

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ СТАНЦИОННЫХ ПОПРАВОК СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ЮГА КАМЧАТКИ И АВАЧИНСКО-КОРЯЖСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ

В.К. Лемзиков¹, М.В. Лемзиков¹, В.И. Левина²

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

*²Камчатский филиал Геофизической службы ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
valeria@emsd.ru*

Введение

Исследования станционных поправок выполнялись еще в 50-х годах прошлого века [14]. Давно было установлено, что поверхностная геология, сильно влияющая на условия распространения сейсмических волн, является главным фактором, определяющим значение станционных поправок [10,11]. Первоначально для определения станционных поправок использовались прямые Р- и S-волны [7,10]. В последнее время для этой цели дополнительно используются хвостовые части записей землетрясений - кода-волны. Сравнивая результаты прямых Р- и S-волн и кода-волн в [15,16] сделан вывод, что использование кода-волн обеспечивает более устойчивые оценки станционных поправок, чем прямые Р и S-волны. Станционные поправки, прежде всего, необходимы для правильного определения значения энергетического класса землетрясений. В условиях Камчатки станционные поправки могут характеризовать особенности распространения и затухания сейсмических волн в вулканических средах активных вулканов.

Идея об экранировании сейсмических волн магматическим очагом активного вулкана Ключевской впервые была проверена в [2]. В [1,4,5,6,7] исследовались объемные объекты (корни вулканов), в которых наблюдается сильное поглощение сейсмических волн. Причем в «корнях вулканов» наблюдается значительное поглощение не только S, но и Р-волн. Размеры таких экранирующих тел под вулканами Камчатки определяются в пределах 30-100 км. Этот факт влияет на определение энергетического класса землетрясений в вулканических областях, так как определение энергии землетрясений по этим станциям занижается на величину 0.4 – 0.5 единиц. В [7] поправка к энергетическому классу местных землетрясений для станций, установленных на вулканах, разделяется на две части, $\Delta K = \Delta K_{\alpha} + \Delta K_{\beta}$, где ΔK_{α} определяется как поправка к энергетическому классу за грунтовые условия, а ΔK_{β} - за эффект прохождения сейсмических волн в «корнях вулканов». Эти работы были выполнены по прямым Р- и S- волнам. Для практического определения энергии местных землетрясений, в том числе, и по станциям, установленных в вулканических областях, вклад различных составляющих в значения станционных поправок имеет только теоретический смысл.

В предлагаемой работе сопоставлены спектральные станционные поправки к энергии местных Камчатских землетрясений с соответствующими поправками, полученными при определении энергетического класса этих же землетрясений по стандартной методике, установленной для камеральной работы при обработке этих же землетрясений. Это позволило получить обоснованные предварительные оценки станционных поправок радиотелеметрических станций установленных на юге Камчатки и на вулканах Авачинско-Коряжской группы по прямым S-волнам и кода-волнам.

Исходные данные

На юге Камчатки несколько сейсмических станций расположены географически очень близко друг к другу. Здесь находится так называемый «Авачинский куст радиотелеметрических сейсмических станций» - это несколько сейсмических пунктов наблюдения, установленных на склонах активных вулканов: Авачинский и Коряжский. Все эти станции находятся на расстоянии, примерно, 30 км от сейсмического пункта наблюдения РЕТ в г. Петропавловске-Камчатском. Радиотелеметрическую сейсмическую станцию РЕТ удобно выбрать как «реперную». Во многих работах грунты под ней характеризуются как самые жесткие, скальные, амплитудно-частотные характеристики которых не имеют особых резонансных частот [3]. На Камчатке имеется еще достаточно плотная система расположения радиотелеметрических сейсмических станций вокруг Ключевской группы вулканов, но, для исключения варианта получения локальных поправок, необходимо сопоставить данные по этой группе станций со станциями расположенными в южной

части Камчатки и, в конечном итоге, с РЕТ. Эти обстоятельства повлияли на выбор в первоначальном определении станционных поправок радиотелеметрических сейсмических станций Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) только для южной части Камчатки: Петропавловск «PET», Русская «RUS», Шипунский «SPN», Налычево «NLC», Малая Ипелька «MIP», Горелый «GRL», Ганалы «GNL», Авача «AVH», Седловина «SDL», Сомма «SMA», Угловая «UGL», Коряка «KRK» (рис. 1). Пункты установки первых пяти станций имеют высоту над уровнем моря не более 100 м, а остальные – около 1000 м. Станционные поправки определялись по горизонтальным каналам записей скорости колебаний грунта имеющих одинаковые амплитудно-частотные характеристики, обозначенные как SHE и SHN. Эти горизонтальные сейсмические каналы использовались для определения станционных поправок энергетического класса местных глубоких тектонических землетрясений, обозначенного как $K_{S1,2}^{\phi 68}$ радиотелеметрических сейсмических станций по первым вступлениям S-волн и по кода-волнам.

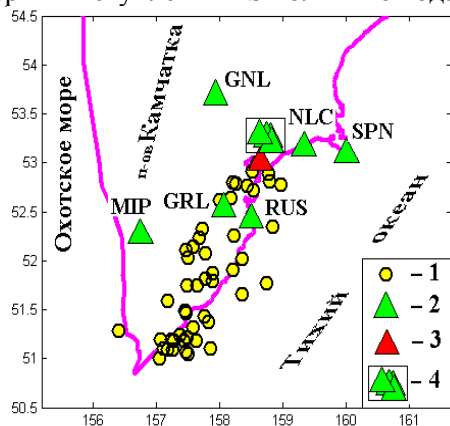


Рис. 1 Карта эпицентров глубоких тектонических землетрясений юга Камчатки и радиотелеметрических сейсмических станций: 1 – эпицентры; 2 – станции; 3 – «реперная» радиотелеметрическая сейсмическая станция РЕТ. 4 - Авачинский куст радиотелеметрических сейсмических станций, включающий 5 станций: AVH, SDL, SMA, UGL, KRK.

Для обработки выбраны тектонические землетрясения за период с 2000 по 2006 гг. с глубинами очагов $H = 70-180$ км с эпицентрами южнее мыса Шипунский на Камчатке (рис. 1). Глубокие тектонические землетрясения выбирались в диапазоне энергетического класса $9.5 < K_{S1,2}^{\phi 68} < 11.0$, где $K_{S1,2}^{\phi 68}$ шкала энергии Камчатских землетрясений С.А. Федотова. Выбор глубоких местных тектонических землетрясений в узком диапазоне значений энергетического класса позволяет рассчитывать, что их очаги сильно не различаются. Всего за период 2000-2006 гг. было обработано 49 глубоких местных тектонических землетрясений.

Метод исследования

Определение станционных поправок во многих работах выполняется путем сравнения данных пар или нескольких сейсмических станций. При этом, по возможности, учитывается влияние разных факторов: условия распространения сейсмических волн, диаграммы направленности излучения очагов землетрясений, их энергию и другие. Для уменьшения влияния этих факторов применяются различные способы. Например, в работе [9] для анализа использовались группы станций, установленные близко друг к другу. В работе [17] при определении станционных поправок применяется рекурсивный стохастический инверсный метод анализа амплитуд местных землетрясений.

Зависимость спектра мощности землетрясения $Y(\omega)$, полученного по первым вступлениям Р- или S-волн одного канала сейсмической станции, от основных функций и параметров можно представить в следующем виде [12,13]:

$$Y(\omega) = X(\omega) * I(\omega) * G(R) * D(\omega) * S(\omega) * \mathcal{R}(\omega), \quad (1)$$

где $X(\omega)$ – очаговый спектр мощности землетрясения; $I(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика сейсмического канала регистрации; $D(\omega)$ – функция, описывающая поглощение сейсмических волн в среде; $G(R)$ – функция, характеризующая поглощение сейсмических волн благодаря геометрическому расхождению; $S(\omega)$ – спектральная станционная поправка, $\mathcal{R}(\omega)$ - функция,

характеризующая направленность излучения очага землетрясения; ω – круговая частота колебаний сейсмических волн; R – гипоцентрального расстояние в км.

Для кода-волн также можно записать зависимость спектра мощности $Y(\omega | t)$ некоторого ее участка от основных функций и параметров как [17]

$$Y(\omega | t) = X(\omega) * site(\omega) * path(\omega | t), \quad (2)$$

где $X(\omega)$ – очаговый спектр землетрясения (при использовании одного и того же землетрясения для определения спектров прямых-волн, кода-волн и по разным станциям этот член в (1) и (2) один и тот же); $site(\omega)$ – станционные условия (станционная поправка, которая соответствует $S(\omega)$, но может быть не равна ей), $path(\omega | t)$ – условия распространения сейсмических волн на пути от очага до станции; t – время в с измеренное от времени в очаге землетрясения.

Таким образом, при одинаковом гипоцентрального расстоянии для некоторой пары близко расположенных станций в соотношении (1) и (2) очень возможно, что только коэффициенты $S(\omega)$ и $site(\omega)$ (станционные поправки) будут разные. При выборе глубоких тектонических землетрясений Авачинского залива (с $H \sim 100$ км), при условии расположения станций в соответствии с рис.1, можно выбрать пары станций, для которых не только примерно равны гипоцентрального расстояния, но и функции направленности излучения $\mathcal{R}(f)$. При выборе пары станций одна из них обязательно должна быть «реперной», т.е. PET.

Перед проведением спектрального анализа выбранные участки записей землетрясений корректировались стандартными процедурами: устранение тренда, выравнивание нулевой линии и сглаживание концов отрезка косинусным окном. Полученный спектр мощности полезного сигнала корректировался на амплитудно-частотную характеристику сейсмического канала и из него вычитался спектр шума, который также предварительно корректировался на амплитудно-частотную характеристику сейсмического канала. Спектры участков S-волн и кода-волн оценивались на следующих частотах: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12 и 14 Гц. Среднее значения спектров определялось как средние в полосе шириной 1 Гц с центрами на соответствующих частотах. Соотношения уровней спектров прямых волн, кода волн и микросейсм глубоких тектонических землетрясений приведены на рис.2а, где видно, что отношение сигнал/шум в диапазоне частот 1 – 10 Гц для первых S-волн почти 3 порядка, а для кода-волн – около 2.

Результаты.

На рис. 2б приведены отношения спектров мощности глубокого тектонического землетрясения по некоторым сейсмическим станциям юга Камчатки относительно «реперной» станции PET. Спектры землетрясений по станциям восточного побережья Камчатки SPN и NLC по частотному составу колебаний примерно одинаковые по сравнению с «реперной». В то же время станции, установленные на склоне вулкана Авачинский AVH и UGL более низкочастотны по сравнению с «реперной».

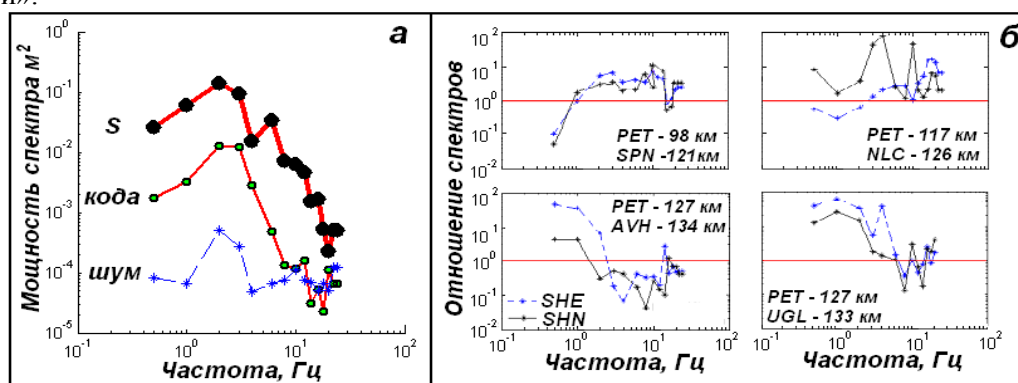


Рис.2. а) Пример спектров мощности скорости движения грунта при глубоком местном землетрясении для участков S-волн, кода-волн и микросейсм для станции PET по горизонтальному сейсмическому каналу SHE. б) Примеры отношений спектров для участков S-волн по сейсмическим каналам SHE и SHN; каждый график относится к паре станций, вписанных в них, а цифрами показано гипоцентрального расстояние.

При определении спектральных станционных поправок данные первых вступлений S-волн одного землетрясения по двум каналам рассматриваются как равнозначные, которые определяют средние значения. Далее по всей выборке для каждой станции определялись средние спектральные станционные поправки. Отдельно найдены для каждой станции средние спектральные станционные

поправки по кода-волнам. По данным, предоставленным камеральной группой КФ ГС РАН определены стационарные поправки относительно «реперной» станции РЕТ для всех станций юга Камчатки. Они обозначены как «поправки КФ ГС РАН». Результаты показаны в Таблице 1.

На рис.3 представлены осредненные результаты по спектральным стационарным поправкам по первым вступлениям S-волн и по кода-волнам по сейсмическим станциям, установленным на юге Камчатки. Результаты по данным S-волн и кода-волнам практически совпадают по всем станциям, только по некоторым станциям на некоторых частотах отмечается небольшое различие. Этот факт вполне согласуется с ранее полученным заключением о том, что кода-волны в основном формируются рассеянными поперечными сейсмическими волнами [8]. Кроме того, в [15,16] получено заключение о том, что результаты по кода-волнам более надежные, чем по первым S-волнам, следовательно, на рис. 3 показано практически двойное подтверждение значений спектральных стационарных поправок.

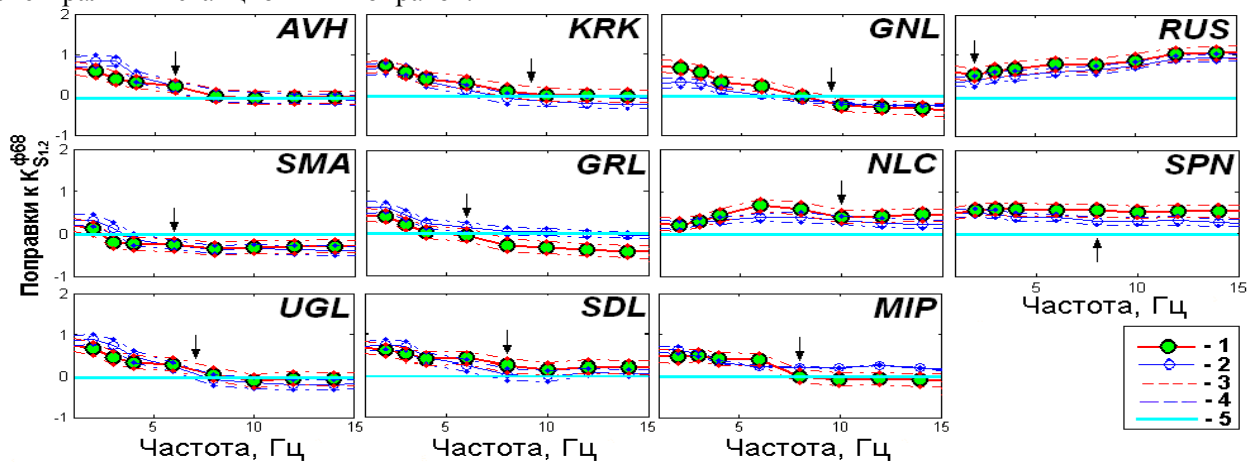


Рис. 3. Показаны средние значения спектральных стационарных поправок к величине $K_{S1,2}^{\phi68}$ по отношению к «реперной» станции РЕТ. 1- по первым вступлениям S-волн, 2 - по кода-волнам, 3 – среднее квадратичное отклонение для S-волн, 4 – то же для кода-волн, 5 – линия, показывающая нулевое значение спектральных стационарных поправок. Стрелкой показано значение поправок КФ ГС РАН для каждой станции.

Соответствие поправок КФ ГС РАН спектральными поправками почти по всем станциям находится в диапазоне 6-10 Гц, за исключением станции RUS. Возможно, что колебания на частоте 6 – 10 Гц наиболее доминантные (преобладающие) на записях местных Камчатских землетрясений по сейсмическим каналам SHE и SHN и совпадение результатам по нескольким станциям.

Таблица 1 Соответствие спектральных стационарных поправок на определенной частоте стационарным поправкам КФ ГС РАН. N – количество обработанных землетрясений по станциям

Код станции	N	Спектральная поправка		Поправка КФ ГС РАН
		Значение	Частота, Гц	
AVH	40	$0,2588 \pm 0,1404$	6	$0,2567 \pm 0,1893$
SMA	33	$-0,2588 \pm 0,1491$	6	$-0,2888 \pm 0,2071$
UGL	36	$0,1886 \pm 0,1404$	7	$0,1926 \pm 0,2211$
SDL	25	$0,0658 \pm 0,1404$	8	$0,0139 \pm 0,2638$
KRK	40	$0,0482 \pm 0,1491$	8	$0,0301 \pm 0,1804$
GRL	42	$-0,0658 \pm 0,1667$	6	$-0,0846 \pm 0,3061$
GNL	43	$-0,1360 \pm 0,1491$	9	$-0,1904 \pm 0,2426$
SPN	7	$0,3450 \pm 0,1404$	6	$0,2736 \pm 0,2576$
NLC	33	$0,3918 \pm 0,1404$	10	$0,3309 \pm 0,2322$
RUS	25	$0,5307 \pm 0,1754$	2	$0,4165 \pm 0,3745$
MIP	10	$-0,0746 \pm 0,1404$	8	$-0,1979 \pm 0,5447$

является лишним доказательством убедительности полученных станционных поправок. Именно в этом диапазоне частот определяется параметр $K_{S1,2}^{\phi 68}$ местных Камчатских землетрясений.

Наблюдается общая тенденция поведения спектральных станционных поправок для станций, установленных в вулканических областях в отличие от установленных на восточном побережье Камчатки. В вулканических средах Авачинско-Коряжской группы наблюдается сильное поглощение высокочастотных сейсмических колебаний, которое также проявляется на вулкане Горелый (GRL) и в горном районе Ганалы (GNL). В то же время нельзя отметить особых отличий в поведении спектральных станционных поправок между «реперной» и станциями восточного побережья Камчатки. Если признать, что под вулканами существуют достаточно протяженные тела [2,4,5,6,7], так называемые «корни вулканов», экранирующие сейсмические волны, то возможно это проявляется в сильном поглощении высокочастотных сейсмических колебаний S-волн и кода-волн в вулканических областях.

Выводы

В результате получены предварительные оценки станционных поправок радиотелеметрических станций. Сравнения результатов по спектральным частотам показало хорошее совпадение результатов на частотах 6 - 8 Гц.

Список литературы

1. Горельчик В.И., Фарберов А.И. Некоторые особенности глубинного строения вулканических областей по сейсмологическим данным. В кн. Вулканизм и глубины Земли. Материалы III Всесоюзного вулканологического совещания 28-31 мая 1969. М.:Наука, 1971, С.107-113.
2. Горшков Г.С. О глубине магматического очага Ключевского вулкана. // Докл. АН СССР, 1956, Т. 106, N 4.с. 703-707
3. Ершов И.А., Медведев С.В., Федотов С.А. и др. Сейсмическое микрорайонирование Петропавловска-Камчатского. В кн. Сейсмическое микрорайонирование. М.:АН СССР, 1965, (ТРУДЫ ИФЗ), С.107-113.
4. Федотов С.А., Потапова О.В. Предварительная карта тел на глубинах 30-100 км в верхней мантии под Камчаткой, экранирующие Р- и S-волны. В кн. Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. М.:Наука, 1974, С.176-179.
5. Федотов С.А., Фарберов А.И. Об экранировании поперечных волн и магматическом очаге в верхней мантии в районе Авачинской группы вулканов. В кн. Вулканизм и глубинное строение Земли. М.:Наука, 1966, с. 43-48
6. Фирстов П.П., Широков В.А. Локализация корней вулканов Ключевской группы по сейсмологическим данным. В кн. Вулканизм и глубины Земли. Материалы III Всесоюзного вулканологического совещания 28-31 мая 1969. М.:Наука, 1971, С.113-117.
7. Фирстов П.П., Широков В.А. Влияние корней Камчатских вулканов на распространение сейсмических волн близких землетрясений. В кн. Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. М.:Наука, 1974, С.179-188.
8. Aki K., Chouet B. Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects //J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 3322-3342.
9. Andrews D. J. Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, in Earthquake Source Mechanics, 1986, S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz (Editors), American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 259-268.
10. Borchardt R. D. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, //Bull Seism. Soc. Am. 1970, 60, pp. 29-61.
11. Borchardt R. D. and J. F. Gibbs . Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake, Bull. Seism. Soc. Am, 1976, 66, pp. 467-500.
12. Boatwright, J., J. B. Fletcher, and T. E. Fumal. A general inversion scheme for source, site, and propagation characteristics using multiply recorded sets of moderate-sized earthquakes, // Bull. Seism. Soc. Am., 1991, 81, pp.1754-1782.
13. Field E. H. and Jacob K. H. A Comparison and Test of Various Site-Response Estimation Techniques, Including Three That Are Not Reference-Site Dependent // Bulletin of the Seismological Society of America, August 1995, Vol. 85, No. 4, pp. 1127-1143.
14. Gutenberg B. Effects of ground on earthquake motion, Bull. Seism. Soc. Am. 1957, 47, pp.221-250.
15. Tsujiura M. Spectral analysis of the coda waves from local earthquakes, //Bull. Earthq. Res.Inst., Tokyo Univ., 1978, 53, pp.1-48.
16. Tucker B. E. and J. L. King . Dependence of sediment-filled valley response on the input amplitude and the valley properties, //Bull. Seism. Soc. Am. 1984, 74, pp.153-165.
17. Su.F., K. Aki, T. Teng et. al. The relation between site amplification factor and surficial geology in central California. //Bull. Seism. Soc. Am. 1992, 82, No. 2, pp.580-602