



УДК 550.344.43

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

<sup>1</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский  
e-mail: lemzikov@kscnet.ru

<sup>2</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский

## Поглощение сейсмических волн в поверхностных слоях вулкана Кизимен (предварительные результаты)

Для оценки параметров поглощения сейсмических волн и станционных поправок в вулканической зоне вулкана Кизимен использованы вулканические землетрясения, произошедшие во время последнего извержения этого вулкана. Для этих землетрясений проводился одновременный подбор параметров очаговых спектров и среды распространения сейсмических волн. Предложенный метод позволяет оценивать параметры поглощения сейсмических волн на пути пробега и под станциями. Оба этих параметра оценивают напряженно-деформированное состояние среды вулканической постройки вулкана Кизимен. Получено изменение увеличения коэффициента, характеризующего станционную поправку, в период увеличения его вулканической активности в августе–декабре 2011 г.

### Введение

Кизимен (Щапинская сопка) высотой 2376 м является действующим вулканом Камчатки. Он единственный, расположенный на западном склоне южной оконечности хребта Тумрок, а в структурном плане — на сочленении грабена Центрально-Камчатской депрессии с горстом Восточного хребта. 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 г. вулкан находился в стадии активной фумарольно-сульфатарной деятельности. В середине ноября 2010 г. началось новое извержение вулкана Кизимен, сейсмическая подготовка которого началась в июле 2009 г. По сейсмическим данным за 2010–2013 гг. на общем фоне активизации вулкана наблюдались периоды относительно повышенной вулканической и сейсмической активности.

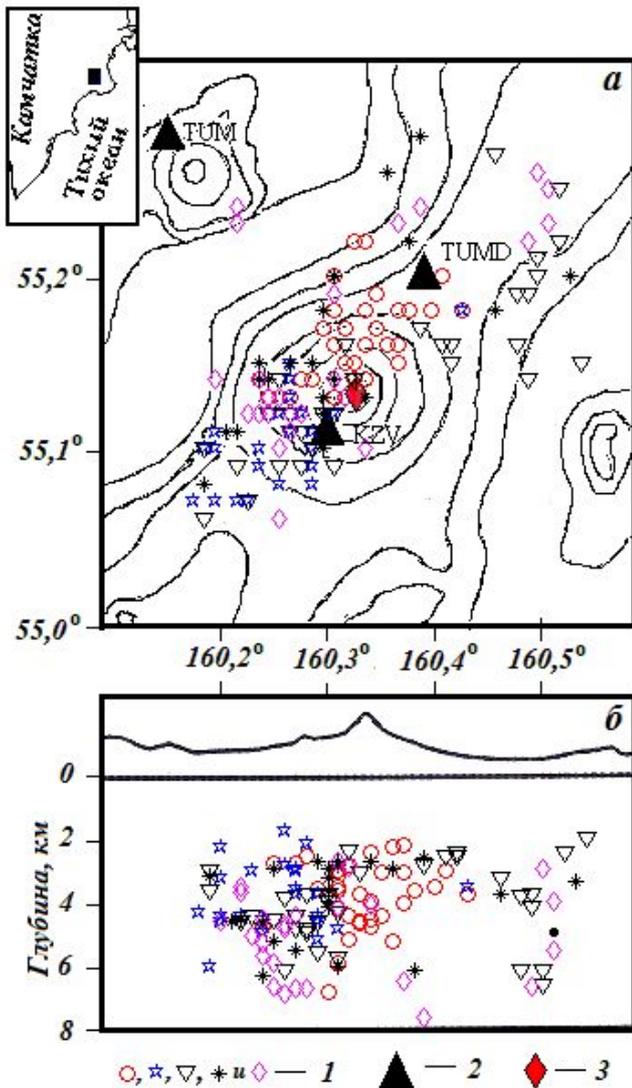
Уровень поглощения сейсмических волн среды в вулканических зонах являются одним из важнейших параметров, характеризующее её напряженно-деформированное состояние. Сейсмические лучи, пробегающие в вулканических средах, содержат информацию об их реологическом и напряженно-деформированном состоянии. С целью изучения поглощения сейсмических волн среды в вулканических зонах используем спектры этих волн, формы которых изменяются в зависимости от влияния на них условий распространения в среде.

Целью работы является определение параметров среды распространения сейсмических волн в вулканической зоне вулкана Кизимен с использованием инверсионного метода предложенного в [4, 10].

### Исходные данные

В работе выбраны вулcano-тектонические землетрясения с очагами, расположенными в очень ограниченном пространстве под вулканом Кизимен. Это пространство определяется координатами:  $55,0^\circ < \varphi < 55,3^\circ$ ,  $160,1^\circ < \lambda < 160,6^\circ$ , где обозначено  $\varphi$  координата с. ш. и  $\lambda$  — в. д. По глубине очагов землетрясения выбирались в диапазоне от 3 до 7 км под вулканом, среднее значение которых определяется на глубине 5 км. Положение очагов выбранных вулканических землетрясения за 2010–2012 гг. в пространстве показано на рис. 1.

Всего выбрано 143 вулканических землетрясения вулкана Кизимен за 2010–2012 гг. В этой выборке в диапазон энергетических классов 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 по [6]. Записи землетрясений произведены сетью цифровых радиотелеметрических сейсмических станций Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН. Пункты регистрации, установленные на склоне и вблизи вулкана Кизимен и которые использованы в работе: Кизимен — (KZV), Тумрок — (TUM) и Тумрокские источники — (TUMD) (см. рис. 1). Две станции: KZV и TUM — короткопериодные и имеет три компоненты записи скорости колебаний грунта: две горизонтальные (SHE, SHN) и одну вертикальную (SHZ). Станция TUMD длиннопериодная, имеет не только широкую частотную полосу



**Рис. 1.** Карта района исследования (а – горизонтальная и б – 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 (1–3 месяца), 2012 (4–8 месяцы) и 2012 (8–12 месяцы); 2 – сейсмические станции; 3 – вершина вулкана Кизимен в горизонтальной проекции. Пояснения в тексте.

пропускания сейсмических колебаний, но и более высокий динамический диапазон по сравнению со станциями KZV и TUM. В числе каналов станции TUMD имеются три компонента записи скорости колебаний грунта: две горизонтальные (BHE, BHN) и одну вертикальную (BHZ), записи по которым выбирались для обработки. В работе использованы слабые сейсмические сигналы, поэтому эффективно использовать их можно в частотном диапазоне от 1 Гц до 15 Гц. В результате сильного ограничения амплитудно-частотной характеристики сейсмических каналов в области нижних и верхних частот, особенно для каналов SHE, SHN и SHZ

вне пределов этого частотного диапазона отношение сигнал/шум мало.

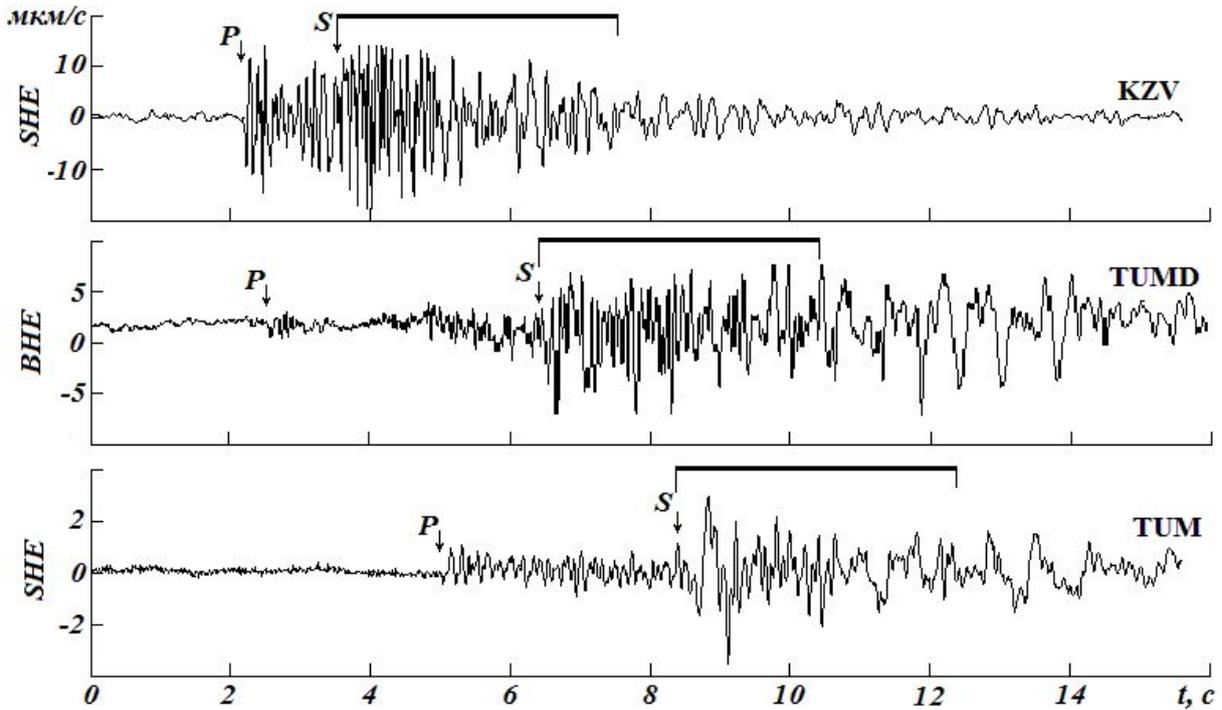
В работе использовались спектры S-волн вулканических землетрясений вулкана Кизимен по записям всех перечисленных станций (см. рис. 1). Обработывались записи вулканических землетрясений, у которых уровень полезного сигнала S-волн не менее чем в три раза превышает уровень помех, т. е. микросейсм. Выбранный для спектрального анализа участок сейсмограммы, содержащий S-волны, не превышал по длительности более 4-х с, как в [1, 2, 3, 4]. На рис. 2 приведены примеры вулканических землетрясений вулкана Кизимен, записи которых получены во время последнего извержения. Интенсивность только S-волн 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.

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 сейсмического канала, которым была произведена регистрация. 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 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12 Гц.

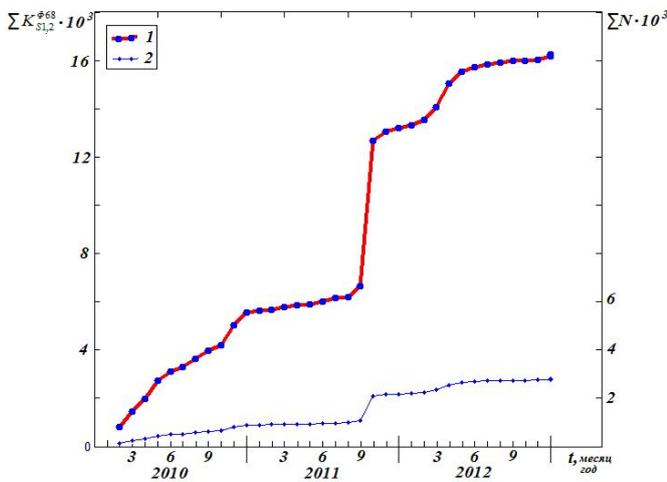
### Метод анализа

Основа метода заключается в сравнении экспериментальных спектров S-волн вулканических землетрясений с теоретическими спектрами Брюна [12]. Подробно метод для тектонических землетрясений описан в [9, 10]. Показано в [4], что этот метод может быть применён для некоторых типов вулканических землетрясений. Кратко отметим только некоторые положения использованного метода.

Значение экспериментального спектра скорости участка S-волны вулканического землетрясения частоте  $f$  обозначим как  $\dot{v}(f)$ . Для модельного спектра Брюна на той же частоте это значение обозначим как  $\dot{v}(f)$ . Значение угловой частоты  $f_c$  модельного спектра определяется экспериментальным спектром участка S-волны вулканического землетрясения. А все остальные элементы модельного спектра, согласно принятой модели, известны. Соответствие между значениями модельного и экспериментального спектров устанавливается после коррекции модельного спектра на соответствующие коэффициенты поглощения сейсмических волн в среде их распространения. Обозначим функцию  $G(R)$ , кото-



**Рис. 2.** Пример записи вулканического землетрясения вулкана Кизимен по записям станций KZV, TUM и TUMD, произошедшего 29 марта 2001 г. в 8:57 UTC, с  $K_{S1,2}^{Ф68} \leq 6,1$ , на глубине  $H = 5,5$  км под вулканом Кизимен. На записях всех станций отчётливо видны вступления P- и S-волн. Отношение сигнал/шум для участков S-волн превышает уровень 3-х раз. Уровень шума определялся по уровню микросейсм перед вступлением P-волн.



**Рис. 3.** Кумулятивный график накопления сейсмической энергии (1) и количества вулканических землетрясений (2) вулкана Кизимен в 2010–2012 гг.

рая характеризует ослабление сейсмических волн из-за геометрического расхождения;  $D(f)$  — поглощение их в среде;  $S(f)$  — поглощение их непосредственно в слоях среды под станцией (станционная поправка). Функцией, характеризующую направленность излучения очага землетрясения пренебрегаем, что корректно в случае использования пунктов регистрации почти полностью окружающих очаг (см. рис. 1).

Деление значения на  $\dot{u}(f)$  соответствующие модельные величины представляет величину разницы между экспериментальным и модельным спектрами. Для линеаризации получаемого соотношения необходимо его прологарифмировать, так как коэффициенты поглощения подчиняются экспоненциальному закону. Просуммировав все остатки варианта моделирования, получаем:

$$\chi^2 = \sum_{k,n} |\ln \dot{u}_k(f_n) - \ln \dot{v}_j(f_n) + \ln G(R) + \ln D(f_n) + \ln S(f_n)|^2 / \sigma_k^2(f_n) \quad (1)$$

где  $\sigma_k^2(f_n)$  имеет смысл дисперсии исходных данных и вычисляется как отношение сигнал/шум для диапазона частот спектра. Она вычисляется по микросейсам до начала записей первых вступлений продольных волн вулканических землетрясений и записью анализируемого сигнала.

Соотношение (1), выражающее разницу между экспериментальным и модельным спектрами, содержит в качестве неизвестных следующие параметры: угловую частоту  $f_c$ , станционную поправку  $t^*$  и параметр поглощения в среде на пути пробега сейсмических волн  $Q$ . Выражение (1) можно составить для нескольких землетрясений, с очагами в различных точках полупространства по записям нескольких станций и определять соответствующие параметры. Однако из-за неопределённости многих параметров удовлетворительного решения может быть не получено. В целях упрощения используем следую-

**Таблица 1.** Статистические характеристики использованных выборок вулканических землетрясений вулкана Кизимен.

год	N	Fi	σFi	La	σLa	Gl	σGL	K	σK
2010	33	55,16	0,026	160,32	0,043	4,41	1,34	6,1	0,31
2011	24	55,10	0,028	160,25	0,055	4,83	1,43	6,1	0,36
2012 <sub>1</sub>	36	55,14	0,050	160,31	0,111	4,88	1,81	5,9	0,64
2012 <sub>2</sub>	25	55,14	0,055	160,29	0,090	4,55	1,48	5,8	0,49
2012 <sub>3</sub>	25	55,14	0,059	160,26	0,097	5,90	1,74	6,1	0,46

щие 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 очагами практически в одном и том же месте должны быть приблизительно 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. В этом случае выполняется подбор значения угловой частоты модельного спектра Брюна и скорректированные на поглощение сейсмических волн значения этого спектра сравниваются с записями этого землетрясения по всем станциям. Во второй подинверсии уже при определённых значениях угловой частоты  $f_c$  последовательно на фиксированных частотах (индекс  $n$ ) определялись параметры  $t^*$ ,  $Q$  по набору записей нескольких землетрясений одной станции. В каждом случае выполнялся подбор неизвестных параметров путём перебора и составлялись уравнения.

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{2,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & a_{k,k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_k \end{pmatrix} \quad (2)$$

Столбец  $d$  составлялся для первой и второй подинверсий по составляется по значениям соотношения (1). Члены диагонали определяются по соотношению сигнал/шум для каждой записи. Чтобы минимизировать соотношение (1) решение уравнений (2) выполняется методом SVD (Singular Value Decomposition). 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, причём 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.

В качестве индикатора наилучшего решения при выборе определённой комбинации параметров  $f_c$ ,  $t^*$ ,  $Q$  использовалось свойство подбора линий к некоторой системе точек в пространстве, указанное в [14], 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. Выборки вулканических землетрясений выполнялись в соответствии с уровнем вулканической и сейсмической активностью вулкана Кизимен. Таким образом, выборка исходных данных является частью методических вопросов обработки.

Очередное извержение вулкана Кизимен началось в середине ноября 2010 г. Сейсмическая активность его повышалась весь 2010 г., и начало его извержения отмечается резким изменением наклона на кумулятивном графике накопления сейсмической энергии за этот год. К сожалению, использованная в работе методика не позволяет проанализировать данные за 2010 г., так как сейсмическая станция TUMD были установлена только в 2011 г. Данные за 2010 г. получены только по двум станциям: KZV и TUM — и рассматриваются как дополнительные к результатам, полученным в 2011 и 2012 г. Активность вулкана Кизимен слабо и равномерно изменялась в 2011 г. с начала года до августа месяца — это определяло одну выборку вулканических землетрясений (2011). В то же время наблюдаются большие вариации активности вулкана Кизимен в 2012 г. Поэтому все землетрясения за 2012 г. разделены на три выборки: исходные данные за январь — март обозначены как выборка 2012<sub>1</sub>; за апрель–август — 2012<sub>2</sub>; за сентябрь–декабрь — 2012<sub>3</sub>. Всего было сделано 5 выборок по вулкану Кизимен. Выборки вулканических землетрясений определяются как: 2010, 2011, 2012<sub>1</sub>, 2012<sub>2</sub> и 2012<sub>3</sub>. Приведём основные статистические характеристики этих выборок (см. таблицу).

Приведенные статистические характеристики использованных выборок вулканических землетрясений вулкана Кизимен являются дополнением к визуальным данным на рис. 1. Все выборки имеют примерно одинаковый разброс данных по координатам очагов и их энергетических классов. Ни одна

из этих выборок не имеет каких-либо особенных отличий или преимуществ перед другими по приведённым статистическим характеристикам и визуальным данным на рис. 1.

### 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 трёх сейсмических станций: KZV, TUM и TUMD — путём теоретических расчётов с применением соотношения (1) и составлением уравнения (2) определяется угловая частота  $f_c$  очагового спектра S-волны.

При составлении уравнений необходимо использовать вполне определённые значения параметров поглощения сейсмических волн. Параметры добротности в конкретных условиях расположения сейсмических станций и очагов землетрясений на вулкане Кизимен имеют вполне определённые диапазоны значений. Пределы значений станционных поправок  $t^*$  и добротностей среды  $Q$  при первоначальном расчёте принимались по ранее полученным результатам из [3, 7, 8, 13]. 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. Уравнение (2) составлялось по записям нескольких землетрясений только одной станции. Значение станционной поправки  $t^*$  должно быть одинаковым для данной станции по записям любых землетрясений. Значение  $Q$  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 неопределённостей. И специально для соблюдения этих условий делались выборки вулканических землетрясений вулкана Кизимен. Значение угловой частоты  $f_c$  очагового спектра для каждого землетрясения в соотношении (1) используется по результатам первой подинверсии.

Практически перед началом вычислений необходимо выбрать значения параметров  $t^*$  и  $Q$ , которые, как сказано ранее, выбирались с учётом литературных данных и которые являлись контрольными значениями. Для упрощения расчётов они выполнялись при значении параметра  $Q$  в диапазоне 20 до 500, с шагом по этому параметру  $\Delta Q = 2$ . А значения параметра  $t^*$  выбирались в диапазоне — от 0,001 до 0,6, с шагом —  $\Delta t^* = 0,001$ . Выбранные для расчётов запредельные значения обоих параметров и очень маленькие шаги их изменения значи-

тельно увеличивает по времени процесс вычисления на компьютере, но облегчает анализ полученных результатов. Результаты выбирались при сравнении их в разных выборках при разных частотах для нескольких станций.

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

Отмечается существенное изменение станционных поправок  $t^*$  в 2012 г. по сравнению с предыдущими годами по результатам всех трёх станций. Эти изменения на некоторых частотах превосходят уровень среднеквадратичного отклонения. Учитывая, что на концах частотных интервалов возможны искажения, выполним расчёт статистической значимости различий станционных поправок  $t^*$  для станции KZV по выборкам 2011 и 2012<sub>1</sub> для частоты 6 Гц. Среднее значение для точки 6 Гц для 2011  $t^* = 0,097$ , среднее квадратичное отклонение  $\sigma = 0,021$ . Среднее значение для точки 6 Гц для 2012<sub>1</sub>  $t^* = 0,119$ , среднее квадратичное отклонение  $\sigma = 0,026$ . При уровне значимости  $\alpha = 0,01$  проверим нулевую гипотезу, что средние значения станционных поправок  $t^*$  за 2011 и 2012<sub>1</sub> равны. Определим конкурирующую гипотезу о том, что эти средние не равны. По таблицам функций Лапласа находим  $z_{кр} = 2,58$ . По приведённым данным  $z_{набл} = 2,95$ . Так как  $z_{набл} > z_{кр}$  то нулевую гипотезу отвергаем. Средние значения станционных поправок  $t^*$  за 2011 и 2012<sub>1</sub> не равны. Следует отметить, что уменьшение параметра  $t^*$  обозначает уменьшение поглощения энергии сейсмических волн в среде под станцией, в то же время уменьшение  $Q$  обозначает увеличение поглощения энергии сейсмических волн в среде.

Большое увеличение по модулю параметра  $t^*$  означает увеличение поглощающих свойств поверхностных слоёв вулкана Кизимен в 2012 г. по сравнению с предыдущими годами. В августе 2011 г. 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 г. Данные после августа 2011 г. по техническим причинам не обработаны. Но данные за 2012 г. показывают, что произошли существенные изменения в поверхностных слоях вулкана Кизимен после августа 2011 г.

На рис. 5 приведена зависимость величины  $1/Q$  от частоты колебаний сейсмических волн для станции KZV по всем выборкам. Чем больше по модулю значение  $Q$ , тем более консолидированные среды пробегает сейсмические волны. Так же чем больше гипоцентрально расстояние, тем в более глубокие зоны среды проникают сейсмические волны. Представленный метод определения добротности среды, как и многие другие, позволяют опреде-

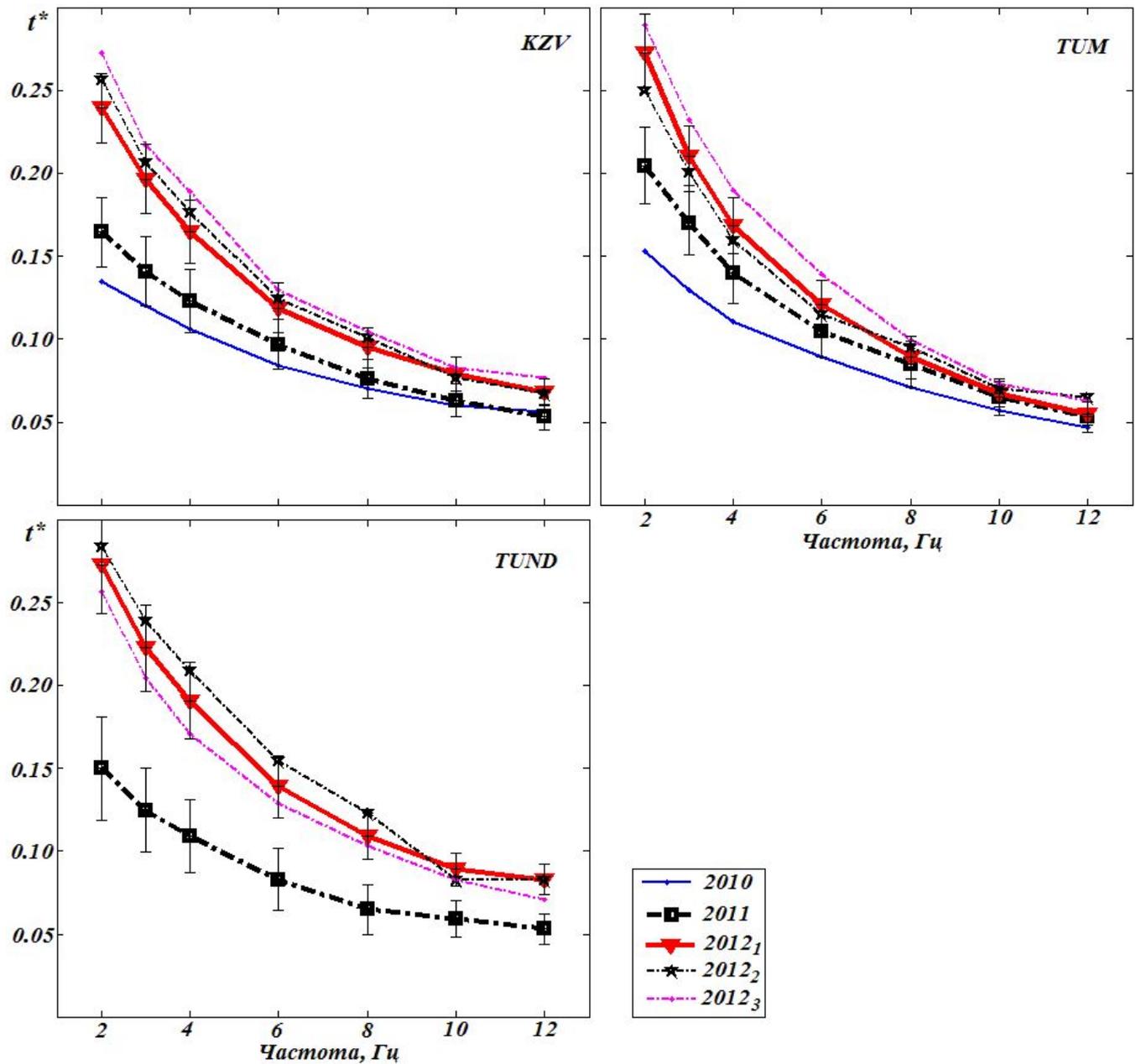


Рис. 4. График спектральных стационарных поправок  $t^*$  для станции за 2010, 2011 и 2012 г.ов.

лять только среднее значение параметра  $Q$  по всему пути сейсмического луча. Поэтому для более дальних расстояний значение параметра  $Q$  больше. Таким образом, вполне очевидно, что для станций TUMD и TUM значение параметра  $Q$  по модулю на всех частотах больше по сравнению с KZV. Однако при сравнении значений параметров  $t^*$  и  $Q$  на рис. 4 и 5 не отмечается каких-либо изменений значений  $Q$  связанных с увеличением вулканической активности вулкана Кизимен во второй половине 2011 г.

Из анализа рис. 4, 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  $Q$ . Так как анализировались поверхностные вулканические землетрясения, сейсмические волны которых распространяются в поверхностных слоях вулканической зоны вулкана Кизимен, то это указывает, что в этих слоях произошли изменения в 2011 г.

### Вывод

Таким образом, предложен способ, который позволяет оценить поглощающие свойства среды с использованием вулканических землетрясений. Получено увеличение поглощающих свойств среды

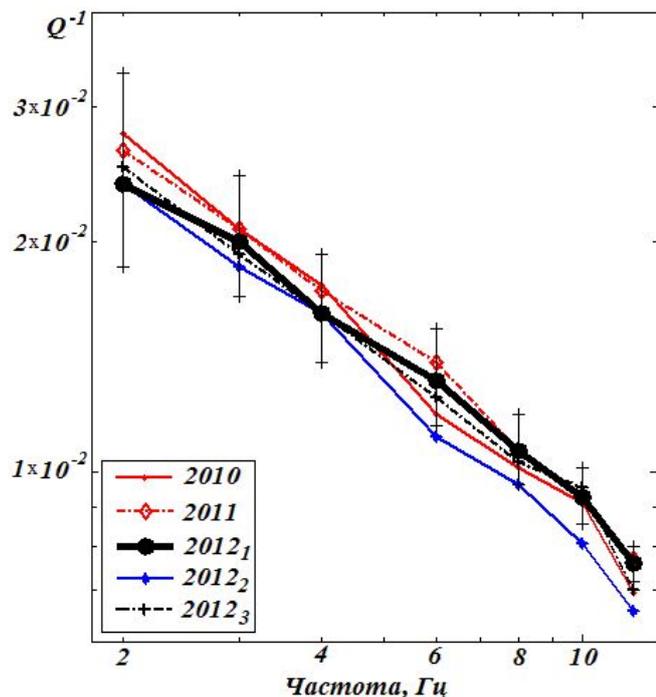


Рис. 5. Значения параметра добротности  $Q$  по станциям вблизи вулкана Кизимен по данным станции KZV по вулканическим землетрясениям с очагами на глубине 5 км.

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. Петропавловск-Камчатский: 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 // Материалы конференции, посвящённой Дню вулканолога, 30–31 марта 2009 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2010. С. 167–177.
4. Лемзиков В.К., Лемзиков М.В., Гарбузова В.Т. Метод определения стационарных поправок и добротности среды с использованием вулканических землетрясений. В печати
5. Лемзиков В.К. Поглощение и рассеяние поперечных сейсмических волн в литосфере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2007. №3. С. 50–63.
6. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.:Наука. 1972. 116 с.
7. 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.
8. 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.
9. 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. Vol. 75. №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. Seismol. Soc. Amer. 1991. Vol. 81. №5. P. 1754–1782.
11. Boore D. M. Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method // Pure Appl. Geophys. 2003. Vol. 160. №2. P. 635–676.
12. Brune J. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. Vol. 75. №6. P. 4997–5009.
13. Hough S. E., Anderson J. G. J. Brune et al. Attenuation near Anza, California // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1988. Vol. 78. №2. P. 672–691.
14. Pearson K. On lines and planes of closest fit systems of points in space // Philosophical Magazin. 1901. №2. P. 559–572.