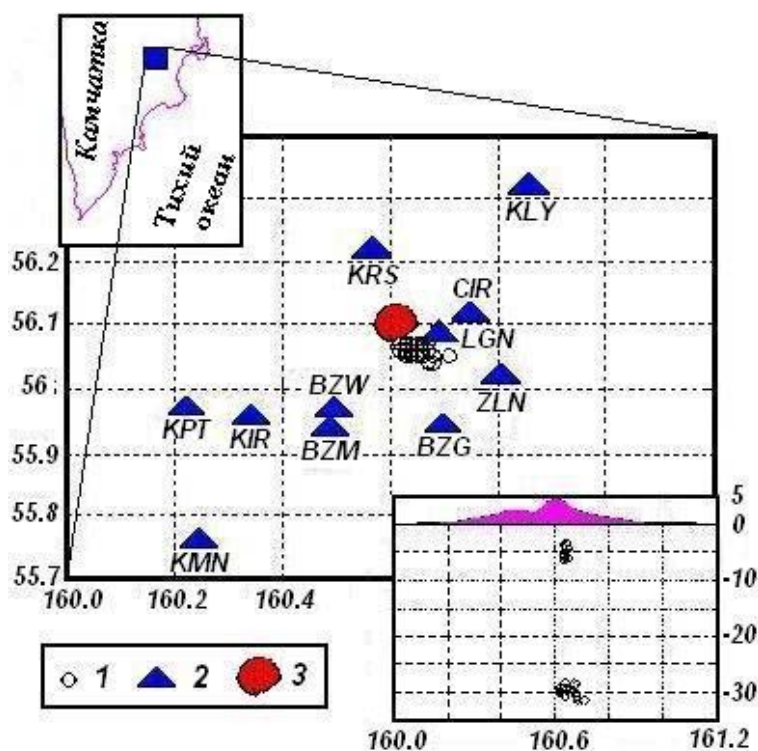


Рис. 1. Карта района исследования; сверху слева – расположение его на карте Камчатки, внизу справа – вертикальная проекция в направлении запад-восток. 1 – очаги вулcano-тектонических землетрясений, 2 – сейсмические станции, 3 – вершина вулкана Ключевского в горизонтальной проекции.

но-тектонических землетрясений с очагами на глубине 30 км включает 27 землетрясения. Для этой выборки среднее значение $K_{SI,2}^{\Phi 68} = 5.86 \pm 0.15$.

Записи этих землетрясений выполнены радиотелеметрическими сейсмическими станциями Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН), установленными на склоне и вблизи вулкана. Выбранные станции условно можно разделить на две группы. Четыре станции: LGN, CIR, KRS и ZLN – расположены на склоне вулкана Ключевского, а станции: KMN, KPT, KLY, BZW, BZG, BZG и KIR – более отдаленно (рис. 1). Каждая станция имеет три компонента записи скорости колебаний грунта (SHE, SHN, SHZ): две горизонтальные и одну вертикальную. Сейсмические каналы радиотелеметрических 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 сек⁻¹.

Использовались спектры S-волн вулcano-тектонических землетрясений вулкана Ключевской по записям всех перечисленных станций (рис. 1). При обработке использовались записи землетрясений, у которых уровень полезного сигнала, т.е. S-волн, не менее чем в три раза превышал уровень помех, т.е. микросейсм. При выборе интервала участка S-волн решалась задача выделения так называемых «прямых» сейсмических волн, которые наиболее полно характеризуют очаг землетрясений, от других и, в первую очередь, рассеянных сейсмических волн. Выбранный для спектрального анализа участок сейсмограммы не должен превышать по длительности больше 4 сек, так как на расстояниях менее 50 км очаго-

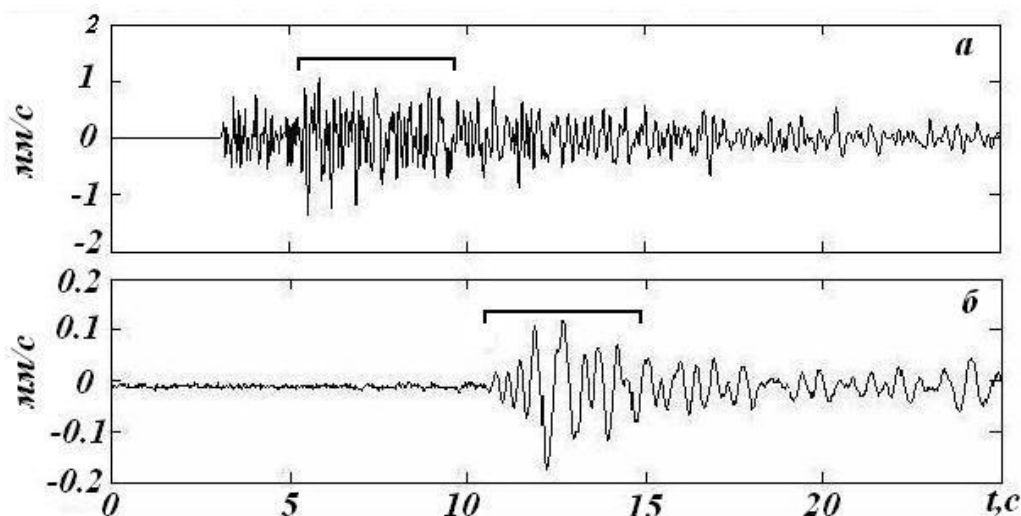


Рис. 2. Примеры вулcano-тектонических землетрясений с очагами на глубинах 5 (а) и 30 (б) км под вулканом Ключевским. Показаны интервалы записей землетрясений, включающие S-волны.

вый импульс S-волн по длительности не превышает указанный интервал. Таким же образом оценивается очаговый импульс S-волн вулcano-тектонических землетрясений вулкана Ключевской в [1, 2].

Вулcano-тектонические землетрясения вулкана Ключевской с очагами под вулканом Ключевской на глубине 5 км имеют четкие вступления P- и S-волн (рис. 2). По этим признакам такие землетрясения близки к тектоническим. Видимые угловые частоты спектров S-волн по записям станций определяются на частотах 4–5 Гц. Другое дело с вулканическими землетрясениями с очагами на глубине 30 км. Они, в отличие от предыдущих, низкочастотные и не имеют четких вступлений первых волн. Кроме того, интенсивность S-волн гораздо больше P-волн и последние проявляются в основном на вертикальных сейсмических каналах. Следует отметить, что большинство вулканических землетрясений имеет повторяющиеся волновые формы, поэтому их разделяют на типы. Хотя выбранные землетрясения относятся к одному типу вулcano-тектонических землетрясений, характер записи различен для землетрясений с очагами на глубинах 5 и 30 км. Тем актуальнее произвести сравнение их очаговых спектров.

Выбранные участки сейсмограмм, содержащие S-волны перед быстрым преобразованием Фурье подвергались стандартным процедурам: удалением нулевого и временного тренда, косинусообразной коррекцией концов анализируемого интервала.

Обсуждение результатов

Параметры очага и среды в соотношениях (6) и (7) имеют вполне определенные диапазоны значений. Пределы значений станционных поправок t^* и добротностей среды Q определяются по литературным данным. Пределы значений угловой частоты f_c спектров определяются конкретными записями землетрясений. Пределы значений коэффициентов m , на которые умножаются уровни экспериментальных спектров \bar{u}_0 , определяются простран-

ственным положением очага и станции, и частично могут соответствовать гипоцентральному расстоянию.

Выбранные таким образом значения параметров $m\bar{u}_0$, t^* , Q использовались в соотношении (6) в первоначальном расчете при первой подинверсии. Первая подинверсия выполнялась по всему диапазону частот спектра. Таким образом, для каждого землетрясения определялись угловые частоты очаговых спектров, которые можно назвать как «предварительные значения».

В качестве индикатора наилучшего решения при выборе определенной комбинации параметров f_c , $m\bar{u}_0$, t^* , Q использовалось свойство подбора линий к некоторой системе точек в пространстве, указанное в [19]. В этой работе утверждается, что к системе точек на плоскости подбирается такая линия, для которой сумма расстояний от всех точек до линии будет минимальной. Пример, показывающий сходимость результата к некоторому минимуму при переборе значений угловой частоты f_c для очагового спектра вулcano-тектонического землетрясения с использованием соотношения (6), приведен на рис. 3. Здесь показаны результаты при разном объеме исходных данных. Так как функция направленности очага не известна, то наибольшего доверия при первой подинверсии заслуживают результаты, которые получены по станциям полностью окружающие очаг, т.е., практически по максимальной выборке исходных данных для данного землетрясения.

Заметим, что разброс по энергии землетрясений с очагами на глубине 5 км составляет примерно 5%, а на глубине 30 км – 3%. К тому же, энергия и пространственные координаты землетрясений определены с ошибками. Их нельзя, даже методически, уменьшить до нуля. В целом, за верхний предел этих ошибок можно принять величину 10%, даже учитывая величину разброса по энергии сделанных выборок землетрясений. Поэтому, расчетные значения параметров будут иметь реальную дисперсию не менее, указанной выше, хотя ошибку расчета (рис. 3) в каждой подинверсии можно сделать сколь угодно малой.

Вторая подинверсия определяет параметры $m\bar{u}_0$, t^* , Q отдельно на каждой частоте с использованием данных только одной станции. В соотношении (7) значения угловой частоты очагового спектра для каждого землетрясения подставляются по результатам первой подинверсии, а параметры $m\bar{u}_0$, t^* , Q последовательно определяются. Причем диапазон изменений параметров при первоначальном расчете взят по литературным данным. При условии, что эти параметры определяются по землетрясениям с очагами, находящимися практически в одном и том же месте и имеющим одинаковую энергию, они должны быть одинаковыми для набора землетрясений одной станции. В качестве индикатора наилучшего решения при выборе определенной комбинации параметров f_c , $m\bar{u}_0$, t^* , Q использовалось тоже описанное выше свойство подбора линии к значениям разности модельных и

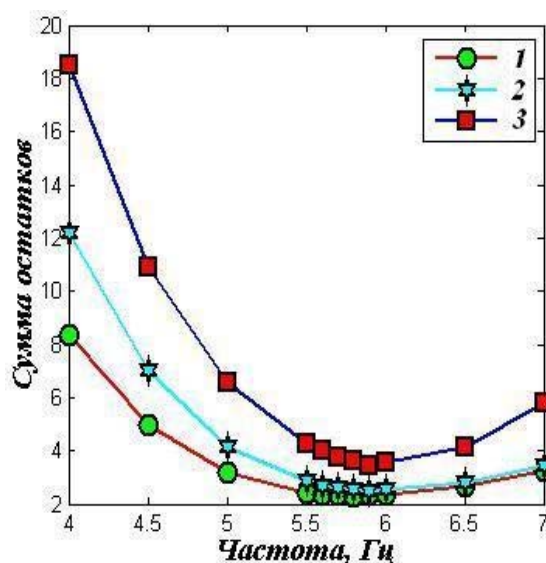


Рис. 3. Суммы остатков при разных значениях угловой частоты f_c при первой подинверсии. 1 – с использованием записей 7 станций, 2 – то же 9, 3 – то же 11.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Таблица 1. Значение коэффициента m для станций при расчете очаговых спектров вулканотектонических землетрясений с очагами на глубине 5 км.

f^* (Гц)	CIR	LGN	KRS	ZLN	KLY	KMN	KPT	KOZ	BZM	BZG
1	2.5	1.5	5	3	8	10	10	12	4	4
2	1.5	1.5	3	2	5	8	8	10	3	2
3	1.5	1.5	2	1.5	5	8	8	10	2	2
4	1.5	1.5	2	1.5	5	8	8	10	2	2
6	1.5	1.5	2	1.5	5	8	8	10	2	2
8	1.5	1.5	2	1.5	5	8	8	10	2	2
10	1.5	1.5	2.5	1.5	5	8	8	10	2	2
12	1.5	1.5	3.5	2.5	7	–	8	–	3	2
14	2.0	1.5	4.5	3.5	10	–	–	–	5	4
16	3.0	2.0	7	4.5	15	–	–	–	7	6

Таблица 2. Значение коэффициента m для станций при расчете очаговых спектров вулканотектонических землетрясений с очагами на глубине 30 км.

f^* (Гц)	CIR	LGN	KRS	ZLN	KLY	KMN	KPT	KOZ
1	10	10	10	10	15	15	15	20
2	5.5	5	6	7	10	10	10	15
3	5	5	5	5	8	10	10	15
4	5	5	5	5	8	10	10	15
6	5	5	5	5	8	10	10	15
8	7.5	8	7	7	8	15	10	15
10	10	10	10	10	10	20	15	20
12	12.5	10	17	15	15	–	–	–
14	17	14	20	20	25	–	–	–
16	24	22	27	25	30	–	–	–

реальных спектров, только в качестве искомого последовательно использовались значения $m\bar{u}_0$, t^* или Q .

Соотношения (6) и (7) позволяют использовать землетрясения с очагами, расположенными в разных точках среды, но тогда значения параметров $m\bar{u}_0$ и Q будут иметь разные значения для одной станции даже для землетрясений одинаковой энергии. И для получения решения, тем более без увеличения его разброса, необходимо существенно увеличить объем выборки и количество переборов в первой и второй подинверсиях. Поэтому в целях существенного упрощения, сделаны выборки одинаковых по параметрам землетрясений, и, дополнительно, разные выборки с очагами на глубинах 5 и 30 км решались отдельно.

Значения параметров $m\bar{u}_0$, t^* , Q , рассчитанные во второй подинверсии для каждой станции и каждого землетрясения, подставлялись в соотношение (6) и расчет по первой подинверсии повторялся, уточняя значение параметра f_c для каждого землетрясения. Процедура повторяется для нахождения удовлетворительного решения.

Угловые частоты очаговых спектров для выборок вулканотектонических землетрясений с глубиной очага 5 км и 30 км под вулканом Ключевским определены, соответственно на частотах 6.55 ± 0.60 и 4.55 ± 0.19 Гц. Проведенное осреднение для землетрясений с очагами

на глубине 5 км не совсем корректно, так как механизмы очагов землетрясений, имеющих угловые частоты спектров 6 и 7 Гц, в общем, различны. Другое дело для землетрясений с очагами на глубине 30 км. Они имеют маленький разброс значений угловых частот f_c очаговых спектров (всего около 4%). Это позволяет утверждать, что механизмы очагов всех этих землетрясений подобны. Другое явное отличие – они более низкочастотные, чем на глубине 5 км,

При определении параметра f_c для каждого пространственного положения очаг-станция определялось значение коэффициента добротности Q . Таким образом, для каждой станции для землетрясений с очагами на глубинах 5 и 30 км получены коэффициенты добротности. На рис. 4 приведены коэффициенты добротности Q для некоторых станций. В целях сравнения приведены данные по одним и тем же станциям для выборок землетрясений с очагами на глубинах 5 и 30 км. Результаты сравниваются с работой [4], в которой эти же вулканические землетрясения были обработаны другим методом. Результаты сопоставимы и детализация поведения коэффициентов добротности по частоте для разных станции позволит оценить напряженно-деформированное состояние среды по вариациям этих параметров во времени.

При расчете коэффициента m , на который необходимо умножить уровень экспериментального спектра конкретной станции для получения очагового спектра, получены следующие результаты. Расчет выполнен для модели Брюна, в которой высокочастотный спад спектра мощности смещения происходит по второй степени частоты. Для землетрясений с очагами на глубине 5 км в диапазоне частот от 1 Гц до 15 Гц наблюдается хорошее совпадение с моделью Брюна. С учетом того, что на низких и высоких частотах аппаратура регистрации сильно ограничивает входной сигнал, можно считать, что очаги этих землетрясений соответствуют этой модели Брюна (табл. 1). Для землетрясений на глубине 30 км такая модель Брюна не подходит. В этом случае, только в очень узком диапазоне частот от 3 до 6 Гц наблюдается совпадение (табл. 2).

Для вулкано-тектонических землетрясений с очагами на глубине 30 км дополнительно была использована модель очага Брюна, в которой высокочастотная часть спектра спадает

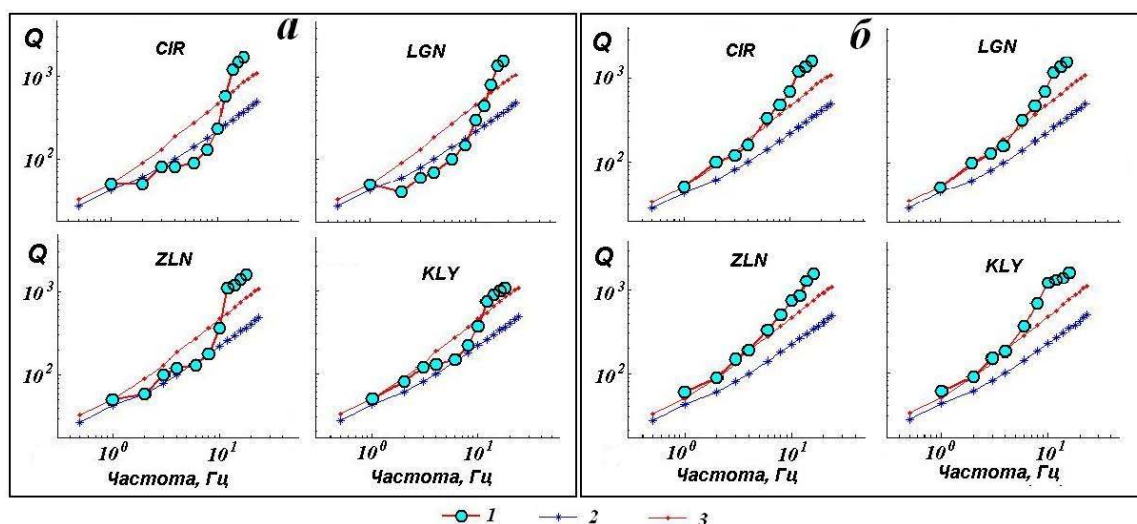


Рис. 4. Значения параметра добротности по некоторым станциям для вулкано-тектонических землетрясений с очагами на глубине 5 (а) и 30 (б) км. 1 – значения Q по станциям, 2 – значения Q для глубины 5 км из [4], 3 – то же для глубин 30 км из [4].

по 3-ей степени частоты. Однако в этом случае угловая частота очаговых спектров сместилась в сторону высоких частот. Так как угловые частоты спектров этих землетрясений по записям станций определяются на частотах 2–3 Гц, а расчет по предыдущей модели определил угловую частоту очаговых спектров 4.55 Гц, то смещение их почти на 2 Гц в сторону высоких частот расценено как явная ошибка.

Таким образом, на основании результатов по землетрясениям с очагами на глубине 5 км под вулканом Ключевской, можно согласиться работой [3], что механизмы очагов этих вулкано-тектонических землетрясений подобны очагам тектонических землетрясений.

Заключение

Предложен способ получения угловых частот очаговых спектров и параметров среды распространения сейсмических волн. Получены предварительные результаты, характеризующие механизм очагов вулкано-тектонических землетрясений и среду.

Автор выражает благодарность д.ф.-м.н. А.А.Гусеву.

Список литературы

1. 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.
2. Горельчик В.И., Гарбузова В.Т. Сейсмичность Ключевского вулкана как отражение современной магматической деятельности. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский., 2001. с. 352–370.
3. Зобин В.М. Динамика очага вулканических землетрясений. Москва, «Наука», 1979, 92 с.
4. 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. Петропавловск-Камчатский, 2010, с.167–177.
5. Andrews D.J. Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, in Earthquakes Source Mechanics. S. Das, J. Boatwright and C. H. Scholz (Editors), American Geophysical Union, Washington.D.C. 1986. p. 259–267.
6. Anderson J.G. Implication of attenuation for studies of the earthquake source, in Earthquakes Source Mechanics, S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz (Editors), American Geophysical Union, Washington.D.C. 1986. p. 311–319.
7. Anderson J.G., S.E. Hough. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. //Bull. Seism. Soc. Am.1984. V.74. No.5. p.1969–1994.
8. Boatwright J. Detailed spectral analysis of two small New York earthquake. //Bull. Seism. Soc. Am. 1978.V.68, No.3. p.1117–1131.
9. Boatwright J. Characteristics of the aftershock sequence of the Borah Peak, Idaho, earthquake, determined from digital recordings of the events. //Bull. Seism. Soc. Am. 1985. V. 75, No.3 p.1265–1284.

10. *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. Seism. Soc. Am. 1991. V.81, No.5. p.1754–1782.
11. *Boore D. M.* Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method. //Pure appl. Geophys. 2003. V.160, No.2. p.635–676.
12. *Brune J.* Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. //J. Geophys. Res. 1970. V.75. No.6. p.4997–5009.
13. *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. Seism. Soc. Am. 1990. V.80, No.6. p.1481–1503.
14. *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. Seism. Soc. Am. 1995. V.85. No.4. p.1127–1143.
15. *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. Seism. Soc. Am. 1991. V.81, No.5. p.1783–1812.
16. *Hough S. E. and J. G. Anderson.* Inverting for attenuation. //Bull. Seism. Soc. Am. 1988. V.78. No.2. p.692–708.
17. *Hough S. E., Anderson J. G., J. Brune, F. et. al.* Inverting for attenuation. //Bull. Seism. Soc. Am. 1988. V.78. No.2. p.672–691.
18. *Humphrey J. R., Anderson J. G.* Earthquake source parameters and site response from Guerrero, Mexico. //EOS. 1990. V.71. No.1440.
19. *Pearson K.* On lines and planes of closest fit systems of points in space. //Philosophical Magazin. 1901. No.2. p.559–572.
20. *Su F., Aki K., Teng T. et. al.* The relation between site amplification and surficial geology in central California. //Bull. Seism. Soc. Am. 1992. V.82. No.2. p.580–602.