

ЭМПИРИЧЕСКИЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ ВБЛИЗИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ КАМЧАТКИ

А.А. Гусев^{1,3}, А.А. Скоркина^{2,3}

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9, Россия

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, Россия

³ Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9, Россия

По материалам цифровой регистрации изучены спектральные характеристики среды вблизи 23 сейсмических станций Камчатки методом сравнения спектров записи местного землетрясения на целевой и эталонной станциях; в качестве последней выбрана станция «Петропавловск» (PET) с жестким скальным грунтом. Спектры определены по данным многополосной фильтрации. В каждой из изученных частотных полос сопоставлены пиковые амплитуды скорости и уровни спектров Фурье поперечных волн, а также среднеквадратические амплитуды коды. Средний спектр Фурье в пределах полосы найден из равенства Парсевала по энергии поперечных волн в полосе. Для поперечных волн различие гипоцентральных расстояний скомпенсировано с помощью эмпирических функций затухания. Обработаны записи более 300 событий с диапазоном гипоцентральных расстояний, в основном 100–600 км, с $M = 5–6$. Обнаружено большое разнообразие спектральных характеристик по трем методам. Для ряда нескальных станций выявлено ожидаемое поведение спектральных характеристик на высоких частотах. Другие станции могут считаться аналогами ст. PET. Для ряда станций обнаружен четкий рост спектральных отношений с частотой вплоть до 10-кратного усиления в области 20–30 Гц. В целом выявленные спектральные характеристики в диапазоне до 3–5 Гц согласуются с ожидаемыми трендами, соответствующими геологическому строению в пунктах установки приборов сильных движений.

Спектр, S-волна, кода, метод опорной станции, спектр отклика среды, станции сильных движений, Камчатка.

EMPIRICAL SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE MEDIUM NEAR STRONG-MOTION SEISMIC STATIONS OF KAMCHATKA

A.A. Gusev and A.A. Skorkina

Spectral characteristics of the medium around 23 digital strong-motion seismic stations of the Kamchatka region have been studied from local earthquake data relative to a reference bedrock station (Petropavlovsk, PET). Spectra are determined by multiband filtering. In each band peak velocity amplitudes, levels of Fourier S -spectra and mean-square coda amplitudes were compared. Average Fourier spectra were obtained from S -wave energy using Parseval's equation. The difference in hypocentral distances for pairs of stations was compensated by empirical S -wave attenuation functions. Records of more than 300 events were processed, with $M = 5–6$ and hypocentral distances mainly 100–600 km. The spectral ratios estimated by the three methods show behavior diversity. Some nonrock stations show expected spectral characteristics at high frequencies. The conditions at other stations can be considered similar to those at PET. Some stations show amplifications of up to 10 times in the 20–30 Hz frequency range. In general, the obtained spectral characteristics within 3–5 Hz are consistent with the expected trends corresponding to known local geology around strong-motion stations.

S-wave, coda, reference station, spectral ratio, site response, strong-motion station, Kamchatka

ВВЕДЕНИЕ

Исследование спектра отклика среды в широком диапазоне частот (0.2–30.0 Гц) и отклика грунтов в частности — важный и непереносимый этап работ по изучению сейсмической опасности. Под откликом среды понимается специфическое для площадки строительства или участка, на котором установлена сейсмическая станция, частотно-зависимое усиление колебаний различных частот. Такое усиление возможно оценить с помощью двух типов спектра: спектров Фурье или спектров реакции. Оценки, полученные с помощью спектров Фурье с использованием эталонной станции, условно назовем относительными спектрами отклика среды, или эмпирическими спектральными характеристиками среды вблизи сейсмических станций.

На Камчатке основные усилия по изучению грунтов в аспекте сейсмоопасности были сосредоточены вокруг г. Петропавловск-Камчатский. Так, систематические исследования В.В. Штейнберга и С.А. Федотова [1974], а также И.А. Ершова [1974] позволили выделить здесь несколько типовых грунтовых комплексов со специфическими ожидаемыми спектрами сильных движений. В последующие годы оценка собственно спектров отклика грунта с использованием эталонной сейсмической станции («Петропавловск», код РЕТ) проводилась для отдельных площадок в рамках заказных работ [Гусев и др., 1980; Гусев, 1990; и др.].

С появлением на Камчатке сети цифровых сейсмических станций [Чебров и др., 2013] появилась возможность систематически изучать спектры откликов грунтов в точках размещения этих станций в широком диапазоне частот (0.2—30.0 Гц). При этом возникает возможность охватить ряд пунктов вне г. Петропавловск-Камчатский, что позволяет получить исходный материал для оценки сейсмической опасности ряда пунктов и территорий Камчатского края.

Методики сейсмического микрорайонирования традиционно опираются на расчет отношений спектров Фурье и спектров реакции [Сейсмическое..., 1977], где спектр реакции — это ряд пиковых амплитуд для набора маятников с различными собственными частотами и одинаковой добротностью (или коэффициентом затухания). По существу, такие маятники образуют гребенку полосовых фильтров с фиксированной относительной шириной полосы. В СССР накоплен большой опыт работы [Раутиан и др., 1981; и др.] с аппаратурно реализованной гребенкой фильтров такого рода, известной как ЧИСС, т. е. частотно-избирательная сейсмическая станция [Запольский, 1971]. В настоящей работе аналогичная методика реализована на цифровой основе.

Оба данных подхода в инженерной сейсмологии опираются на анализ акселерограммы всего землетрясения, включая *P*- и *S*-волны. Однако на близких гипоцентральных расстояниях вклад поперечных волн в энергию колебаний, в пиковые амплитуды и особенно в важнейшие для инженерных приложений амплитуды горизонтального движения является основным или подавляющим [Федотов, 1972]. Поэтому в данной работе в качестве основного анализируемого сигнала использовали группу поперечных волн.

Хотя с точки зрения сейсмической опасности в рассматриваемом случае поперечные волны являются определяющими, для изучения отклика грунта есть и дополнительная возможность. В работах [Phillips, Aki, 1986; Hua et al., 1993; и др.] было обнаружено, что эмпирические спектры отклика среды можно в ряде случаев приблизительно оценить с использованием отношений спектров кода-волн. В качестве меры амплитуды в таких работах используется приведенный спектр коды — набор фактических среднеквадратических амплитуд коды в рабочих полосах, пересчитанный к фиксированному запаздыванию относительно времени в очаге. Аналогия откликов грунтов в отношении *S*-волн и коды — физически обоснованная, поскольку кода в основном состоит из рассеянных *S*-волн. На частотах ниже 2 Гц в коде имеется также вклад высокочастотных поверхностных волн [Раутиан и др., 1981], но аналогичный вклад имеет место и при формировании регистрируемой «группы *S*-волн». Однако, как выяснилось [Margheriti et al., 1994; Bonilla et al., 1997], полного согласия поправок по коде и *S*-волнам часто не наблюдается. Данный вопрос требует изучения для условий Камчатки. Далее представлены спектры отклика среды с помощью спектров Фурье, приведенных спектров коды и аналогов ЧИСС-спектров, которые назовем «спектры пиковых амплитуд».

Альтернативой эмпирическому методу оценки спектров откликов среды является использование теоретических расчетов, например, модели слоистой среды [Ратникова, 1973; Joynер, Fumal, 1984]. Возможны расчеты для двумерных и трехмерных моделей сред, однако надежные исходные данные для таких расчетов могут отсутствовать.

Расчетный метод становится важнейшим, если решается задача оценки поведения грунтов в условиях больших амплитуд. В этом случае необходим явный учет нелинейного поведения грунтовой толщи [Hudson, 1972; Pavlenko, Irikura, 2006]. Настоящее исследование касается свойств грунтовых толщ только в линейном приближении, т. е. при небольших амплитудах, и в ограниченном диапазоне магнитуд ($M = 5-6$).

Далее описывается процедура подбора цифровых акселерограмм камчатских землетрясений, расчет спектров записей компонент с помощью трех различных подходов (с использованием спектров Фурье для *S*-волн, приведенных спектров коды или спектров пиковых амплитуд), расчет отношений спектров (изучаемой и эталонной станции), а также выполняется анализ полученных средних отношений.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для оценки спектральных характеристик среды вблизи 23 сейсмических станций (с/ст) сильных движений (таблица, рис. 1, а, б) выбраны записи 335 землетрясений 2011–2016 гг., диапазона магнитуд $M_L = 4.7-6.4$ ($K_S = 11.0-14.3$, $M_w = 4.3-6.0$ [Абубакиров и др., 2018]), включая Жупановское земле-

трясение [Чебров и др., 2016] с глубинами менее 400 км; всего более 7000 записей (см. рис. 1, в, з), при этом выбранный диапазон магнитуд обеспечивает достаточный уровень соотношения сигнал—шум, в том числе на больших расстояниях (см. рис. 1, з). Каждая станция оборудована широкополосными цифровыми акселерометрами CMG5T и CMG5TD с частотой опроса 100 отсчетов/с [Чебров и др., 2013], а описание грунтов в месте установки приборов приведено на сайте [Камчатский..., 2018].

Геологическое строение вблизи г. Петропавловск-Камчатский (см. таблицу, рис. 1, б). В геологическом отношении [Паспорт..., 1986; Государственная..., 2000] территория города находится в пределах Петропавловского горста, сложенного смятыми в пологие складки метаморфизованными породами верхнего мела и палеогена, покрытыми четвертичными отложениями, мощность, состав и степень литификации которых сильно варьирует по площади. Наиболее древними породами, принимающими участие в геологическом строении района, являются зеленокаменные отложения верхнего мела. Это — скальный фундамент, далее условно называемый «меловой фундамент». Эти отложения прорваны интрузиями габбро-диабазов, андезитобазальтов и диоритов. Именно на подобной интрузии габбро-диабазов размещена опорная скальная станция РЕТ. Во многих местах меловые отложения перекрыты толщей вулканических песков, шлаков, пемз и туфов андезитобазальтового и андезитового состава мощностью до 500 м. Материал этой толщи в основном слабо сцементирован. Вблизи Петропавловска эта более молодая толща вулканогенно-осадочного происхождения сформировалась у подножия вулканов Авачинский и Корякский. Далее для краткости подобные распространенные на Камчатке молодые отложения будем называть «вулканогенно-осадочной толщей». Сейсмические эффекты именно этой толщи определяют «средние грунты» вблизи города. В вулканогенно-осадочной толще возникают слабо выраженные резонансы и эффекты широкополосного усиления. Там, где верхние толщи прорваны интрузиями, сейсмический разрез имеет более высокоскоростной характер.

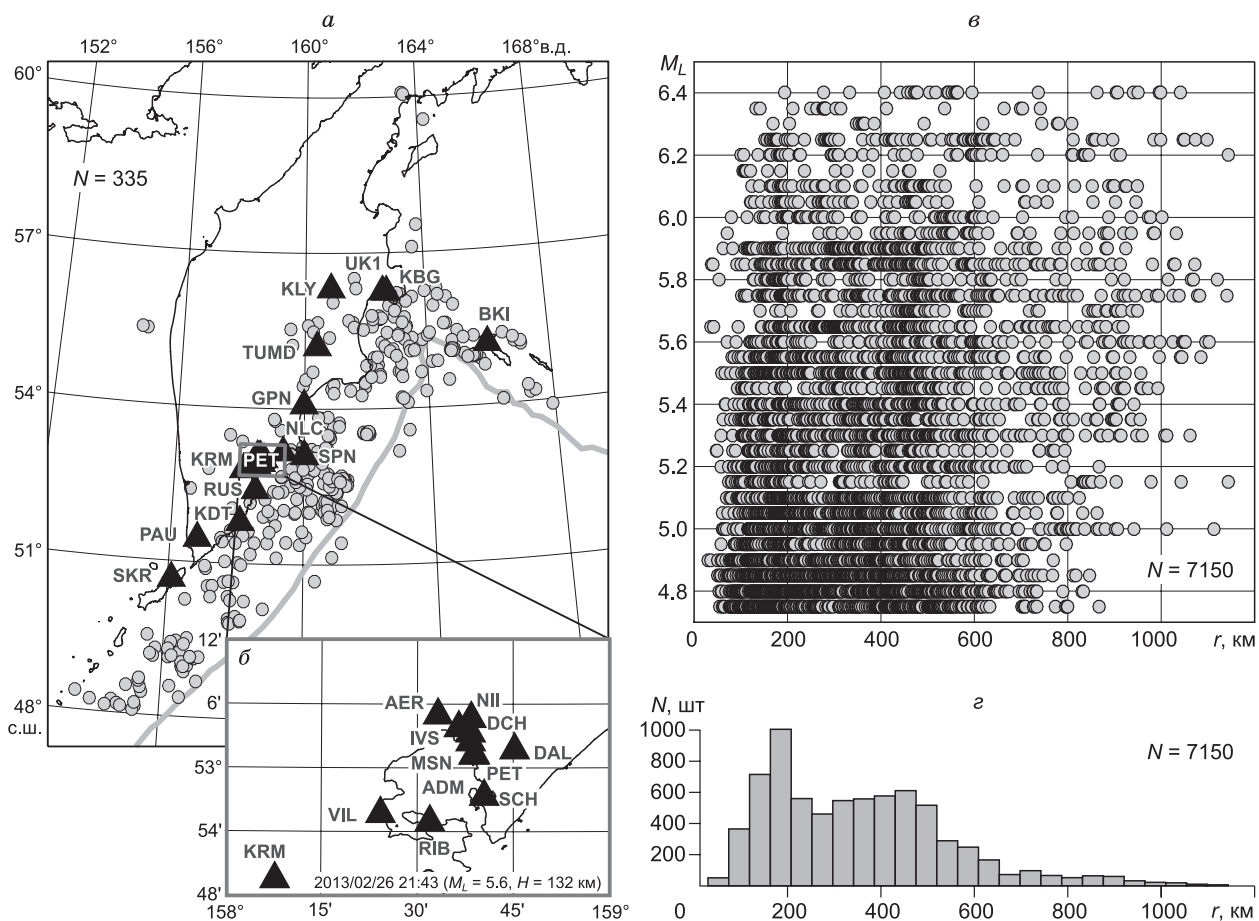


Рис. 1. Изученный набор данных (335 очагов за 2011—2016 гг. с $M_L = 4.7—6.4$):

а — расположение сейсмических станций и эпицентров землетрясений; б — сейсмические станции Петропавловского куста (см. таблицу); в — расположение данных на плоскости гипоцентрального расстояния (r , км)—магнитуда (M_L); з — распределение количества записей по гипоцентральному расстоянию.

Сводная информация по сейсмическим станциям и грунтовым условиям в районе их установки

Код и название с/ст, Δ _{РЕТ}	φ, °	λ, °	h, м	N, шт	Грунты [Камчатский..., 2018]	Геологическая информация
1	2	3	4	5	6	7
РЕТ («Петропавловск»)	53.02	158.65	68	335	Габбро-диабазы	Обширная (до 1 км) интрузия габбро-диабазов, внедряющаяся в меловой фундамент
Сейсмические станции «Петропавловского куста»						
ADM («Администрация ПК»), 0.2 км	53.02	158.65	5	306	Мягкий, насыпная галечная супесь	Меловой фундамент, покрытый тонким коллювием
MSN («Мишенная»), 2.4 км	53.04	158.64	381	238	Скальный	Каменистый элювий на четвертичной экструзии андезитов и дацитов
DCH («Дачная»), 3.9 км	53.06	158.64	160	317	Средний, пирокластические отложения	Вулканогенно-осадочная толща
IVS («Институт»), 5.5 км	53.07	158.61	160	321	Средний, пирокластические отложения	»
НИ («НИГТЦ»), 6.4 км	53.08	158.64	190	282	Консолидированный (глыбы, щебень, глина)	»
DAL («Дальний»), 7.0 км	53.03	158.75	57	309	Уплотненный (щебень, скала)	Меловой фундамент, покрытый тонким коллювием
SCH («Школа»), 7.4 км	52.96	158.67	70	310	Консолидированный (глыбы, щебень, глина)	То же
AER («Аэрологическая станция»), 9.5 км	53.09	158.55	80	203	Средний	Вулканогенно-осадочная толща
RIB («Рыбачий»), 14 км	52.92	158.53	100	320	Консолидированный (глыбы, щебень, глина)	Меловой или палеогеновый фундамент, покрытый коллювием
VIL («Вилочинск»), 19 км	52.93	158.40	40	320	То же	То же
KRM («Карымшина»), 41 км	52.83	158.13	100	308	»	Меловой или палеогеновый фундамент, покрытый крупнообломочным аллювием
Сейсмические станции «северной группы»						
NLC («Налычево»), 49 км	53.17	159.35	6	296	—	Меловой или палеогеновый фундамент, покрытый коллювием
SPN («Шипунский»), 91 км	53.11	160.01	95	282	Скальный	То же
GPN («Жупаново»), 147 км	54.08	159.99	20	247	»	Вулканогенно-осадочная толща
TUMD («Тумрок-источники»), 268 км	55.20	160.40	478	268	—	»
KLY («Ключи»), 393 км	56.32	160.86	35	323	—	»

1	2	3	4	5	6	7
УК1 («Администрация УК»), 440 км	56.26	162.59	5	305	Песок	Слабосцементированный галечник аллювиального происхождения
КВГ («Крутоберегово»), 445 км	56.26	162.71	30	317	Песок, гравий	То же
ВК1 («Беринг»), 535 км	55.19	165.98	12	339	»	Конгломераты, псаммитовые (среднеобломочные) туфы
Сейсмические станции «южной группы»						
RUS («Русская»), 66 км	52.43	158.51	125	295	—	Интрузивный комплекс, покрытый тонким коллювием
KDT («Ходутка»), 140 км	51.81	158.08	22	261	Скальный, лавовый поток	Мел-палеогеновый фундамент, покрытый тонким коллювием
PAU («Паужетка»), 283 км	51.47	156.82	130	313	Песок, гравий	Вулканогенно-осадочная толща
SKR («Северо-Курильск»), 321 км	50.67	156.12	30	337	»	Вулканогенно-осадочная толща

Геологическое строение северного района Камчатки (см. таблицу) в основном определяется [Государственная..., 2007] горными массивами, состоящими из пород мел-палеогенового возраста, включая разнообразные габброиды и ультрабазиты, кремнисто-вулканогенные образования и кремнисто-вулканогенно-терригенные отложения. Низменные части полуострова заполнены осадочными образованиями позднеплиоценового-раннечетвертичного возраста. В работе [Gorbatov et al., 1999] по результатам томографии сейсмических скоростей на севере выявлены зоны пониженных скоростей — на глубинах до 30 км (иногда до 150 км), приуроченные, в том числе, к районам активного вулканизма, и зоны повышенных скоростей, особенно характерные для района Командорских островов (с/ст ВК1). В работе [Кузин, 1974] также отмечена специфическая структура района Командорских островов с отношением скоростей $v_p / v_s = 1.71$ против типичного значения 1.73 на Камчатке и тонкой (~25 км) корой. В геологическом отношении Командорские острова сложены палеогеновыми и неогеновыми осадочно-туфогенными и эффузивными образованиями общей мощностью около 5 км. При этом окрестности с/ст ВК1 сложены конгломератами, псаммитовыми (среднеобломочными) туфами [Геология..., 1964]).

Геологическое строение южного района Камчатки (см. таблицу) — южное замыкание горст-антиклинальной структуры Срединного кристаллического массива Камчатки, зона сочленения этого поднятия с заполненным терригенными отложениями прогибом позднемелового времени [Геологическая..., 1956]. Согласно [Gorbatov et al., 1999], скоростных аномалий здесь не выявлено, сейсмические скорости в целом соответствуют средним значениям по Камчатке.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Спектры записей. Первый шаг процедуры — определение спектров *S*-волн. Для этого проводится выделение на записях групп *S*-волн, выделение участков шума для получения оценок уровня шума и расчета частотно-зависимого отношения сигнал/шум [Скоркина, Гусев, 2017]. Оценки из зашумленных полос отбрасываются; в качестве порогового было принято значение амплитудного отношения сигнал/шум — 3. Далее оцениваются уровни амплитудного спектра в каждой из рабочих полос частот. Весь анализ проводится параллельно для сигнала сейсмических волн, прошедшего через гребенку полосовых фильтров с примерно логарифмической сеткой осевых частот. Используется набор из 24 частотных полос, каждая шириной 1/3 октавы — 0.1 ед. десятичного логарифма; полосы располагаются с шагом 0.1 по логарифмической оси частот.

После фильтрации для каждой полосы по записи определяются амплитудные параметры:
– среднеквадратическая амплитуда шума в окне 60 с до вступления *P*-волны;

- интеграл от квадрата скорости по окну S -волны, далее кодируется как ES ;
- пиковая амплитуда S -волны, далее кодируется как AS ; и
- среднеквадратическая амплитуда коды в окне после приведения к запаздыванию 100 с, далее кодируется как CS . Ширина окна обмера коды меняется от полосы к полосе, что пояснено ниже.

Значение ES используется для оценки квадрата амплитудного спектра в пределах рабочей полосы фильтра. Пользуясь частным случаем теоремы Парсевала [Дженкинс, Ваттс, 1971], среднеквадратичное значение сигнала, или средняя мощность, рассеиваемая сигналом, может быть разложена на составляющие, даваемые каждой гармоникой. Таким образом, полученный интеграл по времени от текущего квадрата скорости S -волн для каждого интервала многополосного фильтра пересчитывается в интеграл по полосе частот от квадрата амплитудного спектра сигнала. Таким образом, получаем оценки для центральных частот многополосного фильтра, интерполяцию которых считаем аналогом сглаженного амплитудного спектра сигнала.

В предварительном исследовании [Гусев, Гусева, 2014] обнаружено, что выбор индивидуального временного окна для выделения S -волн на каждой записи не дает заметных преимуществ по сравнению с автоматическим выбором по определенной схеме. Как показано в [Petukhin, Gusev, 2003], в условиях Камчатки волновой пакет S -волн за счет эффектов рассеяния растягивается на период времени, пропорциональный времени пробега. (Отметим, что такой подход справедлив только для низких и умеренных магнитуд, для которых и вели исследование; начиная с $M = 6.5-7.0$ на длительность волнового пакета начинает влиять очаговая длительность). Поэтому при расчете параметра ES интегрирование ведется в пределах окна $[1.0-1.8] t_s$, где t_s — время пробега S -волн.

Функции затухания с расстоянием. Обычно в работах по СМР предполагается, что целевая и эталонная станция находятся вблизи друг от друга, а очаг-источник намного дальше. Такой подход может создавать сложности на практике в условиях редкой сети станций и активной региональной сейсмичности, что имеет место в изучаемом случае (см. рис. 1, а, таблицу). Для компенсации различий в гипоцентральном расстоянии для пар станций применены функции затухания. Такие эмпирические функции были построены для спектров Фурье в полосах, что описано в работе [Гусев и др., 2017]. Данная методика кратко пояснена ниже.

Для случая пиковых амплитуд функции затухания — это калибровочные кривые, подобные тем, которые используются для построения традиционных магнитудных шкал. Следуя [Aki, Chouet, 1975; Rautian, Khalturin, 1978], в качестве эффективного средства построения эмпирических функций затухания применена нормировка пиков и спектров S -волн к уровню среднеквадратической амплитуды кода-волн на той же записи при фиксированном запаздывании относительно времени в очаге. В данной работе используется запаздывание в 100 с; соответствующий уровень обозначается A_{c100} . Нередко для 100 с этот уровень снять затруднительно, но при этом возможно на другом запаздывании. Тогда полученная оценка с приемлемой точностью пересчитывается в оценку для 100 с с использованием средних региональных огибающих кода-волн. Ширина окна оценки мощности коды $[t_1 t_2]$ не менее 6 с. Значение t_1

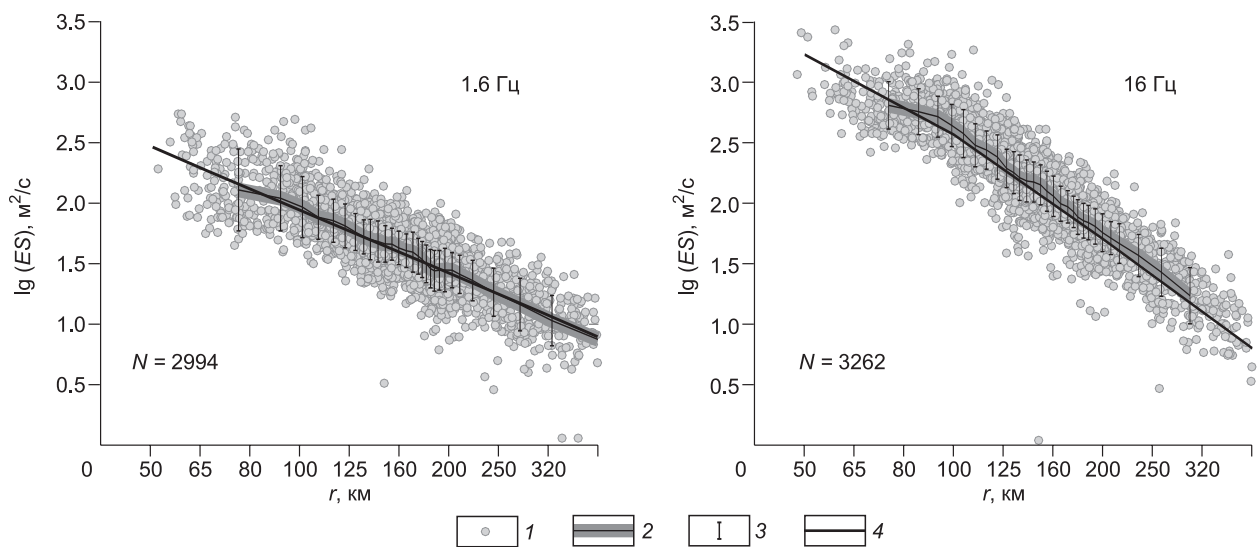


Рис. 2. Нормированная к уровню коды «энергия» поперечных волн как функция гипоцентрального расстояния (1), ее сглаженный вариант (2), условное стандартное отклонение (3) и результирующая калибровочная функция (4) для энергии поперечных волн в полосах 1.6 и 16 Гц.

Рис. 3. Примеры функций затухания:

a — нормированные к коде функции затухания параметра $(ES)^{0.5}$ (т. е. (энергия *S*-волн)^{0.5}) для прореженного набора полос; кривые произвольно сдвинуты по вертикали для разборчивости; *r* — гипоцентральное расстояние (км); f_{cb} — осяевая частота полосы фильтра; *b* — привязка по уровню для кривых, представленных на рисунке *a*, при $r = 100$ с; нулевое значение ординаты соответствует случаю $A_i = A_{c100}$.

задается как $L_1 t_s$, где, следуя Т.Г. Раутиан, принято частотно-зависимое значение L_1 : от $L_1 = 2.3$ для 0.25 Гц до $L_1 = 1.7$ для 40 Гц. Выбор t_2 определяется уровнем шума. Размер окна уменьшается при обнаружении вероятных афтершоков, выделяемых автоматическим алгоритмом. После получения нормированных к коду уровней спектров *S*-волн для многих расстояний, сглаживанием этих оценок была определена искомая функция затухания (рис. 2, 3).

С использованием найденных функций затухания все наблюдаемые спектры и амплитуды приводились к фиксированному расстоянию $r_{bas} = 50$ км:

$$S_{ijk,50} = (B_{Sk}(50) / B_{Sk}(r_{ij})) S_{ijk}(r_{ij}),$$

$$A_{ijk,50} = (B_{Ak}(50) / B_{Ak}(r_{ij})) A_{ijk}(r_{ij}),$$

где S_{ijk} — уровень спектра Фурье в полосе с осяевой частотой f_k , записанный на станции номер *j* при землетрясении номер *i*, r_{ij} — гипоцентральное расстояние станции номер *j* при землетрясении номер *i*; $B_{Sk}(r)$ — нормированная функция затухания спектра Фурье для полосы номер *k*; $S_{ijk,50}$ — приведенный спектр. Для пиковых амплитуд справедливы аналогичные формулы с очевидной заменой *S* на *A*. Технически далее использовали только приведенные спектры и амплитуды. При делении приведенного спектра станции *p* на такой же спектр эталонной станции с принятым номером ноль для того же события *i* имеем

$$S_{ipk,50} / S_{i0k,50} = (B_{Sk}(r_{i0}) / B_{Sk}(r_{ip})) \cdot (S_{ipk}(r_{ip}) / S_{i0k}(r_{i0})),$$

здесь правый множитель — отношение фактических спектров записей, а левый — поправка за различие расстояний. Опорное расстояние выпадает. Для пиковых амплитуд снова справедливы аналогичные обозначения и результаты. Для приведенных уровней коды нормировка не нужна.

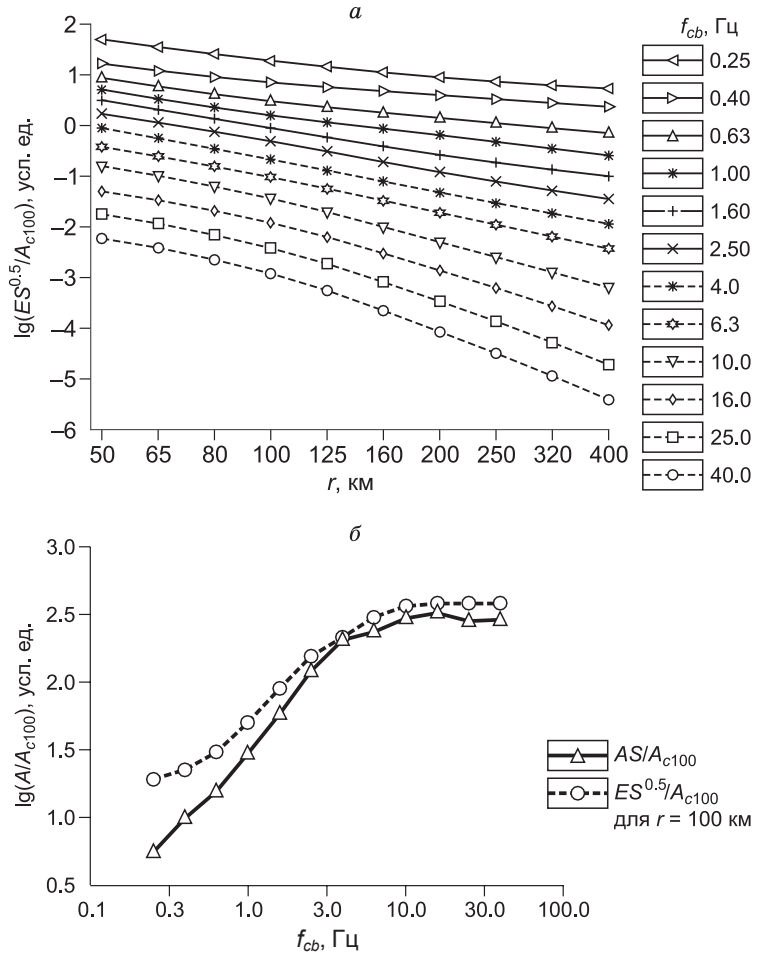
Для изучения откликов грунтов логарифмы вычисленных отношений спектров

$$\Delta \lg S_{ipk} = \lg (S_{ipk,50} / S_{i0k,50})$$

следовало осреднить:

$$\Delta \lg S_{pk} = (1 / n_{pk}) \sum_i \Delta \lg S_{ipk},$$

где n_{pk} — число наблюдений. Фактически вместо средних использовали медианы, менее чувствительные к иногда возникающим выбросам. Разброс значений $\Delta \lg S_{ipk}$ характеризовали значением условного стандартного отклонения $\sigma(\Delta \lg S_{ipk})$, которое оценивали по робастному алгоритму через межквартильный размах. Аналогично рассчитывали параметры



$$\Delta \lg A_{pk} = (1 / n_{pk}) \sum_i \lg (S_{ipk,50} / S_{i0k,50}),$$

$$\Delta \lg C_{pk} = (1 / n_{pk}) \sum_i \lg (A_{c100,ipk} / A_{c100,i0k}).$$

Функции затухания амплитуд и энергии S -волн и стандартные функции убывания амплитуд коды строили с использованием трех компонент записи, суммируя энергии этих компонент. Изучение спектров Фурье и спектров коды вели для средних квадратических по горизонтальным компонентам станций. В случае пиковых амплитуд и при построении средних зависимостей, и при анализе данных использовали наибольшую по модулю из горизонтальных компонент.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эмпирические характеристики среды, полученные вблизи станций сильных движений Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, представлены на рис. 4, кривые могут произвести впечатление сглаженных, хотя и не являются таковыми. Рабочие полосы фильтров не перекрываются, и соседние точки — независимы. Оказывается, что при выбранной детальности (с шагом 0.1 по логарифмической оси частот) амплитуды спектров в типичных случаях меняются плавно. Есть и отдельные примеры ступенчатого поведения (с/ст KRM, MSN) и выбросов, имеющих, по-видимому, резонансный характер (с/ст NLC, DAL); эти примеры иллюстрируют уровень детальности полученных спектральных характеристик, которые являются важной априорной информацией при решении ряда прикладных задач. Например, при проведении работ по СМР на территории Камчатского края, при определении станционных поправок для расчета магнитуд и т.д.

Рассмотрим полученные эмпирические характеристики (относительно с/ст PET):

1. Эмпирические спектральные характеристики среды вблизи с/ст ADM и DAL оказались близки к опорной с/ст PET в диапазоне частот до 1 Гц, что позволяет предполагать различие только в верхней части разреза (до глубин в 1.2 км, при средней $v_s = 1.2$ км/с [Паспорт..., 1986]). На больших глубинах станции подстилаются идентичной по упругим свойствам меловой скальной толщей, что согласуется с [Государственная..., 2000].

2. Среда вблизи с/ст DCH, IVS, NII и AER характеризуется однотипно повышенными амплитудами в диапазоне 0.3—1.0 Гц, что позволяет предполагать наличие мощного слоя с менее плотными породами в строении, не менее 1.2—4.0 км (при $v_s = 1.2$ км/с), что согласуется с [Государственная..., 2000], так как ни один из этих участков не приурочен к выходу никольской толщи.

3. Нехарактерное отношение амплитуд спектров (меньше единицы, что указывает на регистрацию больших амплитуд опорной станцией) наблюдается на с/ст RUS при 0.2—0.5 Гц, что подтверждает наличие более высокоскоростного слоя (по сравнению с Никольской толщей под с/ст PET) мощностью не менее 2.4—6.0 км (при $v_s = 1.2$ км/с), а именно выход крупной интрузии гранитов, гранодиоритов, аляскистов ахотенского комплекса [Геологическая..., 2000]). Менее выраженные примеры спектральных характеристик того же рода (при 0.2—0.5 Гц) отмечаются на с/ст NLC и KRM.

4. Для окрестности с/ст «южной группы» — RUS, KDT, PAU, SKR — оказалось характерным стабильно растущее с частотой от 1 Гц и выше отношение спектров исследуемой и опорной станций.

5. Окрестности с/ст «северной группы» — TUMD, KLY, UK1, KBG и в меньшей степени GPN — по типу спектральных характеристик (выраженный спад в диапазоне 1—10 Гц) составляют особую группу.

При сравнении между собой характеристик разных типов (AS , ES , CS) на одной станции видно, что на отдельных частотах амплитуды хорошо согласуются. В других случаях наиболее выражены усиления амплитуд в спектрах коды, далее следуют спектры Фурье S -волн, а оценка по пиковым амплитудам ниже других; такого соотношения следует ожидать и для спектров реакции. Отметим, что сам факт наличия или отсутствия существенных расхождений между спектральными характеристиками, полученными разными методами (AS , ES , CS), коррелирует с имеющейся геологической информацией (см. таблицу). Так, для условно «скальных» станций различия по трем способам счета спектров минимальны — ADM, DAL, KDT, KRM, NLC, RIB, RUS, SCH, SKR, SPN, VIL — в то время как для станций с выраженной вулканогенной толщей — IVS, DCH, NII, KLY, KBG — различия между методами более существенные.

Таким образом, изучение строения верхней части разреза под станциями ADM, SKR и NII требует привлечения дополнительной информации (например, бурения) в связи с разногласием имеющейся информации о грунтах (см. таблицу) и выявленными эмпирическими спектральными характеристиками (рис. 4). Другие особенности спектральных характеристик среды интерпретируются в следующем разделе.

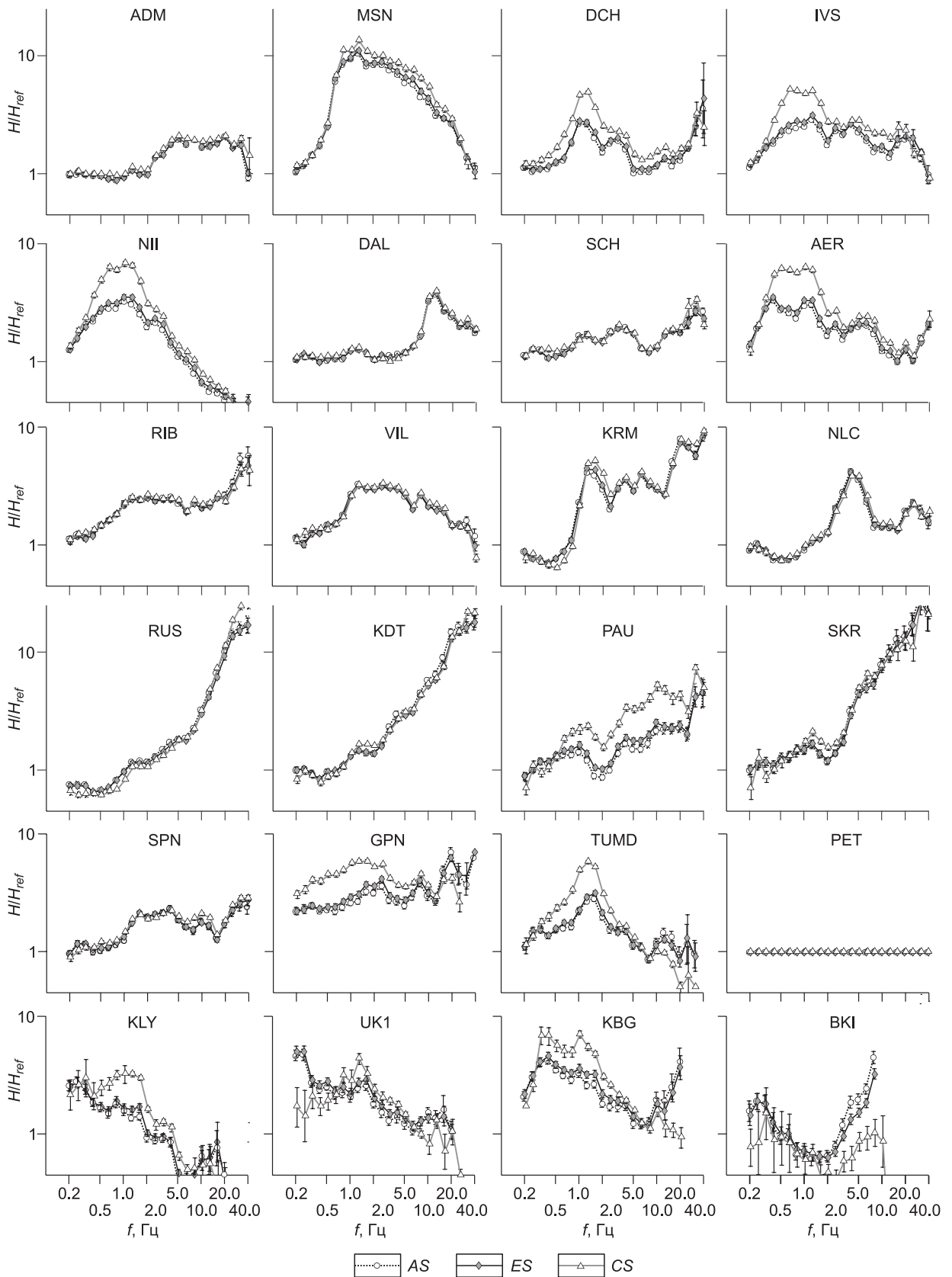


Рис. 4. Эмпирические спектральные характеристики среды вблизи сейсмических станций сильных движений относительно эталонной скальной с/ст PET:

AS — отношение спектров пиковых амплитуд, *ES* — отношение спектров Фурье, *CS* — отношение спектров коды. Доверительные интервалы изображают условное стандартное отклонение.

ОБСУЖДЕНИЕ

В более ранних работах для центрального района города выделялось от шести [Штейнберг, Федотов, 1974] до девяти [Ершов, 1974] инженерно-геологических зон. Большая детальность последней работы связана с дополнительно выполненными массовыми измерениями (преобладающих периодов). Так, уже в [Ершов, 1974] отмечены выходы скальных пород в районе с/ст SCH, что подтверждается результатами настоящей работы. Другие четыре спектральные характеристики для акселерометров (PET, ADM, MSN, DCH), размещенных на территории, соответствующей карте-схеме [1974], примерно согласуются с выделенными ранее грунтовыми комплексами. Характеристики для PET согласуются с ожидаемым спектром типа 1 («моноклитные и слаботрециноватые»), для DCH — с типом 5 («рыхлые пирокластические отложения»).

Ряд наблюдаемых особенностей спектральных характеристик может интерпретироваться по-разному [Kotha et al., 2016; Alcik, 2018], и для однозначной интерпретации требуется привлечение дополнительной информации (например, бурения). Так, например, в [Kotha et al., 2016] такие характеристики, выявленные для станций в диапазоне 1—100 Гц, расположенных в Италии и Турции, коррелируют со средними скоростями в верхних 30 м (параметр « $v_s 30$ »). В связи с отсутствием систематической информации о скоростном строении среды под сейсмическими станциями Камчатки, приведем предварительные интерпретации для основных выделенных спектральных характеристик:

1. Положительная аномалия (повышение амплитуд до 10 Гц в широкой полосе частот) для окрестности вблизи с/ст MSN, вероятно, связана не только с сейсмической жесткостью грунта, но и топографическим эффектом [Geli et al., 1988], так как с/ст MSN расположена на вершине изометричной сопки с относительной высотой около 350 м (см. таблицу). Повышающий эффект только от низкой сейсмической жесткости здесь маловероятен — эмпирические характеристики для с/ст MSN и AER различаются (см. рис. 4), несмотря на одинаковые оценки сейсмической жесткости грунта [Шевченко, Яковенко, 2018].

2. Для объяснения спектральных характеристик в окрестностях с/ст TUMD и KLY можно было бы привлечь расположение этих станций в непосредственной окрестности вулканов (Ключевской, Кизи-мен). Но для с/ст KBG и UK1, расположенных в прибрежной части (в отдалении от упомянутых вулканов), получены аналогичные характеристики.

Могут возникнуть сомнения в том, в какой мере допустимо использовать для этих станций средние функции затухания типа приведенных на рис. 3. Однако на характеристики по данным CS неточности функций затухания не оказывают влияния, а согласие характеристик по *ES* и *CS* в целом приемлемое. Так или иначе, полученные для этих станций оценки предварительные; они требуют дополнительной проверки.

3. Еще в большей степени следует считать предварительными оценки для окрестности с/ст VKI, для которой в дополнение к неуверенности в функции затухания имеется еще аномалия в форме огибающей коды [Лемзиков, Гусев, 1989]. Однако с учетом этой аномалии следовало бы ожидать повышение уровней поправок по коде относительно таковых для *S*-волн, в то время как наблюдается противоположная картина.

4. Для ряда станций (IVS, DCH, AER, NII, PAU, GPN, TUMD, KLU, KBG) в отдельных полосах частот (в основном 0.5—2.0 Гц) обнаружилось заметное расхождение между методами *ES* (*AS*) и *CS*: оценки по коде (*CS*) превышают оценки по *S*-волнам (*ES*, *AS*) до двух раз, причем данное расхождение имеет место как раз на частотах с максимальным усилением амплитуд. Как отмечено в [Раутиан и др., 1981], иногда на коду (т. е. на рассеянные волны) накладываются низкоскоростные поверхностные волны, формирующиеся в осадочных бассейнах со слоистой толщей; это явление может увеличить амплитуды коды выше ожидаемых. Однако в условиях Восточной Камчатки подобные бассейны отсутствуют. При этом наличие такого расхождения необходимо учитывать в работах по СМР как возможное проявление нелинейных свойств [Hudson, 1972; Pavlenko, Irikura, 2006], что делает недопустимым выполнение в регионе работ по СМР с использованием только кода-волн. Нередко работы по СМР ведут с использованием микросейсм (например, [Абудейф и др., 2019]). Природа колебаний коды и микросейсм во многом аналогична, поэтому отмеченная проблема может иметь место и для такого подхода.

5. Выявленные для «южной группы» — RUS, KDT, PAU и SKR — растущие с частотой (от 1 Гц и выше) спектральные характеристики ранее не выделялись для исследуемой территории и могут либо характеризовать грунты, значительно отличные от окрестности с/ст PET, либо повышенное затухание высоких частот под опорной с/ст PET, что требует дополнительной проверки.

ВЫВОДЫ

1. Отработана многополосная методика расчета эмпирических спектральных откликов грунтов с использованием пиковых амплитуд *S*-волн, спектров Фурье *S*-волн и среднеквадратических амплитуд

кода-волн. За счет использования эмпирических региональных функций затухания методика позволяет использовать записи целевой и эталонной станций с заметно различающимися гипоцентрными расстояниями.

2. Методика реализована в автоматическом режиме и опробована на сотнях землетрясений региона диапазона магнитуд 5—6. При съеме амплитуд кода-волн автоматически исключаются искажения, связанные с наложением афтершоков на коду.

3. Обнаружено большое разнообразие эмпирических характеристик среды под сейсмическими станциями в широком диапазоне частот (0.2—30.0 Гц). В ряде случаев обнаружены эффекты резонансного усиления амплитуд.

4. Спектральные характеристики по трем методам качественно согласуются, но часто наблюдаются определенные систематические количественные различия. По амплитуде стационарные эффекты усиления амплитуд наиболее выражены в спектрах коды; далее следуют спектры Фурье S -волн, затем оценка по пиковым амплитудам. Величину по коде почти всегда можно считать оценкой сверху для значений по S -волнам. Хотя нередко такая оценка дает небольшое завышение амплитуд, порядка 10—20 %, в ряде случаев завышение достигает двух раз. Использование коды и микросейсм для СМР без контроля по S -волнам в условиях Камчатки может привести к заметным ошибкам.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН за непрерывный сейсмический мониторинг Камчатки современной аппаратурой, что позволило выполнить настоящую работу. Авторы признательны Т.К. Пинегиной за ценные консультации по грунтовым условиям в нескольких пунктах, Н.М. Шапиро за полезное обсуждение, а также В.А. Салтыкову, замечания которого позволили значительно улучшить качество статьи.

Определение спектральных свойств среды вблизи с/ст «северной группы» выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-35-00029).

ЛИТЕРАТУРА

Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Гусева Е.М., Павлов В.М., Скоркина А.А. Массовое определение моментных магнитуд M_w и установление связи $M_w—M_L$ для камчатских субдукционных землетрясений // Физика Земли, 2018, № 1, с. 158—172.

Абудейф А.М., Фэт-Хэльбери Р.Е., Мохаммед М.А., Эль-Хашаб Н.М., Масуд М.М. Оценка локального эффекта методом микросейсм в г. Ахмим (провинция Сохаг, Египет) // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (2), с. 273—282 (на англ.).

Геологическая карта СССР. М-56(57) — Северная группа Курильских островов / Ред. В.Н. Верещагин. М-б 1:1 000 000. СПб., Картографическая фабрика Госгеолтехиздата Министерства геологии и охраны недр СССР, 1956.

Геология СССР. Т. 31. Геологическое описание. Камчатка, Курильские и Командорские острова. М., Недра, 1964, 743 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Южно-Камчатская серия (N-57-XXXIII — Петропавловск-Камчатский, N-57-XXXIII — сопка Мутновская) / Ред. Б.А. Марковский. М-б 1:200 000. СПб., Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2000.

Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:200 000. Изд. 2-е. Серия Восточно-Камчатская. Лист 0-58-XXVI, XXXI, XXXII (Усть-Камчатск). Объяснительная записка. СПб., Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007.

Гусев А.А. Предварительный вариант расчетных сейсмических нагрузок для Петропавловска-Камчатского. Источники и воздействие разрушительных сейсмических колебаний // Вопросы инженерной сейсмологии, вып. 31. М., Наука, 1990, с. 67—85.

Гусев А.А., Гусева Е.М. Скейлинговые свойства характерных частот очаговых спектров землетрясений Камчатки // ДАН, 2014, т. 458, № 1, с. 88—91.

Гусев А.А., Зобин В.М., Феофилактов В.Д. Определение расчетной балльности и оценка параметров максимальных колебаний грунта площадки строительства на Камчатке // Количественная оценка сейсмических воздействий. М., Наука, 1980, с. 44—59.

Гусев А.А., Скоркина А.А., Чебров Д.В. Очаговые спектральные параметры землетрясений Восточной Камчатки диапазона $M_w = 3—6$ по данным поперечных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2017, № 3, вып. 35, с. 36—49.

Дженкинс Г., Ваттс Д.М. Спектральный анализ и его приложения. Т. 1. М., Мир, 1971, 316 с.

Ершов И.А. Об оценке сейсмической опасности для г. Петропавловск-Камчатский // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск, Наука, 1974, с. 82—90.

Запольский К.К. Частотно-избирательные сейсмические станции ЧИСС // Экспериментальная сейсмология. М., Наука, 1971, с. 20—36.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН. Сеть станций сильных движений [Электронный ресурс]. URL: <http://emsd.ru/133-sd> (дата обращения: 19.11.2018).

Кузин И.П. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М., Наука, 1974, 132 с.

Лемзиков В.К., Гусев А.А. Энергетическая классификация близких камчатских землетрясений по уровню кода-волн // Вулканология и сейсмология. 1989, № 4, с. 83—97.

Паспорт сейсмической станции «Петропавловск-Камчатский» / Сост. Л.Г. Синельникова, 1986, 43 с.

Ратникова Л.И. Методы расчета сейсмических полей в тонкослоистых средах. М., Наука, 1973, 123 с.

Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С., Земцова А.Г., Проскурин А.П., Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.Н., Синельникова Л.Г., Филина А.Г., Шенгелия И.С. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М., Наука, 1981, 142 с.

Сейсмическое микрорайонирование / Ред. С.В. Медведев. М., Наука, 1977, 226 с.

Скоркина А.А., Гусев А.А. Определение набора характерных частот очаговых спектров для субдукционных землетрясений Авачинского залива (Камчатка) // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (7), с. 1057—1068.

Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М., Наука, 1972, 117 с.

Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология, 2013, № 1, с. 18—40.

Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Дрознина С.Я., Иванова Е.И., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Раевская А.А., Салтыков В.А., Сеньюков С.Л., Серафимова Ю.К., Скоркина А.А., Титков Н.Н., Чебров Д.В. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_S = 15.7$, $M_w = 7.2$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2016, № 1, вып. № 29, с. 5—16.

Шевченко Ю.В., Яковенко В.В. Расчет станционной поправки класса и сейсмической жесткости для станций Камчатки // Вулканология и сейсмология, 2018, № 3, с. 70—80.

Штейнберг В.В., Федотов С.А. Оценка параметров колебаний почвы в г. Петропавловске-Камчатском при возможном сильном землетрясении // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск, Наука, 1974, с. 90—100.

Aki K., Chouet B. Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects // J. Geophys. Res., 1975, v. 80, № 23, p. 3322—3342.

Alcik H. Investigation of local site responses at the Bodrum Peninsula (Southwest of Turkey) using the mainshock and aftershocks of the 20 July 2017 M_w 6.6 Bodrum-Kos earthquake // Ann. Geophys., 2018, v. 61, № 3, p. 339.

Bonilla L.F., Steidl J.H., Lindley G.T., Tumarkin A.G., Archuleta R.J. Site amplification in the San Fernando Valley, California: Variability of site-effect estimation using the *S*-wave, coda, and H/V methods // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1997, v. 87, № 3, p. 710—730.

Geli L., Bard P.Y., Jullien B. The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1988, v. 78, № 1, p. 42—63.

Gorbatov A., Dominguez J., Suarez G., Kostoglodov V., Zhao D., Gordeev E. Tomographic imaging of the *P*-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula // Geophys. J. Int., 1999, v. 137, № 2, p. 269—279.

Hua Z.-X., Ma Y.-S., Gao L.-S. Site amplification effect of coda waves in West Yunnan Experimental Site // Acta Seismol. Sinica, 1993, v. 6, № 4, p. 833—841.

Hudson D.E. Local distribution of strong earthquake ground motions // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1972, v. 62, № 6, p. 1765—1786.

Joyner W.B., Fumal T.E. Use of measured shear-wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motion // Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, 1984, v. 2, p. 777—783.

Kotha S.R., Bindi D., Cotton F. Partially non-ergodic region specific GMPE for Europe and Middle-East // Bull. Earth. Engin., 2016, v. 14, № 4, p. 1245—1263.

Margheriti L., Wennerberg L., Boatwright J. A comparison of coda and *S*-wave spectral ratios as estimates of site response in the southern San Francisco bay area // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1994, v. 84, № 6, p. 1815—1830.

Pavlenko O.V., Irikura K. Nonlinear behavior of soils revealed from the records of the 2000 Tottori, Japan, Earthquake at stations of the digital strong-motion network Kik-Net // Bull. Seismol. Soc. Amer., 2006, v. 96, № 6, p. 2131—2145.

Petukhin A.G., Gusev A.A. The duration-distance relationship and average envelope shapes of small Kamchatka earthquakes // Pure Appl. Geophys., 2003, v. 160, № 9, p. 1717—1743.

Phillips W.S., Aki K. Site amplification of coda waves from local earthquakes in Central California // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1986, v. 76, № 3, p. 627—648.

Rautian T.G., Khalturin V.I. The use of the coda for determination of the earthquake source spectrum // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1978, v. 68, № 4, p. 923—948.

*Рекомендована к печати 22 мая 2019 г.
В.С. Селезневым*

*Поступила в редакцию 10 мая 2018 г.,
после доработки — 2 апреля 2019 г.*