

УДК 550.347.097

ОЦЕНКА СТАЦИОННЫХ ПОПРАВОК ДЛЯ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ KNET НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОТНОШЕНИЯ СПЕКТРОВ H- И V-КОМПОНЕНТ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА И ЛОКАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2018 г. Н.А. Сычева, А.Н. Мансуров

Научная станция РАН в г. Бишкеке, Киргизская Республика

Работа посвящена расчету стационарных поправок десяти станций сети KNET для учета влияния на сейсмические волны расположенного непосредственно под сейсмической станцией небольшого слоя горных пород низкой плотности, который, усилив сигнал, может породить его резонанс. Стационарные поправки получены на основе вычисления отношения спектра горизонтальных компонент сигнала к спектру вертикальной компоненты. Проанализированы записи S-волн 90 локальных землетрясений и более 5000 шестидесятисекундных записей сейсмического шума. Проведено сравнение стационарных поправок, полученных на основе анализа сейсмического шума и землетрясений, которые в целом согласуются. На отдельных участках рассматриваемого диапазона частот (1–20 Гц) наблюдаются некоторые различия в форме графика зависимости величины поправки от частоты; на станциях AAK, AML, KZA отличается и диапазон этих значений. При этом на всех станциях отсутствуют сильные резонансные явления во всем диапазоне рассматриваемых частот. Для станций AAK, AML, KBK, TKM2 отмечены существенные резонансные эффекты на отдельных частях исследуемого диапазона частот; для станций CHM, EKS, KZA, UCH, ULHL, USP значение стационарной поправки всюду близко к единице и ею можно пренебречь. Полученные стационарные поправки могут быть использованы при расчете очаговых спектров землетрясений.

Ключевые слова: сайт-эффект, стационарная поправка, стационарное усиление, резонанс, сейсмическая станция, сейсмограмма, спектр, сейсмический шум, землетрясение.

Введение

Киргизская широкополосная сейсмическая сеть (*Kyrgyz NETWORK* – KNET) была установлена вокруг г. Бишкек в августе–сентябре 1991 г. и представляет собой часть совместной Сейсмической программы США–СССР, осуществляемой в рамках Договора об ограничении подземных испытаний ядерного оружия. Создание сети KNET стало результатом совместных усилий ряда институтов двух стран – в частности, Института геофизики и планетарной физики при Калифорнийском университете в г. Сан-Диего (США, *IGPP-UCSD*), Киргизского института сейсмологии (КИС), российских Института высоких температур (ИВТАН) и Института физики Земли (ИФЗ РАН), Университета штата Индианы (США). До установки сети KNET большинство станций в Центральной Азии работало на аналоговом оборудовании с ограниченными частотными характеристиками, что позволяло решать довольно узкий круг не требующих сложных технологий задач, среди которых локализация сейсмических событий и составление каталога землетрясений, определение фокальных механизмов очагов и др.

Установка сети KNET вокруг г. Бишкек (рис. 1) была обусловлена необходимостью сбора записей в режиме, близком к квазиреальному времени, и оперативной досягаемости станций для их обслуживания. Три станции (USP, CHM, TKM2) установлены

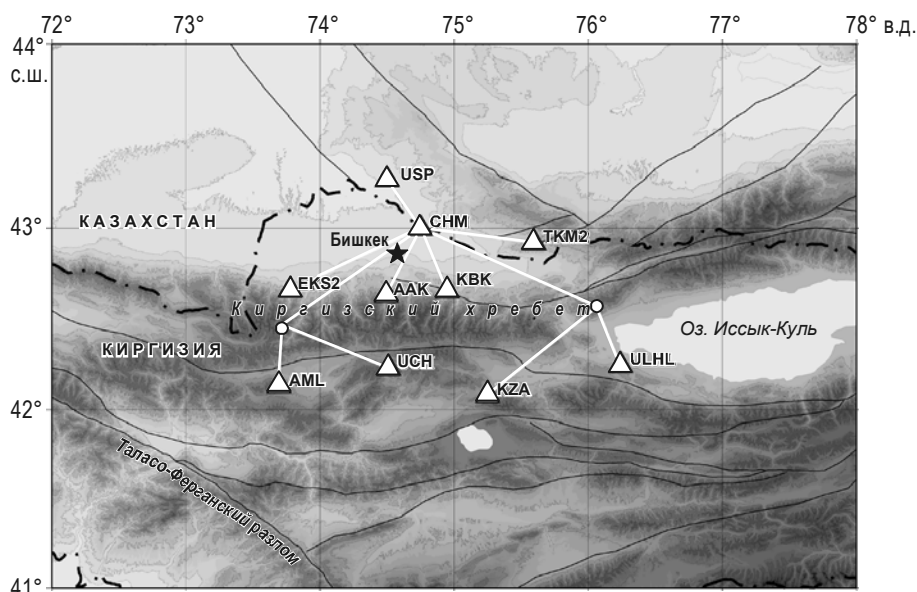


Рис. 1. Схема сейсмологической сети KNET. Треугольники – станции сети; черные линии – региональные разломы по [Mellors, 1995]. Названия станций, координаты и высота расположения, а также ближайшие географические объекты, от которых произошли названия станций, представлены в табл. 1

в Чуйской долине, три (EKS2, AAK, KBK) – в северных предгорьях Киргизского хребта, одна (ULHL) – в ущелье на юго-западе Иссык-кульской котловины. Еще три станции размещены в труднодоступных районах – в районах отрога Суусамыр-Тоо в юго-западной части Суусамырской впадины (AML), Джумгальского хребта (UCH) и северного отрога гор Кызарт (KZA).

Важной особенностью сети является размещение станций на скальных породах и принадлежность некоторых из них к малошумящим¹ [Зейгарник, Трапезников, Брагин, 1994].

Таблица 1. Станции сети KNET

№	Название	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Высота, м	Географический объект, страна
1	AAK	42.6333	74.4944	1680	Ущелье Ала-Арча, село Кашкасу, Киргизия
2	AML	42.1311	73.6941	3400	Перевал Алмалы-Ашуу, Киргизия
3	CHM	42.9986	74.7513	655	Село Чумыш, горы Чумыш, Казахстан
4	EKS2	42.6615	73.7772	1360	Села Эркин-Сай, Кара-Булак, Киргизия
5	KBK	42.6564	74.9478	1760	Село Карагай-Булак, Киргизия
6	KZA	42.0778	75.2496	3520	Перевал Кызарт, горы Кызарт, Киргизия
7	TKM2	42.9208	75.5966	2020	Северный склон Кастекского хребта (Казахстан) в 30 км от г. Токмак, Киргизия
8	UCH	42.2275	74.5134	3850	Перевал Уч-Тёр, перевал Тюз-Ашуу, Киргизия
9	ULHL	42.2456	76.2417	2040	Село Улахол, урочище Донускудук, Киргизия
10	USP	43.2669	74.4997	740	Аул Беткайнар (бывш. Успеновка), Казахстан

Положение станций на топографической основе представлено на рис. 2, в центре которого приведена общая схема сети; вокруг расположены топографические карты в более крупном масштабе, характеризующие рельеф вблизи каждой из десяти станций.

¹ Станция AAK входит во всемирную сейсмическую сеть IRIS.

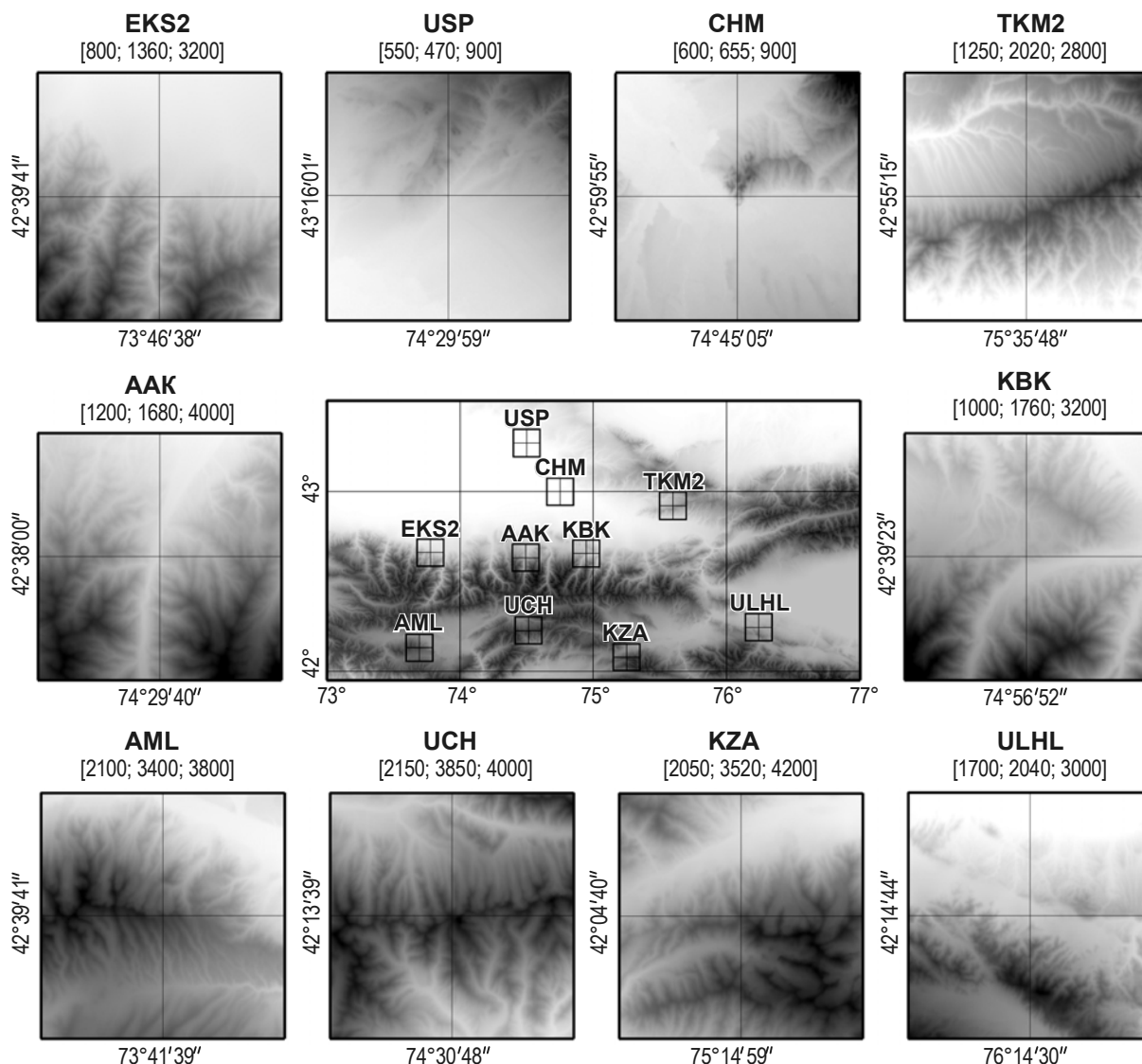


Рис. 2. Схема расположения станций сети KNET на топографической основе. Станции находятся точно в центре соответствующих квадратных фрагментов карт. Над фрагментами в квадратных скобках – [значение высоты в метрах, соответствующее белому цвету на карте; значение высоты, на которой расположена станция; значение высоты, соответствующее черному цвету]

На момент создания сеть KNET являлась одной из наиболее хорошо оснащенных в мире – десять станций были оборудованы широкополосными сейсмометрами (*STS-2*, *Streckeisen*) с 16-битными цифровыми преобразователями, обеспечивающими регистрацию трех компонент в динамическом диапазоне 90 дБ.

В 1995 г. была проведена большая работа по модернизации сети, направленная на повышение чувствительности станций. На всех станциях была установлена новая 24-разрядная аппаратура, позволившая существенно расширить динамический диапазон регистрируемых сейсмических процессов (с 90 до 140 дБ). Это, в свою очередь, значительно улучшило качество регистрации землетрясений и их компьютерную обработку.

С июля 1998 г. сейсмологическая сеть KNET начала работать в режиме реального времени. Модернизация системы позволила одновременно организовать передачу

сейсмологических данных по каналу *ETHERNET* в Институт сейсмологии НАН КР (бывший КИС) и на Научную станцию РАН в г. Бишкек (НС РАН). До 2001 г. данные параллельно поступали в *IGPP-UCSD*, а начиная с 2002 г. – в сейсмологический центр *IRIS* [<http://www.iris.edu/>]¹.

В настоящее время аналоговое выходное напряжение из сейсмометра преобразуется в цифровую форму с помощью модифицированного регистратора *REFTEK72A-08(I)* [www.reftek.com] с 24-битным цифровым преобразователем. Регистратор первоначально фильтрует поток данных низкочастотным фильтром сглаживания и производит выборку данных с частотой 1000 Гц. Дополнительная цифровая фильтрация и уменьшение частоты сигнала применяются для получения желательных частот 100, 40 и 1 Гц. До июня 1998 г. регистрировались два потока данных: ждущий поток при 100 отсчетах в секунду и непрерывный поток при 40 отсчетах в секунду. С июня 1998 г. и по настоящее время регистрируются три потока с частотами 100, 40 и 1 Гц. Установка регистраторов *REFTEK72A-08(I)* на станциях сети была закончена к августу 1999 г.

В 2016 г. исполнилось 25 лет существования сети KNET. За это время было зарегистрировано более 10000 локальных и региональных сейсмических событий, накоплен большой массив непрерывных цифровых сейсмических записей (~2 ТБ) в *SEED* формате. Проводимые исследования, результаты которых сопоставляются с результатами анализа других геофизических полей, позволяют решать широкий круг научных задач – от анализа распределения локальной сейсмичности до расчета сейсмотектонических деформаций [*Ребецкий и др.*, 2016; *Сычева, Мансуров*, 2016; *Сычева, Кузиков*, 2012; *Костюк и др.*, 2010; *Сычева и др.*, 2005, 2008].

В настоящий момент следующим шагом, направленным на углубление понимания сейсмического режима территории Северного Тянь-Шаня, является использование данных об уровне сброшенных напряжений [*Сычева и др.*, 2012; *Сычева, Богомолов*, 2014], которые могут быть получены из расчета динамических параметров – скалярного сейсмического момента и радиуса очага (радиус Брюна). Ключевым моментом при расчете названных динамических параметров – определение амплитудного спектра сейсмических колебаний в очаге землетрясения для нахождения по нему угловой частоты f_0 и коэффициента спектральной плотности Ω_0 .

Амплитудный спектр в очаге может быть получен из зарегистрированного сейсмостанцией амплитудного спектра колебаний. При этом необходимо введение поправок, учитывающих, во-первых, влияние среды, ослабляющее сигнал на пути сейсмического луча между очагом землетрясения и станцией, и, во-вторых, влияние расположенного непосредственно под станцией небольшого слоя горных пород низкой плотности, который может усилить сигнал, породив резонанс. Вторую из поправок (на усиление) принято называть станционной поправкой.

Существуют разные методы определения станционных поправок – прямые и непрямые, на основе сейсмического шума и на основе землетрясений, с применением базовой станции и без нее (см., например, [*Parolai et al.*, 2004; *Bindi et al.*, 2000; *Picozzi et al.*, 2008] и др.). В основе некоторых из этих методов лежит предложенный в [*Nakamura*, 1989] подход, основанный на вычислении отношения амплитудных спектров горизонтальной и вертикальной компонент сигнала.

¹ Передача данных через океан стала возможной благодаря появлению канала *INTERNET*, организованного при поддержке фонда *CRDF* (U.S. Civilian Research & Development Foundation).

В настоящей работе этот подход применен к записям S -волн землетрясений и сейсмического шума, зарегистрированных станциями сети KNET. Подход требует последовательного применения нескольких математических преобразований к выбранным участкам волновых форм в соответствии с нижеизложенной методикой.

Предварительные оценки станционных поправок сейсмических станций сети KNET были получены ранее с использованием авторской программы [Макагон, Сычева, 2013]; результаты этих оценок представлены в [Сычева, Мансуров, Сычев, 2012; Сычева, Богомолов, 2014]. В дальнейшем алгоритм вычисления поправок был пересмотрен и реализован А.Н. Мансуровым; представляемые в данной работе станционные поправки получены на основе этой реализации.

Исходные данные

Станционные поправки были вычислены на основе отдельного анализа записей землетрясений и сейсмического шума.

Записи землетрясений. При анализе записей землетрясений использовались сейсмограммы событий с энергетическим классом $9.5 < K < 13.7$, произошедших в 1998–2012 гг. на территории, ограниченной координатами краевых станций сети KNET (рис. 3). Верхняя граница энергетического класса соответствует событию 16.01.2004 г., наиболее сильному на исследуемой территории за рассматриваемый период времени.

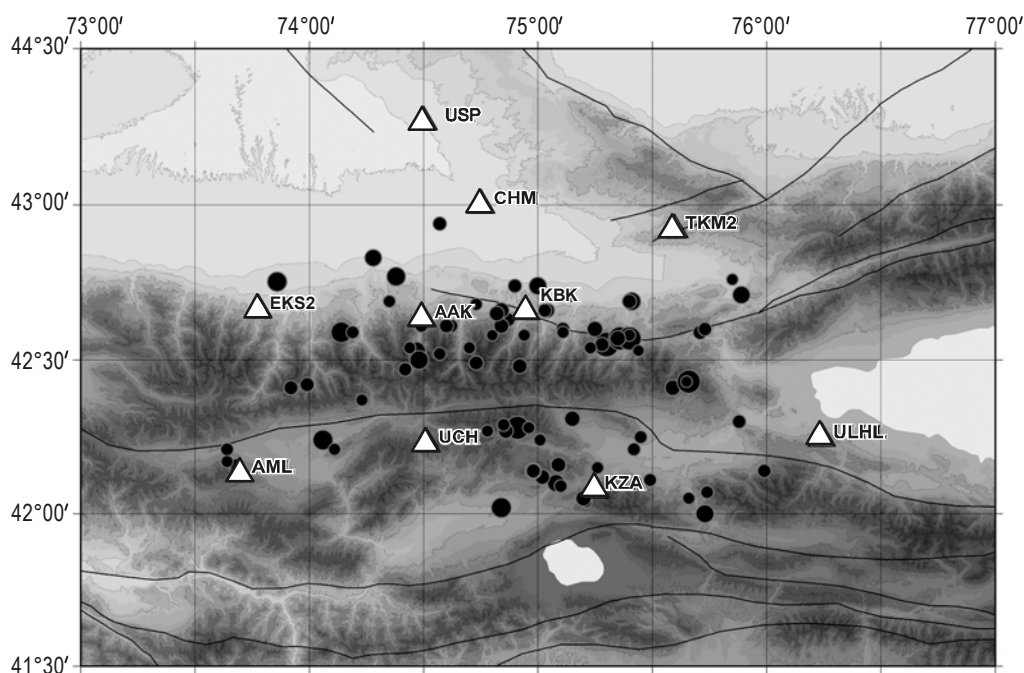


Рис. 3. Схема расположения эпицентров анализируемых в статье землетрясений (кинематические характеристики событий см. в табл. 3 в конце статьи). Треугольники – станции сети KNET; кружки – эпицентры рассматриваемых событий (размер кружков отображает магнитуду события)

Количество обработанных по каждой станции землетрясений (N), минимальное ($R_{\text{мин}}$) и максимальное ($R_{\text{макс}}$) расстояния от эпицентра события до станции представлены в табл. 2; некоторые кинематические характеристики этих событий – в табл. 3, приводимой в конце статьи.

Таблица 2. Количество землетрясений, обработанных по каждой станции, и минимальное и максимальное расстояние от эпицентра события до станции

	Станции сети KNET									
	ААК	АМЛ	СНМ	ЕКС2	КБК	КЗА	ТКМ2	УСН	УЛНЛ	УСП
N	68	60	79	68	76	65	74	52	65	75
$R_{\text{мин}}, \text{ км}$	2.62	3.42	16.13	12.22	7.55	5.13	27.33	22.45	23.84	36.81
$R_{\text{макс}}, \text{ км}$	123.6	191.4	139.3	177.1	120.2	136.6	180.8	125.0	214.5	174.8

Рассматривались волновые формы с началом примерно за 1 с до прихода S -волны и концом, определяемым временем выделения основной энергии волны ($\sim 95\%$), которое устанавливалось визуально интерпретатором. Все выбранные фрагменты записей анализировались на репрезентативность (отсутствие сильных импульсных помех и других факторов, искажающих спектр). Примеры выделения участка S -волны в записях четырех станций сети для события 16.01.2004 г. ($K=13.7$) приведены на рис. 4.

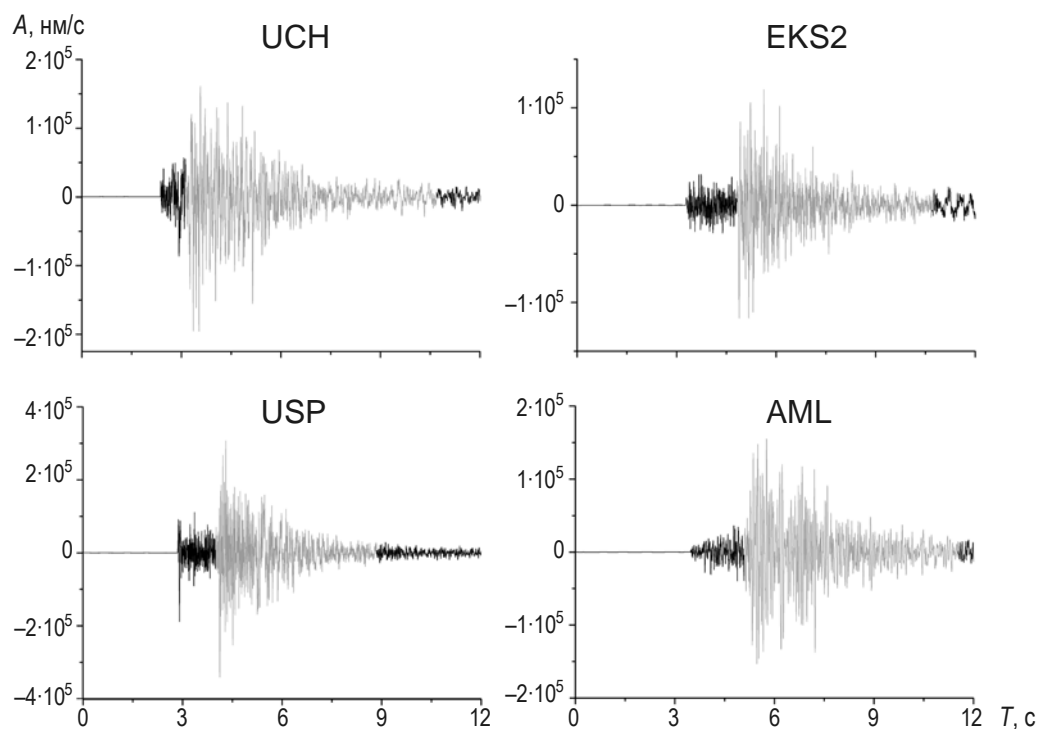


Рис. 4. Сейсмологическая сеть KNET. Записи события 16.01.2004 г. ($K=13.7$) на станциях UCH ($R=73$ км), USP ($R=102$ км), EKS2 ($R=73$ км) и AML ($R=139$ км). Серым цветом выделена часть записи, используемая для анализа. R – расстояние между эпицентром события и регистрирующей станцией

Записи сейсмического шума. При формировании набора записей для анализа сейсмического шума использовались данные за 2000–2014 гг. с включением всех времен года, для чего рассматривались март (равноденствие), июнь (самый долгий день), сентябрь (равноденствие), декабрь (самый короткий день). В результате, осуществлен анализ около 5000 шестидесятисекундных фрагментов записей шума. Все записи были просмотрены на предмет отсутствия в них землетрясений и сильных импульсных помех.

Для примера слева на рис. 5 приведены записи исходного и тапированного¹ сейсмического шума в разные дни марта 2002 г. (станция КВК, компонента E). На том же рисунке справа представлены исходные записи шума с удаленной низкочастотной составляющей, которые использовались для оценки их репрезентативности. Можно видеть, что в обоих случаях сигналы от землетрясений, импульсные помехи и иные артефакты отсутствуют.

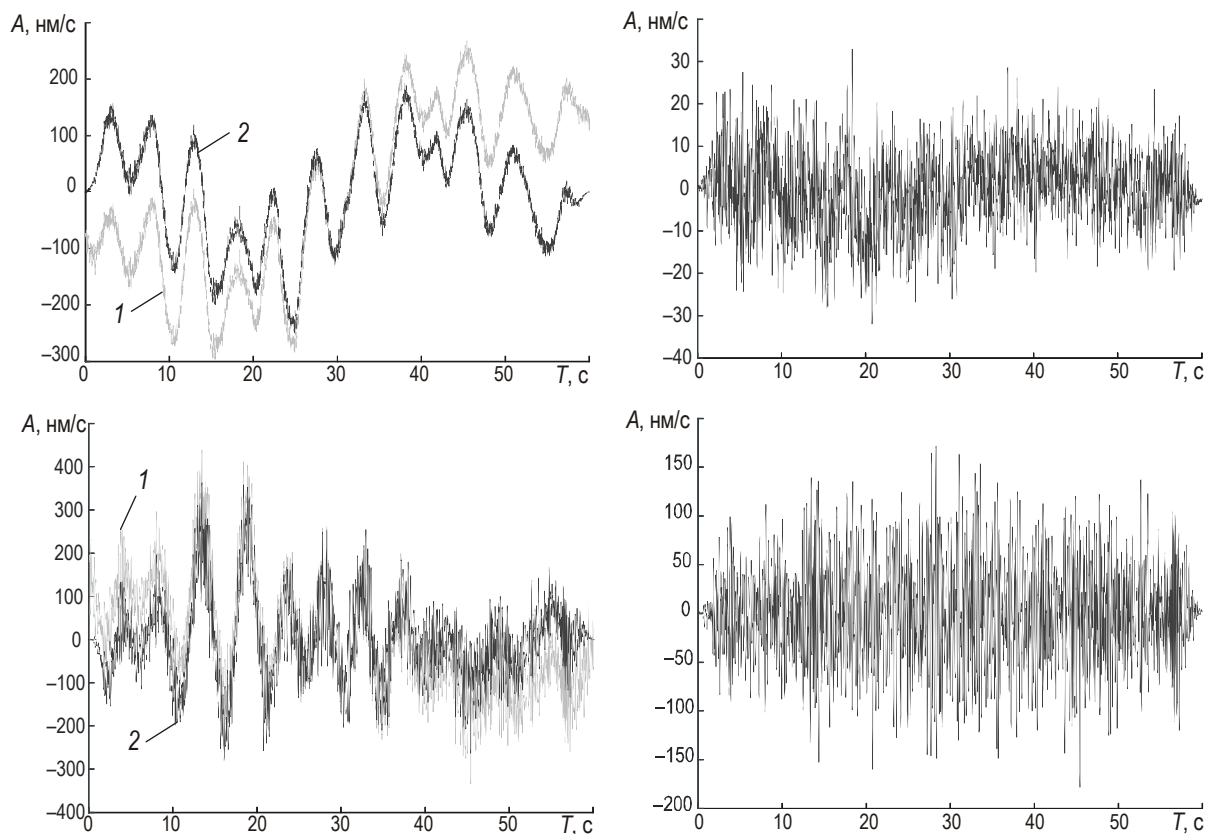


Рис. 5. Записи компоненты E сейсмического шума, полученные на станции КВК в разные дни марта 2002 г.: *слева* – исходный сигнал с вычтенным средним значением (1) и после вычитания линейного тренда и процедуры тапирования (2); *справа* – исходный сигнал, фильтрованный с полосой пропускания 1–20 Гц

Описанный выше принцип выбора исходных данных для анализа позволил оценить станционные поправки по фрагментам S -волн землетрясений в диапазоне от 0.5 до 40 Гц, а по сейсмическому шуму – в диапазоне от 0.2 до 40 Гц.

Методика расчета

Использованный в данной работе метод основан на представлении о том, что расположенный непосредственно под сейсмической станцией тонкий слой земной коры в большей степени влияет на поперечные волны, усиливая их. Продольные волны, в отличие от поперечных, имеющих близвертикальное распространение, под влиянием этой структуры практически не изменяются. В таком случае отношение спектральных

¹ Процедура тапирования (от принятого в англоязычной литературе термина *tapering*, см., например, [Pilz, Parolai, 2012]) описана в разделе Методика расчета.

характеристик горизонтальных компонент к спектральным характеристикам вертикальной будет характеризовать передаточную функцию, вид которой однозначно зависит от местоположения сейсмического датчика. Как известно, сейсмические датчики фиксируют смещения земной коры в трех направлениях – двух горизонтальных (H – восток–запад, E ; север–юг, N) и одном вертикальном (V – Z). Суть метода заключается в нахождении отношения суммарного амплитудного спектра горизонтальных компонент H к амплитудному спектру вертикальной компоненты V . Для расчета названных спектров необходимо измерение трех компонент смещения – E , N , Z . Средний амплитудный спектр H вычисляется как среднеквадратическое значение амплитудных спектров компонент N и E ; амплитудный спектр V соответствует амплитудному спектру компоненты Z . Затем вычисляется непосредственно отношение H/V , для корректного вычисления которого необходимы следующие преобразования используемых исходных данных.

Применение поправок за прибор. На сейсмической станции устанавливается датчик, имеющий собственную амплитудно-частотную характеристику. Исследование записей волновых форм без учета поправок за аппаратуру вносит некоторые искажения в спектр сигнала. Для их устранения к сигналу были применены соответствующие приборные поправки.

Устранение линейного тренда. Под трендом понимается непериодическое изменение среднего, например, его линейный рост. В таком случае тренд представляет собой линейную функцию $z(t) = a \cdot t + b$, где a – линейный коэффициент (визуально воспринимаемый как угол между графиком сейсмограммы и осью времени), b – постоянная составляющая сейсмического сигнала (смещение графика от оси времени, проведенной через условный ноль амплитуды). Наличие на участке сейсмограммы линейного роста может свидетельствовать, например, о наличии колебаний очень большой амплитуды и очень низкой частоты. Колебания такой частоты не могут быть корректно учтены при анализе участка рассматриваемой длины, поэтому линейный рост сигнала лишь исказит его спектр. Постоянная составляющая сама по себе никак не влияет на спектр в ненулевых частотах, но ее наличие препятствует тапированию краев анализируемого участка сейсмограммы (см. следующий абзац). Для устранения линейного тренда методом наименьших квадратов для каждого анализируемого отрезка сейсмограммы были вычислены параметры a и b функции $z(t) = a \cdot t + b$, наилучшим образом аппроксимирующей анализируемый участок сейсмического сигнала; затем значения этой функции вычитались из значений сигнала.

Тапирование исследуемого отрезка сигнала (окно косинуса 5 %). Общепринятой практикой считается умножение временного окна данных на сглаживающее окно перед преобразованием Фурье. Это окно является функцией, плавно убывающей на концах. Поскольку анализируемый фрагмент волновой формы извлекается из общего сигнала, а преобразование Фурье фактически вычисляет спектр бесконечной функции, получаемой “зацикливанием” этого фрагмента, разность значений сигнала между концами фрагмента проявляется в виде неоднородностей (скачков), эффект которых уменьшается благодаря использованию сглаживающего окна. В данной работе применялось наиболее эффективное в сейсмическом анализе [Pilz, Parolai, 2012] косинусное окно с шириной, составляющей 5% от общей длины сейсмограммы.

Пример 60-секундной исходной записи одной компоненты сейсмического шума и тапированной после вычета тренда показан выше на рис. 5.

Вычисление спектра. Для вычисления амплитудного спектра каждой компоненты сейсмического сигнала использовалось быстрое преобразование Фурье.

Сглаживание спектра. Применяемое к амплитудному спектру сглаживание Конно и Омачи [Konno, Ohmachi, 1998] определяется следующим соотношением:

$$A'(f_c) = \sum_f (K_{KO}(f_c, f) \cdot A(f)), \quad K_{KO}(f_c, f) = \left(\frac{\sin(b \cdot \lg(f / f_c))}{b \cdot \lg(f / f_c)} \right)^4 \cdot \text{norm}(f_c), \quad (1)$$

где $A(f)$ – исходный спектр; $A'(f_c)$ – сглаженный спектр; b – коэффициент полосы пропускания (определяет “радиус” сглаживания); $\text{norm}(f_c)$ – нормировочный коэффициент, рассчитываемый из условия

$$\forall f_c : \sum_f K_{KO}(f_c, f) = 1. \quad (2)$$

Усредненный спектр горизонтальных компонент вычислялся как среднеквадратическое значение сглаженных спектров компонент N и E . Пример 60-секундной исходной записи одной компоненты сейсмического шума и тапированной после вычета тренда показан на рис. 6. На рис. 7 приведен пример усредненного спектра горизонтальных компонент, исходного и сглаженного спектров вертикальной компоненты записи одного из землетрясений.

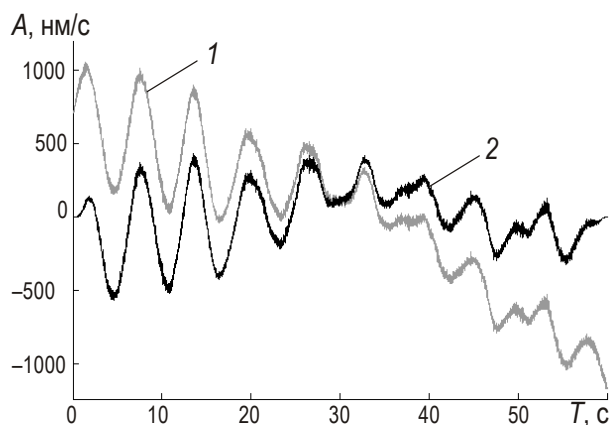


Рис. 6. Пример 60-секундной записи сейсмического шума. Горизонтальная ось – время T , с; вертикальная – значение скорости компоненты HHN , измеренной сейсмодатчиком, A , нм/с

1 – исходный сигнал с удалением среднего, 2 – тапированный после вычета тренда

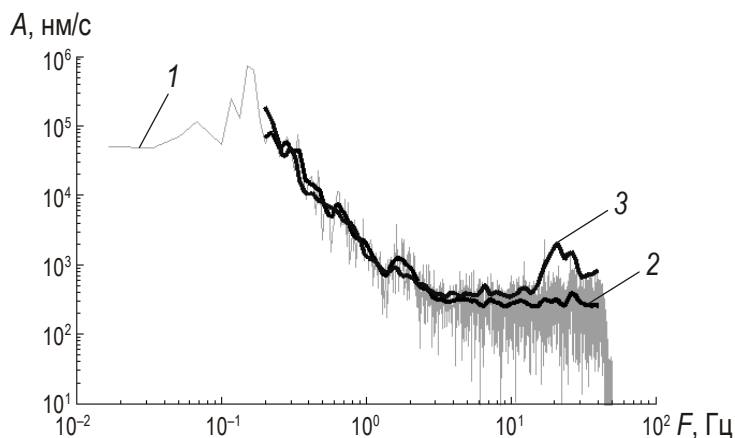


Рис. 7. Станция EKS2. Пример амплитудных спектров записи землетрясения 20.03.2003 г.

1 – спектр вертикальной компоненты; 2 – спектр вертикальной компоненты, сглаженный по методу Конно–Омачи; 3 – усредненный сглаженный спектр горизонтальных компонент

В итоге, для каждого анализируемого участка записи сейсмического сигнала было вычислено отношение амплитудного спектра горизонтальной компоненты к амплитудному спектру вертикальной. Затем для каждой станции были вычислены среднее значение и среднеквадратическое отклонение логарифма этого отношения; осреднение проводилось отдельно для записей сейсмического шума и для фрагментов записей S -волн землетрясений.

Результаты

Угловая частота, определяемая по очаговому спектру, соответствует времени подвижки в очаге. При рассмотрении событий с $K > 9$ (на ИС РАН динамические параметры рассчитываются только для таких событий) это время не может быть менее 0.14 с, что соответствует угловой частоте до 7 Гц. В связи с этим область рассмотрения очагового спектра ограничена сверху частотой 20 Гц.

Статистические характеристики стационарных поправок станций сети KNET, полученных методом расчета отношения H/V по землетрясениям и сейсмическому шуму в диапазоне 0.2–20 Гц, представлены в табл. 4. Для каждой станции приведены максимальное (max) и минимальное (min) значения отношения H/V , их отношение (max/min) и отклонения максимального и минимального значений от единицы (max–1 и min–1).

Таблица 4. Статистические характеристики стационарных поправок

Станция	Сейсмический шум					Землетрясения				
	min	max	max/min	min–1	max–1	min	max	max/min	min–1	max–1
ААК	0.63	1.20	1.90	–0.37	0.20	0.75	2.04	2.72	–0.25	1.04
АМЛ	0.75	1.27	1.70	–0.25	0.27	1.04	3.06	2.94	0.04	2.06
СНМ	0.68	1.89	2.78	–0.32	0.89	1.07	2.10	1.95	0.07	1.10
ЕКС2	0.72	1.47	2.03	–0.28	0.47	0.87	1.63	1.87	–0.13	0.63
КВК	0.95	2.36	2.48	–0.05	1.36	0.77	3.00	3.88	–0.23	2.00
КЗА	0.81	1.17	1.44	–0.19	0.17	0.54	1.77	3.29	–0.46	0.77
ТКМ2	0.60	2.11	3.50	–0.40	1.11	0.72	2.89	4.03	–0.28	1.89
УСН	0.72	1.06	1.48	–0.28	0.06	0.98	1.67	1.66	–0.05	0.63
УЛНЛ	0.61	1.21	2.00	–0.39	0.21	0.94	1.50	1.59	–0.05	0.50
УСП	0.72	1.99	2.77	–0.28	0.99	0.90	1.63	1.81	–0.10	0.63

Графическое сопоставление стационарных поправок, полученных по сейсмическому шуму и по землетрясениям, представлено на рис. 8, где серая область соответствует диапазону среднеквадратичных отклонений для значений по землетрясениям, черная – по сейсмическому шуму.

Выше было отмечено, что станции сети KNET установлены на скальных породах для исключения усиления сигнала тонким слоем, расположенным непосредственно под станцией. Для таких станций теоретически отношение спектра горизонтальной компоненты к спектру вертикальной должно равняться единице во всем диапазоне рассматриваемых частот. На практике значения стационарных поправок незначительно отклоняются от единицы в анализируемом диапазоне частот, варьируя от 0.4 до 1.36 по сейсмическому шуму и от 0.46 до 2.06 по землетрясениям (см. табл. 4). Минимальные значения стационарных поправок не опускаются ниже 0.6 (ТКМ2) по сейсмическому шуму и 0.54 (КЗА) по землетрясениям, максимальные превышают значения 2.00 на станциях ТКМ2 и КВК по сейсмическому шуму и на станциях ААК, АМЛ, СНМ, КВК, и ТКМ2 по землетрясениям. Уровень стационарных поправок, определенных по землетрясениям, находится чуть выше уровня стационарных поправок, определенных по сейсмическому шуму; при этом ход стационарных поправок, полученных по землетрясениям и сейсмическому шуму, практически одинаков на всех станциях (за исключением ААК, АМЛ, КЗА).

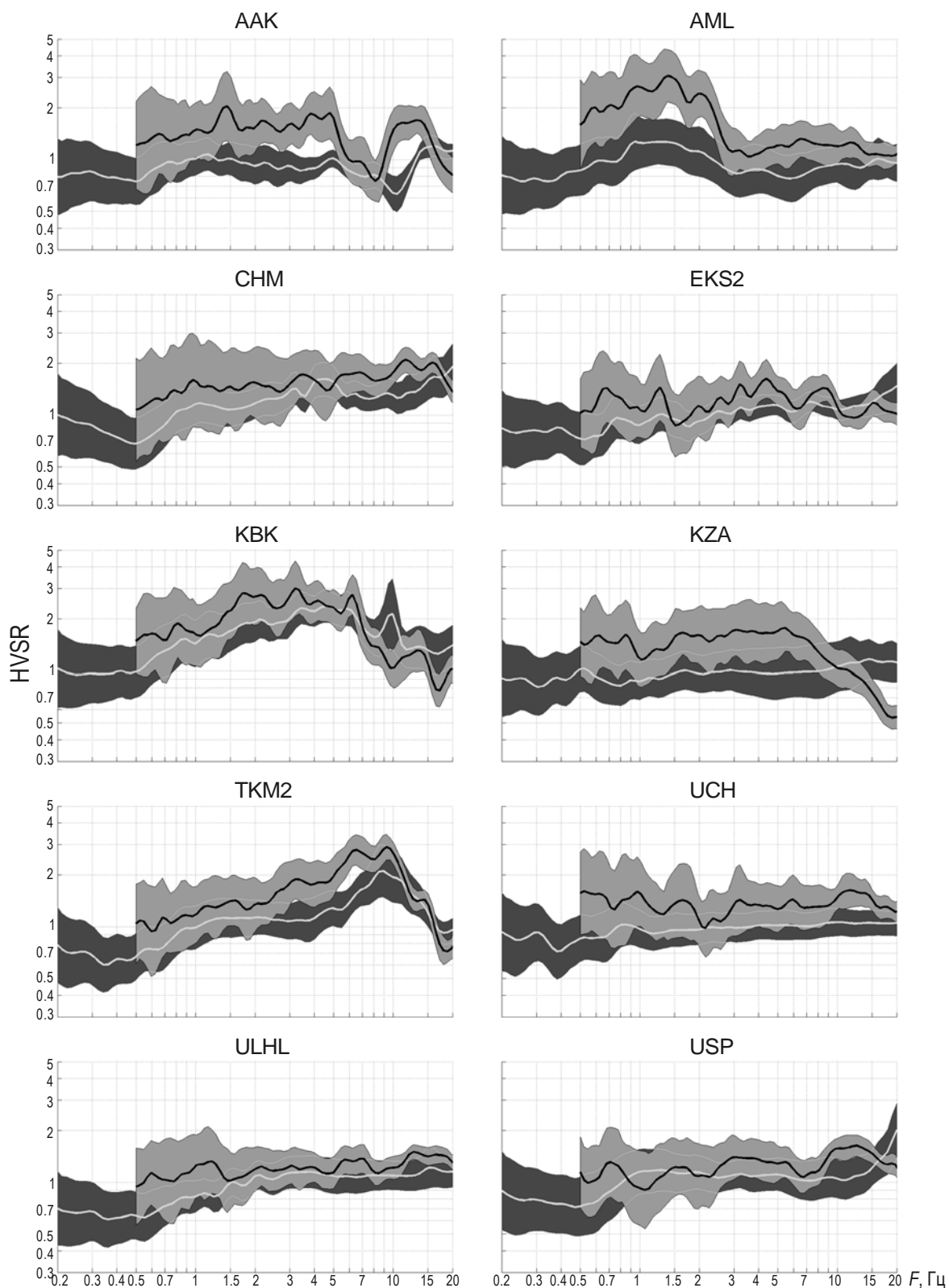


Рис. 8. Сравнение спектральных отношений H/V для землетрясений (черные графики на сером фоне) и сейсмического шума (серые графики на черном фоне) для станций сети KNET. Залитые серым и черным области демонстрируют диапазон среднеквадратичных отклонений

Различия между стационарными поправками, определенными по землетрясениям и шуму, – явление обычное. Для примера на рис. 9 приведены результаты их вычисления для станции Веноза в Италии [Giacomo et al., 2005]. Анализ триггерного шума и землетрясений позволил в этом случае выявить два интервала частот, на которых амплитуды сигнала увеличиваются.

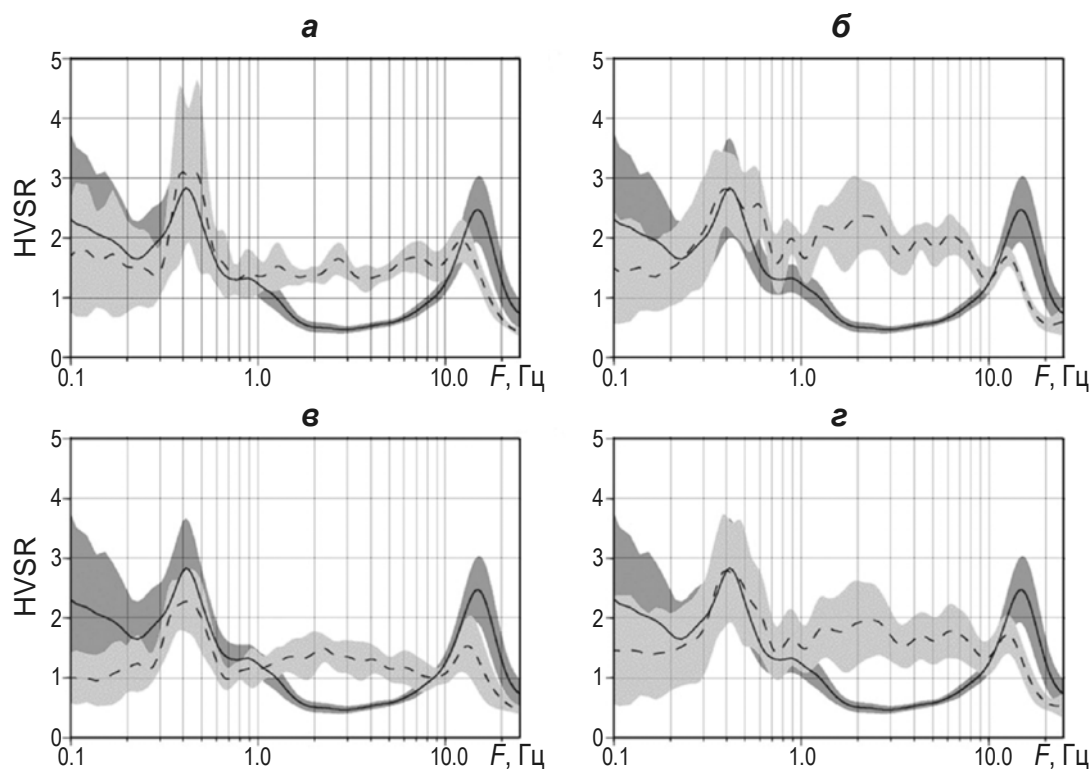


Рис. 9. Станции Веноза, Италия (по [Giacomo et al., 2005]). Сравнение спектральных отношений H/V для землетрясений (пунктирные линии на сером фоне) и триггерного сейсмического шума (сплошные на темно-сером): *а* – результаты для локальных землетрясений; *б* – для череды землетрясений в *San Giuliano di Puglia*; *в* – для региональных и телесеismicких событий; *г* – для всех анализируемых землетрясений. Области с заливкой соответствуют диапазонам изменения среднеквадратичных отклонений

В целом для станций сети KNET можно говорить об отсутствии резонансного эффекта во всем рассматриваемом диапазоне частот. Полученные результаты дают основания для вывода, что все станции сети являются “хорошими” – на них не наблюдается увеличение амплитуд регистрируемых сигналов вследствие резонансных явлений. Однако наличие некоторых отклонений от единичного уровня (см. табл. 4, станции ААК, АМЛ, КВК, ТКМ2) в рассматриваемом диапазоне частот делает необходимым использование стационарных поправок для корректного расчета очагового спектра.

Выше было отмечено, что для получения стационарных поправок по записям сейсмического шума использовались данные 2000–2014 гг. за март, июнь, сентябрь, декабрь каждого года. Для станций АМЛ, УСН и КЗА при расчете спектральных отношений в определенные месяцы определенных лет все кривые (или не менее половины кривых в выборке одного месяца одного года) зависимости H/V от частоты лежат далеко от кривых, представляющих среднее за все месяцы и годы. Такие данные не включены в результат, показанный выше на рис. 8.

Для каждой из трех станций станции наблюдалось не более четырех видов систематических отклонений¹. Для каждого вида была сделана выборка рассчитанных для него кривых H/V ; средние кривые по этим выборкам представлены на рис. 10.

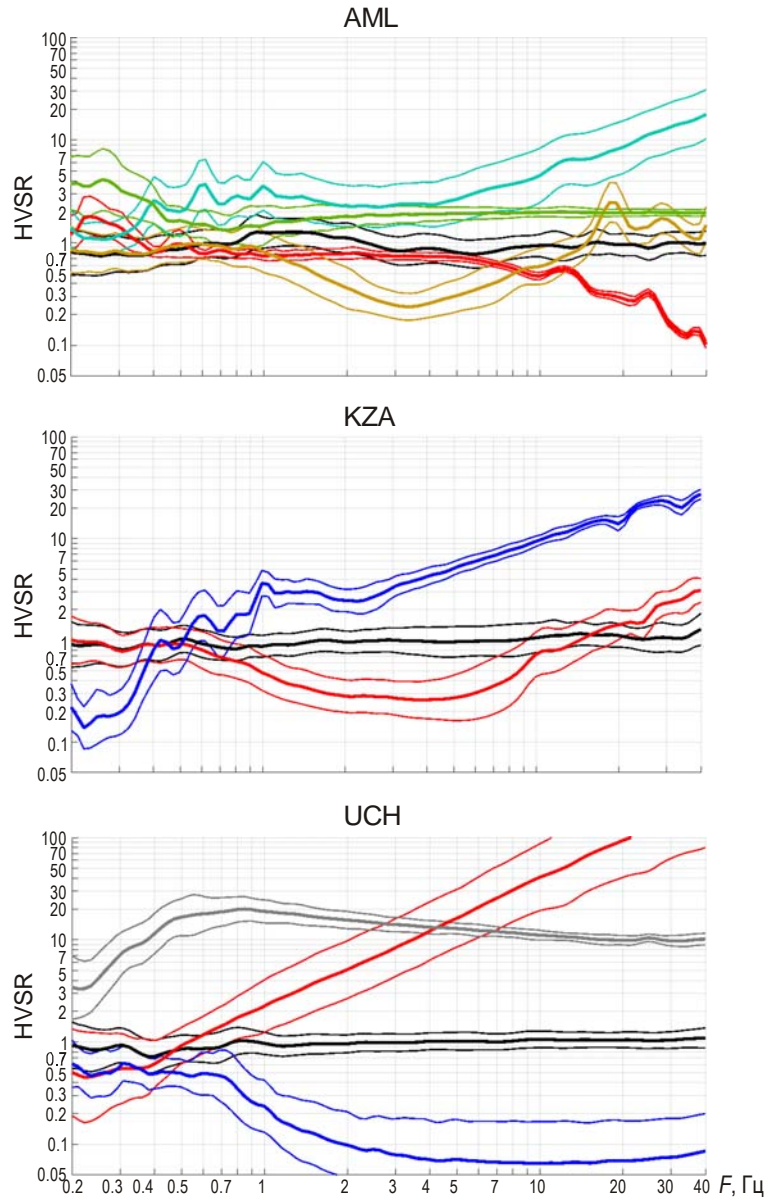


Рис. 10. К анализу систематических отклонений стационарных поправок, вычисленных для трех станций сети KNET по записям сейсмического шума в марте, июне, сентябре и декабре каждого года в период с 2000 по 2014 гг. Расшифровка условных обозначений приведена в табл. 5

На всех фрагментах рис. 10 черные графики – осредненное отношение H/V за исключением отклонений (оно же показано на рис. 8). Графики разного цвета относятся к выборкам данных по разным видам; жирные линии – среднее логарифмическое отношение H/V по выборке; тонкие ограничивают диапазон среднеквадратических отклонений

¹ Говоря о виде, мы имеем в виду сходство ряда кривых по характеру отклонений; фактически для некоторых видов это сходство очень велико – отмечается малое среднеквадратическое отклонение от среднего для вида.

соответствующих выборок. В табл. 5 приводится соответствие цветов на рис. 10 месяцам и годам использованных записей. Утолщенным шрифтом выделены годы, для которых данные за указанный месяц лишь частично вошли в соответствующую выборку; для остальных данные использованы полностью.

Таблица 5. Расшифровка условных обозначений на рис. 10

Станция	Цвет	Количество записей в выборке	Месяц	Год
AML	Бирюзовый	105	июнь	2006
	Зеленый	91	июнь	2000
	Красный	79	сентябрь	2000
	Коричневый	295	сентябрь	2003, 2005 , 2006 , 2007, 2011
KZA	Синий	67	декабрь	2012
	Красный	435	сентябрь	2000, 2001 , 2002 , 2003, 2004 , 2005 , 2006, 2009
UCH	Серый	407	март	2009
			июнь	2009
			сентябрь	2001
			декабрь	2007, 2008
	Красный	454	сентябрь	2002, 2004 , 2008, 2009, 2010, 2011 , 2012
	Синий	35	декабрь	2012

На рис. 10 можно видеть, что бóльшая часть данных с вышеописанными систематическими отклонениями от среднего содержится в выборках за сентябрь.

Выводы

Авторами проведен анализ отношения спектров горизонтальных и вертикальных компонент сигнала (H/V) по записям сейсмического шума (более 5000 шестидесятисекундных фрагментов) и землетрясений (90 событий).

Получены оценки влияния приповерхностного слоя под станциями сети KNET на записи сейсмических волн. Наблюдается согласованность кривых станционных поправок, полученных на основе сейсмического шума и землетрясений.

Выявлено отсутствие сильно-резонансных частот в диапазоне от 0.02 до 20 Гц.

Для всех станций сети отношение горизонтальной компоненты к вертикальной меняется в диапазоне от 0.6–2.36 по сейсмическому шуму и в диапазоне 0.54–3.06 по землетрясениям.

Полученные станционные поправки могут быть использованы при построении очагового спектра в целях исключения влияния некоторых отклонений спектральных отношений от единичного уровня, которые наиболее значительны для станций ААК, АМЛ, КВК, ТКМ.

Станционные поправки можно использовать также для решения других задач, например, для определения акустической добротности геосреды на основе двух станций.

Благодарности

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией комплексных исследований ИС РАН В.Д. Брагину за предоставление цифровых записей и каталога сейсмических событий.

Исследование частично поддержано Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 15-05-06857а).

Таблица 2. Список событий, записи которых использовались для расчета станционных поправок станций сети KNET

	Дата	Время	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	$H, \text{ км}$	K	M	N_0	$D_{\text{min}}, \text{ км}$	$RMS, \text{ с}$	ERH	ERZ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	26.08.1998 г.	22:50:27.42	42.24	75.01	18	9.7	3.2	20	26.5	0.30	0.4	1.0
2	02.11.1998 г.	00:57:37.10	42.1	75.08	16	11.5	4.2	18	14.1	0.26	0.8	0.9
3	21.11.1998 г.	11:46:09.44	42.24	74.06	21	12.5	4.7	20	32.8	0.25	0.7	1.4
4	24.05.1999 г.	07:39:21.39	42.66	75.04	7	10.7	3.7	20	7.5	0.38	0.8	1.3
5	15.06.1999 г.	07:32:03.52	42.66	75.03	7	10.3	3.5	20	7	0.30	0.6	1.0
6	13.07.1999 г.	00:40:40.99	42.14	73.68	13	9.7	3.1	19	0.9	0.18	0.8	0.5
7	14.01.2000 г.	13:27:43.37	42.07	75.74	4	9.9	3.3	18	40.6	0.23	1.1	2.6
8	28.07.2000 г.	17:41:28.18	42.58	74.80	17	9.5	3.1	20	14.6	0.28	0.6	0.9
9	01.08.2000 г.	18:48:51.09	42.09	75.10	16	10.1	3.4	18	12.1	0.25	0.9	0.9
10	22.10.2000 г.	00:54:20.68	42.12	75.02	7	10.6	3.7	14	42.9	0.25	1.3	99.9
11	14.12.2000 г.	21:34:25.04	42.63	74.87	13	9.6	3.1	20	7.4	0.27	0.6	1.1
12	14.12.2000 г.	23:47:48.60	42.63	74.87	13	10.2	3.4	20	7.3	0.27	0.6	1.1
13	21.02.2001 г.	12:15:16.40	42.74	75.00	2	11.7	4.3	20	10	0.30	0.6	0.9
14	08.07.2001 г.	11:51:52.68	42.14	74.98	14	11.2	4.0	20	22.7	0.25	0.1	0.2
15	20.08.2001 г.	01:27:05.74	42.14	74.98	7	10.5	3.6	18	23.4	0.25	0.7	3.2
16	11.09.2001 г.	07:13:42.81	42.41	75.59	6	10.9	3.8	19	46.3	0.44	1.1	5.6
17	18.11.2001 г.	01:28:55.44	42.59	74.14	7	12.7	4.8	20	29.4	0.31	0.7	2.5
18	08.10.2002 г.	17:00:03.65	42.05	75.66	16	9.7	3.2	19	33.5	0.17	0.0	0.0
19	11.12.2002 г.	14:21:07.63	42.58	74.94	17	9.8	3.2	18	8.9	0.24	0.6	0.7
20	21.02.2003 г.	10:35:22.15	42.53	74.47	13	11.7	4.3	20	11.9	0.32	0.7	1.4
21	02.07.2003 г.	10:30:14.42	42.69	74.35	21	9.8	3.2	18	13.5	0.23	0.5	0.9
22	15.07.2003 г.	10:17:01.84	42.11	75.49	11	9.9	3.3	16	75	0.41	0.7	11.3
23	24.09.2003 г.	01:51:17.94	42.37	74.23	17	9.6	3.1	19	28.3	0.21	0.4	0.7
24	06.10.2003 г.	16:42:13.93	42.5	74.48	16	12.0	4.4	20	14.9	0.23	0.5	0.8
25	12.11.2003 г.	05:09:50.26	42.04	75.21	17	9.6	3.1	20	5.4	0.23	0.8	0.7
26	11.12.2003 г.	22:44:35.94	42.42	73.99	6	10.4	3.6	20	31.3	0.27	0.3	0.7
27	16.01.2004 г.	09:06:17.90	42.55	75.30	14	13.7	5.4	20	30.9	0.34	0.8	2.0
28	18.01.2004 г.	13:26:34.98	42.55	75.28	19	10.5	3.6	20	29.6	0.38	0.9	2.8
29	04.02.2004 г.	19:48:15.44	42.83	74.28	7	11.3	4.0	19	27.7	0.65	1.5	5.4
30	13.02.2004 г.	02:01:08.30	42.74	74.90	20	10.3	3.5	20	10.4	0.24	0.5	0.9
31	13.05.2004 г.	22:37:09.42	42.61	74.62	13	10.2	3.5	19	10.7	0.33	0.7	1.6
32	02.06.2004 г.	17:15:10.82	42.28	74.91	18	13.3	5.1	20	33.3	0.29	0.4	1.1
33	20.09.2004 г.	14:25:22.70	42.54	75.23	20	9.7	3.2	15	26.3	0.19	0.5	1.5
34	27.11.2004 г.	12:42:54.30	42.61	74.84	15	10.6	3.7	19	9.7	0.26	0.6	1.0
35	08.06.2005 г.	21:05:21.44	42.16	75.09	17	10.6	3.7	19	15.5	0.23	0.8	1.6
36	20.06.2005 г.	14:25:01.50	42.77	74.38	23	12.0	4.4	20	17.8	0.22	0.5	0.9
37	07.07.2005 г.	19:22:05.42	42.66	74.84	12	10.9	3.8	20	9.2	0.36	0.7	1.6
38	07.07.2005 г.	21:00:07.50	42.65	74.82	11	10.8	3.8	19	10.3	0.42	0.9	2.2
39	03.10.2005 г.	09:28:26.24	42.65	74.82	12	10.8	3.8	18	10.3	0.25	0.5	1.2
40	27.12.2005 г.	00:55:30.54	42.71	75.89	6	11.6	4.2	18	33.8	0.58	2.2	5.8
41	28.12.2005 г.	01:52:48.29	42.69	75.41	12	11.9	4.4	19	29.8	0.26	0.3	1.0
42	29.12.2005 г.	08:50:32.76	42.69	75.40	6	10.5	3.6	17	30.4	0.24	0.7	2.4
43	01.01.2006 г.	08:56:53.85	42.6	75.25	22	11.0	3.9	19	25.3	0.26	0.5	1.4
44	28.05.2006 г.	03:23:55.39	42.21	73.64	0	10.0	3.3	16	10	0.13	1.0	1.2
45	20.07.2006 г.	18:43:00.42	42.76	75.85	7	9.5	3.1	19	27.2	0.37	1.4	3.5

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
46	15.08.2006 г.	18:58:22.87	42.6	75.11	10	10.2	3.4	20	14.4	0.25	0.5	1.8
47	09.09.2006 г.	02:32:07.82	42.16	73.68	13	9.6	3.1	18	3	0.15	0.6	0.4
48	05.11.2006 г.	23:43:30.68	42.17	73.64	10	9.8	3.2	17	5.6	0.31	1.4	1.2
49	08.11.2006 г.	02:21:06.94	42.57	75.36	19	13.4	5.2	20	34.9	0.31	0.6	2.2
50	08.11.2006 г.	02:26:50.84	42.57	75.35	20	10.9	3.9	16	34	0.26	0.7	2.3
51	17.11.2006 г.	19:47:58.27	42.57	75.35	13	10.1	3.4	20	34.7	0.43	0.2	0.4
52	17.11.2006 г.	19:47:58.27	42.57	75.35	13	10.1	3.4	20	34.7	0.43	0.2	0.4
53	25.12.2006 г.	20:21:16.74	42.14	75.99	1	10.3	3.5	16	23.7	0.33	1.1	1.8
54	28.12.2006 г.	02:04:46.76	42.54	74.44	13	9.6	3.1	20	11.2	0.26	0.6	1.1
55	06.06.2007 г.	11:09:25.58	42.57	75.40	13	13.3	5.1	18	38.2	0.26	0.5	2.2
56	07.06.2007 г.	17:50:10.27	42.58	75.40	20	9.7	3.2	13	38	0.18	0.4	1.2
57	06.10.2007 г.	23:56:47.92	42.47	74.42	7	10.2	3.5	16	19.3	0.30	0.7	1.6
58	21.10.2007 г.	14:08:44.42	42.57	75.35	14	11.0	3.9	15	34	0.42	1.1	2.0
59	08.01.2008 г.	18:04:13.75	42.05	75.20	17	11.0	3.9	20	5.1	0.21	0.7	0.6
60	05.02.2008 г.	09:24:12.29	42.28	74.96	6	9.7	3.1	20	32.9	0.42	0.9	3.8
61	24.02.2008 г.	21:02:11.89	42.53	75.44	22	9.5	3.1	14	43	0.23	0.7	2.8
62	13.09.2008 г.	13:40:29.18	42.52	74.57	12	9.8	3.2	17	13.8	0.31	0.7	2.0
63	13.09.2008 г.	18:18:42.06	42.52	74.57	11	10.1	3.4	17	13.8	0.32	0.8	2.1
64	20.09.2008 г.	04:15:52.27	42.27	74.86	22	10.6	3.7	18	38	0.37	0.9	2.7
65	22.01.2009 г.	12:55:14.19	42.61	74.49	17	9.9	3.3	19	3.1	0.29	0.6	0.7
66	01.02.2009 г.	11:25:38.02	42.753	73.86	15	12.3	4.6	19	12.3	0.34	1.2	1.3
67	26.02.2009 г.	22:48:10.55	42.27	74.78	17	9.8	3.2	20	22	0.29	0.6	0.8
68	09.05.2009 г.	05:36:34.52	42.59	75.11	15	9.6	3.1	20	15.2	0.29	0.6	1.4
69	16.05.2009 г.	05:38:46.20	42.59	74.19	6	10.1	3.4	17	34.7	0.38	0.9	3.5
70	24.05.2009 г.	00:08:40.93	42.61	74.60	13	10.5	3.6	19	8.9	0.28	0.6	1.3
71	25.07.2009 г.	14:57:10.42	42.59	75.71	12	10.5	3.6	17	38.5	0.41	1.2	4.8
72	31.07.2009 г.	09:21:48.59	42.68	74.73	10	9.7	3.2	18	17.5	0.31	0.7	2.2
73	07.08.2009 г.	04:32:46.39	42.00	75.73	6	11.8	4.3	17	39.9	0.38	1.1	3.2
74	27.10.2009 г.	15:42:17.95	42.29	74.85	20	9.9	3.3	17	40	0.32	0.1	0.4
75	22.11.2009 г.	16:16:03.28	42.6	75.73	14	10.3	3.5	17	37.4	0.38	0.0	0.0
76	02.03.2010 г.	01:55:36.02	42.43	75.66	19	13.3	5.2	17	51.7	0.23	0.3	1.6
77	02.03.2010 г.	02:49:01.06	42.43	75.65	22	9.5	3.1	15	50.9	0.45	1.3	5.3
78	19.05.2010 г.	15:29:36.24	42.21	74.11	7	9.7	3.2	16	32.7	0.24	0.4	2.1
79	09.09.2010 г.	18:31:50.35	42.31	75.15	19	11.0	3.9	19	26.9	0.37	0.4	1.0
80	29.09.2010 г.	07:30:07.97	42.25	75.45	17	10.0	3.3	18	25	0.26	0.6	1.8
81	19.12.2010 г.	19:12:48.85	42.54	74.70	7	9.8	3.2	15	19.7	0.30	0.8	1.9
82	09.04.2011 г.	02:28:48.84	42.02	74.84	19	9.8	3.2	18	48.9	0.14	0.4	2.5
83	09.04.2011 г.	12:30:24.93	42.02	74.84	21	12.5	4.7	19	47.7	0.27	2.1	6.2
84	16.12.2011 г.	03:14:40.13	42.3	75.88	13	10.2	3.4	18	30	0.34	1.1	2.7
85	10.02.2012 г.	06:49:17.11	42.94	74.57	16	10.2	3.4	18	16	0.33	0.9	1.4
86	28.03.2012 г.	12:54:01.43	42.49	74.73	17	10.4	3.6	18	24.8	0.30	0.7	1.0
87	16.05.2012 г.	03:26:40.57	42.48	74.92	16	10.6	3.7	20	19.3	0.35	0.6	0.9
88	12.09.2012 г.	05:51:15.70	42.41	73.92	4	10.4	3.5	10	30.2	3.39	0.2	0.5
89	06.10.2012 г.	11:41:23.18	42.21	75.42	14	9.9	3.3	19	20.2	0.26	0.5	0.9
90	29.10.2012 г.	17:44:48.37	42.15	75.26	6	9.7	3.1	19	7.9	0.38	1.3	2.1

Примечание: H – глубина очага землетрясения; K – класс землетрясения; M – магнитуда, пересчитанная из класса по формуле $M=(K-4)/1.8$ [Ризниченко, 1985]; N_0 – количество фаз, использованных при определении гипоцентра; D_{\min} – минимальное расстояние до ближайшей станции; RMS – среднеквадратическое отклонение определения времени прихода сейсмических волн; ERH – ошибка определения эпицентра; ERZ – ошибка определения глубины.

Литература

Зейгарник В.А., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д. Отчет по теме “Научное и техническое обслуживание Кыргызской сейсмической телеметрической сети”. Научная станция РАН Обьединенного института высоких температур. 1994. 7 с.

- Костюк А.Д., Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Яги Ю. Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии // *Физика Земли*. 2010. № 3. С.52–65.
- Макагон М.Ю., Сычева Н.А. Программный комплекс расчета станционных поправок (сайт-эффект) станций на основе сейсмического шума // *Вестник Киргизско-Российского Славянского университета*. 2013. Т. 13, № 7. С.90–96.
- Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Кузиков С.И., Маринин А.В. Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сети КНЕТ // *Геология и геофизика*. 2016. № 3. С.496–520.
- Сычева Н.А., Богомолов Л.М. Падение напряжения в очагах среднемагнитудных землетрясений в Северном Тянь-Шане // *Физика Земли*. 2014. № 3. С.142–153.
- Сычева Н.А., Кузиков С.И. Анализ скоростных моделей литосферы Тянь-Шаня и метод двойных разностей при определении положения гипоцентров землетрясений по данным сейсмологической сети КНЕТ // *Геофизические исследования*. 2012. Т. 13, № 2. С.5–22.
- Сычева Н.А., Мансуров А.Н. Сравнение оценок деформации земной коры Северного и Центрального Тянь-Шаня, полученных на основе сейсмических и GPS данных // *Вестник КРСУ (Кыргызско-Российский Славянский университет)*. 2016. Т. 16, № 1. С.178–182.
- Сычева Н.А., Мансуров А.Н., Сычев В.Н. Предварительные оценки станционных поправок сейсмических станций сети КНЕТ (Северный Тянь-Шань) на основе горизонтально-вертикальных спектральных отношений землетрясений // “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле”. Третья тектонофизическая конференция: Материалы докладов конференции 8–12 октября 2012 г. Т. 2. С.191–194.
- Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Юнга С.Л., Макаров В.И. Сейсмотектонические деформации и новейшая тектоника Тянь-Шаня // *Физика Земли*. 2008. № 5. С.3–15.
- Сычева Н.А., Кальметьева З.А., Мансуров А.Н., Сычев В.Н. Методические особенности определения динамических параметров землетрясений по данным сейсмологической сети КНЕТ (Северный Тянь-Шань) // “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле”. Третья тектонофизическая конференция: Материалы докладов конференции 8–12 октября 2012 г. Т. 2. С.185–190.
- Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадиева В.А. Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети КНЕТ) // *Физика Земли*. 2005. № 11. С. 62–78.
- Bindi D., Parolai S., Spallarossa D., Cattaneo M. Site effects by H/V ratio: Comparison of two different procedures // *Journal of Earthquake Engin. Imperial College Press*, 2000. V. 4, N 1. P.97–113.
- Giacomo D.D., Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Parolai S., Richwalski S.M. Analysis and Modeling of HVSR in the Presence of a Velocity Inversion: The Case of Venosa, Italy // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2005. V. 95, N 6. P. 2364–2372. doi: 10.1785/0120040242.
- Konno K., Ohmachi T. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1998. V. 88, N 1. P.228–241.
- Mellors R.J. Two studies in Central Asian seismology: a teleseismic study of the Pamir/Hindu Kush seismic zone and analysis of data from the Kyrgyzstan broad band seismic network: Submitted to the faculty of the Graduate School in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in the Department of Geological Sciences Indiana University, June. 1995. 77 p.
- Nakamura Y.A. Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR Railw // *Tech. Res. Inst.* 1989. V. 30. P.25–33.
- Parolai S., Bindi D., Baumbach M., Grosser H., Milkereit C., Karakisa S., Zunbul S. Comparison of Different Site Response Estimation Techniques Using Aftershocks of the 1999 Izmit Earthquake // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2004. V. 94, N 3. P.1096–1108.
- Picozzi M., Strollo A., Parolai S., Durukal E., Ozel O., Karabulut S., Zschau J., Erdik M. Site characterization by seismic noise in Istanbul, Turkey // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2008. P.2–6.

Pilz M., Parolai S. Tapering of windowed time series // Ed. By Bormann P. New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2). Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2012. P.1–4.

Сведения об авторах

СЫЧЕВА Найля Абдулловна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Научной станции РАН в г. Бишкеке. 720049, Киргизская Республика, г. Бишкек-49, Научная станция РАН. Тел.: +996(312) 613-140. E-mail: nelya@gdirc.ru

МАНСУРОВ Артур Наильевич – младший научный сотрудник, ФГБУН Научной станции РАН в г. Бишкеке. 720049, Киргизская Республика, г. Бишкек-49, Научная станция РАН. Тел.: +996(312) 613-140. E-mail: sur@gdirc.ru

STATION CORRECTIONS FOR THE KNET SEISMOLOGICAL NETWORK ESTIMATED FROM H/V SPECTRAL RATIO OF SEISMIC NOISE AND LOCAL EARTHQUAKES

N.A. Sycheva, A.N. Mansurov

Research Station RAS in Bishkek city, Kyrgyzstan

Abstract. Station corrections are computed for ten stations of KNET seismological network to consider site effects due to a thin low-density layer underneath the stations. This layer may amplify seismic signal at certain frequencies and cause resonance effects. Station corrections are obtained on the basis of H/V spectral ratio calculations. S-wave records of 90 local earthquakes and 5000 of 60-second fragments of ambient seismic noise were analyzed. We compared site amplifications estimated from ambient noise and earthquakes; generally they are consistent. At certain segments within the considered frequencies from 1 to 20 Hz, some differences are observed in shape of corrections depended on frequency; the amplitude range of site amplification differs at AAK, AML, and KZA stations. Strong resonance features are absent at all stations in the frequency range considered. Stations AAK, AML, KBK, and TKM2 display significant resonance features at certain frequencies, whereas at stations CHM, EKS, KZA, UCH, ULHL, and USP, site amplification is close to unity and can be neglected. The values of site amplification can be utilized in computation of source spectra of earthquakes.

Keywords: site effect, site amplification, resonance, seismic station, seismogram, spectrum, seismic noise, earthquake.

References

- Bindi D., Parolai S., Spallarossa D., and Cattaneo M. Site effects by H/V ratio: Comparison of two different procedures, *J. Earthquake Engin.*, 2000, vol. 4, no. 1, pp. 97-113.
- Giacomo D.D., Gallipoli M. R., Mucciarelli M., Parolai S., and Richwalski S.M. Analysis and Modeling of HVS Rin the Presence of a Velocity Inversion: The Case of Venosa, Italy, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 2005, vol. 95, no. 6, pp. 2364-2372, doi: 10.1785/0120040242.
- Konno K. and Ohmachi T. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1988, vol. 88, no. 1, pp. 228-241.
- Kostyuk A.D., Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Yunga S.L., and Yagi Y. Deformation of the earth's crust in the Northern Tien Shan according to the earthquake focal data and satellite, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 230–243.
- Mackagon M.Yu. and Sycheva N.A. Software development for site-effect calculation by seismic noise, *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta* (Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University), 2013, vol. 13, no. 7, pp. 90-96.

- Mellors R.J. *Two studies in Central Asian seismology: a teleseismic study of the Pamir/Hindu Kush seismic zone and analysis of data from the Kyrgyzstan broad band seismic network*, PhD Thesis, Indiana University, 1995.
- Nakamura Y.A. Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR Railw, *Tech. Res. Inst.*, 1989, vol. 30, pp. 25-33.
- Parolai S., Bindi D., Baumbach M., Grosser H., Milkereit C., Karakisa S., and Zünbül S. Comparison of Different Site Response Estimation Techniques Using Aftershocks of the 1999 Izmit Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 2004, vol. 94, no. 3, pp. 1096-1108.
- Picozzi M., Strollo A., Parolai S., Durukal E., Ozel O., Karabulut S., Zschau J., and Erdik M. Site characterization by seismic noise in Istanbul, Turkey, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, pp. 2-6.
- Pilz M. and Parolai S. Tapering of windowed time series, *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, ed. Bormann P., 2012, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, pp. 1-4. DOI: http://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_14.1.
- Rebetsky Y.L., Marinin A.V., Sycheva N.A., Sychev V.N., and Kuzikov S.I. The stress state of the Northern Tien Shan crust based on the KNET seismic network data, *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 3, pp. 387-408.
- Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Mukhamadeeva V.A., and Yunga S.L. Determination of seismotectonic crustal strains in the North Tien Shan using focal mechanisms from data of the KNET digital seismic network, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2005, vol. 41, no. 11, pp. 916-930.
- Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Yunga S.L., and Makarov V.I. Seismotectonic deformations and recent tectonics of the Tien Shan, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2008, vol. 44, no. 5, pp. 351-363.
- Sycheva N.A. and Kuzikov S.I. Analysis of velocity model for the Tien-Shan lithosphere and the double-difference method for hypocenters location using seismic network KNET data, *Geophys. Research*, 2012, vol. 13, no. 2, pp. 5-22.
- Sycheva N.A., Kalmet'eva Z.A., Mansurov A.N., and Sychev V.N. Methodological features of determining the dynamic parameters of earthquakes according to the data of the seismological network KNET (Northern Tien Shan), *Tektonofizika i aktual'nyye voprosy nauk o Zemle, Tret'ya tektonofizicheskaya konferentsiya. Materialy dokladov konferentsii 8-12 oktyabrya 2012 g.* (Proc. Conf. Tectonophysics and topical issues of Earth sciences), 2012, vol. 2, pp. 185-190.
- Sycheva N.A., Mansurov A.N., and Sychev V.N. Preliminary estimates of station corrections of seismic stations of the KNET network (Northern Tien-Shan) on the basis of horizontally-vertical spectral relationships of earthquakes, *Tektonofizika i aktual'nyye voprosy nauk o Zemle, Tret'ya tektonofizicheskaya konferentsiya. Materialy dokladov konferentsii 8-12 oktyabrya 2012 g.* (Proc. Conf. Tectonophysics and topical issues of Earth sciences), 2012, vol. 2, pp. 191-194.
- Sycheva N.A. and Mansurov A.N. Comparing estimates of earth crust deformations derived from seismic and GPS-DATA, *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta* (Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University), 2016, vol. 16, no. 1, pp. 178-182.
- Sycheva N.A. and Bogomolov L.M. Stress drop in the sources of intermediate-magnitude earthquakes in Northern Tien Shan, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 415-426.
- Zeygarnik V.A., Trapeznikov Yu.A., and Bragin V.D. *Otchet za 1994 god po teme Nauchnoye i tekhnicheskoye obsluzhivaniye Kyrgyzskoy seysmicheskoy teletricheskoy seti. Nauchnaya stantsiya RAN Ob'edinennogo instituta vysokikh temperatur* (Scientific and Technical Service of the Kyrgyz Seismic Telemetry Network, Report), Scientific Station of the Joint Institute for High Temperatures, RAS, 1994.