

УДК 550.34.094

ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА СТАНЦИЙ СЕТИ KNET

© 2020 г. Н. А. Сычева^а, И. В. Сычев^б, А. Н. Мансуров^а, С. И. Кузиков^а, *

^а Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек-49, 720049 Кыргызстан

^б Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
просп. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: ksi@gdirc.ru

Поступила в редакцию 21.09.2019 г.

После доработки 21.09.2019 г.

Принята к публикации 31.03.2020 г.

Проведена оценка уровня сейсмического шума станций сети KyrgyzNetwork (KNET) за 19 лет ее работы (1999–2017 гг.) в режиме реального времени. По каждому каналу сейсмологической станции (запад–восток, север–юг, вертикальный) сформированы пятнадцатиминутные сегменты сейсмического шума с частотой 100 Гц по временам года (март, июнь, сентябрь, декабрь) и временам суток (0, 6, 12 и 18 ч UTC). Рассчитаны вероятностные спектральные плотности мощности сейсмического шума (ВСПМ), для каждой узловой частоты/периода построена плотность распределения значения спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала. Проведено сравнение полученных распределений с моделями сейсмического шума Петерсона (1993). Максимальное отсутствие стохастических шумов для всех станций сети KNET приходится на 00 и 18 ч UTC. Уровень сейсмического шума мало зависит от времени года на периодах 2–5 с, его уровень незначительно понижается в летнее время года и повышается в холодное на периодах 5–10 с, для периода 0.02–2 с менее благоприятным является сентябрь месяц. На диапазоне периодов 0.02–10 с (частота 0.1–50 Гц) станции сети KNET в целом обладают хорошими характеристиками и могут быть отнесены к разряду бесшумных.

Ключевые слова: KNET, станция, канал, сейсмические записи, сейсмический шум, спектральная плотность мощности

DOI: 10.31857/S0203030620040069

ВВЕДЕНИЕ

Киргизская сейсмологическая сеть KNET (KyrgyzNet) была установлена в августе–сентябре 1991 г. в результате совместных усилий ряда научных организаций: Института геофизики и планетарной физики при Калифорнийском университете г. Сан-Диего (IGPP-UCSD), Киргизского Института сейсмологии (КИС), Российского Института высоких температур (ИВТАН), Российского Института физики Земли (ИФЗ РАН), и университета штата Индианы (ISU). На момент создания KNET была одной из самых современных сетей в мире. Десять станций были оборудованы широкополосными сейсмометрами с 16-битными цифровыми преобразователями, которые предусматривают 90 дБ регистрируемого динамического диапазона. Одним из важных достоинств сети является то, что сейсмографы установлены на скальных породах, что позволяет предполагать здесь наличие в записях минимального уровня шума.

До 1991 г. большинство сейсмических станций в Центральной Азии работало на аналоговом обо-

рудовании с ограниченными частотными характеристиками. Это позволяло решать лишь небольшой круг задач: локализация сейсмических событий и составление каталога землетрясений, определения фокальных механизмов очагов и другие задачи, не требующие применения сложных технологий. Установка цифровых сейсмографов KNET нового поколения позволила получать данные с более высокой разрешающей способностью и пригодных для высокотехнологичной обработки.

Шесть станций KNET пространственно окружают столицу Киргизии г. Бишкек и расположены вдоль бортов Чуйской долины (рис. 1). Три станции северного эшелона установлены вдоль северо-восточной границы Чуйской впадины.

Средний широтный ряд из трех сейсмостанций расположен вдоль северных отрогов Киргизского хребта. И, наконец, 4 станции самого южного эшелона охватывают территорию от Суусамырской впадины до юго-западного обрамления Иссык-Кульской депрессии. Название каждой станции сети определяется ее близостью к одному

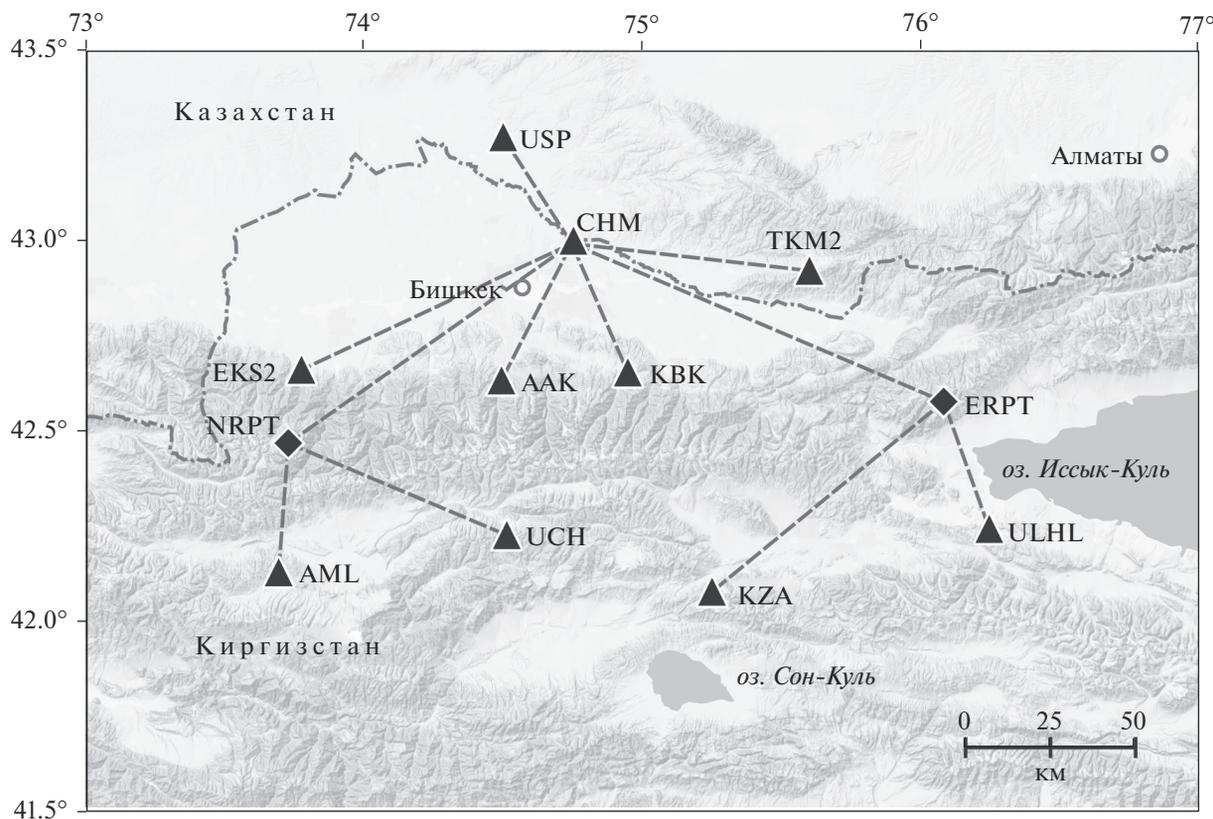


Рис. 1. Положение станций киргизской сейсмологической сети KNET. Треугольники – сейсмостанции; пунктирные прямые линии – телеметрическая радиосвязь между станциями и ретрансляторами (четырёхугольники) для управления и передачи данных.

из населенных пунктов на территории Киргизии или Казахстана. В табл. 1 сведены кодовые названия и географические характеристики сейсмологических станций сети KNET.

Согласно обзорной карте (см. рис. 1) сейсмостанции USP, CHM и TKM2 образуют северный эшелон сети наблюдения вдоль зоны сопряжения Чуйской депрессии и предгорий окружающих ее с северо-востока гор. В более крупномасштабном плане топографическая ситуация здесь сводится к сравнительно пологим формам рельефа с глубокой эрозионной врезкой в первые десятки метров и абсолютными высотами 650–2000 м (рис. 2, верхний ряд). При этом основная часть окружающих сейсмостанций территорий представлена четвертичным терригенным чехлом с окнами выходов на дневную поверхность скальных пород палеозойского фундамента.

Следующий эшелон станций EKS2, AAK и KBK (см. рис. 2, второй ряд сверху) находится в предгорной зоне перехода от Чуйской долины к северному склону Киргизского хребта. При абсолютных высотах 1350–1800 м к северу от этих сейсмостанций наблюдается выполаживание рельефа, а к югу – наоборот возрастание градиента

превышений и глубины врезки водных потоков. Для этой зоны характерно сопряжение палеоген-неогеновых слабо литифицированных отложений (с севера) и палеозойских скальных образований (в основном гранитов, с юга).

В юго-западной части территории KNET расположены станции AML и UCH, а также – ретранслятор NRPT, обеспечивающий телекоммуникационную связь этих станций с Чуйской впадиной (см. рис. 1). Эта группа объектов имеет самый большой интервал высот 3400–4250 м (см. рис. 2, второй ряд снизу), охватывая приводраздельные части Киргизского, Суусамырского и Джумгалского хребтов. Здесь обнажается сильно расчлененный палеозойский кристаллический фундамент с довольно значимой сейсмической активностью (Суусамырское землетрясение 1992 г. M_s 7.4) и следами современных тектонических проявлений (разломы, зеркала скольжений, трещиноватость пород).

Наконец, в юго-восточной части сети KNET находятся станции KZA и ULHL, а также связывающий их Восточный ретранслятор (ERPT). Эти объекты расположены на территории от гор Кызарт до западного окончания Кунгейского и Тер-

Таблица 1. Географические характеристики для станций и ретрансляторов KNET

1	ААК	Ала-Арча	42.6333	74.4944	1680	Ущелье Ала-Арча, село Кашкасу, Киргизия
2	AML	Алмалы-Ашуу	42.1311	73.6941	3400	Перевал Алмалы-Ашуу, Киргизия
3	СНМ	Чумыш	42.9986	74.7513	655	Село Чумыш, горы Чумыш, Казахстан
4	EKS2	Эркин-Сай	42.6615	73.7772	1360	Село Эркин-Сай, Кара-Булак, Киргизия
5	КВК	Карагай-Булак	42.6564	74.9478	1760	Село Карагай-Булак, Киргизия
6	KZA	Кызарт	42.0778	75.2496	3520	Перевал Кызарт, горы Кызарт, Киргизия
7	TKM2	Токмак	42.9208	75.5966	2020	Северный склон Кастекского хребта, Казахстан, 30 км от г. Токмак, Киргизия
8	UCH	Уч-Тёр	42.2275	74.5134	3850	Перевал Уч-Тёр, перевал Тюз-Ашуу, Киргизия
9	ULHL	Улахол	42.2456	76.2417	2040	Село Улахол, урочище Донускудук, Киргизия
10	USP	Эж-Успенровка	43.2669	74.4997	740	Аул Беткайнар (бывшая Успенровка), Казахстан
11	ERPT	Восточный ретранслятор	42.5778	76.0778	3746	Перевал Калмак-Ашуу, хребет Кунгей-Алатау, Киргизия
12	NRPT	Северный ретранслятор	42.4694	73.7278	4214	Перевал Мазар-Ашуу, Киргизский хребет, Киргизия

Примечание. φ – широта, λ – долгота, Н – высота над уровнем моря. В таблице не указаны станции, которые работали короткое время – BLG (Белогорка), ТКМ (Токмак).

скейского хребтов. Интервал высот здесь довольно значительный – от 2050 до 3750 м (см. рис. 2, нижний ряд), градиент расчлененности рельефа значительный. Породы здесь в основном представлены скальными выходами палеозойских образований, в меньшей мере – палеоген–неогеновыми отложениями. Станции этого района обычно характеризуются как “шумные” из-за фиксации значительного количества микросейсмического фона не установленной природы.

На станциях сети установлены сейсмометры STS-2, которые генерируют выходное напряжение, пропорциональное скорости перемещения фундамента, и обладают передаточной функцией, постоянной на широком диапазоне частот от 0.01 до 10 Гц. В диапазоне от 10 до 40 Гц он дает усиление и сдвиг по фазе, что корректируется последующей обработкой (<https://www.passcal.nmt.edu/content/instrumentation/sensors/broadband-sensors/sts-2-bb-sensor>).

Сейсмический шум – очень слабые колебания (микросейсмические), источниками которых могут быть различные явления – ветер, колебания воды в водоемах или удары волн о береговые линии, часть из них возбуждается стоячими волнами морей и океанов при прохождении циклонов и т.д. Микросейсмические регистрируются в широком частот-

ном диапазоне и служат естественным фоном, определяющим порог чувствительности сейсмографов. Низкий уровень шума сейсмографа позволяет более качественно определять слабые сейсмические события и микросейсмические.

Первая оценка уровня сейсмического шума была проведена в ходе исследований связи уровня шума с солнечными вспышками [Сычева и др., 2011]. Для этого необходимо было получить представление о самом шуме. Было проанализировано среднее квадратическое отклонение (СКО) 900-секундных отрезков сейсмического сигнала на станции ААК за летние и зимние месяцы длительностью 60 дней (рис. 3). Средний уровень СКО в летние месяцы ниже, чем в зимние: если в летние месяцы его значение колеблется на уровне 0.2×10^4 нм/с, то в зимние месяцы его уровень достигает 1.5×10^4 нм/с. В зимние месяцы также наблюдается некоторая квазипериодичность и более значительные перепады значения СКО.

В работе [Сычева, Мансуров, 2018] был произведен расчет станционных поправок (site-effect) станций сети KNET на основе сейсмического шума по методике [Nakamura, 1989]. Для высокогорных станций, которые находятся южнее оси Киргизского хребта – AML, UCH и KZA, было получено несколько часто встречающихся вариантов

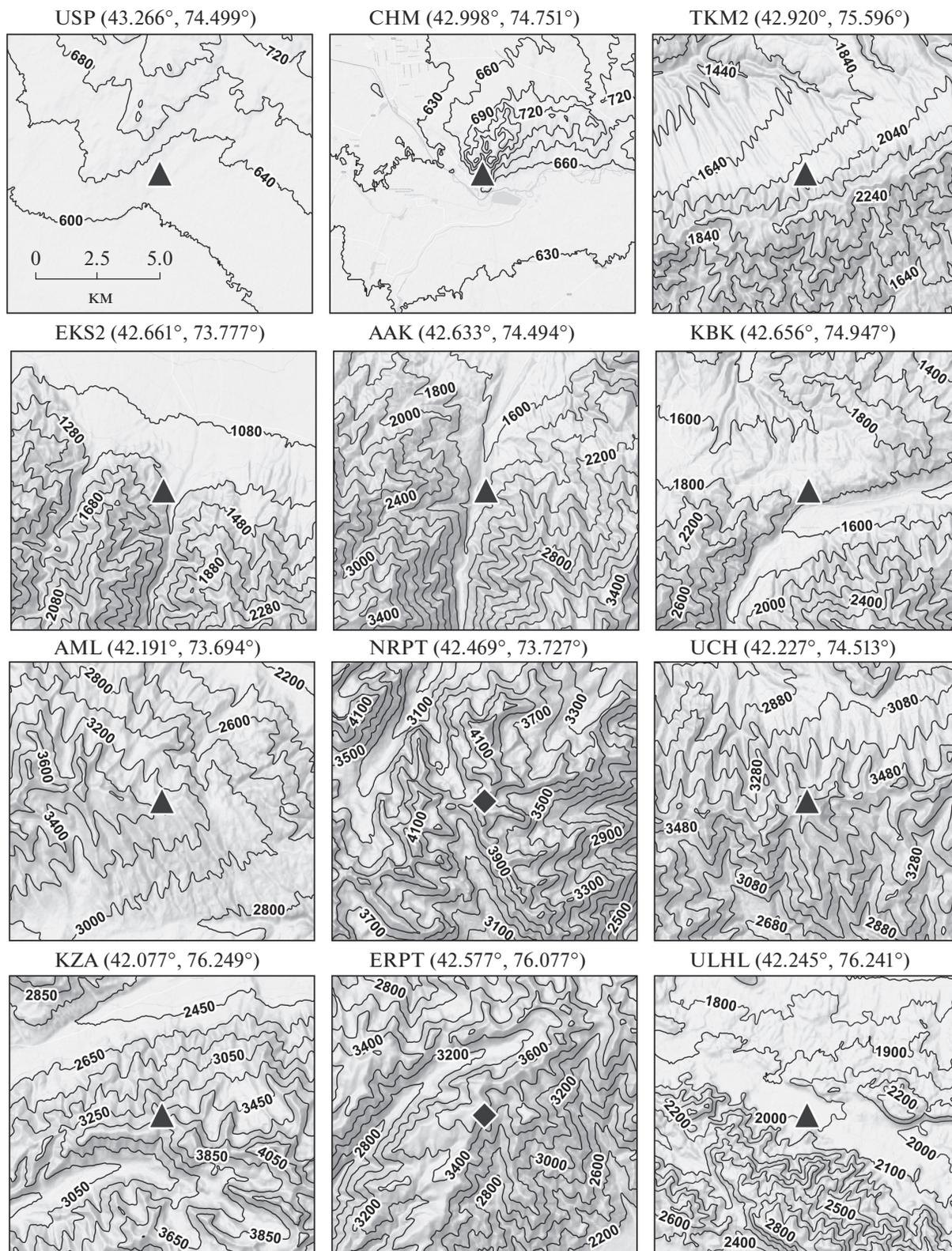


Рис. 2. Участки топографической карты (0.1° по широте и 0.15° по долготе). В центрах – позиции станций и ретрансляторов KNET, в подписи – код пункта и координаты (с.ш., в.д.).

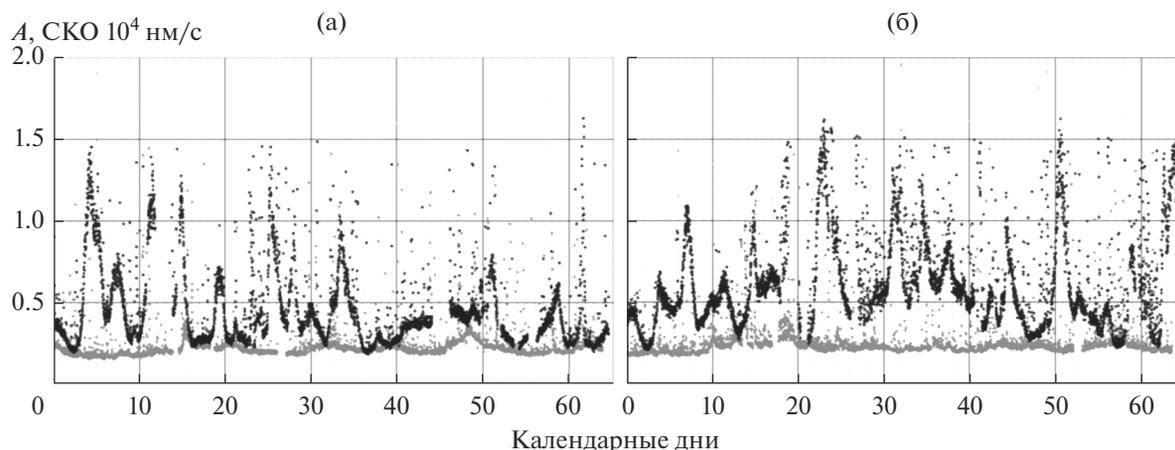


Рис. 3. Изменение SKO сейсмического шума на станции Ала-Арча (ААК) в летние (серый) и зимние (черный) месяцы: а – 22.05.2003–22.07.2003, 22.11.2003–22.01.2004; б – 22.05.2004–22.07.2004, 22.11.2004–22.01.2005 [Сычева и др., 2011].

отклонений отношения спектра горизонтальной компоненты к вертикальной (H/V) от типичного для этих станций. Это могло происходить из-за значительного возрастания или уменьшения уровня шума по одному из каналов, что может быть связано с климатическими условиями.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

С июля 1998 г. сейсмологическая сеть KNET работает в режиме реального времени, что обеспечивает получение непрерывных данных в почти полном объеме (98–99%). Для исследования уровня сейсмического шума станций сети KNET были рассмотрены цифровые записи с частотой 100 Гц за период с начала 1999 г. до середины 2017 г. Из непрерывных записей были сформированы отрезки (сегменты) сейсмического шума длительностью 15 мин (900 с). Сегменты выбирались за четыре интервала времени суток с разницей в 6 ч: 00, 06, 12 и 18 ч UTC. Указанные интервалы времени суток выбирались из четырех месяцев разных времен года – март, июнь, сентябрь, декабрь для каждого исследуемого года. Указанные месяцы выбраны как месяцы весеннего и осеннего равноденствия и месяцы с самой продолжительной и короткой ночью. Анализ сегментов сейсмического шума позволит выяснить, зависит ли уровень шума от времени года, времени суток и меняется ли он из года в год. В результате было сформировано ~240000 записей (сегментов) сейсмического шума. Из этого числа были использованы только сегменты, в которых не было обнаружено сейсмических событий и импульсных помех.

Частотный состав сейсмического шума изучался путем построения вероятностной спектральной плотности мощности (ВСПМ) сейсмического шума для всех трех измеряемых компо-

нент (E, N, Z). Суть этой методики [McNamara, Buland, 2004] состоит в следующем.

1. Для каждого канала станции формируются наборы (выборки) рассматриваемых сегментов сейсмической записи (примеры критериев формирования наборов: записи за определенный год, за определенное время суток, все исследуемые записи).

2. Для каждого рассматриваемого сегмента вычисляется спектральная плотность мощности (СПМ), в частотной области производится пересчет от измеряемых сейсмодатчиком значений скорости к значениям ускорения. Традиционно вместо зависимости СПМ от частоты рассматривается зависимость СПМ от периода колебаний.

3. Для всего набора исследуемых сегментов выбираются узловые значения периода с шагом в 1/8 октавы и СПМ каждого отрезка передискретизируется к этим значениям периода со сглаживанием.

4. Также для всего набора данных исследуемый диапазон значений СПМ разбивается на поддиапазоны шириной в 1 дБ каждый, и строится матрица вероятностной спектральной плотности мощности (ВСПМ), в которой каждый столбец соответствует узловому значению периода, а каждая строка – поддиапазону значений СПМ. Значение каждого элемента матрицы рассчитывается как доля (в исследуемом наборе) количества сегментов, для которых на соответствующем узловом периоде значение СПМ попадает в соответствующий поддиапазон.

5. Полученные матрицы ВСПМ визуализируются в виде тепловых карт.

Каждый сегмент оставляет на тепловой карте ВСПМ “след” в форме пиксельного графика его СПМ. Чем больше сегментов вошло в тепловую карту, тем “бледнее” след каждого отдельного

сегмента, но, когда на каких-то частотах значения СПМ многих сегментов близки и попадают в один диапазон, их “следы” складываются и становятся более яркими. Каждый столбец матрицы ВСПМ является плотностью распределения значения мощности, тогда у этой плотности можно рассчитать среднее и построить кривую зависимости среднего ВСПМ от частоты.

Для формирования сегментов сейсмического шума, графического построения волновых форм, просмотра данных и построения ВСПМ использовались авторские программы с привлечением дополнительных библиотек. Для работы с данными в формате miniSEED была использована библиотека *obspy* (A Python Toolbox for seismology/seismological observatories, <https://docs.obspy.org/>). Из этой же библиотеки был использован класс *PPSD* для автоматизации расчета и изображения матриц ВСПМ. В документации этой библиотеки отмечено, что алгоритмы расчета ВСПМ основаны на методике [McNamara, Bulan, 2004]. Информация об эталонной модели высокого и низкого уровня шума использована из [Peterson, 1993], где они обозначены как *NHNM* и *NLNM* соответственно, в данной работе для них приняты обозначения *HiMdl* и *LoMdl*.

В результате обработки по каждому каналу (E, N, Z) были построены ВСПМ сейсмического шума для следующих наборов данных.

- За весь период исследования (1999–2017).
- За весь период исследования по четырем временам суток (00, 06, 12 и 18 ч, UTC).
- За весь период исследования по четырем месяцам март, июнь, сентябрь и декабрь.
- По каждому году исследования.
- По каждому году и исследования, по четырем временам (март, июнь, сентябрь, декабрь).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты за весь период исследования

Количество сегментов (n), обработанных по всему набору данных, дата первого и последнего сегмента по каждой станции сети представлены в табл. 2. Всего обработано ~50000 сегментов сейсмического шума, среднее число сегментов по каждому каналу всех станций сети составило ~16500. Для каждой станции было обработано приблизительно равное количество записей по каждому из каналов. Максимальное количество сегментов обработано по станциям UCH ($n = \sim 2260$ по каждому каналу) и AAK ($n = \sim 2130$ по каждому каналу), минимальное по станциям КВК ($n = \sim 740$ по каждому каналу). При просмотре сегментов сейсмического шума станции КВК на записях часто присутствовали сигналы высокой амплитуды неясной природы (не землетрясение)

при отсутствии таковых на остальных станциях сети такие записи были исключены из анализа.

Тепловые карты плотности спектра мощности сейсмического шума для каждого канала станции относительно моделей из работы [Peterson, 1993] представлены на рис. 4 и 5. По тепловым картам можно оценить положение кривой максимума ВСПМ относительно модельных кривых на разных периодах спектра, и разброс значений мощности в пределах выборки на разных частотах. Положение максимума ВСПМ относительно моделей говорит об уровне шума станции, разброс значений мощности – об устойчивости ее работы.

Положение максимума ВСПМ относительно моделей меняется в зависимости от периода (см. рис. 4, 5). Полученные спектры рассматривались на четырех диапазонах периодов: 0.02–1, 1–5, 5–10 и 10–100 с. В зависимости от положения максимума ВСПМ относительно моделей на каждом рассматриваемом диапазоне были приняты следующие обозначения: “L~” – близко к модели низкого уровня шума *LoMdl*, “~H” – близко к модели высокого уровня шума *HiMdl*, “L~M” – ниже середины между моделями, “M~H” – выше середины между моделями, “H<” – выше *HiMdl*. Согласно принятым обозначениям, табл. 3 содержит информацию об отклонениях от моделей на рассматриваемых диапазонах периодов для каждого канала каждой станции. Чем светлее цвет ячейки таблицы, тем максимум ВСПМ ближе к нижней модели (низкий уровень шума).

Анализ табл. 3 и рис. 4, 5 показал, что наилучшим является вертикальный канал: максимум ВСПМ для всех станций сети находится ниже середины между двумя моделями (L~M) на периодах до 1 с, и близко к нижней модели на остальных периодах (L~).

Диапазон периодов 0.02–2 с. Положение максимума ВСПМ для всех станций сети на этом участке спектра находится ниже середины между двумя моделями (L~M). Ближе всего к *LoMdl* находятся максимумы ВСПМ для станций AAK, AML, EKS2, KZA, UCH и USP.

Диапазон периодов 2–5 с. На этом участке спектра положение максимума ВСПМ для всех станций совпадает с нижней моделью или находится чуть выше ее. Это означает, что станции сети на этих периодах имеют минимальный уровень шума.

Диапазон периодов 5–10 с. В этом диапазоне максимум ВСПМ для всех станций также находится чуть выше нижней модели, что тоже означает минимальный уровень шума.

Диапазон периодов 10–100 с. Положение максимума ВСПМ на рассматриваемом участке не совпадает как между каналами, так и между станциями. Как было указано выше, для вертикальных каналов станций максимум ВСПМ находит-

Таблица 2. Период и количество обработанных сегментов сейсмического шума по каждому каналу станций сети KNET

Количество	Канал	Станции									
		ААК	АМЛ	СНМ	ЕКС2	КВК	КЗА	ТКМ2	УСН	УЛНЛ	УСП
	Е	2134	1475	1915	1544	735	1397	1223	2354	1836	1917
	Н	2133	1475	1910	1547	735	1395	1218	2357	1836	1927
	З	2133	1474	1914	1548	736	1394	1215	2358	1836	1920

Примечание. Дата начала для всех станций – 01.03.1999; дата конца 30.06.2017 – для станций ААК, АМЛ, СНМ, ТКМ2, УСП; 29.09.15 – для станции КЗА; 28.06.2017 – для станции КВК; 29.06.2017 для станций УСН, УЛНЛ; 14.06.2017 – ЕКС2.

Таблица 3. Положение кривой максимума ВСПМ относительно модельных кривых на разных периодах спектра по трем каналам (Е, Н, З) станций сети KNET

Канал	Е				Н				З			
	Диапазон периодов, с				Диапазон периодов, с				Диапазон периодов, с			
	0.02–2	2–5	5–10	10–100	0.02–2	2–5	5–10	10–100	0.02–2	2–5	5–10	10–100
ААК	L~M	L~	L~	M~H	L~M	L~	L~	M~H	L~M	L~	L~	L~
АМЛ	L~M	L~	L~	M~H	L~M	L~	L~	M~H	L~M	L~	L~	L~
СНМ	L~M	L~	L~	H<	L~M	L~	L~	H<	L~M	L~	L~	L~
ЕКС2	L~M	L~	L~	H<	L~M	L~	L~	H<	L~M	L~	L~	L~
КВК	L~M	L~	L~	~H	L~M	L~	L~	H<	L~M	L~	L~	L~
КЗА	L~M	L~	L~	~H	L~M	L~	L~	~H	L~M	L~	L~	L~
ТКМ2	L~M	L~	L~	M~H	L~M	L~	L~	M~H	L~M	L~	L~	L~
УСН	L~M	L~	L~	~H	L~M	L~	L~	~H	L~M	L~	L~	L~
УЛНЛ	L~M	L~	L~	~H	L~M	L~	L~	~H	L~M	L~	L~	L~
УСП	L~M	L~	L~	~H	L~M	L~	L~	H<	L~M	L~	L~	L~

ся чуть выше нижней модели. Максимумы ВСПМ горизонтальных каналов по станциям ААК, АМЛ и ТКМ2 расположены чуть выше середины между двумя моделями, по станциям КЗА, УСН и УЛНЛ граничат с верхней моделью, а для станций СНМ, ЕКС2, КВК и УСП даже превышают ее уровень.

Разброс значений мощности в пределах выборки.

Большое количество анализируемых данных создает необходимость ввести некоторую сводную оценку, которую условно можно назвать “качеством”. Присвоение оценки (I, II или III) может зависеть как от разброса спектров отдельных сегментов сейсмического шума (чем больше разброс, тем ниже качество), так и смещения максимума ВСПМ вверх относительно нижней модели (чем ближе к нижней модели, тем выше качество).

Как видно на рис. 4 и 5, для станций сети разброс значений мощности в пределах выборки меняется в зависимости от рассматриваемого периода. Результаты анализа значений плотности распределения (дисперсии) на разных диапазонах периодов с применением вышеописанных оценок (I – минимальный разброс между спектрами отдельных сегментов шума); II – есть небольшой разброс; III – большой разброс) представлены в табл. 4.

Чаще всего хорошее согласование между спектрами отдельных сегментов на всех периодах наблюдается на Z канале (I – 24 раза, II – 8, III – 8). Больше количество оценок I по всем каналам на станциях СНМ, ААК и ТКМ2 (9, 8 и 8), меньшее на станциях КВК и УЛНЛ (1, 1). Максимальное количество оценок III на станциях УСН и КВК (8, 4), отсутствие этих оценок на станциях ААК,

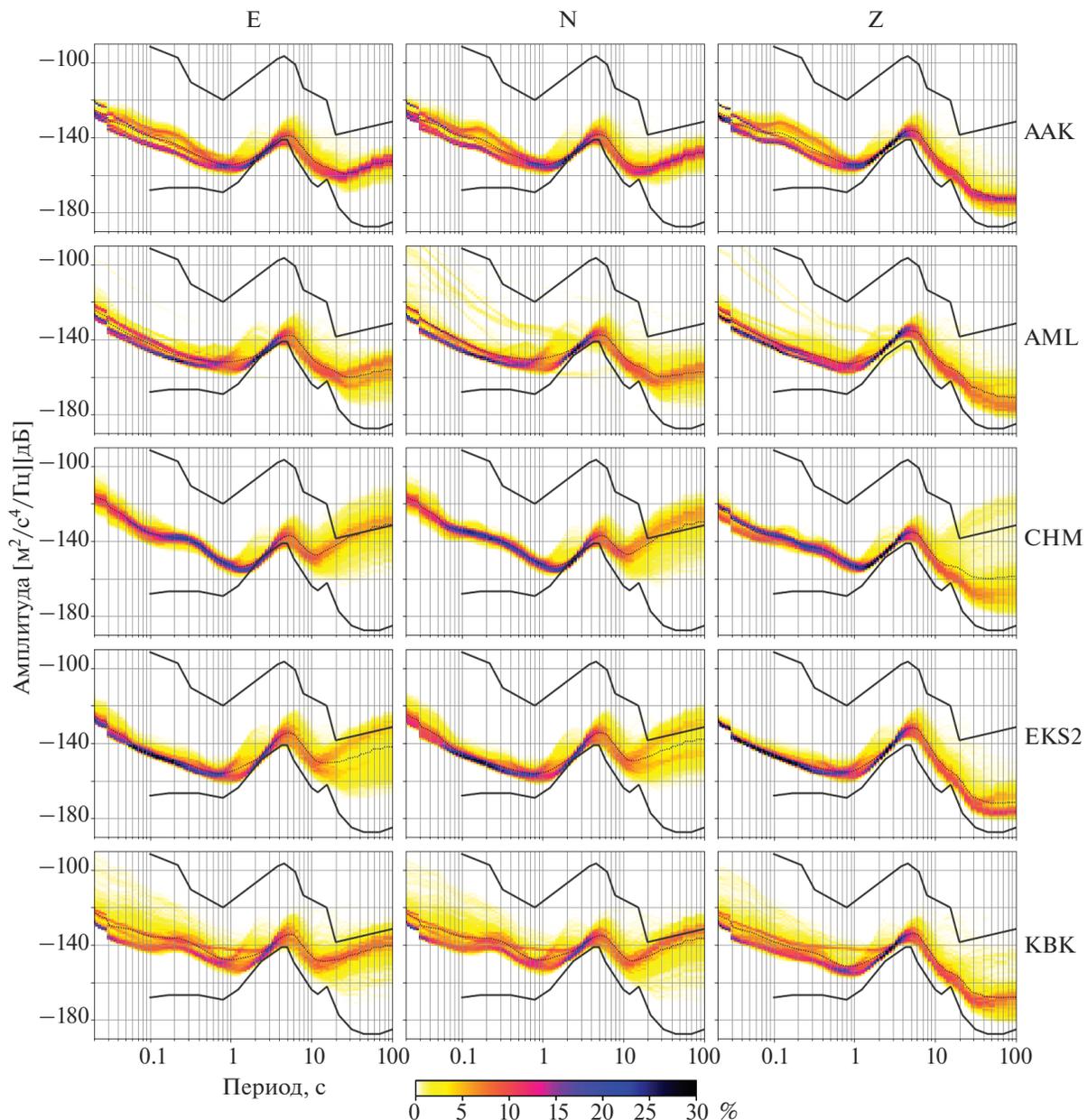


Рис. 4. ВСПМ сейсмического шума по всем каналам станций AAK, AML, CHM, EKS2 и KBK, построенные по всему набору данных. Тонкой черной пунктирной линией на этом и всех последующих рисунках ВСПМ показана кривая зависимости среднего значения ВСПМ от частоты.

TKM2. На станциях AML и UCH разброс между спектрами больше связан с отдельными значительными отклонениями от типичного спектра мощности.

Диапазон периодов 0.02–2 с. Значительный разброс между спектрами отдельных сегментов наблюдается на станциях AML, UCH, и KBK. На остальных станциях хорошее согласование или небольшая дисперсия.

Диапазон периодов 2–5 с. На этих периодах небольшая дисперсия наблюдается по станциям

AML, KBK и ULHL на всех каналах, а большая – на N-канале станции UCH.

Диапазон периодов 5–10 с. Для рассматриваемого периода незначительный разброс между спектрами наблюдается на N-каналах станций EKS2, KBK, KZA, ULHL, USP; большая дисперсия – на N-канале станции UCH.

Диапазон периодов 10–100 с. Дисперсия велика по всем каналам всех станций, значительные расхождения между отдельными спектрами на этом

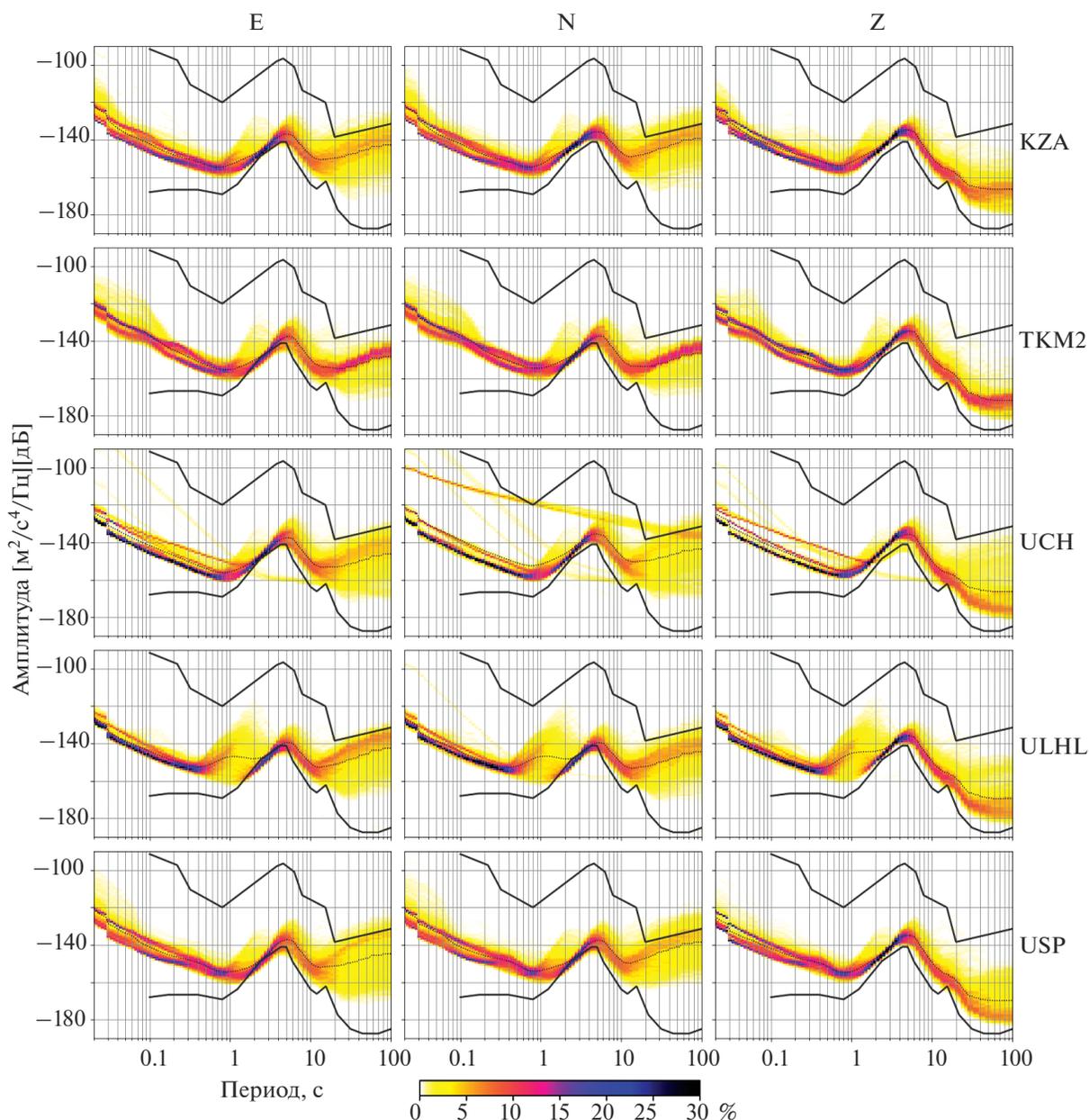


Рис. 5. ВСПМ сейсмического шума по всем каналам станций KZA, TKM2, UCH, ULHL и USP, построенные по всему набору данных.

периоде наблюдаются для станций CHM, EKS2, KZA, UCH, ULHL и USP.

Результаты за весь период исследования по четырем временам суток

Количество сегментов сейсмического шума обработанных по временам суток (00, 06, 12 и 18 ч UTC) по каждому каналу станций сети KNET представлено в табл. 5: наибольшее количество сегментов обработано по станции UCH (8110) и ААК (7367), минимальное по станции KBK (2672). Количество обработанных сегментов по временам суток

(UTC): 00 ч – 26476, 06 ч – 6590, 12 ч – 6402, 18 ч – 10124. Такое количественное соотношение может косвенно свидетельствовать о том, что в районе 00 и 18 ч UTC сейсмический шум свободен от импульсных помех.

Анализ 120 тепловых карт (10 станций, 3 канала, 4 времени суток) показал, что положение максимума ВСПМ практически не зависит от времени суток. Поэтому на оценку качества в основном влиял разброс между спектрами отдельных сегментов на разных периодах (дисперсия). Результаты анализа ВСПМ с использованием вышепри-

Таблица 4. Разброс значений мощности в пределах выборки на разных периодах станций KNET

Канал	E				N				Z			
	Диапазон периодов, с				Диапазон периодов, с				Диапазон периодов, с			
	0.02–2	2–5	5–10	10–100	0.02–2	2–5	5–10	10–100	0.02–2	2–5	5–10	10–100
AAK	II	I	II	I	II	I	I	I	II	I	I	I
AML	II	II	I	II	III	II	I	II	III	I	I	II
CHM	I	I	I	III	I	I	I	III	I	I	I	III
EKS2	I	I	II	III	I	I	II	III	I	I	I	II
KBK	III	II	II	II	III	II	II	II	III	II	I	III
KZA	II	I	II	III	I	I	II	III	I	I	I	II
TKM2	I	I	I	I	II	I	II	II	II	I	I	I
UCH	III	I	I	III	III	III	III	III	III	I	I	III
ULHL	II	II	II	III	II	II	II	III	II	II	I	III
USP	II	I	II	III	II	I	II	III	I	I	I	III

Примечание. I – хорошее согласование между спектрами отдельных сегментов.

Таблица 5. Количество сегментов (*n*) сейсмического шума обработанных по временам суток (00, 06, 12 и 18) по каждому каналу станций сети KNET

Канал	E				N				Z			
	UTC часы				UTC часы				UTC часы			
	00	06	12	18	00	06	12	18	00	06	12	18
AAK	968	313	316	537	967	313	316	537	967	313	316	537
AML	721	242	224	288	721	242	224	288	721	242	224	287
CHM	1134	171	183	427	1132	171	182	425	1133	171	183	427
EKS2	963	154	109	318	965	154	109	319	964	155	109	320
KBK	466	63	58	148	466	64	58	147	466	64	58	148
KZA	691	220	236	250	690	220	236	249	691	221	234	248
TKM2	613	179	180	251	613	176	179	250	610	177	177	251
UCH	1039	422	397	496	1037	424	398	498	1040	422	398	499
ULHL	1098	228	238	271	1100	227	239	271	1100	227	239	270
USP	1129	205	194	389	1136	207	195	389	1135	203	193	389

веденных оценок качества представлены в табл. 6. Посредством подсчета оценок по всем станциям за конкретное время суток получен следующий результат: 00 ч UTC – (I – 22 раза, II – 7, III – 1), 06 ч – (I – 7, II – 20, III – 3), 12 ч – (I – 10, II – 11, III – 9) и 18 ч – (I – 14, II – 9, III – 7 раз). Из соотношений оценок I, II и III для каждого времени суток следует, что наилучшими часами работы для станций является 00 UTC. Наибольшая дисперсия в ВСПМ наблюдается в 12 UTC. Наименее чувствительны к изменению времени суток станции ААК и ТКМ2, а на станции КВК такая чувствитель-

ность наблюдается отчетливо: число сегментов, СПМ которых сильно отклоняется от кривой максимума ВСПМ, минимально в ночные и утренние часы, но не днем и вечером.

На рис. 6а представлены ВСПМ двух станций – ААК и ЕКС2 для разных времен суток. Первая станция находится в штольне, расположенной в ущелье Ала-Арча на высоте 1680 м, вторая – на склоне горы на высоте 1360 м. Разница в характеристике ВСПМ в разные часы для станции ААК практически не наблюдается, а для станции ЕКС2 уровень сейсмического шума на периодах больше

Таблица 6. “Качество” РСМ для часов суток (00, 06, 12, 18 UTC) станций сети KNET

Канал	UTC часы	Станции									
		AAK	AML	CHM	EKS2	KBK	KZA	TKM2	UCH	ULHL	USP
E	00	II	II	I	I	I	I	II	II	I	I
	06	I	I	III	II	II	I	I	II	II	II
	12	I	I	III	II	III	II	I	I	II	II
	18	I	II	II	I	III	II	II	II	III	I
N	00	II	I	I	I	I	I	II	III	I	I
	06	I	III	II	II	II	II	I	III	II	II
	12	I	III	II	III	III	II	I	III	II	I
	18	I	I	I	I	III	II	II	III	III	II
Z	00	II	I	I	I	I	I	I	I	I	I
	06	I	II	II	II	II	II	II	II	II	II
	12	I	II	II	III	III	II	I	I	III	II
	18	I	II	I	I	III	I	I	I	III	I

Таблица 7. Количество сегментов сейсмического шума обработанных по временам года (март, июнь, сентябрь и декабрь) по каждому каналу станций сети KNET

Канал	E				N				Z			
	март	июнь	сент.	дек.	март	июнь	сент.	дек.	март	июнь	сент.	дек.
AAK	641	506	435	552	641	505	435	552	641	505	435	552
AML	458	367	261	389	458	367	261	389	458	367	261	388
CHM	600	306	442	567	600	302	442	566	600	306	442	566
EKS2	509	229	328	478	511	230	328	478	511	232	328	477
KBK	281	120	91	243	281	121	90	243	281	121	91	243
KZA	438	383	209	367	438	383	208	366	434	383	209	368
TKM2	474	182	143	424	471	183	143	421	470	180	143	422
UCH	722	596	425	611	722	605	423	607	727	596	424	611
ULHL	571	431	351	482	572	432	351	482	571	431	352	482
USP	656	335	344	582	659	335	345	588	656	339	340	585

10 с зависит от времени суток. В дневные часы наблюдается рост дисперсии между спектрами отдельных сегментов.

Результаты за весь период исследования по четырем временам года

Количество сегментов сейсмического шума обработанных месяцам март, июнь, сентябрь и декабрь по каждому каналу станций представлено в табл. 7: наибольшее количество обработано по станции UCH (7796) и AAK (7041), минимальное по станции KBK (2487). Соотношение количества обработанных сегментов по временам года: март – 16052, декабрь – 14081, июнь – 10378,

сентябрь – 9080. Такие соотношения могут косвенно свидетельствовать о том, что лучший месяц для станций – март, а худший – сентябрь.

Распределение мощности сейсмического шума оценивалось отдельно по каждому из диапазонов: 0.02–2, 2–5, 5–10 и 10–100 с. Внутри этих диапазонов периодов в зависимости от времени года по-разному меняется как положение максимумов ВСПМ, так и разброс между спектрами отдельных сегментов. Результаты просмотра ВСПМ (120 тепловых карт) сведены в табл. 8.

В табл. 9 представлено суммарное распределение оценок для каждого исследуемого времени года и рассматриваемого диапазона периодов.

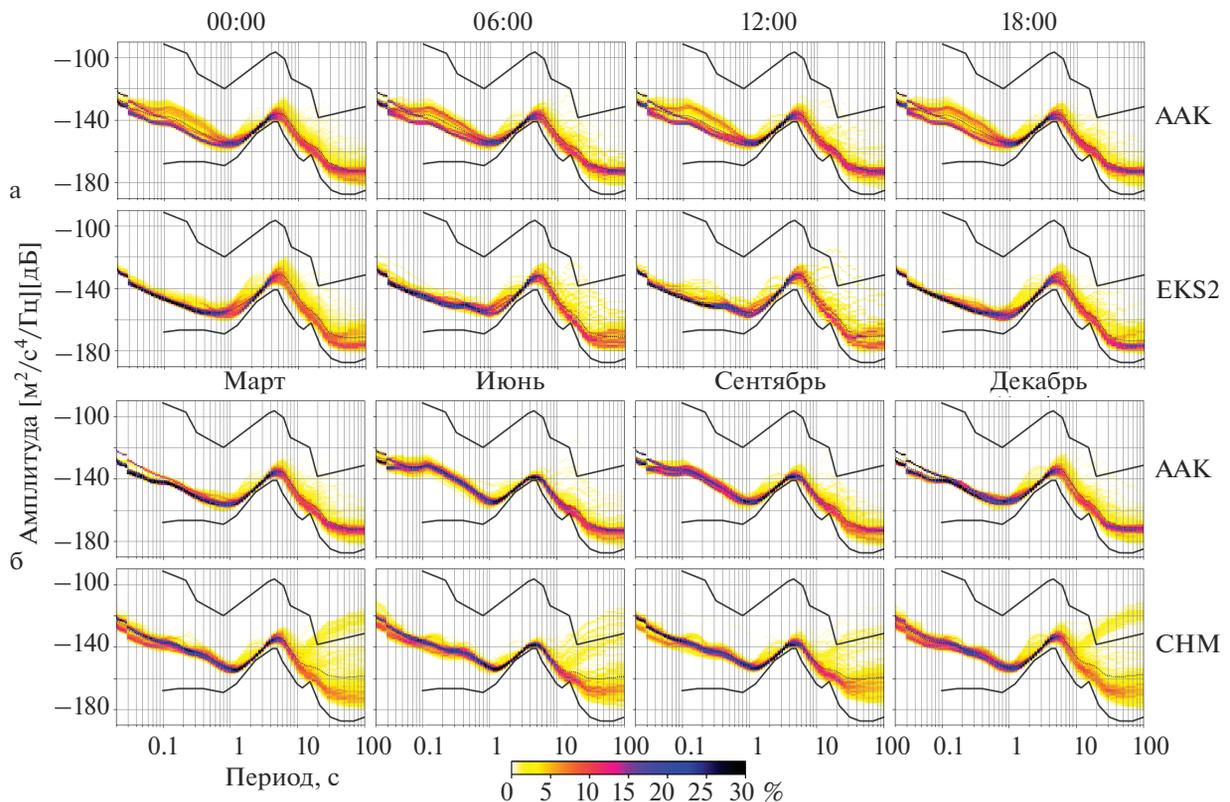


Рис. 6. ВСПМ сейсмического шума (канал Z): а – по временам суток (станции ААК и ЕКС2); б – по временам года (ААК и СНМ).

Согласно таблице, наиболее чувствительным к изменениям времени года является диапазон периодов 5–10 с (большее количество высоких оценок на теплое время года и меньшее на холодное), наименее чувствительным – диапазон периодов 2–5 с. Для больших периодов (10–100 с) характерна нестабильность уровня сейсмического шума для всех времен года. На высоких частотах (0.02–2 с) менее благоприятным является сентябрь месяц.

Если не рассматривать длиннопериодные (10–100 с) колебания, то все станции, за исключением КВК, АМЛ и УСН, можно считать стабильными к изменениям времени года. Март является лучшим временем года для станций ТКМ2 и АМЛ, июнь – для станций ААК, СНМ, ЕКС2, USP, КЗА, сентябрь – для станций СНМ и USP, декабрь – для станций КВК, КЗА, ТКМ2, УСН, ULHL.

На рис. 6б представлены ВСПМ двух станций по временам года – ААК и СНМ. Станция ААК расположена в ущелье на высоте 1680 м, а станция СНМ – на склоне низкой горы (высота 655 м). Качество работы станции ААК мало зависит от времени года, а станция СНМ чувствительна к времени года на периодах более 10 с. На этих периодах в холодное время года возрастает дисперсия распределения. На рис. 7 представлена ВСПМ

сейсмического шума для марта, июня, сентября и декабря по всем каналам для станции КВК. Лучшим временем года для этой станции является март и декабрь.

Станция ULHL. Исследование ВСПМ станций по временам суток и временам года позволило отметить особенность станции ULHL, которая находится на юго-западном побережье озера Иссык-Куль. Независимо от времени года и времени суток на периодах 0.5–3.5 с наблюдается неустойчивое поведение сейсмического шума (рис. 8).

Результаты по каждому году исследования (1999–2017)

Просмотр ВСПМ шума станций KNET по каждому году исследования (570 тепловых карт) показал, что эти формы незначительно отличаются от ВСПМ, определенной по всему набору данных. В целом, работу станций KNET от года к году можно считать стабильной. На рис. 9 представлены ПСМ для станции ТКМ2 по каждому году исследования (N канал).

Таблица 8. Качество (I – высокое, II – среднее, III – низкое) ВСПМ сейсмического шума для времен года (март, июнь, сентябрь, декабрь) на разных диапазонах периодов

Стан- ция	Канал месяц	E				N				Z			
		диапазон периодов, с				диапазон периодов, с				диапазон периодов, с			
		0.02–2	2–5	5–10	10–100	0.02–2	2–5	5–10	10–100	0.02–2	2–5	5–10	10–100
ААК	Март	I	I	II	II	I	I	II	II	I	I	II	I
	Июнь	II	I	I	I	II	I	I	I	II	I	I	II
	Сентябрь	II	I	I	II	II	I	I	II	II	I	I	II
	Декабрь	I	I	II	I	I	I	II	II	I	I	II	II
АМЛ	Март	I	I	II	II	I	I	I	I	I	I	II	II
	Июнь	II	I	I	I	III	II	I	III	II	II	I	II
	Сентябрь	I	I	I	III	II	I	I	III	III	I	I	I
	Декабрь	I	I	II	II	I	I	II	II	I	I	II	I
СНМ	Март	I	I	II	II	I	I	II	III	I	I	II	III
	Июнь	I	I	I	II	I	I	I	III	I	I	I	III
	Сентябрь	I	I	I	III	I	I	I	III	I	I	I	II
	Декабрь	I	I	II	III	I	I	II	II	I	I	II	III
ЕКС2	Март	I	I	II	III	I	I	II	III	I	I	II	II
	Июнь	I	I	I	II	I	I	I	II	I	I	I	I
	Сентябрь	I	I	I	III	I	I	I	III	I	I	I	I
	Декабрь	I	I	II	II	I	I	II	II	I	I	II	II
КВК	Март	III	II	II	II	III	II	II	II	II	II	II	II
	Июнь	III	II	II	III	III	II	II	III	III	II	II	III
	Сентябрь	III	II	II	III	III	II	II	III	III	I	II	II
	Декабрь	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
КЗА	Март	I	I	II	II	I	I	II	II	I	I	II	II
	Июнь	I	I	I	III	I	I	I	II	I	I	I	II
	Сентябрь	I	I	I	III	II	I	I	II	II	I	I	II
	Декабрь	I	I	II	II	I	I	II	II	I	I	I	I
ТКМ2	Март	I	I	II	I	I	I	II	I	I	I	I	I
	Июнь	I	I	I	II	I	I	I	III	I	I	I	I
	Сентябрь	I	II	I	II	I	I	I	III	I	I	II	II
	Декабрь	I	I	II	I	I	I	II	I	I	I	I	I
УСН	Март	I	I	I	I	I	I	I	III	I	I	I	I
	Июнь	I	I	I	III	I	I	I	III	I	I	I	I
	Сентябрь	III	I	I	III	III	III	III	III	III	I	I	III
	Декабрь	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	II
УЛНЛ	Март	I	I	I	II	I	I	I	II	I	I	I	II
	Июнь	I	I	I	II	I	I	I	III	I	I	I	I
	Сентябрь	I	I	I	I	I	I	I	II	I	I	I	II
	Декабрь	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III
УСП	Март	I	I	II	III	I	I	II	III	I	I	I	II
	Июнь	I	I	I	III	I	I	I	III	I	I	I	I
	Сентябрь	I	I	I	III	I	I	I	III	I	I	I	II
	Декабрь	I	I	II	II	I	I	II	II	I	I	II	II

Таблица 9. Распределение оценок “качества” для проанализированных диапазонов периодов по исследуемым временам года

Месяц	Диапазон периодов (с) и “Качество” (I, II, III)											
	0.02–2			2–5			5–10			10–100		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Март	27	1	2	27	3	0	10	20	0	7	16	7
Июнь	21	5	4	25	5	0	27	3	0	8	9	13
Сентябрь	17	6	7	26	3	1	25	5	0	3	11	16
Декабрь	27	3	0	27	3	0	8	22	0	13	14	3

Результаты по четырем месяцам каждого года исследования

Анализ ВСПМ по четырем временам каждого года для всех станций сети позволил выявить наиболее проблемные станции, которые уже были отмечены ранее – AML, KBK, KZA и UCH. В отдельные дни рассматриваемого периода на этих станциях ВСПМ значительно отличается от типичной, определенной по всему набору данных. Станции UCH и AML традиционно считались “тихими” сейсмостанциями (с низким уровнем шума). По нашим данным такое предположение справедливо только в определенное время года.

Результаты просмотра тепловых карт по вышеуказанным станциям за разные времена года сведены в табл. 10, где для каждого канала отмечены месяцы лет, в течение которых набралось боль-

шое количество сегментов, СПМ которых значительно отклоняется от кривой максимума ВСПМ, посчитанной за весь период исследования.

Согласно табл. 10, для высокогорных станций южного эшелона (AML, KZA, UCH) наблюдаются закономерные сезонные отклонения только в определенные месяцы года. Вероятно, что нестабильное поведение станции AML в июне месяце связано с затоплением бункера расположения станции водой во время таяния близлежащих ледников, а на станциях KZA и UCH в период сентябрь–декабрь наличие ветров влияет на уровень сейсмического шума. На рис. 10 представлены примеры нестабильного поведения для вышеуказанных станций.

В 2009 г. на станции UCH в марте и июне стабильно наблюдался обычный уровень сейсмиче-

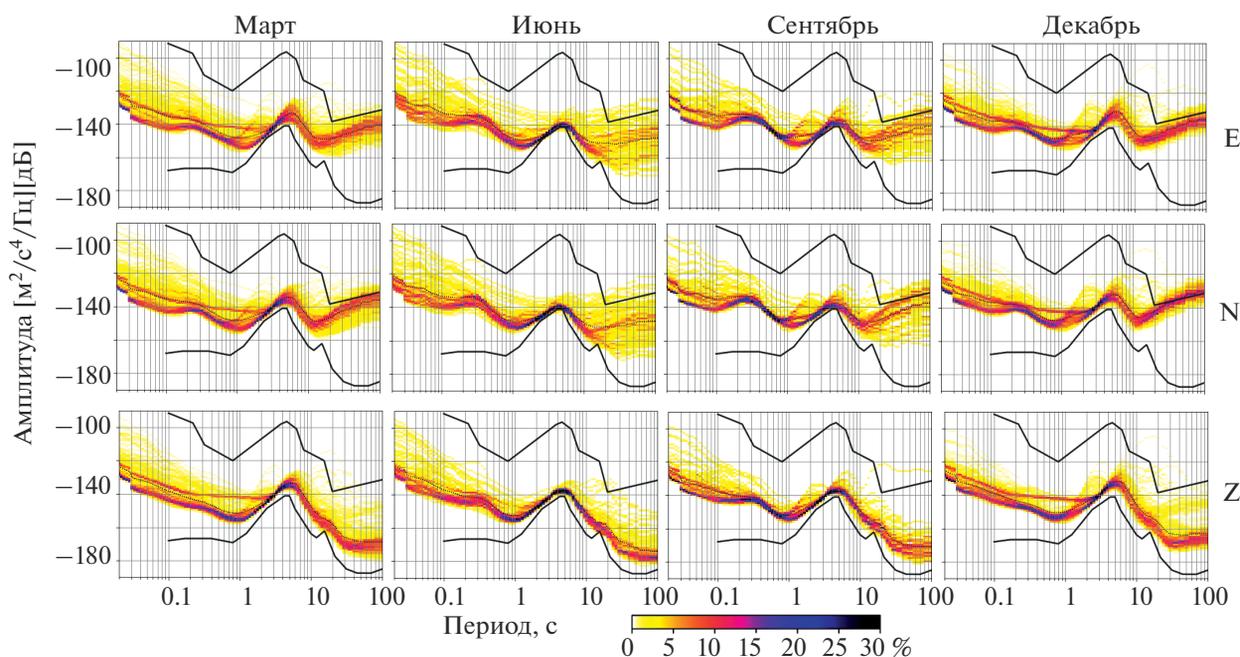


Рис. 7. ВСПМ станции KBK по всем каналам за март, июнь, сентябрь, декабрь.

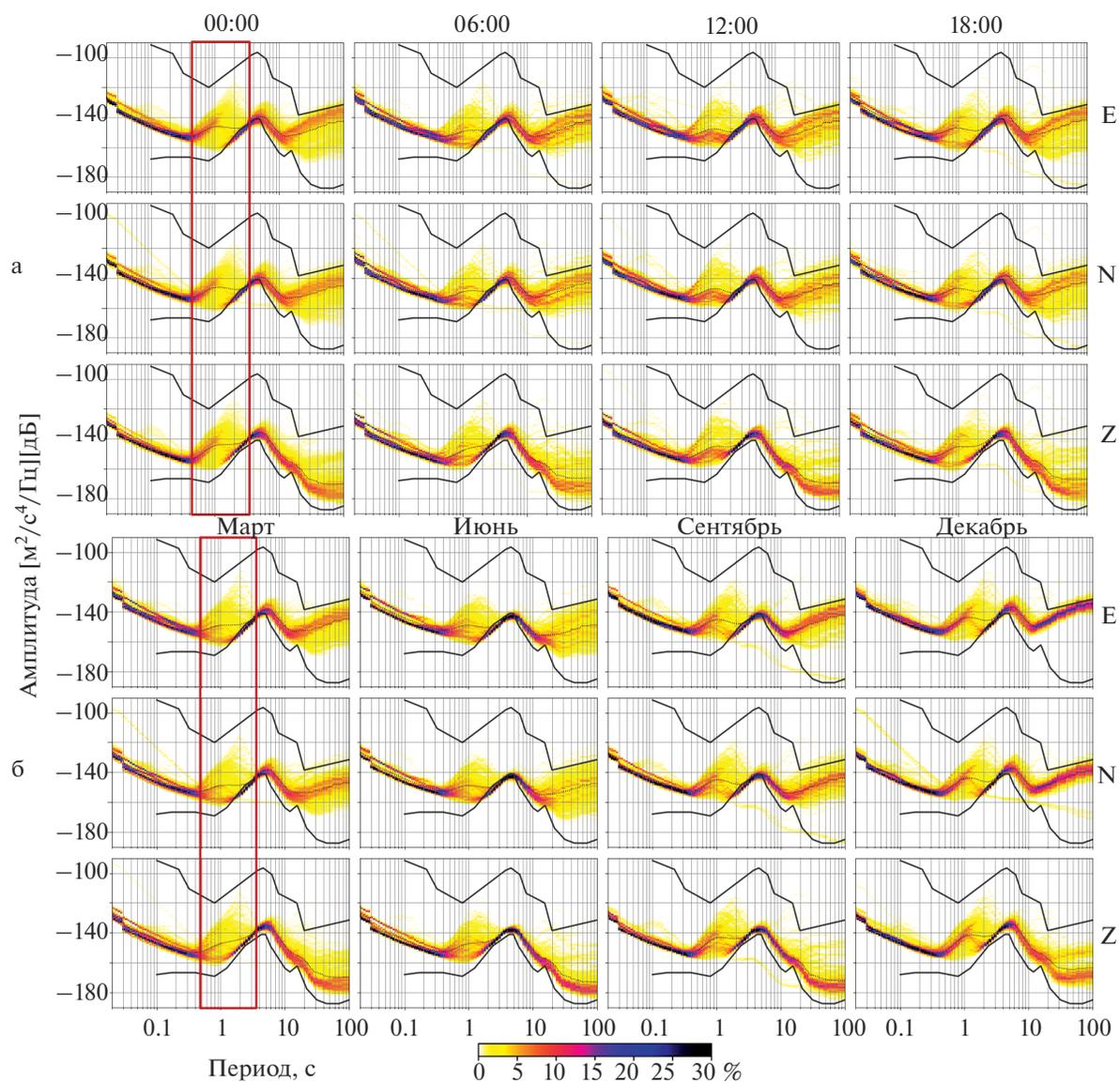


Рис. 8. ВСПМ для станции ULHL по временам суток (а) и временам года (б) по всем каналам.

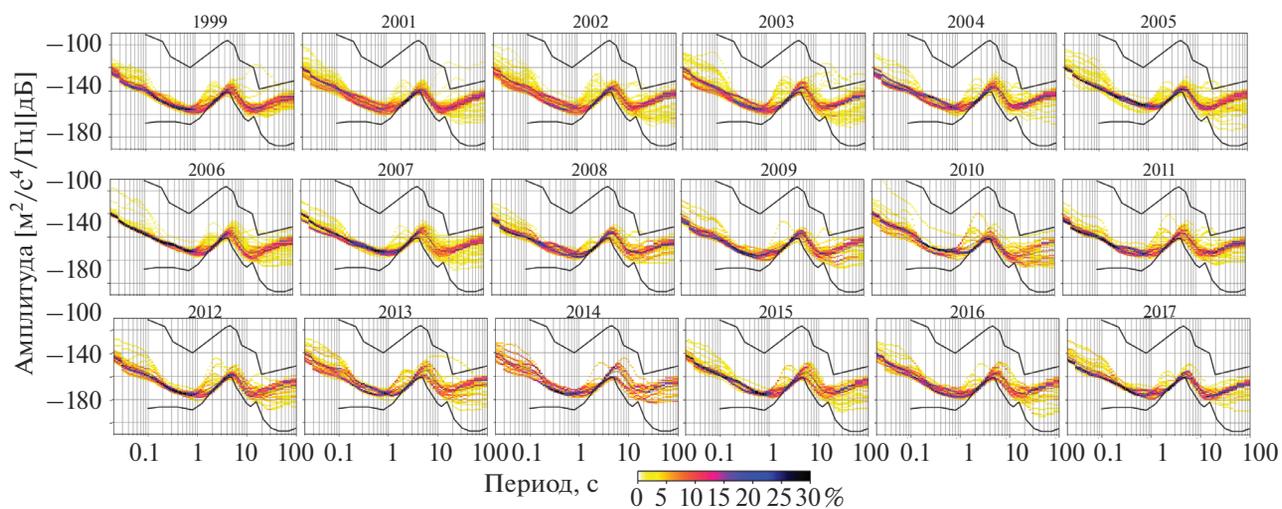


Рис. 9. ВСПМ для станции TKM2 по годам исследования для N канала.

Таблица 10. Месяцы годов, в которые зафиксированы значительные отклонения уровня сейсмического шума на отдельных каналах станций AML, KBK, KZA и UCH

Станция	Месяц	E	N	Z
AML	Июнь		1999, 2001–2004, 2006–2007, 2010–2011, 2015–2017	1999, 2002–2003, 2006–2007, 2011, 2013, 2016–2017
	Сентябрь		2013, 2015	2015
	Декабрь	2005, 2007		2005, 2007
KBK	Март	1999, 2001–2002, 2005, 2007–2008, 2010, 2012, 2016	1999, 2002, 2005, 2007–2008, 2010, 2012, 2016	1999, 2002, 2005, 2007–2008, 2010, 2012, 2016
	Июнь	2000–2003, 2005–2008, 2015	1999, 2001–2003, 2005–2008, 2015	1999, 2001–2002, 2015
	Сентябрь	2002, 2006, 2009, 2012	2002, 2006, 2009, 2012	2002, 2006, 2009, 2012
	Декабрь	1999, 2002, 2004, 2010, 2011, 2013–2015	1999, 2002, 2013	1999, 2002
KZA	Сентябрь	2003, 2005–2008, 2010–2011	2002–2003, 2005–2007, 2010, 2011	2001–2011, 2014
	Декабрь	2000, 2004, 2012	2000–2002, 2004, 2007, 2011–2012	2011–2013
UCH	Март		2009	
	Июнь		2009	
	Сентябрь	2001–2002, 2007–2012, 2014, 2016	2001–2016	2001–2010, 2015, 2016
	Декабрь	2010, 2014,	2007, 2010, 2012	2010, 2012, 2014

Примечание. Серый цвет ячеек означает отсутствие существенного количества сильных отклонений.

ского шума (см. табл. 10). В сентябре отмечено нетипичное поведение шума в результате неисправности на станции (“завалился” датчик). На рис. 11 представлены ПСМ станции UCH за четыре месяца 2009 г., неисправность могла появиться в период с июля по сентябрь. 24 ноября 2009 г. датчик был заново установлен и отцентрирован.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки качества работы станций сейсмологической сети KNET с 1999 по 2017 гг. было проанализировано более 50000 сегментов сейсмического шума длительностью 15 мин (900 с), сформированные за различные времена суток (00, 06, 12, 18 ч) и времена года (март, июнь, сентябрь, декабрь) по всем трем каналам (E, N, Z). Уровень сейсмического шума оценивался на основе расчета вероятностной спектральной плотности мощности (ВСПМ) сейсмического сигнала с последующим построением тепловых карт и сравнением с эталонными моделями из [Peterson,

1993]. Анализ ВСПМ позволил установить следующее.

- По всем станциям сети наименьшее отклонение ВСПМ от нижней кривой эталонной модели (LoMdl или NLNM) наблюдается у вертикального канала (Z) на всех периодах.

- По всем каналам станций кривая максимума ВСПМ лежит ниже середины между нижней моделью LoMdl и верхней моделью HiMdl для периодов 0.02–2 с и близко к LoMdl для периодов 2–10 с. Для горизонтальных каналов на диапазоне периодов 10–100 с большие значения ВСПМ соответствуют мощностям намного выше от нижней модели и для некоторых станций даже превышают верхнюю модель. При решении задач исследования локальной сейсмичности длиннопериодная (10–100 с) составляющая сейсмического сигнала так или иначе исключается.

- Минимальный уровень шума внутри суток отмечается в районе 00 и 18 ч UTC.

- Уровень шума зависит от времени года: наибольшие отклонения наблюдаются для больших периодов (10–100 с) по горизонтальным каналам;

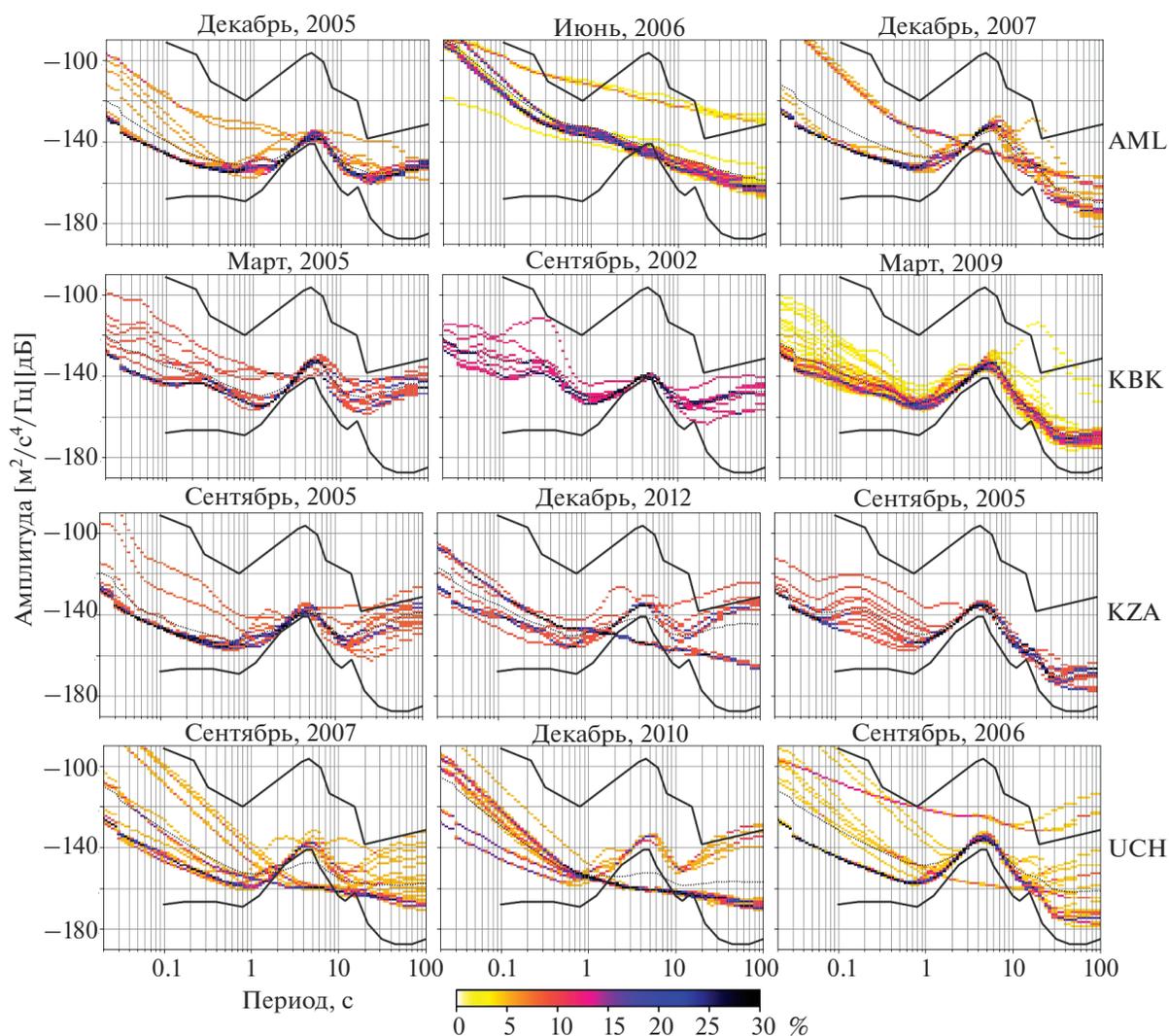


Рис. 10. ВСПМ станций KNET в периоды нестабильного поведения мощности сейсмического шума.

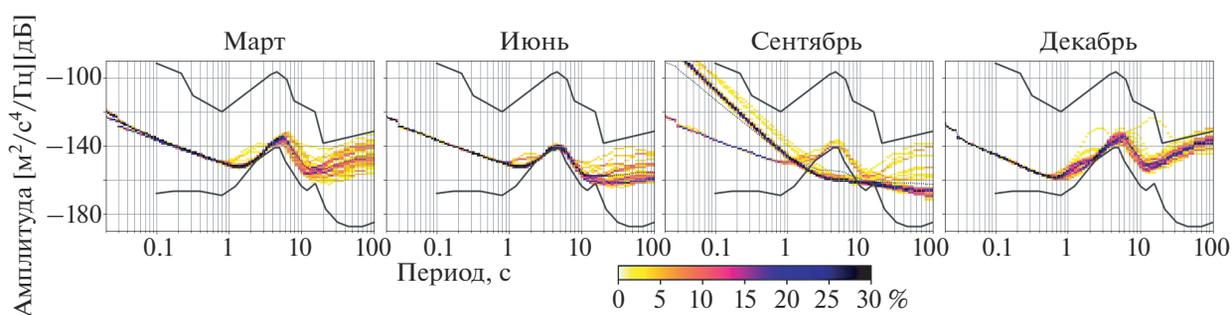


Рис. 11. ВСПМ станции UCH по каналу E для 2009 г.

на периодах 5–10 с уровень шума незначительно меняется по временам года для всех каналов. На вышеуказанных диапазонах периодов в летнее время уровень шума ниже, чем в зимнее. Наиболее чувствительным к изменениям времени года являются станции AML, KZA, UCH и KBK.

- На станциях сети KNET уровень шума от года к году практически не меняется.

Анализ ВСПМ шума станций сети KNET позволил установить, что станции обладают хорошими характеристиками, и данные этой сети (непрерывные волновые формы) могут быть использованы

ны для исследований, предъявляющих требования низкого уровня шума.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Частично исследования выполнены в рамках государственного задания для Научной станции РАН в городе Бишкек, по программе фундаментальных научных исследований IX.128, тема АААА-А19-119020190066-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н. О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума // Физика Земли. 2011. № 3. С. 55–71.

Сычева Н.А., Мансуров А.Н. Оценка станционных поправок для сейсмологической сети KNET на основе анализа отношения спектров Н- и V-компонент сейсмического шума и локальных землетрясений // Геофизические исследования. 2018. № 19. С. 30–48. <https://doi.org/10.21455/gr2018.1-3>

McNamara D.E., Buland R.P. Ambient Noise Levels in the Continental United States // Bulletin of the Seismological Society of America. 2004. V. 94. № 4. P. 1517–1527. <https://doi.org/10.1785/012003001>

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.

Peterson J. Observation and modeling of seismic background noise // U. S. Geol. Surv. Open-File Rept. 93–322. 1993. P. 1–95.

Study of the Seismic Noise Level of KNET Stations

N. A. Sycheva¹, I. V. Sychev², A. N. Mansurov¹, and S. I. Kuzikov^{1, *}

¹Research Station RAS, Bishkek-49, 720049 Kyrgyzstan

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, Koptug ave., 3, Novosibirsk, 630090 Russia

*e-mail: ksi@gdirc.ru

We carried out an assessment of the seismic noise level of stations of the KyrgyzNetwork (KNET) network for 19 years of its operation (1999–2017) in real time. For each station over 3 channels (west-east, north-south, vertical) we selected 15-minute segments of seismic noise with a frequency of 100 Hz according to the seasons (March, June, September, December) and time of day (0, 6, 12 and 18 hours UTC). Probabilistic power spectral density (PPSD) was computed, for each node frequency/period we consider distribution density of seismic signal's power spectral density (PSD) among certain set of waveform segments. Resulting distributions were compared to seismic noise models from Peterson (1993). The minimum presence of stochastic noise for all stations of the KNET network occurs at 00 and 18 hours UTC. The level of seismic noise depends little on the time of year for periods of 2–5 s. Seismic noise is slightly reduced in summer and increases in winter on periods of 5–10 s. On the period 0.02–2 s, the greatest manifestation of noise is observed in September. Within consideration of periods' range of 0.02–10 s (frequency range 0.1–50 Hz) in general KNET stations have good characteristics and may be classified as noiseless seismic stations.

Keywords: KNET, station, channel, seismic records, seismic noise, power spectral density