

УДК 550.34

Особенности фоновых микросейсм на сейсмических станциях Камчатки как отражение спектральных характеристик грунтов

© 2020 г. В.В. Яковенко, Ю.В. Шевченко

КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск Камчатский, Россия

Аннотация. Главная цель работы состоит в получении спектральных характеристик грунтов для 23 сейсмических станций Камчатки путём исследования спектров фоновых микросейсм. Расчёт спектров выполнен на основе записей цифровых велосиметров. Итоговые оценки получены осреднением спектров для каждого часа в течение недели. Для некоторых станций проведена интерпретация отношения спектра горизонтальной компоненты смещения грунта к спектру вертикальной компоненты (H/V).

Ключевые слова: сейсмостанции, микросейсм, спектральные характеристики грунта.

Для цитирования: Яковенко В.В., Шевченко Ю.В. Особенности фоновых микросейсм на сейсмических станциях Камчатки как отражение спектральных характеристик грунтов // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 2. – С. 91–101. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.09>

Введение

Основная цель работы — оценка спектральных характеристик грунтов на сейсмических станциях Камчатки путём исследования спектров фоновых микросейсм. Известно, что движение грунта при землетрясении в большой степени зависит от спектральных свойств грунтовой толщи в основании постамента. Поэтому спектральные особенности грунта могут считаться важной характеристикой сейсмической станции. Полученные результаты также дают представление о суточных вариациях спектров микросейсм, связанных по большей части с местными источниками шумов. Расчёт спектров сейсмических колебаний, а также интерпретация резонансных частот спектральных оценок широко используются в практике сейсмологических исследований. Новизна работы состоит в получении этих характеристик для конкретных сейсмических станций на Камчатке.

Шум микросейсм представляет собой движение грунта, вызванное различными источниками как естественного, так и искусственного происхождения. Источником микросейсм может быть волнение океана, взаимодействие ветра с рельефом, строениями, растительностью, движение транспорта, работа строительных машин и т.п. На частотах ниже 1 Гц возбуждение микро-

сейсм обычно связано с природными явлениями. Выше 1 Гц источник микросейсм, как правило, искусственного происхождения, но может быть следствием ветрового воздействия, вулканического дрожания.

На конец 2019 г. на сейсмических станциях Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН установлено 66 широкополосных цифровых сейсмометров: CMG-6T (0.033÷40 Гц), CMG-5T (0÷40 Гц), AC-73iNHV (0÷40 Гц), CMG-3TB (0.0083÷40 Гц), STS-2 (0.0083÷40 Гц), KS-2000 (0.01÷40 Гц). Акселерометры рассчитаны на регистрацию сильных событий, и, как правило, низкоамплитудные микросейсм не охватываются динамическим диапазоном этих приборов [Шевченко, Яковенко, 2016]. Поэтому представленные в статье результаты получены только для 23 сейсмических станций, оборудованных велосиметрами. Местоположение этих станций показано на рис. 1.

Особенности спектра микросейсм зависят не только от источника сигнала и его расположения, но и от структуры грунта места, где получена соответствующая запись. Если рельеф местности не слишком сложен и можно рассматривать структуру грунта как слоистую среду на скальном основании, то анализ спектральных особенностей микросейсм позволяет сделать оценки мощности поверхностного слоя грунта.

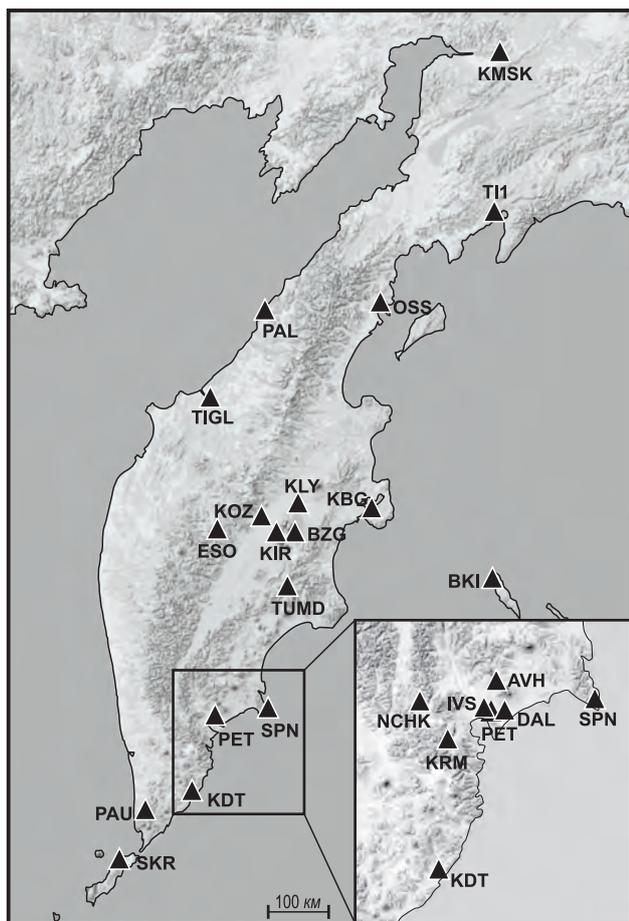


Рис. 1. Местоположение сейсмических станций Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН

При анализе влияния структуры грунта под станцией на спектр микросейсм используют три способа: исследование амплитуд микросейсм относительно опорной точки, расположенной на породе фундамента; исследование резонансных частот относительно опорной точки на породе фундамента; исследование отношения спектра горизонтальной компоненты к спектру вертикальной (H/V). При получении оценок структуры грунта под станциями будет использован метод H/V , поскольку для этого не нужны записи с опорной точки и значения H/V слабо зависят от положения и интенсивности источника микросейсм.

Использованные данные и методика получения оценок спектров микросейсм

Для расчёта спектров мощности фоновых микросейсм использовались записи цифровых велосиметров CMG-3TB (IVS, BKI, TI1, KBG, SKR), STS-1 (PET), STS-2 (PAL), KS-2000 (KLY). На 14 станциях (AVH, BZG, DAL, ESO, KDT, KMSK, KIR, KLY, KOZ, OSS, PAU, SPN, TIGL,

TUMD) установлены велосиметры CMG-6T. Для обработки сейсмограмм применялась программа DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010].

Итоговые спектры для каждой компоненты сейсмической записи получены усреднением 168 оценок спектра, при расчёте которых использовался участок записи длительностью 180 с в начале каждого часа в течение недели (т.е. обработано почти 12000 трасс). Все результаты получены для последней декады марта, когда глубина промерзания грунта близка к максимальной. Использовались данные сейсмических станций за 2013–2016 гг. В это время не наблюдалось значительного дрожания на активных вулканах.

Спектральные оценки рассчитаны для 11 частот: 20, 10, 5, 2.5, 1.25, 0.625, 0.3125, 0.15625, 0.078125, 0.0390625, 0.0195313 Гц. Это средние частоты для полосовых фильтров с относительной шириной 1.5 (исходные значения алгоритма расчёта фильтров: верхняя частота фильтра с центральной частотой 20 Гц (40 Гц); относительная ширина фильтров – 1.5; частоты среза фильтра совпадают с центральными частотами соседних фильтров). При выборе таких параметров обеспечивается соизмеримость мощности по всему диапазону частот, а также равномерное распределение полос в исследуемом диапазоне частот (см. графики отношения H/V на рис. 2–7). Длительность участков превышает период, соответствующий частоте 0.0195313 Гц, примерно в три раза, что позволяет получить адекватные спектральные оценки на нижних частотах. Сейсмические трассы после фильтрации возводятся в квадрат, затем интегрируются. Полученное значение интеграла даёт оценку спектра мощности микросейсм для скорости смещения грунта на соответствующей частоте [Аки, Ричардс, 1983]. Спектр горизонтальной составляющей рассчитывается как среднее от спектра для компонент EW и NS .

Отношение спектров для горизонтальной составляющей сигнала к спектру вертикальной составляющей использовалось для оценки резонансных частот и соответствующей толщины осадочного слоя в местах установки сейсмических станций.

Обозначим через f_0 резонансную частоту для отношения спектров, h – толщину осадочного слоя, V_s – скорость поперечных волн в слое. Расчёт толщины слоя выполнялся в соответствии с выражением $h=V_s/(4\cdot f_0)$ [Nakamura, 1989; Boore, Joyner, 1997; Panou et al., 2004; Еманов и др., 2008]. Скорости V_s рассчитывались, исходя из значений сейсмической жёсткости α [Шевченко, Яковенко, 2018] и плотности ρ грунта для соответствующей сейсмической станции.

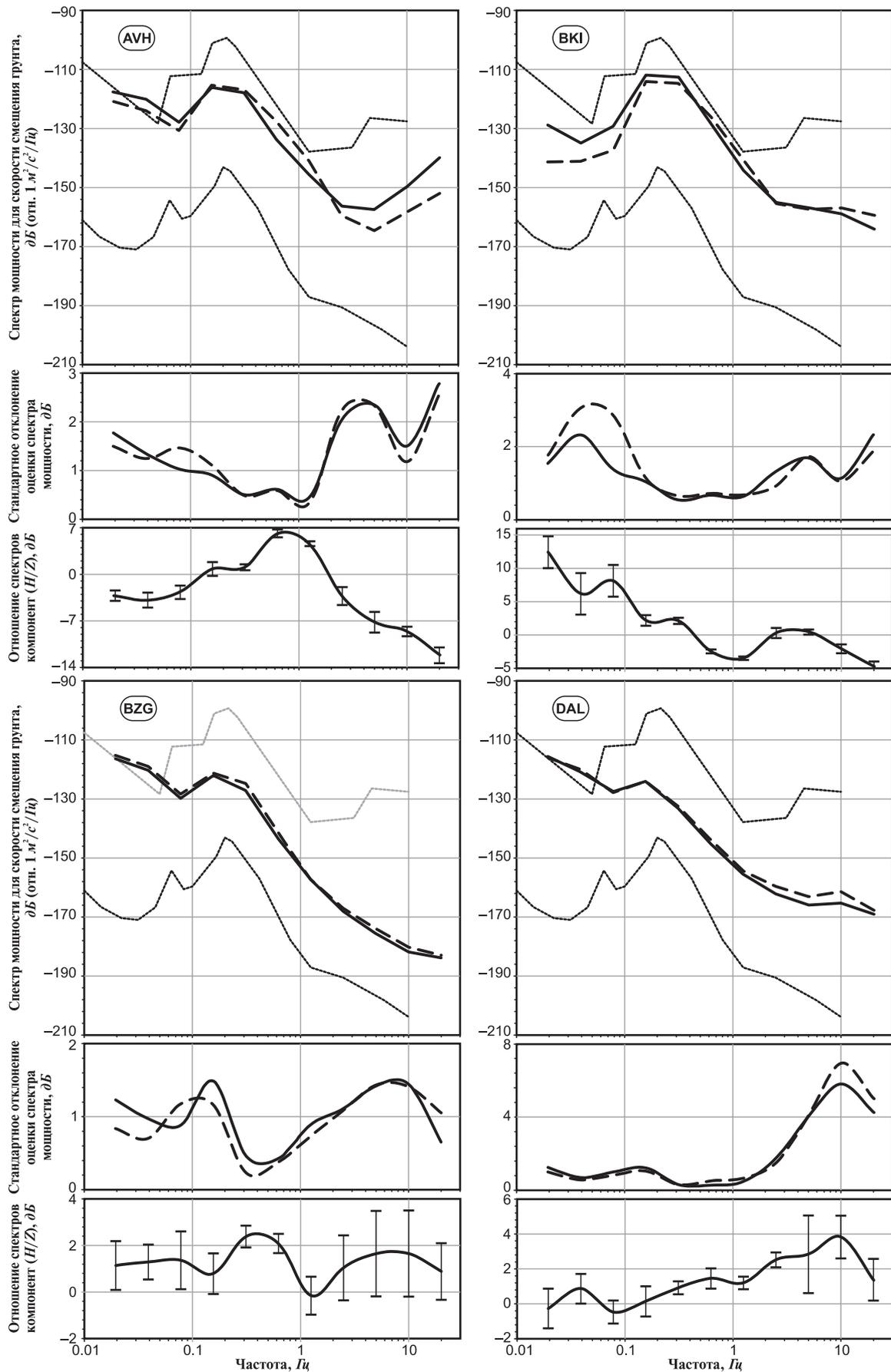


Рис. 2. Спектральные оценки для станций AVH, BKI, BZG, DAL

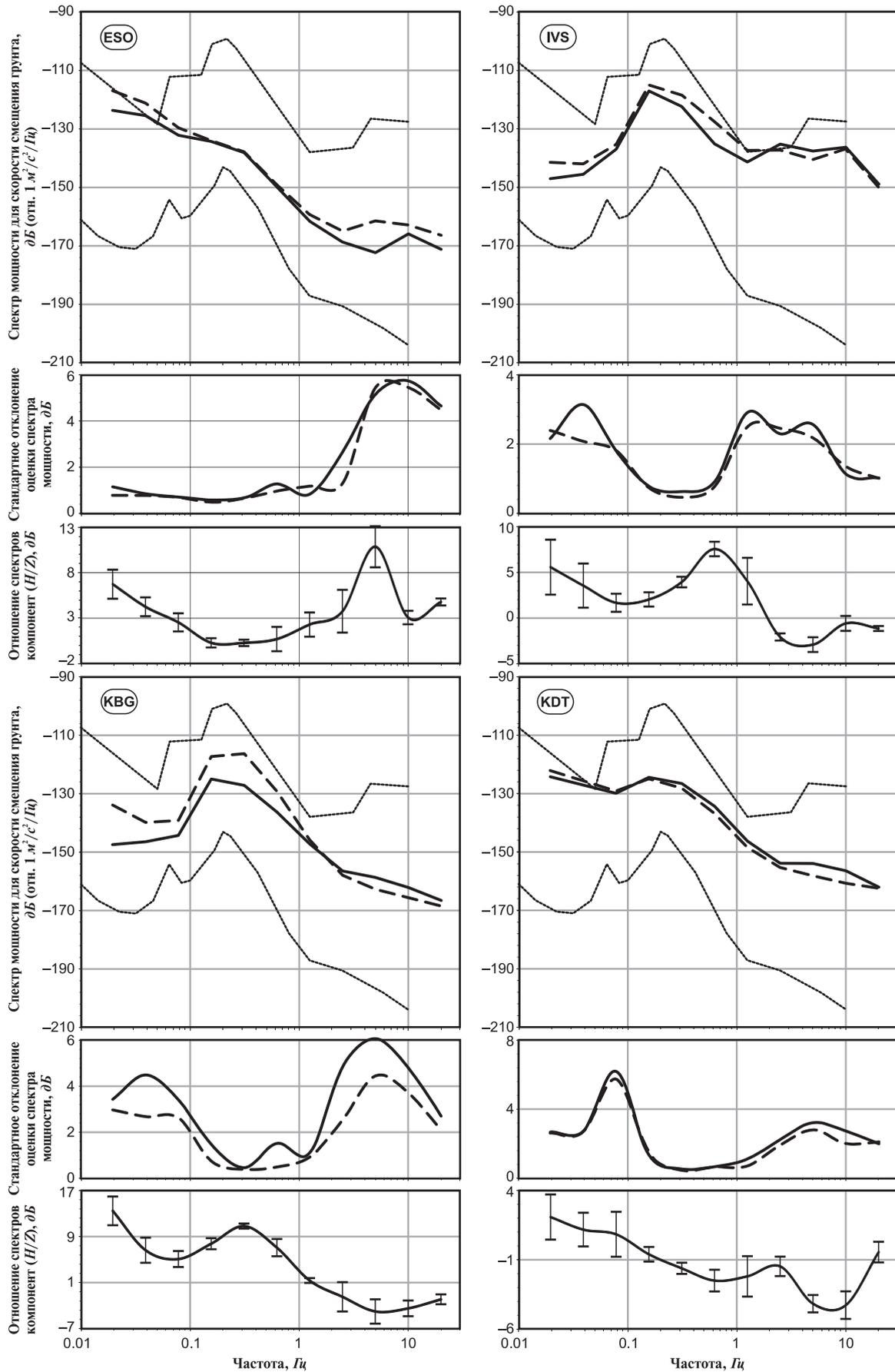


Рис. 3. Спектральные оценки для станций ESO, IVS, KBG, KDT

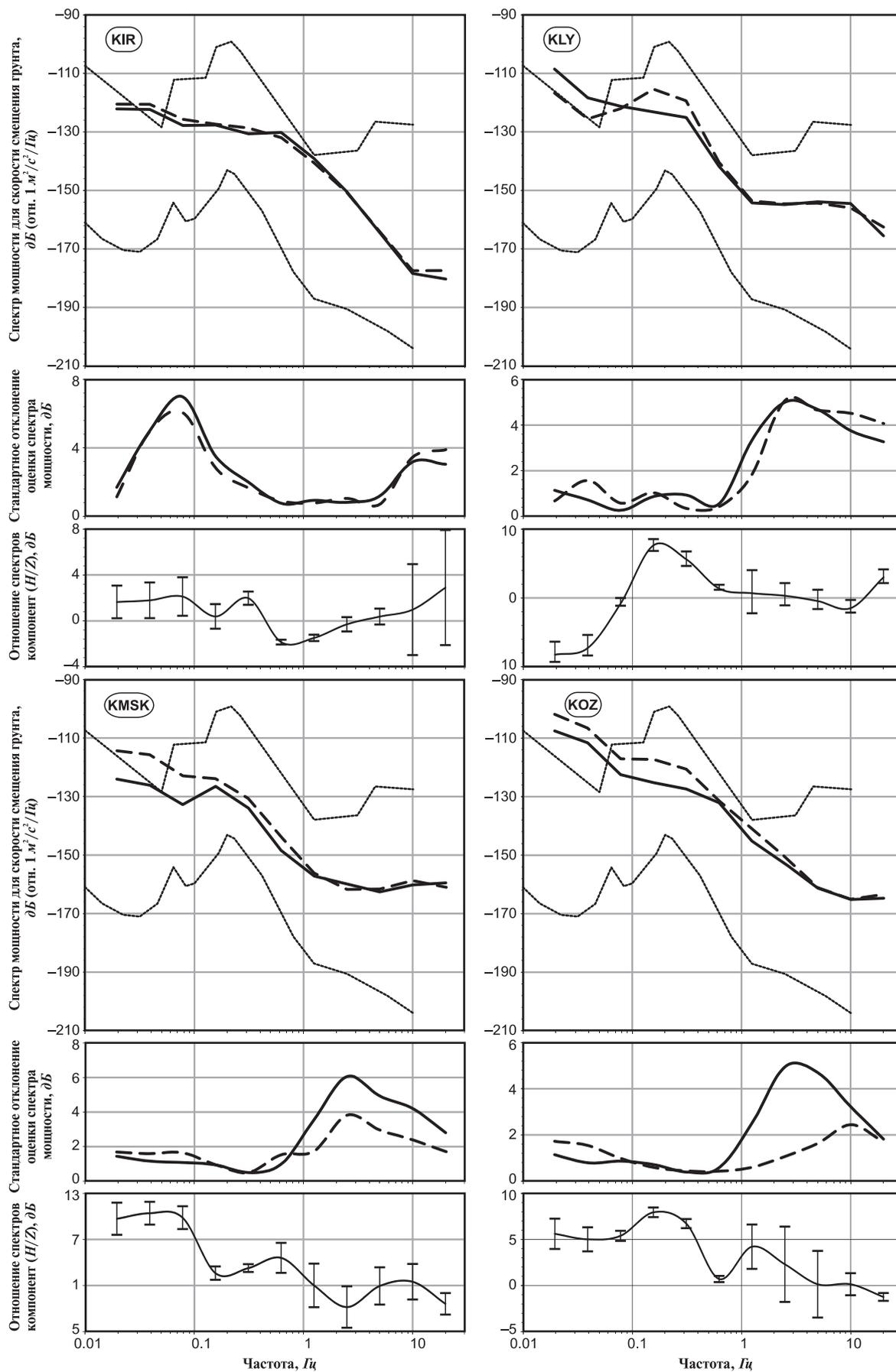


Рис. 4. Спектральные оценки для станций KIR, KLY, KMSK, KOZ

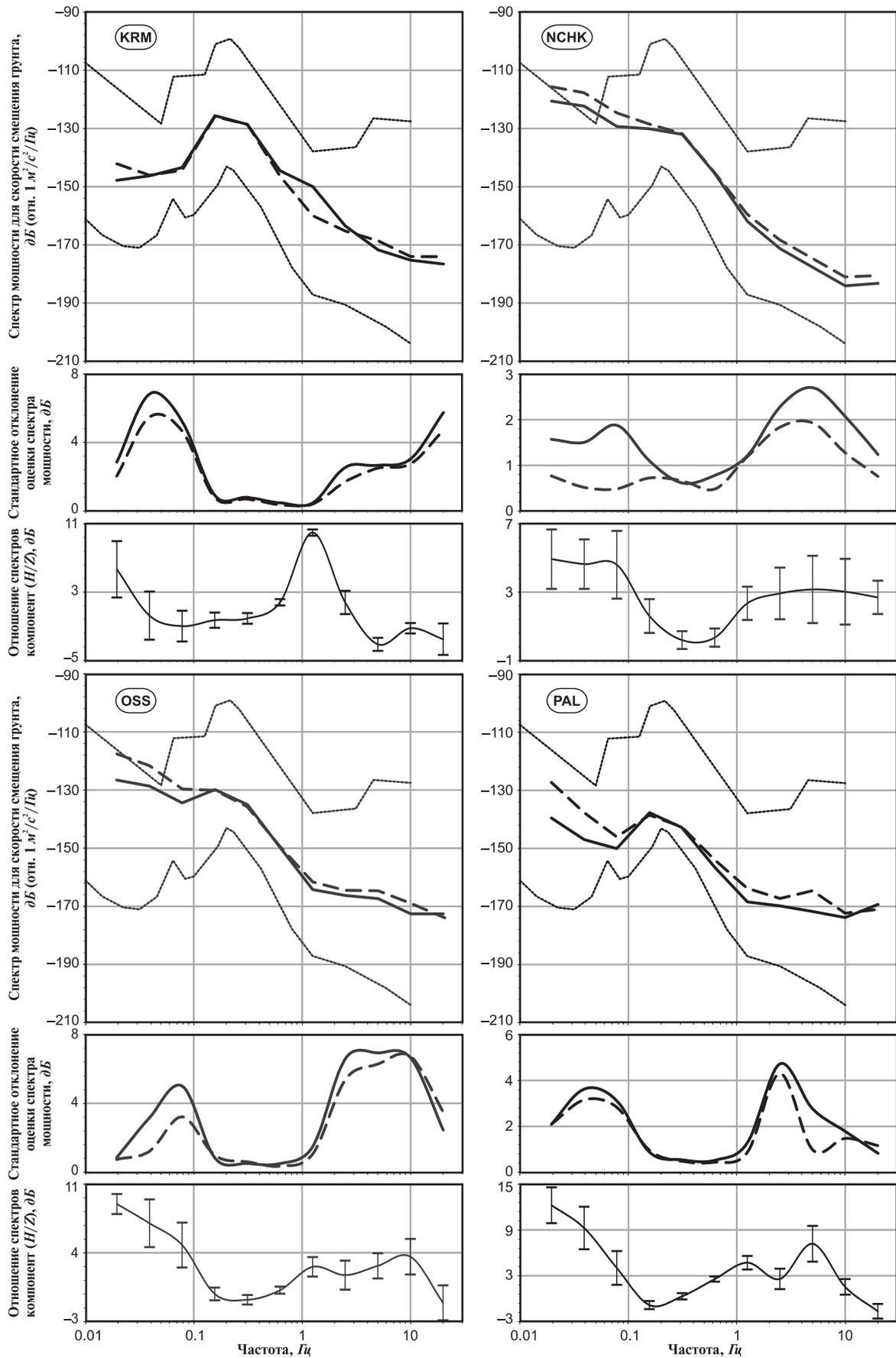


Рис. 5. Спектральные оценки для станций KRM, NCHK, OSS, PAL

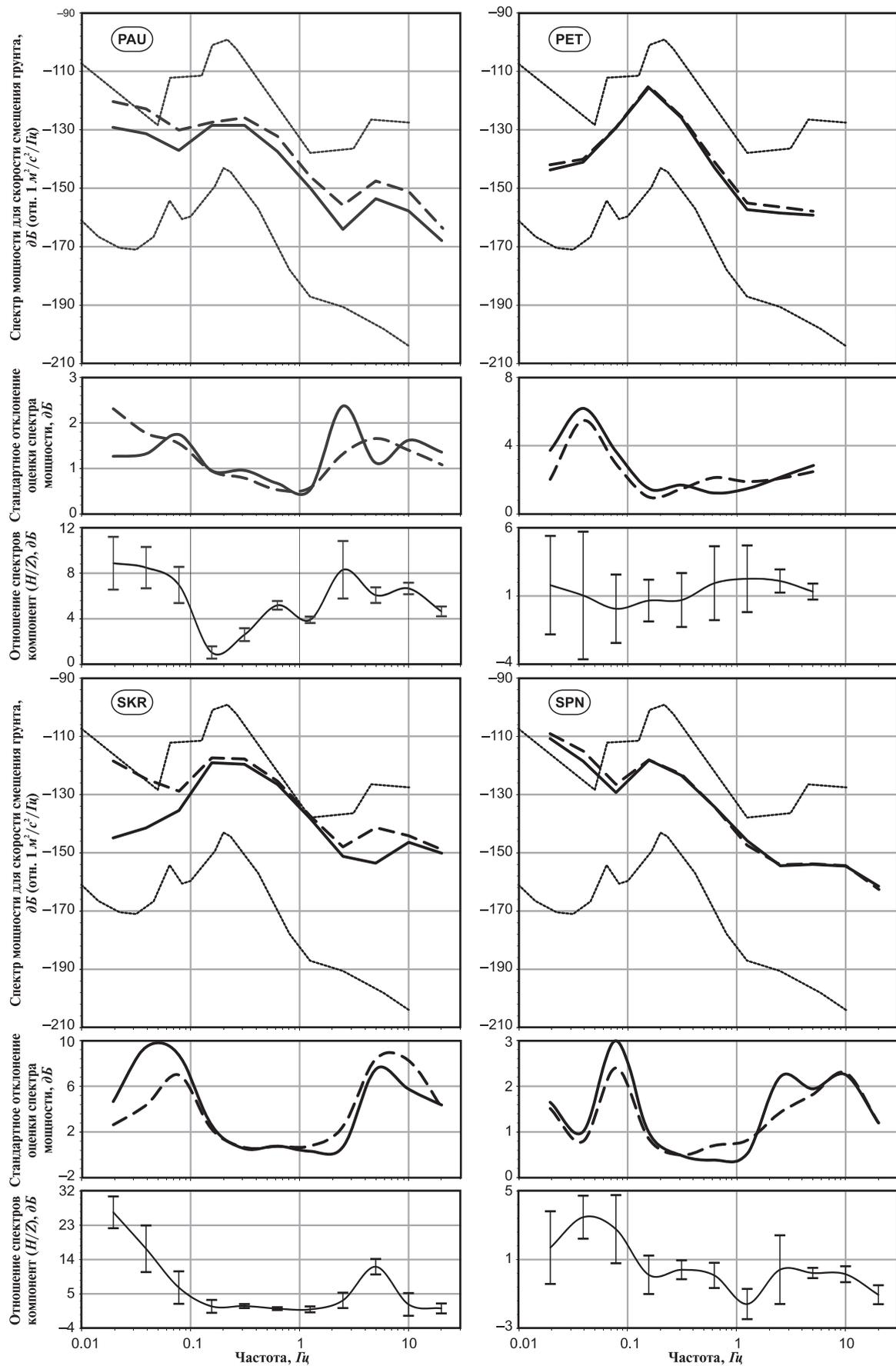


Рис. 6. Спектральные оценки для станций PAU, PET, SKR, SPN

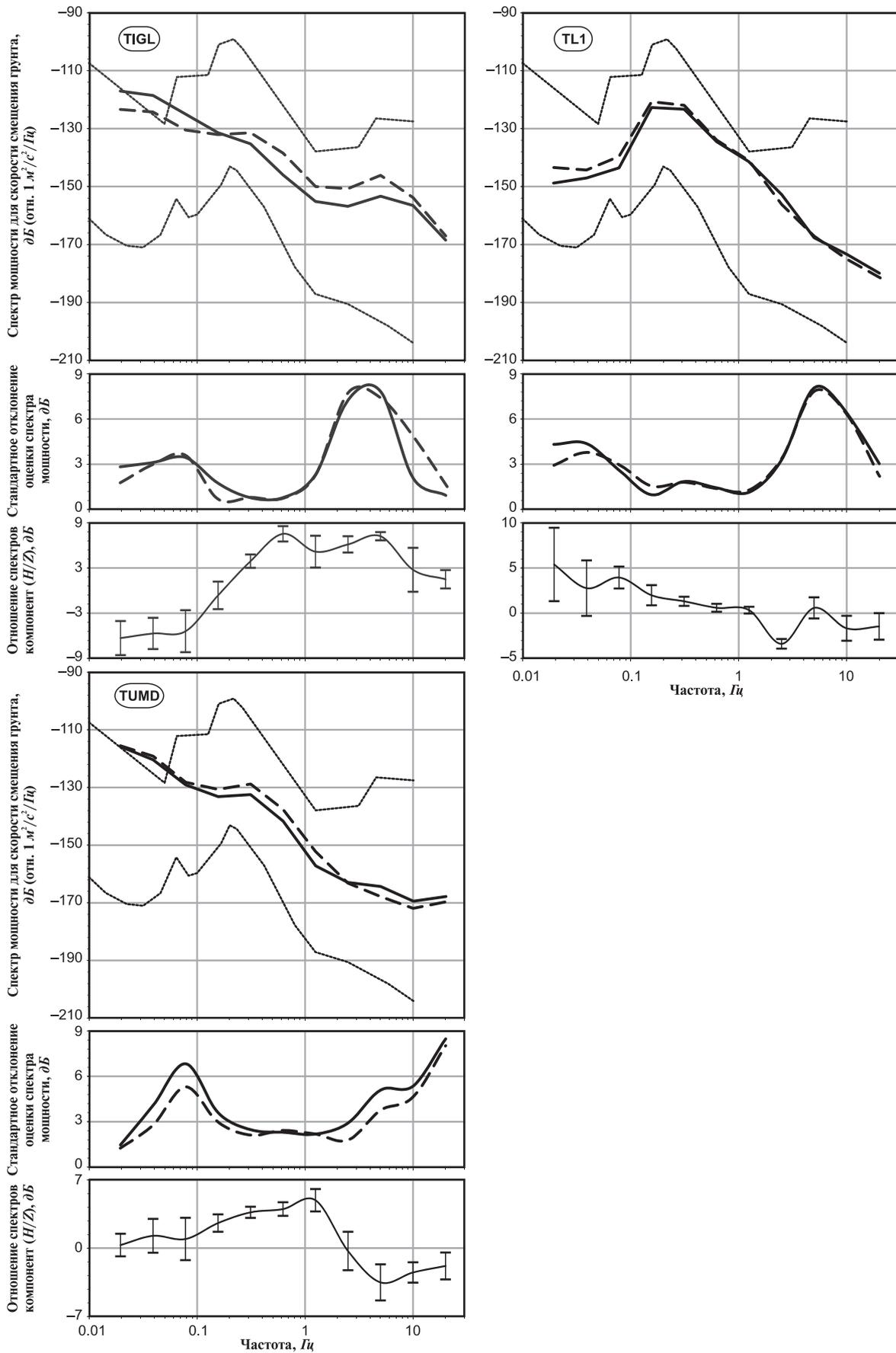


Рис. 7. Спектральные оценки для станций TIGL, TL1, TUMD

Результаты расчёта спектров микросейсм

Полученные спектральные оценки для горизонтальной и вертикальной составляющей скорости смещения грунта представлены на рис. 2–7. На этих рисунках для каждой станции сверху вниз показаны: спектры мощности (тонкие линии – модели NNNM и NLNM), графики стандартного отклонения спектров, отношение спектров компонент для горизонтальной и вертикальной составляющей скорости смещения грунта (H/V). Горизонтальной составляющей соответствует пунктирная кривая, вертикальной – сплошная кривая. «Усы» на диаграммах отношения спектров обозначают стандартное отклонение полученных оценок.

Для большинства станций характерно увеличение разброса в оценках уровня спектра мощности на частотах выше 1 Гц (см. стандартное отклонение для станций AVH, DAL, ESO, KBG, KLY, TL1, KMSK, KOZ, OSS, PAL, SKR, SPN, TIGL). Все эти станции расположены рядом с посёлками, что является причиной значительной суточной изменчивости уровня микросейсм на высоких частотах. На графиках стандартного отклонения уровня спектра мощности стан-

ций BKI, IVS, KBG, PET, SKR, SPN наблюдается «бугор» на частотах 0.1 Гц и ниже. Эти станции располагаются сравнительно близко к береговой линии моря, поэтому рост разброса в оценках уровня спектра, видимо, связан с изменениями в волнении морской поверхности и морскими приливами.

Шум датчика CMG-6T на частотах ниже 0.1 Гц иногда превышает фоновый шум микросейсм [Шевченко, Яковенко, 2016], поэтому для частот, меньших 0.1 Гц, спектры на графиках для станций AVH, BZG, DAL, ESO, KDT, KMSK, KIR, KLY, KOZ, OSS, PAU, SPN, TIGL, TUMD могут не отражать фактический уровень микросейсм.

Оценки отношения H/V на всех станциях для частот выше 0.1 Гц имеют стандартное отклонение в диапазоне 2–5 дБ. Возможной причиной разброса оценок может быть слабая контрастность сейсмической жёсткости слоёв.

В таблице представлены результаты оценки толщины резонирующего слоя в местах установки сейсмических станций. Значения акустической жёсткости α взяты по данным работы [Шевченко, Яковенко, 2016]

Таблица. Оценка толщины поверхностного слоя грунта на сейсмических станциях

№	Станция (код)	Описание грунта	Плотность, $\rho/\text{см}^3$	α , $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$	f_0 , Гц	Скорость V_s , м/с	h , м
1	Авача (AVH)	гкс	2.0	$3.89\cdot 10^4$	0.7	19	10
2	Беринг (BKI)	гкс	2.0	$6.49\cdot 10^5$	3.0	325	30
3	Безымянный-Грива (BZG)	гкс	2.0	$1.32\cdot 10^5$	0.4	66	40
4	Дальний (DAL)	ск	2.5	$2.39\cdot 10^6$	0.6	954	80
5	Эссо (ESO)	гкс	2.0	$1.47\cdot 10^6$	5.0	736	40
6	Институт (IVS)	гкс	2.0	$2.28\cdot 10^5$	0.6	114	50
7	Крутоберегово (KBT)	ппс	1.5	$5.00\cdot 10^4$	0.3	33	30
8	Ходутка (KDT)	ск	2.5	$2.24\cdot 10^6$	2.2	897	100
9	Каменская (KMSK)	гкс	2.0	$2.48\cdot 10^6$	8.0	1240	520
10	Киришева (KIR)	гкс	2.0	$4.10\cdot 10^5$	0.3	205	170
11	Ключи (KLY)	гкс	1.5	$3.45\cdot 10^5$	0.2	230	290
12	Козыревск (KOZ)	гкс	2.0	$8.73\cdot 10^4$	1.2	44	10
13	Карымшина (KRM)	гкс	2.0	$1.86\cdot 10^6$	1.2	932	200
14	Оссора (OSS)	гкс	2.0	$3.81\cdot 10^6$	1.3	1907	370
15	Палана (PAL)	гкс	2.0	$5.83\cdot 10^6$	1.3	2917	560
16	Паужетка (PAU)	гкс	2.0	$8.98\cdot 10^5$	2.5	449	50
17	Петропавловск	ск	3.0	$4.30\cdot 10^6$	1.5	1433	240
18	Северо-Курильск (SKR)	гкс	2.0	$1.22\cdot 10^6$	5.0	609	30
19	Шипунский (SPN)	гкс	2.0	$1.11\cdot 10^6$	2.5	556	50
20	Тигиль (TIGL)	гкс	2.0	$8.11\cdot 10^5$	0.7	405	150
21	Тилички (TL1)	гкс	2.0	$9.55\cdot 10^5$	5.0	478	20
22	Тумрок-источники (TUMD)	гкс	2.0	$4.14\cdot 10^5$	1.2	207	50

Примечание: α – сейсмическая жёсткость грунта; f_0 – резонансная частота для отношения спектров; V_s – скорость поперечных волн в слое; h – толщина слоя; гкс – глиняно-каменная смесь; ск – скальные породы; ппс – песчано-пепловая смесь.

Распределение плотности грунта с глубиной неизвестно. Поэтому при расчёте толщины резонирующего слоя плотность грунта под постаментом сейсмической станции и соответствующий состав брались по упрощённой схеме из трёх вариантов: скальные породы; глиняно-каменная смесь; песчано-пепловая смесь. Полученные при таком подходе оценки толщины слоя ближе к реальным для высоких частот f_0 и, соответственно, слоёв грунта малой толщины h . В случае резонанса на низких частотах толщина слоя h будет завышена из-за недооценки плотности. Впрочем, влияние недооценки плотности будет не слишком значительно, не более 50%.

Заключение

На основе цифровых записей 23 сейсмических станций Камчатской сети получены спектры мощности фоновых микросейсм в полосе 0.02–20 Гц. Спектры снабжены оценками стандартного отклонения, которые характеризуют нестабильность во времени уровня сейсмического шума.

Для грунтовой толщи в основании постаментов станций получены резонансные частоты, исходя из которых сделаны приблизительные оценки толщины резонирующего слоя грунта.

Литература

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. В 2-х т. Пер. с англ. Т. 2. — М.: Мир, 1983. — 360 с.
- Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 22–34.
- Еманов А.Ф., Красников А.А., Бах А.А., Черных Е.Н., Еманов А.А., Семин А.Ю., Черепанов А.В. Резонансные свойства верхней части разреза // Физическая мезомеханика. — 2008. — Т. 11, № 1. — С. 26–36.
- Шевченко Ю.В., Яковенко В.В. Расчёт стационарной поправки класса и сейсмической жёсткости для станций Камчатки // Вулканология и сейсмология. — 2018. — № 3. — С. 70–80.
- Шевченко Ю.В., Яковенко В.В. Собственный шум сейсмометров на частотах от 0.01 до 0.1 Гц // Сейсмические приборы. — 2016. — Т. 52, № 2. — С. 17–28.
- Boore D.M., Joyner W.B. Site Amplifications for Generic Rock Sites // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1997. — V. 87, N 2. — P. 327–341.
- Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. — 1989. — V. 30, N. 1. — P. 25–33.
- Panou A.A., Theodulidis N., Hatzidimitriou P.M., Papazachos C.B., Stylianidis K. Ambient noise horizontal to vertical spectral ratio for assessing site effect urban environments: The case of Thessaloniki city (northern Greece) // Bulletin of the Geological Society of Greece. — 2004. — V. 36, N. 3. — P. 1467–1476.

Сведения об авторах

Яковенко Валентин Валентинович, инженер Камчатского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: valek@emsd.ru

Шевченко Юрий Валентинович, начальник группы метрологии КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: klb@emsd.ru

Features of background microseisms at seismic stations of Kamchatka as a reflection of spectral characteristics of soils

© 2020 V.V. Yakovenko, Yu.V. Shevchenko

KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract The main goal of the work is to obtain the spectral characteristics of soils for 23 seismic stations in Kamchatka by studying the spectra of background microseisms. The spectra were calculated based on the recordings of digital cycle meters. The final estimates are obtained by averaging the spectra for each hour during the week. For some stations, the ratio of the spectrum of the horizontal component of the soil displacement to the spectrum of the vertical component (H/V) was interpreted.

Keywords seismic stations, microseisms, spectral characteristics of soil.

For citation Yakovenko, V.V., & Shevchenko, Yu.V. (2020). [Features of background microseisms at seismic stations of Kamchatka as a reflection of spectral characteristics of soils]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(2), 91-101. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.09>

References

- Aki, K., & Richards, P. (1983). *Kolichestvennaia seismologiya: Teoriia i metody: V 2-kh tomakh* [Quantitative Seismology: Theory and Methods. V. 2]. Moscow, Russia: MIR Publ., 360 p. (In Russ.).
- Boore, D.M., & Joyner, W.B. (1997). Site amplifications for generic rock sites. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(2), 327-341.
- Droznin, D.V., & Droznina, S.Y. (2011). Interactive DIMAS program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3), 215.
- Emanov, A.F., Krasnikov, A.A., Bach, A.A., et al. (2008). [Resonant properties of the upper part of the section]. *Fizicheskaia mezomekhanika* [Physical mesomechanical], 11(1), 26-36. (In Russ.).
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1), 25-33.
- Panou, A.A., Theodulidis, N., Hatzidimitriou, P.M., Papazachos, C.B., & Stylianidis, K. (2004). Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio for assessing site effects in urban environments: the case of Thessaloniki city (Northern Greece). *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36(3), 1467-1476.
- Shevchenko, Y.V., & Yakovenko, V.V. (2017). Intrinsic noise of seismometers at frequencies from 0.01 to 0.1 Hz. *Seismic Instruments*, 53(1), 70-80.
- Shevchenko, Yu.V., & Yakovenko, V.V. (2018). Calculation of station corrections of class and seismic rigidity for stations of Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology*, 12(3), 221-230.

Information about authors

Yakovenko Valentin Valentinovich, Engineer of the Kamchatka Branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (KB GS RAS), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: valek@emsd.ru

Shevchenko Yuri Valentinovich, Head of the Metrology Group of the KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: klb@emsd.ru