

14. Федотов С.А., Двигало В.Н., Жаринов Н.А. и др. Извержение вулкана Шивелуч в мае-июле 2001 г. // Вулканонология и сейсмология. 2001. № 6. С. 1-13.
15. Хубуная С.А., Жаринов Н.А., Муравьев Я.Д. и др. Извержение вулкана Шивелуч в 1993 г. // Вулканонология и сейсмология. 1995. № 1. С. 3-20.
16. Dirksen O., Humphreys M.C.S., Pletchov P., Melnik O., Demyanchuk Y., Sparks R.S.J., Mahony S. (2006) The 2001–2004 dome-forming eruption of Shiveluch Volcano, Kamchatka: observation, petrological investigation and numerical modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 155, P. 201-226.
17. Humphreys M.C. S., Blundy J.D., Sparks R.S.J. (2006) Magma Evolution and Open-System Processes at Shiveluch Volcano: Insights from Phenocryst Zoning. *Journal of Petrology*, 47, P. 2303-2334
18. Ponomareva, V.V., Pevzner, M.M., and I.V. Melekestsev (1998). Large debris avalanches and associated eruptions in the Holocene eruptive history of Shiveluch Volcano, Kamchatka, Russia, *Bull. of Volcanol.*, 59, P. 490-505.
19. Ponomareva, V.V., Kyle P., Pevzner, M.M., et al. (2007). Holocene eruptive history of Shiveluch volcano, Kamchatka Peninsula, Russia. AGU monograph. (In print).

УДК 550.344.43

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОГЛОЩАЮЩИХ И РАССЕИВАЮЩИХ СВОЙСТВ СРЕДЫ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА

**М.В. Лемзиков**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,  
683006; e-mail: [lemzikov@kscnet.ru](mailto:lemzikov@kscnet.ru)*

Записи слабых вулcano-тектонических землетрясений вулкана Ключевской обработаны методом набора временных окон. Данный метод использует нормированные интегралы от объемной плотности сейсмической энергии по нескольким временным окнам на записи землетрясения, пропущенной через полосовой фильтр. Определение оценок поглощающих и рассеивающих свойств среды выполнялось путем подбора параметров, обеспечивающих наилучшее совпадение экспериментальных и теоретических зависимостей названных интегралов от гипоцентрального расстояния. Теоретические зависимости нормированных интегралов от гипоцентрального расстояния вычислялись с использованием аналитического решения уравнения переноса сейсмической энергии в условиях простой модели изотропного рассеяния скалярных сейсмических волн от импульсного точечного источника в однородной по рассеивающим и поглощающим свойствам среде. Получены оценки параметров внутреннего поглощения и рассеивания, которые характеризуют физическое состояние среды вулкана Ключевской. Сравнение средних оценок добротности, полученных в данной работе по

вулкану Ключевской (Камчатка), с литературными данными показало, что результаты данной работы почти равны оценкам добротности по вулкану Этна (Италия) и в то же время вместе значительно ниже оценок добротности, полученных по тектоническим землетрясениям в литосфере Камчатки.

**Введение.** Суммарное затухание сейсмических волн в земле обусловлено двумя факторами: поглощением за счет отличия свойств земных пород от идеально упругих; рассеянием на неоднородностях, природа которых объясняется пространственным изменением физических свойств земных недр. Рассеяние приводит к пространственно-временному перераспределению волновой энергии, а поглощение - к безвозвратным потерям энергии, которая идет на нагревание и/или перестройку структуры земной среды. Параметры суммарного затухания сейсмических волн в литосфере являются важными геофизическими характеристиками, которые содержат информацию о структуре среды и о реологических свойствах земных недр. Надежные количественные оценки параметров суммарного затухания представляют большой практический интерес как необходимые исходные данные для исследований свойств сейсмических источников, а также для прогноза характеристик сильных движений грунта от сценарных землетрясений.

Для определения этих параметров поглощения сейсмических волн в среде в последнее время стали использоваться короткопериодные записи землетрясений. Очень успешно для этих целей используется coda - хвостовая часть записи землетрясений. Первоначально выполнялось определение коэффициента рассеивания по записям близких землетрясений преимущественно на основе соотношения амплитуд прямых и рассеянных волн (коды). Интерпретация записей обычно велась на основе простейшей теоретической модели однократного изотропного рассеяния объемных волн в среде со статически однородно распределенными рассеивателями и пространственно однородным поглощением [8]. Эта модель формирования коды успешно применялась для определения поглощающих свойств среды во многих сейсмически активных регионах Земли, хотя законность пренебрежения многократными рассеянными  $S$ -волнами всегда подвергалась сомнению. Для устранения этих недостатков, дальнейшее развитие моделей формирования коды шло путем численного моделирования. При этом численное моделирование коды выполнялось методом Монте-Карло [10]. Этот метод учитывает многократное рассеяние сейсмических волн, но требует большого объема вычислений на ЭВМ. Рассматривались 2-х и 3-х мерные модели многократного рассеивания, случаи изотропного и анизотропного рассеивания.

Эффективный метод, позволяющий разделять эффекты рассеивания и поглощения в рамках модели изотропного рассеивания, предложен в работе Ру-Шана Ву [14]. Теоретическую основу метода составляет аналитическое решение стационарного уравнения переноса излучения. Позже этот метод был усовершенствован [9] путем привлечения для интерпрета-

ции решения нестационарного уравнения переноса. Этот усовершенствованный метод получил название MLTWA (Multiple Lapse Time Window Analysis). Использование интегралов от записи по нескольким временным окнам делает этот метод принципиально весьма надежным.

В настоящее время найдены аналитические решения нестационарного уравнения переноса сейсмической энергии для некоторых моделей формирования коды [1, 13].

В данной работе используется метод MLTWA [9] и аналитическое решение нестационарного уравнения переноса сейсмической энергии формирования коды [1] с целью определения и исследования параметров поглощающих и рассеивающих свойств среды вулкана Ключевской.

**Исходные данные.** В работе использованы записи цифровых радиотелеметрических сейсмических станций Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) из архива хранения за период с 1999-2006 гг. (рис. 1).

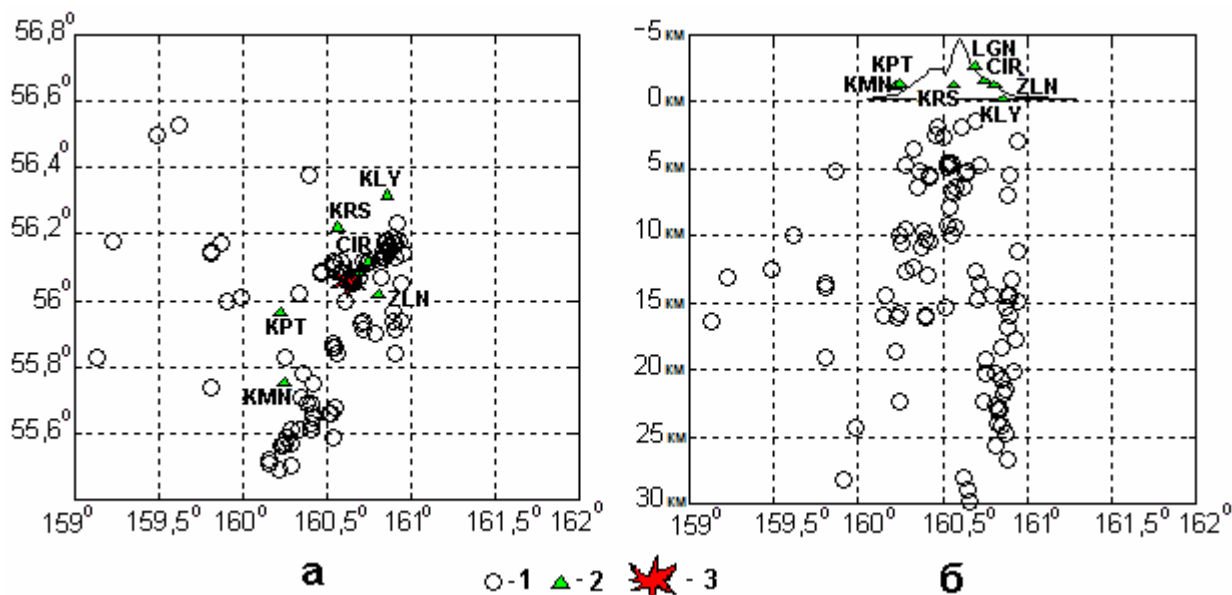


Рис. 1. Карта слабых вулcano-тектонических землетрясений вулкана Ключевской, обработанных методом MLTWA. а) горизонтальная проекция; б) вертикальная проекция по плоскости запад-восток. 1 - эпицентры вулcano-тектонических землетрясений вулкана Ключевской, 2 - радиотелеметрические сейсмические станции КФ ГС РАН, 3 - вулкан Ключевской.

Всего, с использованием данных радиотелеметрических сейсмических станций КФ ГС РАН, выбрано и обработано из архива хранения 90 слабых вулcano-тектонических землетрясений. По энергетическому классу, они разделяются следующим образом:  $K_{S1.2}^{\Phi_{68}}=5-10$  событий;  $K_{S1.2}^{\Phi_{68}}=6-63$  события;  $K_{S1.2}^{\Phi_{68}}=7-15$  событий;  $K_{S1.2}^{\Phi_{68}}=9-1$  событие. Землетрясения вулкана Ключевской в, основном, выбирались с очагами под вулканом на глубинах 0-30 км. Землетрясения относятся к первому типу вулканических землетрясений и по характеру записи ничем не отличаются от местных тектонических землетрясений [5]. Эти землетрясения называют вулcano-тектонические, поскольку по механизму очага и виду записи они практически

неотличимы от чисто тектонических землетрясений [3]. Вулкано-тектонические землетрясения возникают в твердой земле под действием непрерывно меняющегося поля напряжений, создаваемого вокруг магматических каналов, очагов, силлов и даек, внедряющихся в вулканическую постройку [2]. Они характеризуются четкими вступлениями волн Р и S и быстро спадающей кодой, преобладающие частоты лежат в широком диапазоне от 1 до 40 Гц. [2]. Глубокие длиннопериодные землетрясения характеризуются более низкочастотной квазимонохромной кодой, четко выраженной пиковой формой спектра, диапазон преобладающих частот лежит в интервале от 0.5 до 5 Гц [3]. Активную роль в генерации сигналов на этих записях играют флюиды [3]. Записи таких землетрясений в работе не использовались.

В работе использовались радиотелеметрические сейсмические станции КФ ГС РАН: Цирк (CIR), Ключи (KLY), Зеленая (ZLN), Логинова (LGN), Каменистая (KMN), Крестовский (KRS) и Копыто (KPT) (см. рис. 1). Высоты этих станций над уровнем моря, соответственно 1420, 50, 1065, 2500, 1147, 1120 и 1004 м. Станции установлены на конусе и вблизи вулкана Ключевской. Каждая станция имеет три компоненты записи скорости колебаний грунта: две горизонтальные (SHE, SHN) и одну вертикальную (SHZ). Эти станции по сейсмическим каналам и по частотному диапазону, оптимально соответствуют поставленной в работе задаче.

**Метод исследования.** В работе для получения оценок поглощения и рассеивания поперечных волн в литосфере Камчатки используется метод MLTWA [9]. Метод основывается на анализе интегралов от объемной плотности сейсмической энергии по нескольким интервалам времен запаздывания как функций гипоцентрального расстояния и параметров поглощения и рассеивания. Каждая запись вулкано-тектонического землетрясения вулкана Ключевской вначале корректировалась на амплитудно-частотную характеристику сейсмического канала станции, а затем пропусклась через полосовой цифровой фильтр Баттерворта третьего порядка. В работе выбрано четыре октановых фильтра Баттерворта третьего порядка с полосами пропускания: 0.5-1, 1-2, 2-4 и 4-8 Гц с осевыми частотами 0.75, 1.5, 3.0 и 6.0 Гц соответственно. Дальнейшая обработка проводилась отдельно по каждой из частотных полос.

Для каждой из трех компонент оценивался квадрат огибающей записи. Значения квадрата огибающей коды в каждой частотной полосе корректировались на уровень квадрата микросейсмического шума. Далее рассчитывался средний по трем компонентам квадрат огибающей записи.

После этого, для трех временных окон –  $[t_s, t_s + 7.5 \text{ с}]$ ,  $[t_s + 7.5 \text{ с}, t_s + 15 \text{ с}]$  и  $[t_s + 15 \text{ с}, t_s + 22.5 \text{ с}]$  определяются экспериментальные величины интегралов объемной плотности сейсмической энергии. Эти интегралы корректируются на величину геометрического расхождения и нормируются на величину «единичного» интеграла, определенного по оценке мощности сигнала в интервале коды, включающем заданное референтное время  $t_{ref}$  равное 45

сек. Пример обработки записей слабых вулcano-тектонических землетрясений показан на рисунке 2.

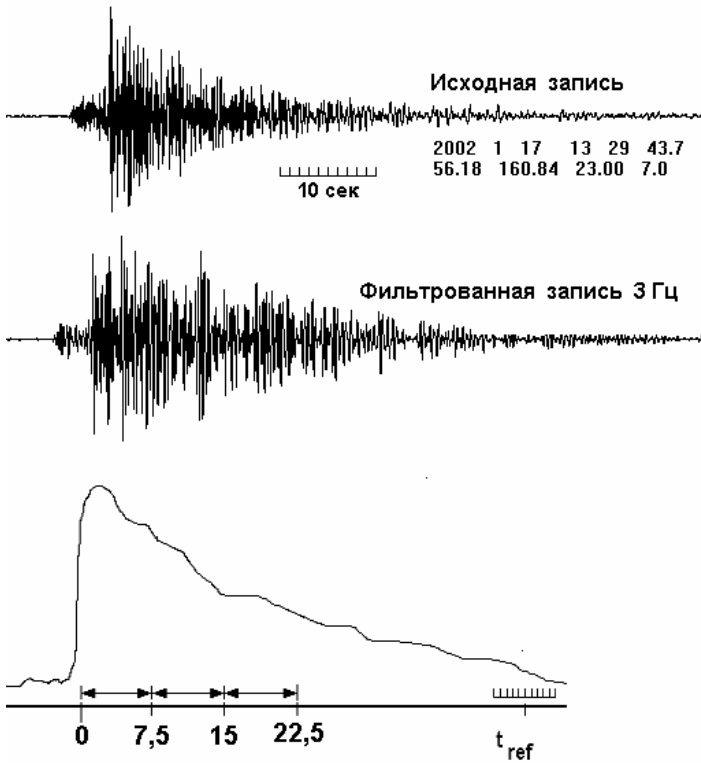


Рис. 2 Пример вулcano-тектонического землетрясения вулкана Ключевской и демонстрация метода обработки MLTWA. Приведены исходная, фильтрованная запись землетрясения по станции «CIR» по каналу SHN и, схематически, сглаженное значение оценки мощности фильтрованной записи землетрясения. Применен полосовой фильтр с частотами среза  $f_1 = 2$ ,  $f_2 = 4$  Гц и  $f_{осевая} = 3$  Гц.

Отмечены временные интервалы интегрирования:  $[t_s, t_s+7,5 \text{ сек}]$ ,  $[t_s+7,5 \text{ сек}, t_s+15 \text{ сек}]$  и  $[t_s+15 \text{ сек}, t_s+22,5 \text{ сек}]$ ; а так же момент времени  $t_{ref}$  и временной интервал интегрирования фильтрованной записи, содержащий момент времени  $t_{ref}$ .

Для теоретической объемной плотности сейсмической энергии  $E(r, t | f)$  в точке  $r$  от источника, и в момент времени  $t$  в полосе частот  $(f - \Delta f, f + \Delta f)$  в работе [13] предложено приближенное аналитическое решение уравнения переноса сейсмической энергии, которое получено с использованием интерполяции между точными решениями для двумерного и четырехмерного случаев. Это аналитическое решение уравнения в работе [1] записано как:

$$E(r, t | f) \approx \frac{W_0(f) * e^{-ct\alpha_t}}{4\pi r^2 c} \delta\left(t - \frac{r}{c}\right) + W_0(f) * H\left(t - \frac{r}{c}\right) * \frac{(1 - r^2 / c^2 t^2)^{1/8}}{[4\pi c t / (3\alpha_t B_0)]^{3/2}} * e^{-ct\alpha_t} * G\left(ct\alpha_t B_0 \left[1 - \frac{r^2}{c^2 t^2}\right]^{3/4}\right), \quad (1)$$

где приближенно для функции  $G(x)$  можно принять следующее значение:

$$G(x) = 8(3x)^{-3/2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\Gamma\left(\frac{3}{4}k + \frac{3}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{3}{4}k\right)} \frac{x^k}{k!} \approx e^x \sqrt{1 + 2,026/x},$$

здесь  $\Gamma(x)$  – гамма-функция,  $H(x)$  – ступенчатая функция Хевисайда, а также предполагается, что коэффициенты  $\alpha_t = \alpha_t(f)$  и  $B_0 = B_0(f)$  зависят от частоты. Это приближенное аналитическое

решение уравнения применялось для расчета теоретических интегралов и интерпретации данных в частотных полосах 1-2, 2-4 и 4-8 Гц.

Для полосы частот 0.5-1 Гц с осевой частотой 0.75 Гц более адекватной является модель рассеивания поверхностных волн. Поэтому для интерпретации данных в этой полосе мы будем использовать двумерный аналог приближенного аналитического решения уравнения переноса сейсмической энергии (1), который имеет вид [1]:

$$E(r, t | f) \approx \frac{W_o(f)e^{-ct\alpha_t}}{2\pi c} \delta\left(t - \frac{r}{c}\right) + H\left(t - \frac{r}{c}\right) \frac{W_o(f)\alpha_t B_o}{2\pi\sqrt{c^2 t^2 - r^2}} \exp[\alpha_t B_o \sqrt{c^2 t^2 - r^2} - ct\alpha_t] \quad (2)$$

Конечно, приближенное аналитическое решение уравнения переноса сейсмической энергии (1) будет соблюдаться при определенных условиях, поэтому, аналогично работе [1], допустим: 1 – очаг землетрясения точечный, импульсный, излучает сейсмические волны сферически симметрично; 2 – среда является однородной по поглощающим и рассеивающим свойствам; 3 – скорость сейсмических волн постоянна в пространстве; 4 – рассеяние изотропно; 5 – обменное рассеяние (из  $P$  – в  $S$ - волны, и наоборот) отсутствует; 6 – рассеянные волны некогерентны, то есть для интенсивностей (средних квадратов амплитуд) рассеянных волн выполняется свойство аддитивности. Мы примем все эти допущения и практически повторим методику обработки землетрясений по методу MLTWA из работы [1].

Расчет теоретических значений объемной плотности сейсмической энергии, проводился для следующего набора пар значений коэффициентов ( $\alpha_t, B_o$  : ( $\alpha_t = 0.03, 0.04, 0.05, \dots, 0.60$ ;  $B_o = 0.1, 0.12, 0.14, \dots, 1.0$ ). Сравнивая способом перебора экспериментальные значения интегралов с соответствующими теоретическими значениями интегралов рассчитанными путем интегрирования аналитических решений уравнений переноса сейсмической энергии (1, 2), можно получить оценки параметров ( $\alpha_t$  и  $B_o$ ). Для получения точечных оценок ( $\alpha_t$  и  $B_o$ ), решалась задача минимизации функции определенной на заданном множестве значений пар значений ( $\alpha_t$  и  $B_o$ ).

**Результаты и обсуждение.** Вулкан Ключевской – типичный стратовулкан с конусом правильной формы и абсолютной высотой около 4750 метров, самый высокий из действующих вулканов Европы и Азии, сложен базальтовыми лавовыми потоками и пирокластическим материалом, преобладающим в верхней части постройки [6]. Вулканические продукты представлены базальтами и андезибазальтами. Вулкан Ключевской самый активный вулкана Камчатки. Здесь часто происходят извержения через вершинный кратер и побочные извержения. Извержения, как из центрального кратера так и побочных прорывов могут поставлять продукты общим объемом 0.001-0.5 км<sup>3</sup>. Опасность от вулкана Ключевской связана с лавовыми потоками, выпадением тефры, лахарами, вулканическими и вулканосейсмо-тектоническими обвалами. Выпадение тефры может оказать негативное влияние на

природу, население и хозяйственные объекты на расстоянии до 15-20 км от эруптивного центра, мощность ее может изменяться от 1-2 см у нижней границы этой зоны до 100-150 см в районе вершинного кратера или у подножия шлаковых конусов побочных прорывов. Лавовые потоки термальных извержений могут распространяться на расстоянии до 15 км от вершинного кратера. Максимальная возможная длина лавовых потоков побочных извержений составляет 10-12 км [7].

В постройке вулкана и под ним на глубине до 30 км постоянно происходят вулканические землетрясения, которые не исчезают даже во время извержения вулкана Ключевской.

На рисунке 3 для трех временных окон ( $[t_s, t_s+7.5 \text{ сек}]$ ,  $[t_s+7.5 \text{ сек}, t_s+15 \text{ сек}]$  и  $[t_s+15 \text{ сек}, t_s+22.5 \text{ сек}]$ ) и четырех частотных полос с осевыми частотами (0.75, 1.5, 3.0, и 6.0 Гц) приведены значения нормированных интегралов объемной плотности энергии сейсмических волн в зависимости от гипоцентрального расстояния, полученные по станциям «CIR», «KLY», «LGN», «ZLN». На рисунке 4 для станций «KMN», «KPT», и «KRS» КФ ГС РАН.

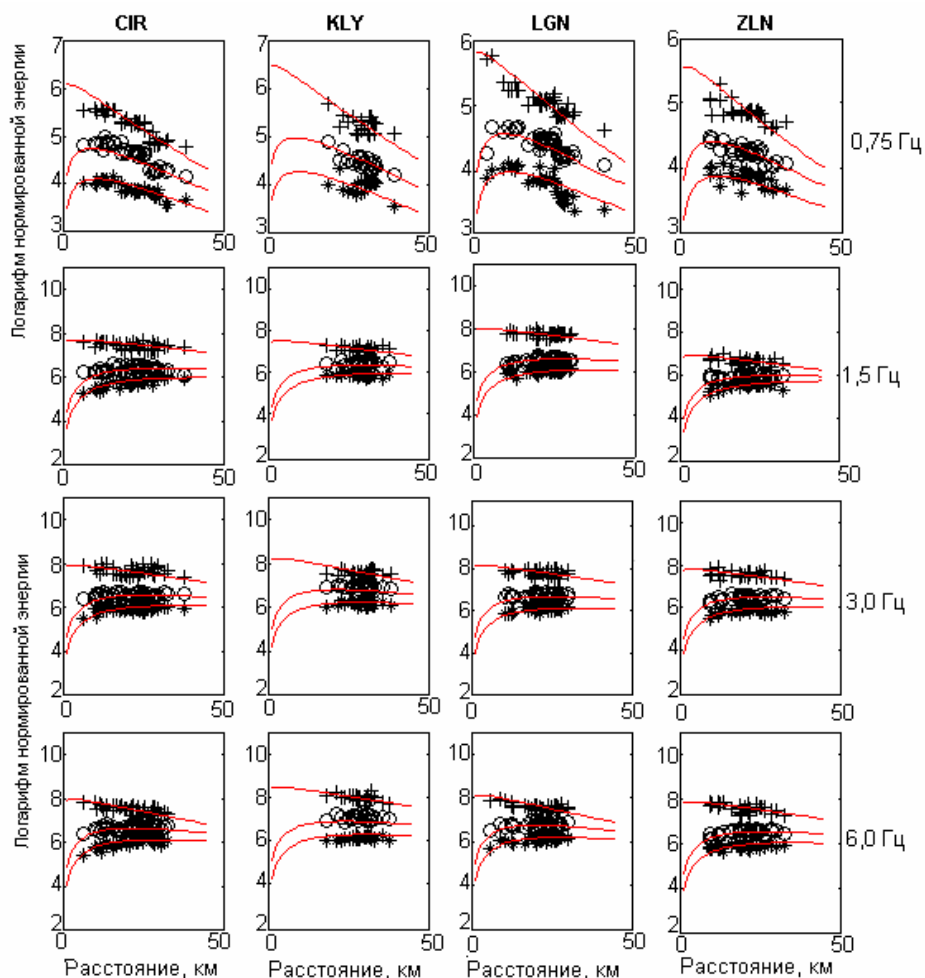


Рис. 3 Интегралы от плотности сейсмической энергии, скорректированные на геометрическое расхождение и нормированные к уровню асимптоты коды при  $t_{ref} = 45 \text{ сек}$ , как функция гипоцентрального расстояния  $r$ , для трех временных окон ( $[t_s, t_s+7,5 \text{ сек}]$ ,  $[t_s+7,5 \text{ сек}, t_s+15 \text{ сек}]$ ,  $[t_s+15 \text{ сек}, t_s+22,5 \text{ сек}]$ ) и четырех частотных полос с осевыми частотами (0.75, 1.5, 3.0, 6.0 Гц). Сплошными линиями показаны теоретические кривые для пар  $(\alpha_t(f) = \bar{\alpha}_t(f), B_0(f) = \bar{B}_0(f))$ , принимающих минимум целевой функции в заданной полосе частот. 1 – экспериментальные данные для временного окна  $[t_s, t_s+7,5 \text{ сек}]$ , 2 – тоже для  $[t_s+7,5 \text{ сек}, t_s+15 \text{ сек}]$ , 3 – тоже для  $[t_s+15 \text{ сек}, t_s+22,5 \text{ сек}]$ . CIR, KLY, LGN и ZLN – радиотелеметрические сейсмические станции.

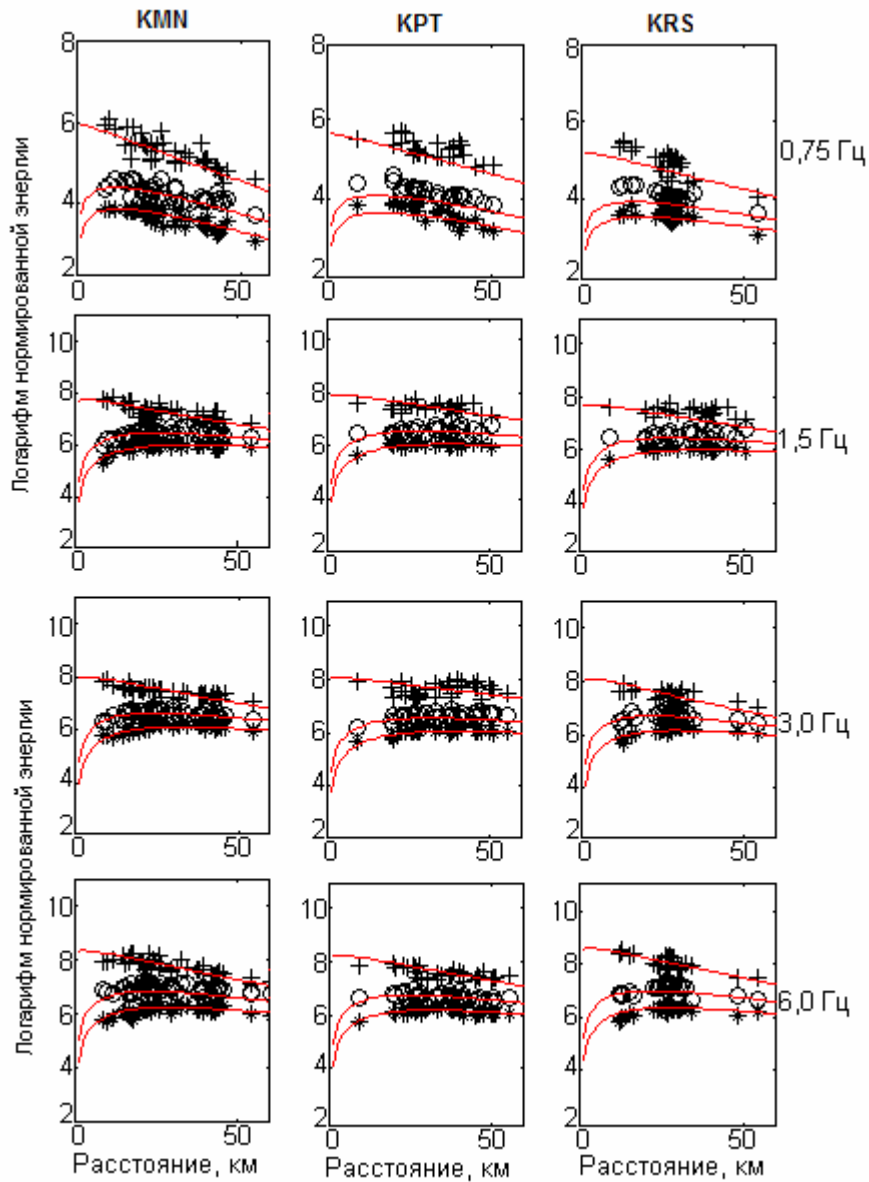


Рис. 4 Интегралы от плотности сейсмической энергии, скорректированные на геометрическое расхождение и нормированные к уровню асимптоты коды при  $t_{ref} = 45$  сек, как функция гипоцентрального расстояния  $r$ , для трех временных окон ( $[t_s, t_s+7,5 \text{ сек}]$ ,  $[t_s+7,5 \text{ сек}, t_s+15 \text{ сек}]$ ,  $[t_s+15 \text{ сек}, t_s+22,5 \text{ сек}]$ ) и четырех частотных полос с осевыми частотами (0.75, 1.5, 3.0, 6.0 Гц). Сплошными линиями показаны теоретические кривые для пар  $(\alpha_i(f) = \bar{\alpha}_i(f), B_0(f) = \bar{B}_0(f))$ , принимающих минимум целевой функции в заданной полосе частот. 1 – экспериментальные данные для временного окна  $[t_s, t_s+7,5 \text{ сек}]$ , 2 – тоже для  $[t_s+7,5 \text{ сек}, t_s+15 \text{ сек}]$ , 3 – то же для  $[t_s+15 \text{ сек}, t_s+22,5 \text{ сек}]$ . KMN, KRS и KPT – радиотелеметрические сейсмические станции.

Сплошными линиями показаны теоретические кривые, обеспечивающие наилучшую подгонку теоретических расчетов к наблюдаемым данным в соответствующих временных окнах.

В таблице 1 приведены значения параметров суммарного затухания  $\alpha_i$  и сейсмического альbedo  $B_0$ , полученные с применением аналитического решения уравнений переноса сейсмической энергии (1, 2) и приведены средние значения параметров в каждой частотной полосе.



**Таблица 1. Оценки параметров  $\alpha_t$  и  $B_0$  полученных с применением приближенных аналитических уравнений переноса сейсмической энергии (1 и 2)**

Станция (код)	N	$\alpha_t * 10^2$				$B_0 * 10^2$			
		0,75 Гц	1,5 Гц	3,0 Гц	6,0 Гц	0,75 Гц	1,5 Гц	3,0 Гц	6,0 Гц
CIR	43	17±15	6±2	8±2	12±3	58±15	54±6	58±7	68±5
KLY	27	17±5	8±4	11±4	8±3	52±9	66±5	62±6	48±11
LGN	47	17±4	7±1	8±1	13±2	62±8	52±3	54±4	68±4
ZLN	35	17±7	9±1	8±1	8±2	66±7	78±2	60±2	58±5
KMN	48	9±5	9±2	9±2	9±3	38±12	64±2	60±2	54±5
KRS	26	7±3	8±3	11±5	9±4	50±10	62±6	64±6	50±10
KPT	35	6±3	7±3	4±3	8±2	32±6	54±6	40±10	52±5
<b>Средн.</b>		<b>10±6</b>	<b>8±2</b>	<b>8±2</b>	<b>9±3</b>	<b>51±10</b>	<b>61±4</b>	<b>57±5</b>	<b>57±6</b>

Примечание. N – количество слабых местных вулcano-тектонических землетрясений; 0.75, 1.5, 3.0 и 6.0 – центральные частоты ( $f$ , Гц) сейсмических каналов с полосовой цифровой фильтрацией.

Результаты таблицы 1 показывают, что величина «сейсмического альбедо»  $B_0$  для большинства станций и для большинства частот больше, чем 0.5. Исключения составляют только станция «KLY» на частоте 6.0 Гц, станции «KMN» на частоте 0.75 Гц. и «KPT» на частоте 0.75 и 3.0 Гц. Значение сейсмического альбедо  $B_0$  больше чем 0.5 свидетельствует о том, что процесс рассеяния поперечных сейсмических волн вулкана Ключевской является преобладающим в суммарном затухании. Относительный вклад рассеивания в суммарное затухание увеличивается на станциях установленных на постройке вулкана Ключевской.

Полученные оценки параметров суммарного затухания  $\alpha_t$  и сейсмического альбедо  $B_0$  поперечных сейсмических волн по станциям в постройке вулкана Ключевской не имеют большого разброса и, как видно из таблицы 1, для всех станций близки к средним значениям.

От значений параметров  $\alpha_t$  и  $B_0$  для каждой станции можно определить остальные параметры внутреннего поглощения и рассеяния сейсмических волн в среде под станцией. Из понятия «сейсмическое альбедо»  $B_0 = \alpha_s / \alpha_t = \alpha_s / (\alpha_s + \alpha_i)$  можно найти коэффициенты рассеяния и внутреннего поглощения  $\alpha_s$  и  $\alpha_i$ , которые равны соответственно:  $\alpha_s = \alpha_t * B_0$ ,  $\alpha_i = \alpha_t - \alpha_s$ . Значения средних длин свободного пробега сейсмической волны определяются как: длина рассеяния  $L_s = 1/\alpha_s$ , длина поглощения  $L_i = 1/\alpha_i$  и общая длина, которая еще имеет название длины экстинкции,  $L_t = 1/\alpha_t$ . Соответствующие добротности среды определялись как:  $Q_s = (\omega/(\alpha_s c))$ ,  $Q_i = (\omega/(\alpha_i c))$  и  $Q_t = (\omega/(\alpha_t c))$ , где  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота распространяющейся волны,  $c$  – средняя скорость распространения волн под вулканом Ключевской, которая была равна – 3.0 км/сек для объемных поперечных  $S$ - волн и – 2.0 км/сек для поверхностных волн. Для расчета среднего значения скорости объемных поперечных  $S$ -волн под вулканом Ключевской была выбрана одна из скоростных моделей для расчета гипоцентров землетрясений

Северной группы вулканов: модель «В» используемая в 1998-2000 гг. [2]. При расчете среднего значения скорости поперечных  $S$ -волн использовалось правило весов, величина которых была равна толщине слоя.

Из девяти приведенных здесь параметров неизвестными являются только два ( $\alpha_t$  и  $B_0$ ) - энергетический коэффициент суммарного затухания -  $\alpha_t$  и «сейсмическое альbedo»  $B_0$ , а остальные есть производные величины от первых двух неизвестных. В таблице 2 приведены значения производных параметров поглощения.

**Таблица 2. Сводная таблица производных параметров поглощения и рассеяния**

Станция (код)	$f$	$L_t$	$L_s$	$L_i$	$\alpha_s$	$\alpha_i$	$Q_t$	$Q_s$	$Q_i$
CIR	0.75	5.8	10.1	14.0	0.099	0.071	13	23	33
	1.5	16.7	30.8	36.2	0.032	0.028	52	96	113
	3.0	12.5	21.5	29.7	0.046	0.034	78	135	187
	6.0	8.3	12.2	26.0	0.082	0.038	104	154	327
KLY	0.75	5.8	11.3	12.2	0.088	0.082	13	26	28
	1.5	12.5	18.9	36.7	0.053	0.027	39	59	59
	3.0	9.0	14.6	23.9	0.068	0.042	57	92	150
	6.0	12.5	26.0	24.0	0.038	0.042	157	327	302
ZLN	0.75	5.8	8.9	17.3	0.112	0.058	13	21	40
	1.5	11.1	14.2	50.5	0.070	0.020	34	44	158
	3.0	12.5	20.8	31.2	0.048	0.032	78	130	196
	6.0	12.5	21.5	29.7	0.046	0.034	157	270	373
LGN	0.75	5.8	9.4	15.4	0.105	0.065	13	22	36
	1.5	14.2	27.4	29.7	0.036	0.034	44	86	93
	3.0	12.5	23.1	27.2	0.043	0.037	78	145	171
	6.0	7.6	11.3	24.0	0.088	0.042	96	142	302
KMN	0.75	11.1	29.2	17.9	0.034	0.056	26	69	42
	1.5	11.1	17.4	30.8	0.058	0.032	35	54	97
	3.0	11.1	18.5	27.7	0.054	0.036	70	116	174
	6.0	11.1	20.5	24.1	0.049	0.041	139	258	303
KRS	0.75	14.2	28.5	28.5	0.035	0.035	33	67	67
	1.5	12.5	20.1	32.8	0.050	0.030	39	63	103
	3.0	9.09	14.2	25.2	0.070	0.040	57	89	158
	6.0	11.1	22.2	22.2	0.045	0.045	139	279	279
KMN	0.75	11.1	29.2	17.9	0.034	0.056	26	69	42
	1.5	11.1	17.4	30.8	0.058	0.032	35	54	97
	3.0	11.1	18.5	27.7	0.054	0.036	70	116	174
	6.0	11.1	20.5	24.1	0.049	0.041	139	258	303
KRS	0.75	14.2	28.5	28.5	0.035	0.035	33	67	67
	1.5	12.5	20.1	32.8	0.050	0.030	39	63	103
	3.0	9.09	14.2	25.2	0.070	0.040	57	89	158
	6.0	11.1	22.2	22.2	0.045	0.045	139	279	279
KPT	0.75	16.6	52.1	24.5	0.019	0.041	39	122	57
	1.5	14.2	26.4	31.0	0.038	0.032	44	83	97
	3.0	20.0	50.0	33.3	0.020	0.030	125	314	209
	6.0	12.5	24.0	26.0	0.042	0.038	157	302	327

Сравним полученные в работе средние значения параметров добротности  $Q_t$ ,  $Q_s$ ,  $Q_i$  поперечных  $S$ -волн по вулкану Ключевской (Камчатка) с параметрами добротности  $Q_t$ ,  $Q_s$ ,  $Q_i$  поперечных  $S$ -волн, полученными по вулкану Этна (Италия) [10] и по тектоническим землетрясениям в литосфере Камчатки [1] (рис. 5).

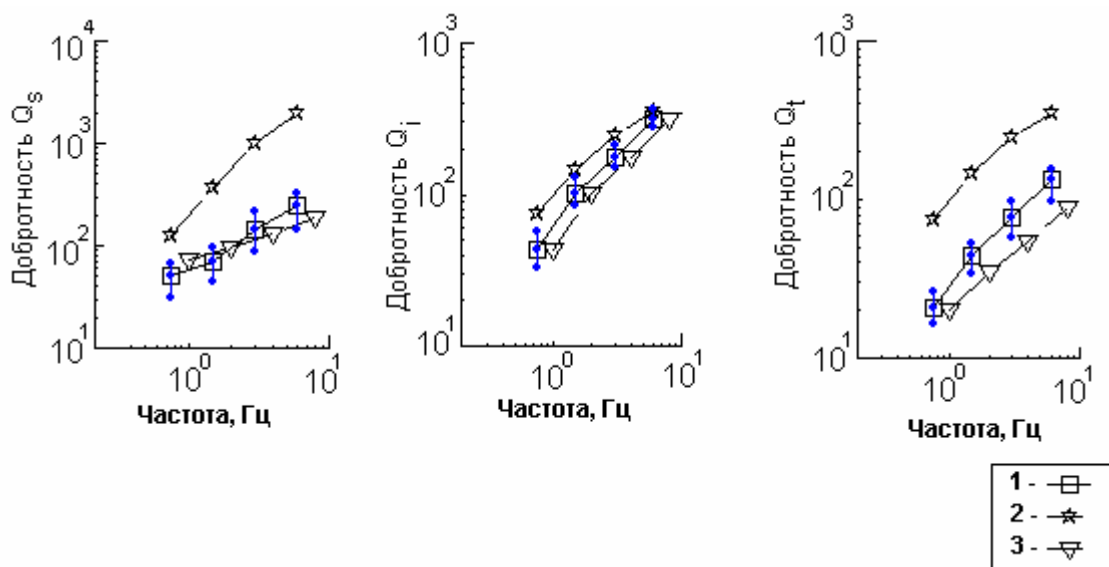


Рис. 5. Сводный график добротности  $Q_t$ ,  $Q_s$ ,  $Q_i$ . По горизонтальной оси частота, по вертикальной оси значения добротности: 1 – средние оценки параметров добротности, полученные в данной работе; 2 – оценки добротности полученные по тектоническим землетрясениям с использованием станции Петропавловск-IRIS Камчатка [1]; 3 – оценки добротности полученные по вулкану Этна (Италия) [12].

На рисунке 5 представлен сводный график средних значений параметров добротности  $Q_t$ ,  $Q_s$  и  $Q_i$ . На всех графиках (см. рис. 5) средние оценки параметров добротности  $Q_t$ ,  $Q_s$  и  $Q_i$  полученные в данной работе по вулкану Ключевской (Камчатка) и по вулкану Этна (Италия) [12] значительно ниже оценок добротности полученных по тектоническим землетрясениям в литосфере Камчатке [1]. Следует отметить, что оценки добротности, полученные в работе [1] получены по тектоническим землетрясениям с применением широкополосной регистрирующей аппаратуры типа: Петропавловск-IRIS, поэтому эти оценки добротности [1] значительно выше всех оценок добротности.

В целом можно отметить, что на графиках рисунка 5 по параметру среднего значения добротности рассеивания  $Q_s$  наблюдается тенденция совпадения средних оценок добротности по вулкану Ключевской (Камчатка) с данными, полученными по вулкану Этна (Италия) [12]. На вулкане Ключевской (Камчатка) также, как и на вулкане Этна (Италия) в суммарном затухании преобладающим фактором является рассеивание. По параметрам добротности внутреннего поглощения  $Q_i$  и суммарной добротности  $Q_t$  наблюдается тенденция незначительного расхождения средних значений добротности по вулкану Ключевской (Камчатка) от данных по вулкану Этна (Италия) [12].

В качестве особенности можно отметить тот факт, что слабая тенденция частотной зависимости добротности наблюдается по вулкану Ключевской (Камчатка), по тектоническим землетрясениям Камчатки [1] и по вулкану Этна Италия [12].

#### **Выводы.**

1. Получены оценки параметров внутреннего поглощения и рассеяния поперечных  $S$ -волн вулкано-тектонических землетрясений в постройке вулкана Ключевской, по сейсмическим станциям КФ ГС РАН расположенными вблизи и на постройке вулкана, которые характеризуют физическое состояние среды вулкана Ключевской.

2. Оценки средних значений добротности  $Q_t$ ,  $Q_s$  и  $Q_i$  полученные в данной работе по вулкану Ключевской (Камчатка) в пределах частот примерно равны значениям добротности, полученные по вулкану Этна (Италия) [12]. Соответствие результатов показывает, что физические свойства, этих вулканических зон, примерно равны.

3. Оценки средних значений добротности  $Q_t$ ,  $Q_s$  и  $Q_i$ , полученные в данной работе по вулкано-тектоническим землетрясениям вулкана Ключевской (Камчатка) и по вулкану Этна (Италия) [12], значительно ниже средних оценок добротностей, полученных по тектоническим землетрясениям в литосфере Камчатки [1].

4. Величина «сейсмического альбедо»  $B_0$  на большинстве станций и на большинстве частот превосходит по значению 0,5. В пределах постройки вулкана Ключевской происходит рассеяние поперечных сейсмических волн вулкано-тектонических землетрясений.

5. Значения добротности  $Q_t$ ,  $Q_s$  и  $Q_i$  слабо увеличиваются с частотой по вулкану Ключевской (Камчатка) и по вулкану Этна (Италия) [12] и по тектоническим землетрясениям Камчатки [1].

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абубакиров И.Р. Оценка характеристик затухания поперечных волн в литосфере Камчатки по наблюдениям цифровой широкополосной станции «Петропавловск» // Физика Земли. 2005. № 10. С. 46-58.
2. Горельчик В.И., Гарбузова В.Т. Сейсмичность Ключевского вулкана как отражение его современной магматической деятельности // В кн. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 352-372.
3. Горельчик В.И., Сторчеус А.В. Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом, Камчатка // В кн. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 373-389.
4. Отчет комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов. Петропавловск-Камчатский. 2000. 407 с.

5. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
6. Хренов А.П., Двигало В.Н., Кирсанов И.Т., Федотов С.А., Горельчик В.И., Жаринов Н.А. Ключевской вулкан // В кн. Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. № 1. С. 106-153.
7. Новейший и современный вулканизм на территории России // Под ред. Лаверова Н.П. М.: Наука, 2005. 603 с.
8. Aki K., Chouet B. Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects //J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 3322-3342.
9. Fehler M., Hoshiya M., Sato H., Obara K. Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto Tokai region, Japan using measurements of S-wave energy vs hypocentral distance //Geophys. J. Int. 1992. V.108. P. 787-800.
10. Gusev A.A., Abubakirov I.R. Monte-Carlo simulation of record envelope of a near earthquake //Phys. Earth Planet. Inter. 1987. V. 49. P. 30-36.
11. Hoshiya M., Sato H., Fehler M. Numerical basis of the separation of scattering and intrinsic absorption from full seismogram envelope - A Monte-Carlo simulation of multiple isotropic scattering //Pap. Meteorol. Geophys. (Bull. of Meteorol. Res. Inst.) 1991.V. 42. P. 65-91.
12. Pezzo D.E., Simini M., Ibanez J.M. Separation of intrinsic Q for volcanic areas: a comparison between Etna and Campi Flegrei //Jornal of Volcanology and Geothermal Research. 1996. V. 70. P. 213-219.
13. Paasschens, J.C.J, Solution of the time-dependent Boltzmann equation // Physical Review E. 1997 V. 56. P. 1135-1141.
14. Wu, R.S., Multiple scattering and energy transfer of seismic waves – separation of scattering effect from intrinsic attenuation - I. Theoretical modeling // Geophys. J. R. Astron. Soc., 1985. V. 82. P. 57-80.

УДК 550.344.43

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА УШИРЕНИЯ ИМПУЛЬСА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОЦЕНОК  
ПОГЛОЩЕНИЯ СРЕДЫ ПОСТРОЙКИ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ

**В.К. Лемзиков**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, г. Петропавловск-Камчатский, Бульвар Пуйна 9, 683006, E-mail: [Lemzikov@kcsnet.ru](mailto:Lemzikov@kcsnet.ru)*

**Введение.** Геологические структуры, характеризующие вулканические зоны сильно гетерогенны. С точки зрения распространения сейсмических волн, они составлены из сложного распределения неоднородностей сильно различающих по размерам и физическим свой-