

УДК 550.34

Особенности временных вариаций микросейсмического шума на сейсмических станциях в Таджикистане

© 2021 г. В.И. Журавлёв, А.А. Лукк

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 28.09.2021 г.

Аннотация. Анализировалась спектральная структура микросейсмического шума в диапазоне частот 0.01–40 Гц в различное время суток и года, зарегистрированного широкополосной аппаратурой на восьми сейсмических станциях Таджикской национальной сейсмической сети в Таджикистане в 2005–2020 гг. Выделено два непересекающихся диапазона частот: «высоко-частотный» (2–40 Гц) и «низкочастотный» (0.01–0.75 Гц) шум, разделённых падением амплитуды шума до 20–30 дБ. Предполагается, что высокочастотный диапазон шума имеет локальную природу, обусловленную экзогенными источниками в виде порывов ветра, сотрясений от мощных водотоков и колебаний уровня крупных водохранилищ, а также в виде техногенных помех за счёт дорожных и карьерных взрывов, работы промышленных предприятий и сотрясений от дорожного трафика. Высокочастотный шум обладает суточной периодичностью, которая отсутствует в низкочастотном шуме. В то же время в обоих частотных диапазонах установлена сезонная периодичность, амплитуда которой достигает 6–7 дБ для высокочастотного шума и примерно 3–5 дБ для низкочастотного шума. При этом сезонные периодичности высокочастотной и низкочастотной составляющих шума являются противофазными. Амплитуда суточной периодичности в вариациях уровня высокочастотного шума максимальна в дневное время и остаётся примерно постоянной в течение 8–10 часов. При этом спад амплитуды шума к вечеру длится дольше, чем более крутой утренний рост. Временные интервалы резкого возрастания и спада интенсивности суточного экстремума коррелируют соответственно с утренними и вечерними сумерками в различное время года. Это отражается в более широкой плоской части спектра максимального уровня шума в летнее время по сравнению с зимним и различиями её уровня до 6 дБ в пользу летнего времени.

Ключевые слова: микросейсмический шум, «высокие» частоты, «низкие» частоты, сейсмические станции, спектры, суточная периодичность, сезонная периодичность, экзогенные и эндогенные источники шума.

Для цитирования: Журавлёв В.И., Лукк А.А. Особенности временных вариаций микросейсмического шума на сейсмических станциях в Таджикистане // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 4. – С. 18–37. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.02>

Введение

В последние годы появилось большое количество публикаций, посвящённых анализу микросейсмического шума в связи с проблемой выделения полезных сейсмических сигналов на уровне помех. Предполагается, что часть полезных сигналов может тонуть в микросейсмическом шуме, что влияет на полноту их регистрации. Особенно это важно при составлении каталогов землетрясений. Последние могут не только обедняться, в основном со стороны слабейших сейсмических событий, но и искажаться в количественном соотношении как в различное вре-

мя суток, так и в различное время года в зависимости от формы возможных соответствующих периодичностей в микросейсмическом шуме.

Последнее обстоятельство может приводить к появлению ложных периодичностей в анализируемых временных рядах чисел землетрясений. Так, например, в работе [Сидорин, 2013] такое явление модуляции анализируемых временных рядов чисел слабых землетрясений сейсмическим шумом из-за его влияния на реальную чувствительность измерительно-регистрирующих каналов предложено называть амплитудной дискриминацией сейсмических волн при обработке сейсмограмм, или шумовой дискриминацией.

Эффект шумовой дискриминации может приводить к возникновению ложных периодичностей, в частности, суточной, недельной, сезонной. Эти периодичности могут быть обусловлены неполнотой регистрации землетрясений, вызванной повышением уровня сейсмического шума в дневное время за счёт как природной (повышение уровня и расход воды в реках, усиление ветра и пр.) [Ананко, Смирнов, 1994; Децереvская, Сидорин, 2005; Журавлёв, Сидорин, 2005а,б], так и антропогенной (например, увеличение интенсивности дорожного трафика, нагрузки промышленной электрической сети и пр.) составляющих [Atef et al., 2009; Журавлёв и др., 2006; Журавлёв, Лукк, 2011, 2012; Сидорин, 2010; Децереvский, Сидорин, 2016]. Ложная годовая периодичность может порождаться более высоким уровнем шума в летнее время [Децереvская, Сидорин, 2005]. В качестве возможных причин сезонных изменений уровня сейсмического шума предполагаются изменения расхода воды в реках, сезонные изменения скорости ветра, изменения характера турбулентности атмосферы [Beauduin, Montagner, 1996; Адушкин и др., 2008; Сидорин, 2004; Ярошевич и др., 2016; Соболев, Закржевская, 2019].

В работе [Zhuravlev, Sidorin, 2021] было выполнено моделирование влияния шума с годовой периодичностью на искусственный каталог землетрясений. Установлено, что при определённых параметрах шума слабые события, магнитудой ниже порога представительности каталога землетрясений, действительно могут иметь сезонную составляющую, которая содержалась в шуме.

Именно под углом зрения возможной обусловленности сезонной периодичности во временных рядах микроземлетрясений их модуляцией микросейсмическим шумом на Гармском геофизическом полигоне нами ранее было выполнено исследование параметров шума на станции «Гарм» [Децереvский и др., 2021]. Было установлено на разных частотных каналах существование значимой сезонной периодичности микросейсмического шума, регистрируемого вертикальной компонентой. При этом форма кривой сезонной периодичности существенно отличалась по фазе и амплитуде в различных частотных диапазонах от 190 с до 47 Гц.

Вместе с тем, в микросейсмическом шуме содержится важная информация о реакции Земли на различные внешние воздействия в виде глобальных процессов в атмосфере и ионосфере, а также в виде локальных воздействий вариаций давления, температуры, силы ветра и уровня

рек и крупных водохранилищ на земную поверхность.

Кроме того, структура микросейсмического волнового поля может быть связана со структурой и геологией земной коры [Орлов, 2011; Горбатиков, Барабанов, 1993; Горбатиков, 2006; 2013; Овсяченко и др., 2011]. Оказалось, что «амплитудно-частотный спектр – одна из важных информативных характеристик микросейсмического процесса, которая очень чувствительна к структурным и геодинамическим условиям геологической среды в районе измерений» [Орлов, 2011, стр. 185]. В работе [Кислов, Гравиров, 2013] проверялись гипотезы о возможности влияния комплекса экзогенных факторов (температура воздуха, ветер, колебания уровня водохранилищ, солнечный прогрев и т.д.) на микросейсмический шум.

Известны также исследования, посвящённые использованию вариаций микросейсмического фона в целях поиска их возможной связи с сильными землетрясениями. Так, в работе [Потапов и др., 1997] рассматривалось возможное воздействие штормовых микросейсм на проявление землетрясений. Показывалось, что во время штормов на Тихом океане в районе Курильских островов и волнений на озере Байкал уменьшается число слабых землетрясений в верхних горизонтах земной коры.

Исследования в направлении возможного использования микросейсм для целей прогноза сильных землетрясений выполнены А.А. Любушиным. Им разработана принципиально новая технология прогнозирования сильных землетрясений магнитудного диапазона M_w порядка 7 и более, основанная на использовании непрерывных записей сейсмического шума на сети широкополосных станций [Любушин, 2008; 2011; 2013]. Вместе с коллегами А.А. Любушин применил эту технологию к Дальневосточному региону (Камчатка, Командорские острова и остров Парамушир) [Любушин и др., 2013; 2015; Касимова, Любушин, 2012; Касимова и др., 2018; Копылова и др., 2021]. В основу сейсмопрогностического алгоритма положены установленные авторами характерные особенности поведения статистик микросейсмического шума на стадиях подготовки местных землетрясений 2011–2016 гг. с $M_w=6.9-8.3$, соответствующие аналогичным изменениям, полученным ранее перед землетрясениями в Японии с $M_w=8.3$ и 9.0 в работе [Любушин, 2011].

Упомянутые выше работы заставляют рассматривать микросейсмический шум не только как

мешающий фактор при регистрации полезных сейсмических сигналов, но и как одно из проявлений внутренней жизни планеты, позволяющее изучать процессы внутри земной коры, которые могут находить своё отражение в изменениях статистических свойств микросейсмического шума. Именно потому самостоятельное изучение структуры микросейсмического шума представляется актуальной задачей.

В отличие от работы [Дещеревский и др., 2021], данное исследование посвящено анализу структуры микросейсмического шума в широком частотном диапазоне, который доступен для часового осреднения по данным восьми сейсмических станций Таджикской национальной сейсмической сети, расположенных на территории Таджикистана. При этом кроме вертикальной компоненты рассматривалась также горизонтальная компонента. Анализировались временные ряды шума в диапазоне частот от 0.01 до 47 Гц при 81 фиксированной частоте, доступной для используемых в системе IRIS широкополосных каналов. Фактически такие данные представляют собой спектры шума с шагом в половину минуты и осреднением одна минута. Таким образом, общий объём исходных данных, рассматриваемых в настоящей работе, был значительно выше использованного ранее в работе [Дещеревский и др., 2021]. Это позволило более детально рассмотреть характеристики микросейсмического шума в зависимости от его частоты, времени суток, времени года и условий установки регистрирующей аппаратуры.

Система наблюдений

В настоящее время, благодаря наличию обширной базы данных регистрации микросейсмического шума, созданной на базе IRIS

на Интернет-сервисе MUSTANG [MUSTANG ..., 2021], такие данные находятся в свободном доступе. Тем самым появляется возможность достаточно подробно исследовать многие параметры шума. Именно этим сервисом мы и воспользовались для получения исходной информации для последующих расчётов.

В настоящей работе рассматриваются данные регистрации микросейсмического шума на сейсмостанциях Таджикской национальной сейсмической сети, расположенных на территории Таджикистана [Гармский ..., 2004]. В отличие от работы [Дещеревский и др., 2021], в настоящем исследовании использовались все станции, расположенные на территории Таджикистана. При этом привлекались к анализу данные шума по трём каналам. Список этих станций приведён в таблице, а на рис. 1 показано их расположение.

Использовались часовые осреднения шума, что при относительно большом наборе частот (от 0.005256 до 46.9506 Гц) позволяло оценивать форму спектра шума. Поскольку используемые станции располагались в разных районах с различным уровнем шума: в пределах промышленных районов, вблизи водохранилищ, в районах с высокой сейсмичностью или практически её полного отсутствия, то исходные ряды имели шаг дискретизации исходных данных в 0.5 час и осреднение в 1 час [Casey et al., 2018; McNamara, Boaz, 2006].

Регистрация велась на вертикальном канале ННЗ и двух горизонтальных каналах ННН и ННЕ с использованием сейсмометров Trillium 40, 40 s, 1553 V/m/s-HRD-24, gain 1, 100 [Metadata ..., 2021].

Пример технических характеристик, включая зависимость чувствительности от частоты, согласно приведённой выше ссылке, показан на рис. 2.

Таблица. Список используемых станций Таджикской национальной сейсмической сети

Код станции	Название		Координаты		Высота, м
	английское	русское	φ, °N	λ, °E	
CHGR	Chuyangaron	Чуангарон	38.656898	69.158203	1049
CHRDR	Chorukh Dayron	Чорух-Дайрон	40.386700	69.670998	580
DUSH	Dushanbe	Душанбе	38.568802	68.780998	786
GARM	Garm	Гарм	39.000000	70.316002	1305
GEZN	Gezan	Гезан	39.283298	67.715401	1485
IGRN	Igron	Игрон	38.220299	69.326599	1284
MANEM	Manem	Манем	37.529999	71.660004	2312
SHAA	Shaartuz	Шаартуз	37.562000	68.122803	868

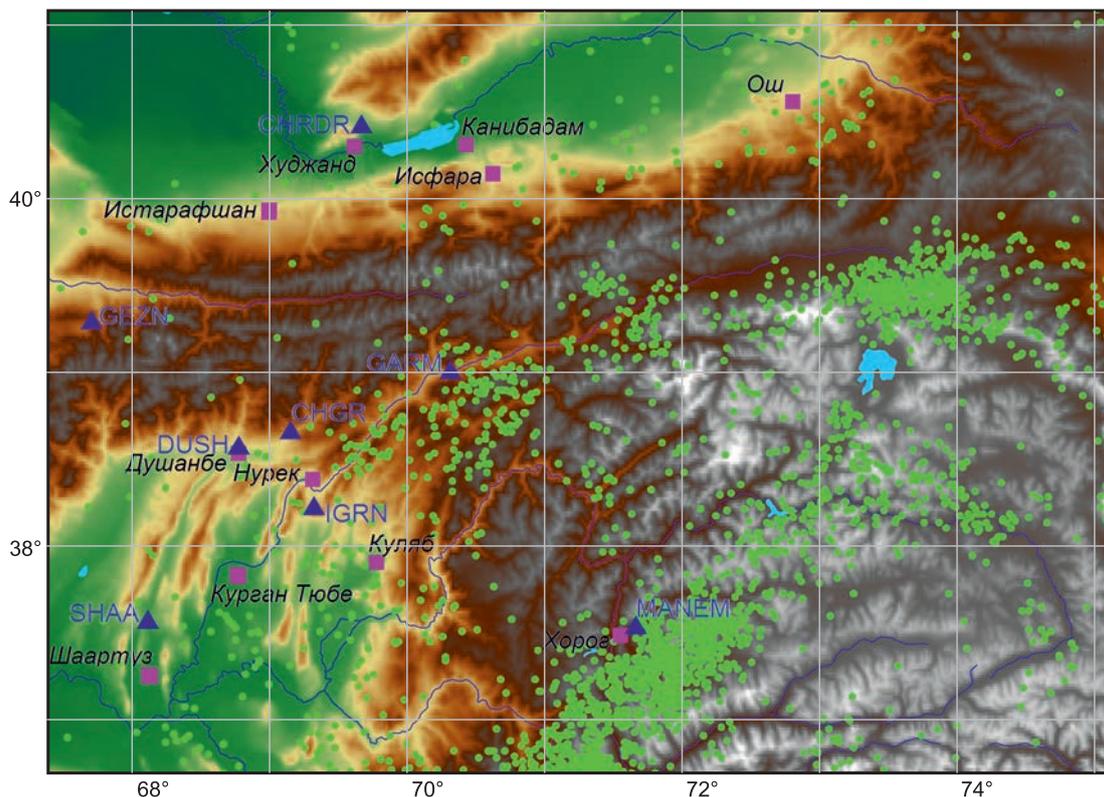


Рис. 1. Сеть сейсмических станций в Таджикистане и текущая сейсмичность с магнитудами $M \geq 3$ за время наблюдения цифровой сети станций с 2005 по 2020 г. согласно [Search ..., 2021].

Землетрясения показаны зелёными кружками. Станции отмечены синими треугольниками, крупные населённые пункты – розовыми квадратиками. Синими линиями показаны основные реки по данным пакета GMT

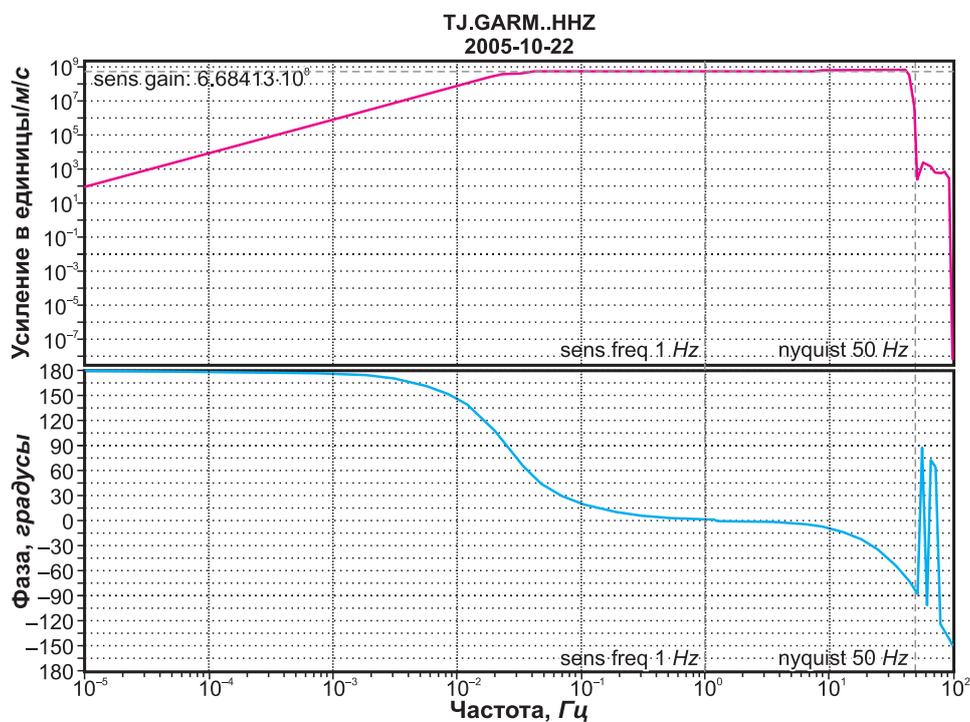


Рис. 2. Пример амплитудно-частотной характеристики вертикального канала (HHZ) регистрации шума на станции «Гарм».

Верхний график по вертикали – усиление в единицы/(м/с), нижний график – фаза в градусах.
По горизонтали – частота в герцах

Условия установки регистрирующей аппаратуры

К сожалению, на сайте системы IRIS нет сведений об условиях установки сейсмических приборов кроме указаний о высоте расположения станций, сведения о которой были приведены в таблице. Информацию о времени открытия станций и условиях установки регистрирующей аппаратуры на некоторых из них мы заимствовали из статьи [Негматуллаев, 2012].

CHGR. Открыта 05.11.2007 года. Расположена в шурфе, вырытом на вершине холма в широкой долине на берегу реки Кафирниган.

CHRDR. Открыта 22.07.2008 года. Установлена в посёлке городского типа, расположенном в предгорьях хребта Моголтау. На небольшом удалении от станции находятся Кайраккумское водохранилище и крупная ГЭС на реке Сырдарья. При посёлке находится рудник по добыче цветных металлов.

DUSH. Установлена 24.10.2005 года. Закрыта 16.08.2007 г. из-за слишком высокого уровня помех, затрудняющих регистрацию полезных сейсмических событий. Расположена в центре столицы Таджикистана г. Душанбе в подвальном помещении. Уровень антропогенных помех довольно высок. В городе работают кирпичный, цементный и шиферный заводы, а также другие предприятия, выпускающие стройматериалы и железобетонные конструкции и изделия. Крупнейшим промышленным предприятием является арматурный завод, производящий чугунное литьё, водо-, газо-, и нефтепроводную арматуру. На расстоянии 2–3 км от станции расположены аэропорт и железнодорожная станция. Зима сравнительно короткая, сопровождается обильными осадками. Сейсмичность города относительно высока и по нормам строительства оценивается на уровне 7–8 баллов по шкале MSK.

GARM. Открыта 05.10.2005 года. Расположена в глубокой штольне на берегу бурной реки Сурхоб, пройденной в гранитном массиве горного поднятия Кабудкрым, расположенного в системе южного Тянь-Шаня. Удалена от ближайшего посёлка Гарм на расстояние около 6 км. Дорожный трафик низкий. Фон антропогенных помех минимальный по сравнению с остальными станциями рассматриваемой группы станций. Сейсмичность крайне высокая. В ближайшей окрестности станции зарегистрировано шесть сейсмических событий с магнитудами $M > 6.1$. Известно землетрясение с магнитудой $M = 7.7$ (Хаитское 1949 г.) на расстоянии около 70 км от места установки станции.

GEZN. Открыта 02.11.2006 года. Расположена на скальном основании в отрогах Зерафшанского хребта.

IGRN. Установлена 18.11.2006 года. На небольшом удалении от станции находятся крупное Нурекское водохранилище и мощная Нурекская ГЭС на реке Вахш. Время от времени здесь производятся мощные водосбросы, существенно повышающие микросейсмический шум в широкой окрестности ГЭС. Сотрясения от работы Нурекской ГЭС и водосбросов регистрировались на расстояниях до 10 км в виде повышения уровня микроземлетрясений ($M < 2$) [Мирзоев, Негматуллаев, 1990].

MANEM. Установлена 18.10.2008 г. в неглубокой штольне, пройденной в кристаллическом массиве горного Бадахшана вблизи впадения реки Гунт в реку Пяндж. Станция расположена на окраине г. Хорога, расположенного на высоте около 2300 м. Крупные промышленные предприятия в городе отсутствуют. Дорожный трафик невысок. Сейсмичность крайне высокая. Землетрясения возникают как в пределах земной коры, так и в мантии до глубин 200–250 км.

SHAA. Открыта 22.10.2005 года. Расположена в широкой долине реки Вахш (притока Пянджа) в 2 км от железнодорожной станции в пределах посёлка городского типа с населением около 20 тыс. человек. Приборы установлены в неглубокой штольне, пройденной в известняковом массиве. Сейсмичность в окрестности станции невысокая, сильные землетрясения неизвестны.

Методика

Исходные скачанные с WWW-сервиса MUSTANG страницы (html) имеют формат, затрудняющий их дальнейшее использование в вычислениях [Casey et al., 2018]. Поэтому они были импортированы в таблицы типа dbf-файлы со столбцами: время, частота, амплитуда в децибелах. В последующем анализе использовались именно эти величины, так как после пересчёта децибел в реальные амплитуды распределение последних оказывалось сильно отличающимся от нормального и имело большое число отскоков. Каждый канал каждой станции возвращается упомянутым выше интернет сервисом в виде html-страницы, имеющей в названии код станции из приведённой выше таблицы и тип канала: вертикальный (NHZ), север–юг (HNN), восток–запад (HNE). Далее содержание страницы переносилось в текстовый файл, а из него – в dbf-файлы. Вся обработка указанных файлов произведена на языке Visual FoxPro, позволяющем с помощью SQL-операторов вычислить средние величины от любого группированного

параметра за интервалы: час, сутки, день недели и т.д. Вычислялись следующие параметры шума: средние за каждый час внутри суток значения спектра шума, вариации спектра в различное время суток, средние внутрисуточные спектры за каждый сезон (зима – декабрь–февраль, весна – март–май, лето – июнь–август, осень – сентябрь–ноябрь), среднесуточный ход амплитуды спектра на характерной частоте, вариации суточного хода на характерной частоте в зависимости от сезона, среднечасовые значения внутри недели.

Для всех рассчитываемых параметров вычислялась также и ошибка по стандартной формуле вычисления дисперсии. Далее будут обсуждаться только значимые отличия от средних значений оцениваемых параметров, превышающие величину ошибки минимум в три раза.

Пример исходного ряда микросейсмического шума по трём компонентам на станции «Гарм» (GARM) за период времени 01.01.–09.03.2006 г. приведён на рис. 3.

Приведённые временные ряды микросейсмического шума длиной 68 суток прерываются тремя

пропусками регистрации длиной от 10 до 80 часов. При этом общая длина ряда составила около 802 суток при общем числе точек 4244139. Такое число точек даёт возможность получить довольно гладкие графики, несмотря на обилие в исходных данных дефектов и пропусков. Причина как дефектов, так и пропусков в основном связана с работой аппаратуры – потерями питания, связи, а также с техническими помехами типа работы техники рядом с установленной аппаратурой.

Размах амплитуд колебаний и положение их пиковых значений примерно одинаковы по всем трём компонентам. Детального поляризационного анализа мы не проводили. Поскольку время загрузки данных было очень велико, мы ограничились на некоторых станциях анализом шума только на вертикальной компоненте.

Примеры исходного ряда микросейсмического шума, зарегистрированного вертикальной компонентой за период времени 01.01.–09.03.2006 г. на станциях «Гарм» с минимальным уровнем шума и «Душанбе» с максимальным уровнем шума, приведены на рис. 4.

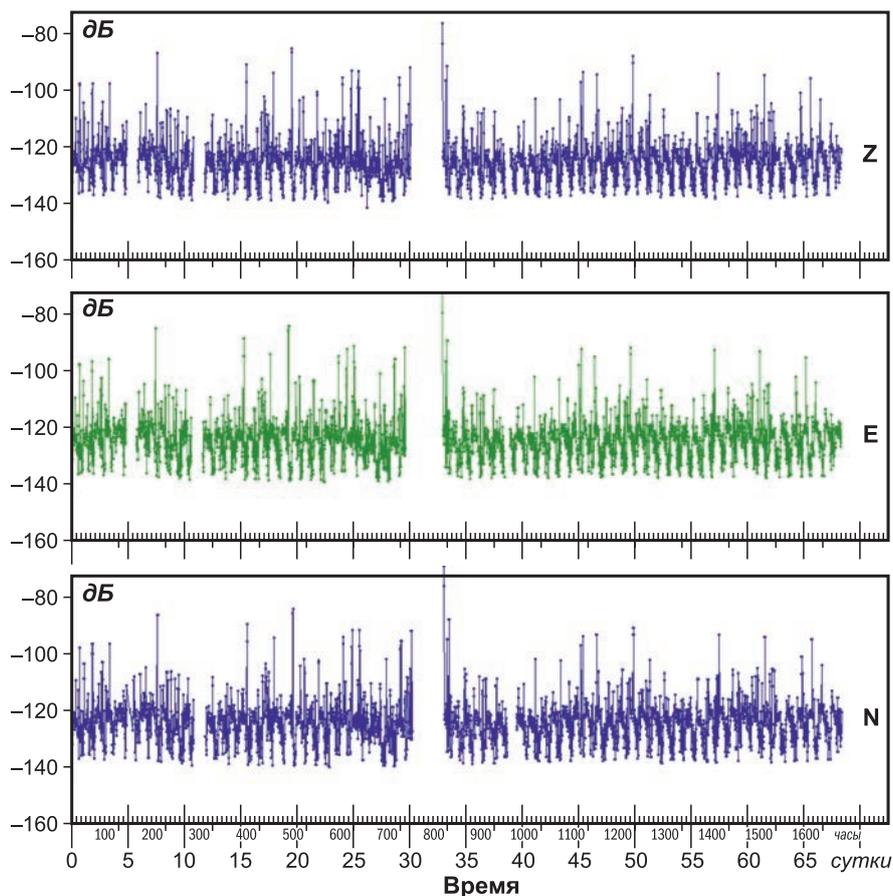


Рис. 3. Пример исходного ряда микросейсмического шума по трём компонентам на станции «Гарм» (GARM) за период времени 01.01.–09.03.2006 г. Дискретизация опроса – один час

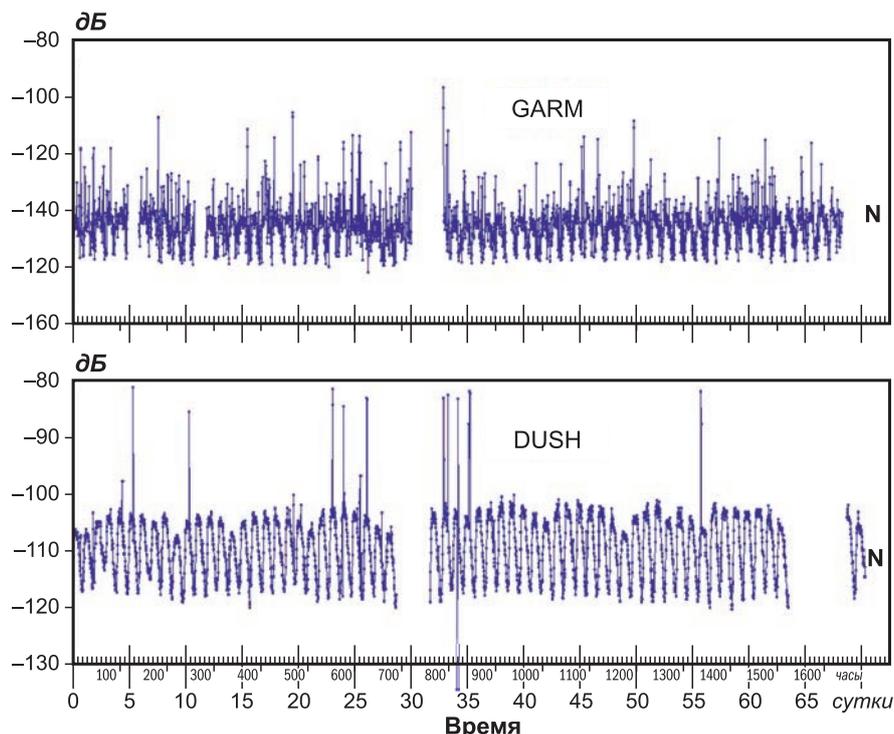


Рис. 4. Примеры исходных рядов микросейсмического шума за период времени 01.01.–09.03.2006 г. на станциях «Гарм» (GARM) и «Душанбе» (DUSH)

Средний фон шума довольно стабилен на отметке приблизительно в -125 дБ со средними вариациями около 10 дБ для станции «Гарм» с минимальным уровнем шума и в -112 дБ со средними вариациями около 15 дБ для станции «Душанбе» с максимальным уровнем шума. В обоих случаях хорошо просматривается суточная периодичность в амплитуде шума.

Внутрисуточные среднечасовые спектры микросейсмического шума

Для всех временных рядов амплитуды шума на вертикальной компоненте для всех используемых станций, аналогичных приведённым на рис. 4, рассчитывались внутрисуточные среднечасовые спектры. Примеры таких спектров, рассчитанных указанным выше образом для трёх временных рядов микросейсмического шума на станциях «Гарм» (GARM), «Шаартуз» (SHAA) и «Душанбе» (DUSH), приведены на рис. 5.

Общей особенностью таких спектров для всех станций является участок быстрого роста амплитуды на частотах от 1 до 6 Гц, переходящий в относительно плоский участок вплоть до примерно 40 Гц. Рост шума на частотах выше 40 Гц скорее связан с влиянием эффекта Найквиста, чем с геодинамическими процессами. Протяжённость плоского участка спектра и его наклон несколько варьируются от станции к станции.

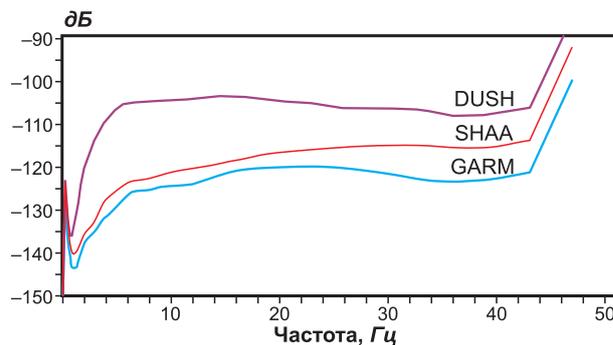


Рис. 5. Среднечасовые спектры микросейсмического шума, рассчитанные для трёх станций – «Гарм» (GARM), «Шаартуз» (SHAA) и «Душанбе» (DUSH)

Отметим, что резкие изменения амплитуды спектра на низких частотах (ниже 1 Гц) не являются следствием влияния частотной характеристики канала регистрации, поскольку столбовая часть характеристики продолжается в сторону низких частот вплоть до 0.02 Гц (см. рис. 2).

Следует предварительно обсудить резкий провал спектра в диапазоне частот от 0.05 до 1 Гц. Эта особенность имеет глобальный характер и является разграничительной областью между низкочастотными и высокочастотными микросейсмами, которые, по-видимому, имеют

различный генезис. На это ранее указывалось и в работе [Дещеревский и др., 2021].

Считается, что область частот от 0.1 до 0.3 Гц определяется в основном глобальными «штормовыми» микросейсмами (см., например, [Орлов, 2011]). А в высокочастотной области спектра (1.5–40 Гц) значительный вклад в амплитуду колебаний, наряду с естественными источниками шума, вносят техногенные помехи. Разделяющий эти области спектра микросейсмического шума минимум амплитуды на частотах 0.7–1.4 Гц оказывается наиболее стабильным как при сейсмических бурях, так и при техногенных помехах. В качестве одного из возможных примеров такого вида спектра в другом регионе можно указать на амплитудно-частотный спектр для Воронежского кристаллического массива (ВКМ), заимствованный нами из работы [Орлов, 2011] и приведённый здесь на рис. 6.

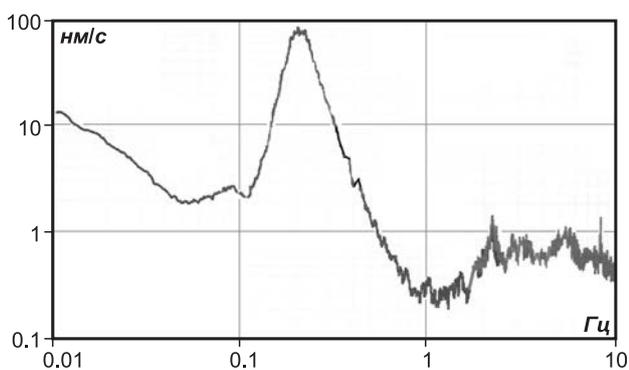


Рис. 6. Типичный для территории Воронежского кристаллического массива амплитудно-частотный спектр вертикальной компоненты микросейсмического шума (модифицированный рис. 1 из [Орлов, 2011])

В области частот выше 1.5 Гц происходит возрастание амплитуды спектра примерно до 5–6 Гц, что согласуется со спектрами на рис. 5.

Следует обратить внимание на особенности плоской части спектров на различных станциях. Мы предполагаем, что это является знаком наличия или отсутствия в спектре шума существенной антропогенной составляющей. Так станция «Гарм» (GARM), расположенная в глубокой штольне на значительном удалении от каких-либо крупных населённых пунктов, характеризуется наиболее низким вкладом антропогенной составляющей в микросейсмический шум в её окрестности, что проявляется в наиболее низком уровне плоской части спектра шума на рис. 5. При этом плоская часть спектра микросейсмического шума для станции «Душанбе» (DUSH) расположена на самом высоком уровне,

т.к. она находится в подвальном помещении в центре столицы Таджикистана Душанбе с наиболее высоким антропогенным уровнем шума по сравнению с остальными станциями сейсмической группы. Промежуточный уровень занимает плоская часть спектра для станции «Шартуз» (SHAA), расположенной вблизи населённого пункта, с пониженным уровнем техногенного шума.

Вариации спектра шума в различное время суток

Рассмотрим поведение амплитуды спектра в различное время суток для ночного и дневного времени на относительно плоском участке спектра в диапазоне частот от 6 до 40 Гц. Для этого были рассчитаны средние значения шума в зависимости от частоты для всех станций в пределах различных трёхчасовых временных интервалов в течение суток с шагом осреднения 1 час (0–2, 3–5, 6–8, 9–11, 12–14, 15–17, 18–20, 21–23 час). Примеры таких графиков для станций «Гарм» (GARM) и «Манем» (MANEM) приведены на рис. 7. Наблюдаются заметные различия амплитуды для ночного и дневного времени на плоском участке спектра. Если в первой половине дня графики 3 и 4 (с 6 до 11 час) фактически сливаются, то во второй половине дня график 7 (вечер) отличается как от графиков 5 и 6 (дневное время), располагаясь ниже их, так и от графика 8 (ночное время), располагаясь выше него. Приведённые на рис. 7 примеры спектров типичны и для остальных рассматриваемых здесь станций. Отмечаются лишь более тонкие различия в виде локальных наклонов плоской части спектра и небольших вариаций её уровня. Например, если для станции «Гарм» наиболее резкий рост амплитуды спектра до уровня плоской части наблюдается в диапазоне частот 4–16 Гц, то для станции «Манем» это происходит в диапазоне частот 2–12 Гц.

Вариации спектра шума в различное время года

Рассмотрим возможную связь вариаций спектров шума с временами года — зима, весна, лето и осень. На рис. 8 приведены такие спектры для станции «Гарм», которые характерны и для большинства других станций.

Общей особенностью таких спектров является изменение уровня плоской части спектра в зависимости от времени года. Шум летом примерно на 6–7 дБ выше, чем зимой. Однако, в более мелких деталях поведение шума на разных

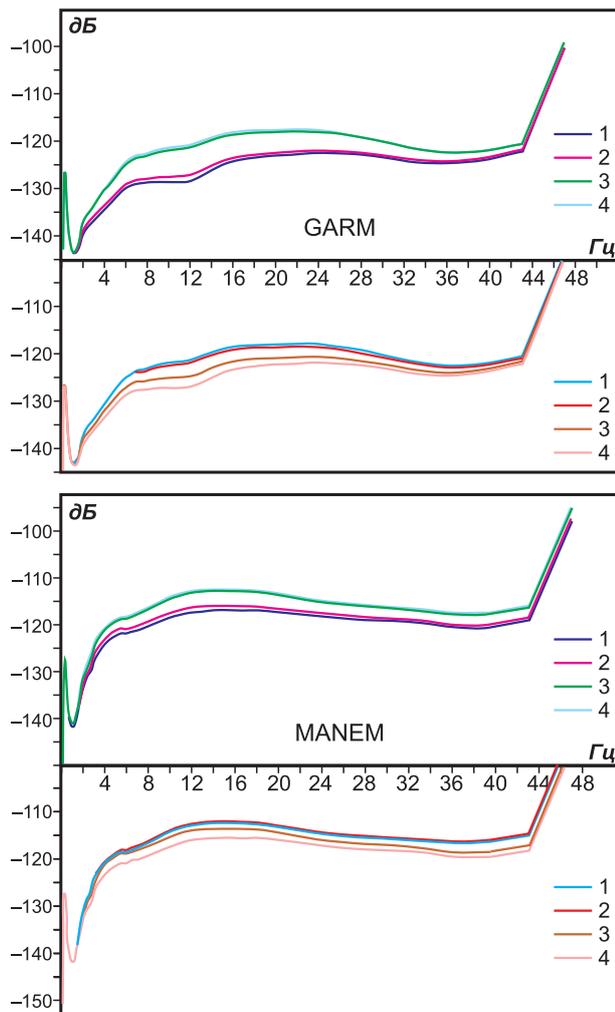


Рис. 7. Поведение осреднённых по трёхчасовым временным интервалам внутри суток спектров шума на станциях «Гарм» (GARM) и «Манем» (MANEM).

1 – от 0 до 2 час; 2 – от 3 до 5 час; 3 – от 6 до 8 час;
4 – от 9 до 11 час; 5 – от 12 до 14 час; 6 – от 15 до 17 час;
7 – от 18 до 20 час; 8 – от 21 до 23 час

станциях несколько различается как по уровню и наклону плоской части спектра, так и уровнем плоской части спектра в осенне-зимнее и весенне-летнее время. Если вид спектров для станции «Игрон» практически идентичен таковым для станции «Гарм», то для других станций наблюдаются более заметные отличия.

Так, например, для станции «Гезан» отмечается практически полное совпадение спектров в осенне-зимнее против весенне-летнего времени с перепадом уровней плоской части спектра всего лишь в 2 дБ. Максимальный уровень плоской части спектра составляет -127 дБ в весенне-летнее время, что на 7 дБ ниже уровня плоской части спектра в летнее время для «Гарма», показанной на рис. 8. Для станции «Шаартуз» разница амплитуд на плоском участке спектра в зависимости

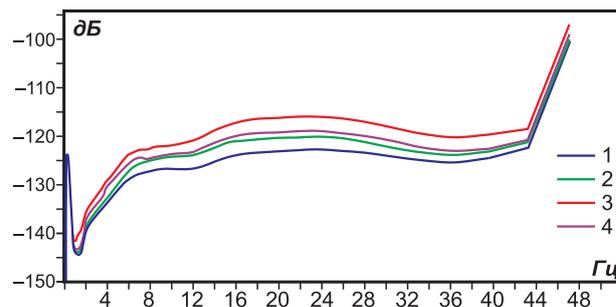


Рис. 8. Спектры шума на станции «Гарм» в различные сезоны года.

1 – зима (декабрь–февраль), 2 – весна (март–май), 3 – лето (июнь–август), 4 – осень (сентябрь–ноябрь)

от сезона самая большая, а шум весной, в отличие от «Гарма», превышает шум летом. Мы не можем пока объяснить эту особенность спектров, но, возможно, в этом повинны интенсивные полевые работы весной в этом сельскохозяйственном районе. Для станции «Манем» на частотах выше 25 Гц наблюдается самая большая разница амплитуд спектра в отличие от других станций. На станции «Чорух-Дайрон» шум летом превышает таковой для станции «Гарм» примерно на 5 дБ, в то время как минимального уровня он достигает осенью, а не зимой. При этом, различия уровней соответствующих плоских частей не превышает 4 дБ. Пример указанных данных для станции «Чорух-Дайрон» приведён ниже на рис. 9.

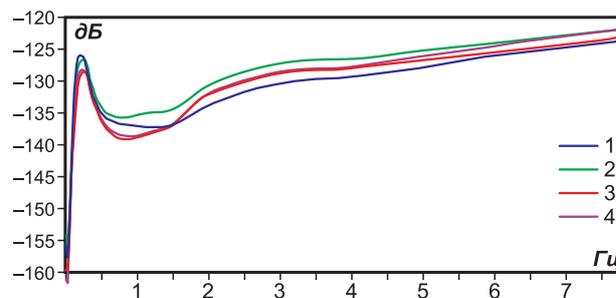


Рис. 9. Спектры шума на станции «Чорух-Дайрон» в различные сезоны года.

1 – зима – синий цвет (декабрь–февраль), 2 – весна – зелёный цвет (март–май), 3 – лето – красный цвет (июнь–август), 4 – осень – коричневый цвет (сентябрь–ноябрь)

Можно было ожидать, что на форму и уровень спектров шума в различное время года могут оказывать влияние крупные водохранилища, вблизи которых располагаются некоторые станции, поскольку считается, что микросейсмический шум в окрестности крупных водохранилищ должен быть выше, чем в отсутствии таковых, за

счёт колебаний обширной водной поверхности, вносящих дополнительный вклад в микросейсмический шум [Лотанов, 2009]. Это может быть обсуждено в связи со станциями «Чорух-Дайрон» и «Игрон», расположенными соответственно вблизи Кайраккумского и Нурекского водохранилищ. Но, согласно приведённому выше описанию спектров для этих станций, какой-либо прямой связи с водохранилищами в данном случае не наблюдается, хотя в нашем распоряжении не было данных об уровне воды и сброса в водохранилищах.

Поскольку наиболее резкие различия по амплитуде спектра наблюдаются на плоском участке в середине рассматриваемого диапазона частот как для суточных, так и для сезонных спектров, который попадает на плоский участок частотной характеристики регистрирующей аппаратуры (см. рис. 2), дальнейший анализ временных рядов микросейсмического шума будет осуществляться нами лишь для частоты 15.2219 Гц , примерно в середине плоского участка спектра, которую мы принимаем за характерную.

Свойства среднесуточных вариаций по станциям

На рис. 10 для всех станций приведены суточные изменения амплитуды частоты 15.2219 Гц микросейсмического шума, построенные по среднечасовым данным шума за весь временной интервал в зависимости от локального времени на каждой станции.

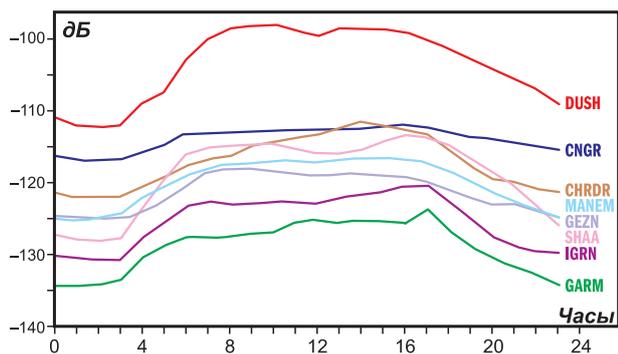


Рис. 10. Среднее суточное изменение амплитуды шума по среднечасовым данным на частоте 15.2219 Гц по локальному времени для всех станций

При построении графиков, приведённых на рис. 10, использовалось не поясное время Таджикистана, а локальное время для каждой станции. Для пересчёта суточных вариаций в локальное время из времени Гринвича использованы

имеющиеся в исходных данных фактические значения долготы каждой станции, приведённые в таблице.

Приведённые ряды имеют общие особенности, в частности, амплитуда шума больше днём и уменьшается ночью. Однако, кроме этих общих особенностей имеются и различия. Так, например, амплитуда шума на станции «Душанбе» — самая большая. Поэтому данная станция проработала всего три года и в дальнейшем была закрыта по причине затруднительной регистрации землетрясений, сигналы от которых тонут в шуме. Амплитуды шума в пределах плоской части минимальны для станций «Гарм» (GARM), «Игрон» (IGRN), «Шаартуз» (SHAA) и «Манем» (MANEM), которые преимущественно установлены в штольнях. При этом абсолютный уровень плоской части кривой является минимальным на станции «Гарм», установленной в наиболее глубокой штольне на расстоянии около 100 м от входа.

Поведение спектра для станции «Чуангарон» отличается от общей закономерности. Для этой станции различия уровня шума днём и ночью минимальны по сравнению с другими станциями. Для станций GARM и IGRN особенностью является их несимметричная форма графика для утра и вечера. Спад амплитуды шума вечером длится дольше, чем его рост утром. При этом шум максимален около полудня. Возможно, этот эффект обусловлен прогревом почвы и воздуха и связанным с этим возрастанием ветровых помех. Эта гипотеза может быть в дальнейшем проверена экспериментальными наблюдениями. Для станций «Душанбе» (DUSH) и «Шаартуз» (SHAA), где предполагается наибольший вклад в микросейсмический шум антропогенных помех в силу их расположения в промышленных центрах, в середине дня (11–14 час) отмечается понижение уровня шума. Следуя информации, приведённой в [Atef et al., 2009], можно предположить, что это понижение уровня шума, хотя бы отчасти, обусловлено обеденным перерывом в работе предприятий и дорожном трафике, а также за счёт изменения мощности потребления электроэнергии в это время.

Наличие недельной модуляции шума в промышленных районах

Понижение уровня шума около полудня хорошо просматривается и на недельном ходе суточной периодичности шума (рис. 11).

Кроме того, ещё одним подтверждением возможности антропогенного влияния на интенсивность шума явилось обнаружение очевидного

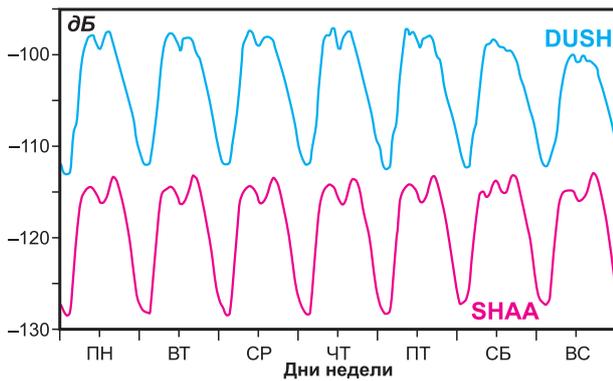


Рис. 11. Среднечасовые амплитуды шума внутри дней недели на станциях «Душанбе» и «Шаартуз»

уменьшение максимальной амплитуды в субботу и воскресенье для станции «Душанбе» (DUSH) в отличие от менее шумной станции «Шаартуз» (SHAA).

Изменения формы суточной вариации шума в различные времена года

Рассмотрим изменения характера суточной периодичности микросейсмического шума в различные времена года. Такие графики в виде среднесуточного хода шума на частоте ~ 15 Гц приведены для станции «Гарм» на рис. 12.

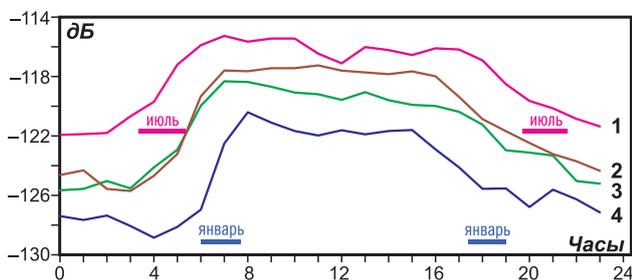


Рис. 12. Средний суточный ход амплитуды шума на частоте 15.2219 Гц в различное время года для станции «Гарм».

Горизонтальными линиями показаны интервалы утренних и вечерних сумерек в январе (синий цвет) и июле (красный цвет). 1 – лето (июнь–август); 2 – осень (сентябрь–ноябрь); 3 – весна (март–май); 4 – зима (декабрь–февраль)

Наблюдаются ярко выраженные сезонные изменения формы среднесуточной периодичности шума. Экстремум суточной периодичности в июне-августе заметно шире такового в декабре-феврале. А его максимальная амплитуда примерно на 6 дБ больше в июне-августе по сравнению с декабрём-февралём. Интересно, что внутрисуточные временные интервалы резкого возрастания и спада интенсивности обсуждаемого экстремума неплохо коррелированы соответствен-

но с утренними и вечерними сумерками в летнее (июль) и зимнее (январь) время. Для этого были использованы доступные календарные данные о длине светового дня. Аналогичные вариации формы среднесуточной периодичности шума наблюдаются и для всех остальных станций рассматриваемой сейсмической группы.

Изменения амплитуды микросейсмического шума в низкочастотном диапазоне в различное время суток и года

Поведение формы спектра микросейсмического шума в области низких частот (0.01–1.1 Гц) внутри суток для станции «Гарм» (GARM) приведён на рис. 13 (см. график 1). Как видим, все спектры в различное время суток одинаковы. То есть, в рассматриваемом низкочастотном диапазоне отсутствует зависимость амплитуды (уровня) шума от времени суток. Это полностью можно отнести и ко всем остальным рассматриваемым здесь станциям сети, так как аналогичные графики рассчитаны для каждой из станций. Вместе с тем, амплитуда и форма спектра шума меняются в зависимости от времени года (рис. 13, график 2). Зимой амплитуда спектра вблизи частоты 0.2 Гц максимальна, а летом этот экстремум заметно уменьшается. Такое соотношение сохраняется и для остальных семи станций.

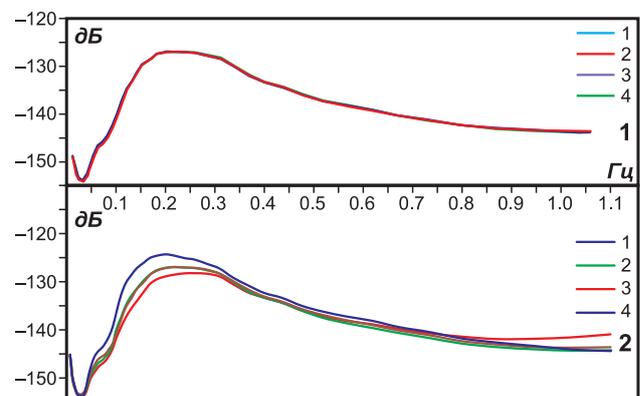


Рис. 13. Вариации формы спектра в области низких частот (0.01–1.1 Гц) внутри суток (1) и в различное время года (2) для станции «Гарм».

(1) 1 – 0–6 час; 2 – 6–12 час; 12–18 час; 18–24 час;
(2) 1 – зима; 2 – весна; 3 – лето; 4 – осень

Следует отметить, что такое сезонное поведение спектров шума в низкочастотной области (рис. 13, график 2) является противофазным по сравнению со спектрами шума в высокочастотном диапазоне (от 0.75–1.0 Гц и выше), в котором амплитуда плоской части спектра максимальна

летом и минимальна зимой (см. рис. 7). Это обстоятельство отмечалось ранее при анализе данных станций «Гарм» с суточными осреднениями амплитуды шума как проявление различного генезиса низкочастотного ($0.01\text{--}0.75\text{ Гц}$) и высокочастотного ($1\text{--}44\text{ Гц}$) микросейсмического шума [Децеровский и др., 2021]. Более подробно сезонные вариации максимальной амплитуды низкочастотной части спектра можно проследить на рис. 14.

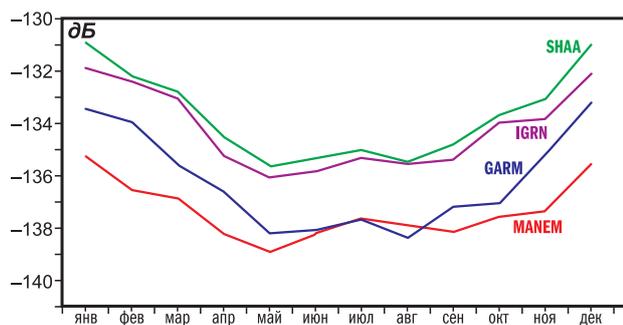


Рис. 14. Сезонные вариации максимальной амплитуды низкочастотной части ($0.01\text{--}0.75\text{ Гц}$) спектра

На всех четырёх спектрах максимальная амплитуда приходится на декабрь-январь (зима), а минимальная — на май-август (лето), что характерно для «низкочастотного» шума и в других точках земного шара. Пример временных рядов шума в диапазоне частот от 0.1 до 0.308 Гц для станции ANMO в Альбукерке, Нью-Мехико, США приведён на рис. 15. За пределами этого частотного диапазона такая периодичность пропадает.

Обсуждение результатов

Мы проанализировали поведение микросейсмического шума в диапазоне частот $0.01\text{--}40\text{ Гц}$

в различное время суток и в течение года, зарегистрированного широкополосной аппаратурой на восьми сейсмических станциях в Таджикистане. Данные получены с помощью Интернет-сервиса IRIS MUSTANG.

Установлено, что наиболее низкий уровень шума на всех сейсмических станциях наблюдается в окрестности частоты 1 Гц . На этой частоте падение уровня спектра шума достигает на разных станциях $20\text{--}30\text{ дБ}$. Узкая область понижения шума разделяет регистрируемый шум на две части — «высокочастотную» ($2\text{--}40\text{ Гц}$) и «низкочастотную» ($0.01\text{--}0.75\text{ Гц}$). Следует заметить, что этот узкий частотный диапазон (1 Гц) с устойчивым низким уровнем шума, слабо подверженному влиянию штормовых микросейсм и локальных высокочастотных источников шума естественного и техногенного происхождения, используется в сейсмологии при разработке специальной высокочувствительной аппаратуры (с усилением вплоть до $1\,000\,000$) для выделения слабых сейсмических колебаний на фоне микросейсмического шума. Подобная аппаратура была разработана в Комплексной сейсмологической экспедиции ИФЗ РАН для обнаружения колебаний от испытательных ядерных взрывов на полигонах «Невада» в США и «Лобнор» в Китае на сейсмических станциях «Гарм» и «Талгар», расположенных на больших расстояниях от этих полигонов.

Разделение шума на низкочастотную и высокочастотную составляющие обусловлено принципиально различным поведением шума в двух частотных диапазонах. Во-первых, высокочастотный шум обладает хорошо выраженной суточной периодичностью, которая проявляется даже визуально в исходных временных рядах шума (рис. 3). При этом такая периодичность полностью отсутствует в низкочастотном шуме (рис. 13 график 1). Во-вторых, в обоих частотных диапазонах наблюдаются существенные

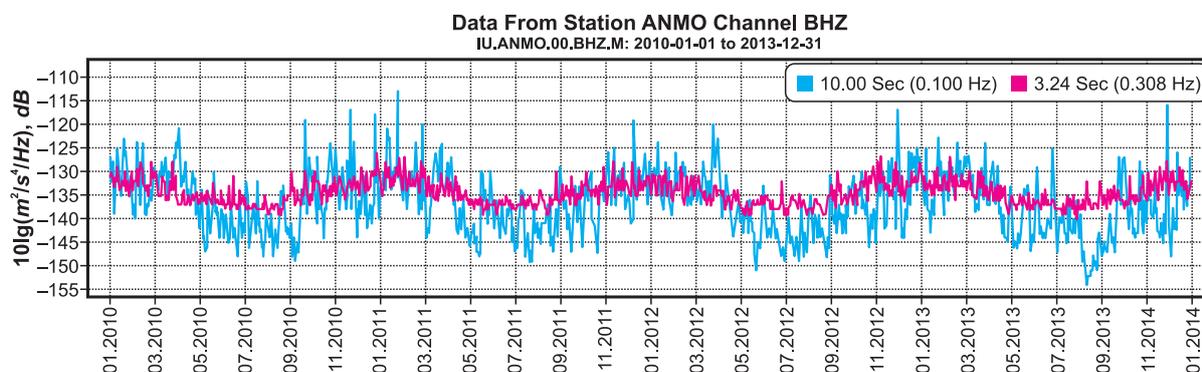


Рис. 15. Пример временных рядов шума в диапазоне частот от 0.1 до 0.308 Гц для станции ANMO в Альбукерке, Нью-Мехико, США согласно [Daily ..., 2021]

различия в максимальных амплитудах шума в различное время года (сезонная периодичность). Такие различия в высокочастотном шуме достигают 6–7 дБ. В низкочастотном шуме они примерно вдвое меньше.

На спектрах всех используемых широкополосных станций выделяется плоская часть в диапазоне 8–42 Гц. Поэтому на этом плоском участке можно выбрать какую-нибудь одну характеристическую частоту. В качестве таковой мы здесь приняли частоту 15.2219 Гц. Как по данным спектров, построенных для различных трёхчасовых интервалов внутри суток, так и по среднечасовым амплитудам шума на частоте ~15 Гц устанавливается хорошо выраженный суточный ход амплитуды шума. Шум минимален в ночное время и максимален в дневное время примерно на одном уровне от 7 до 19 час по локальному времени. Форма периодичности обладает асимметрией. Спад амплитуды шума после его плоской части к вечеру длится дольше по более пологой кривой на графике суточного хода, чем более крутой рост амплитуды от минимальных ночных значений к плоской части графика суточного хода в дневное время. Возможно, это косвенно связано с прогревом почвы и воздуха в утренние часы и обусловленным этим обстоятельством усилением ветра и интенсивности водотоков в горных реках.

Среди более тонких особенностей суточного хода следует указать на небольшое понижение амплитуды шума в окрестности полудня (11–14 час), которое наблюдается на станциях с повышенным уровнем антропогенного шума («Душанбе» и «Шаартуз»). Аналогичный эффект рассматривался в работе [Atef et al., 2009], и предположительно объяснялся авторами понижением уровня антропогенного шума во время обеденного перерыва в работе промышленных предприятий и дорожном трафике. На вклад антропогенной составляющей в амплитуду шума указывает и заметное её понижение в субботу и воскресенье, по сравнению с остальными днями недели, установленное нами на наиболее шумной станции «Душанбе». Тем не менее, можно высказать гипотезу, что наибольший вклад в амплитуду шума на большинстве других станций, установленных вдали от крупных населённых пунктов и интенсивного дорожного трафика, следует считать локальные экзогенные источники шума естественного происхождения, перечисленные выше.

На всех станциях наблюдаются ярко выраженные изменения формы среднесуточной периодичности шума в зависимости от време-

ни года. Экстремум суточной периодичности в июне-августе заметно шире такового в декабре-феврале. А его максимальная амплитуда примерно на 6 дБ больше в июне-августе по сравнению с декабрём-февралём. Интересно, что внутрисуточные временные интервалы резкого возрастания и спада интенсивности экстремума коррелированы соответственно с утренними и вечерними сумерками в летнее (июль) и зимнее (январь) время.

Следует отметить, что поведение спектров в низкочастотном диапазоне (0.01–0.75 Гц) в окрестности зимнего и летнего солнцестояния (рис. 14) оказывается противофазным по сравнению с таковыми для высокочастотного диапазона от 0.75–1.0 Гц и выше (рис. 8). Амплитуда плоской части спектра для низкочастотного диапазона меньше летом, чем зимой. Это может быть свидетельством различного генезиса «высокочастотного» и «низкочастотного» диапазонов микросейсмического шума.

Похожий результат был получен нами ранее при изучении поведения сейсмоакустической эмиссии (САЭ) по данным наблюдений на Русской платформе в шахте глубиной 30 м на геофизической обсерватории «Обнинск» с использованием геофона с частотой 160 Гц [Беляков и др., 2011]. Вид временных рядов интенсивности САЭ и микросейсмических шумов для соответствующих временных интервалов показан на рис. 16.

Отмечаем, что интенсивность САЭ в течение суток ведёт себя противофазно с амплитудой высокочастотного микросейсмического шума, что говорит об ином генезисе САЭ по сравнению с микросейсмическим шумом. В работе [Беляков и др., 2011] предполагалось, что САЭ представляет собой естественное продолжение микроземлетрясений в область более слабых энергий, а не природный локальный шум, хотя по этому вопросу существуют различные мнения. То есть, она обуславливается не экзогенными, как в случае шума, а эндогенными причинами. Тем не менее, ширина экстремума дневного уменьшения интенсивности САЭ на Русской платформе по сравнению с ночным временем оказывается такой же, как и в случае с микросейсмическим шумом: заметно больше в окрестности летнего солнцестояния, чем в окрестности зимнего солнцестояния. При этом левый и правый участки наиболее высокого градиента изменения интенсивности САЭ и амплитуды шума неплохо коррелируются соответственно с началом утренних (метка 1 на рис. 16б) и концом вечерних сумерек (метка 2 на рис. 16б). Картина похожа на ту, что мы получили в настоящем исследовании (см. рис. 12).

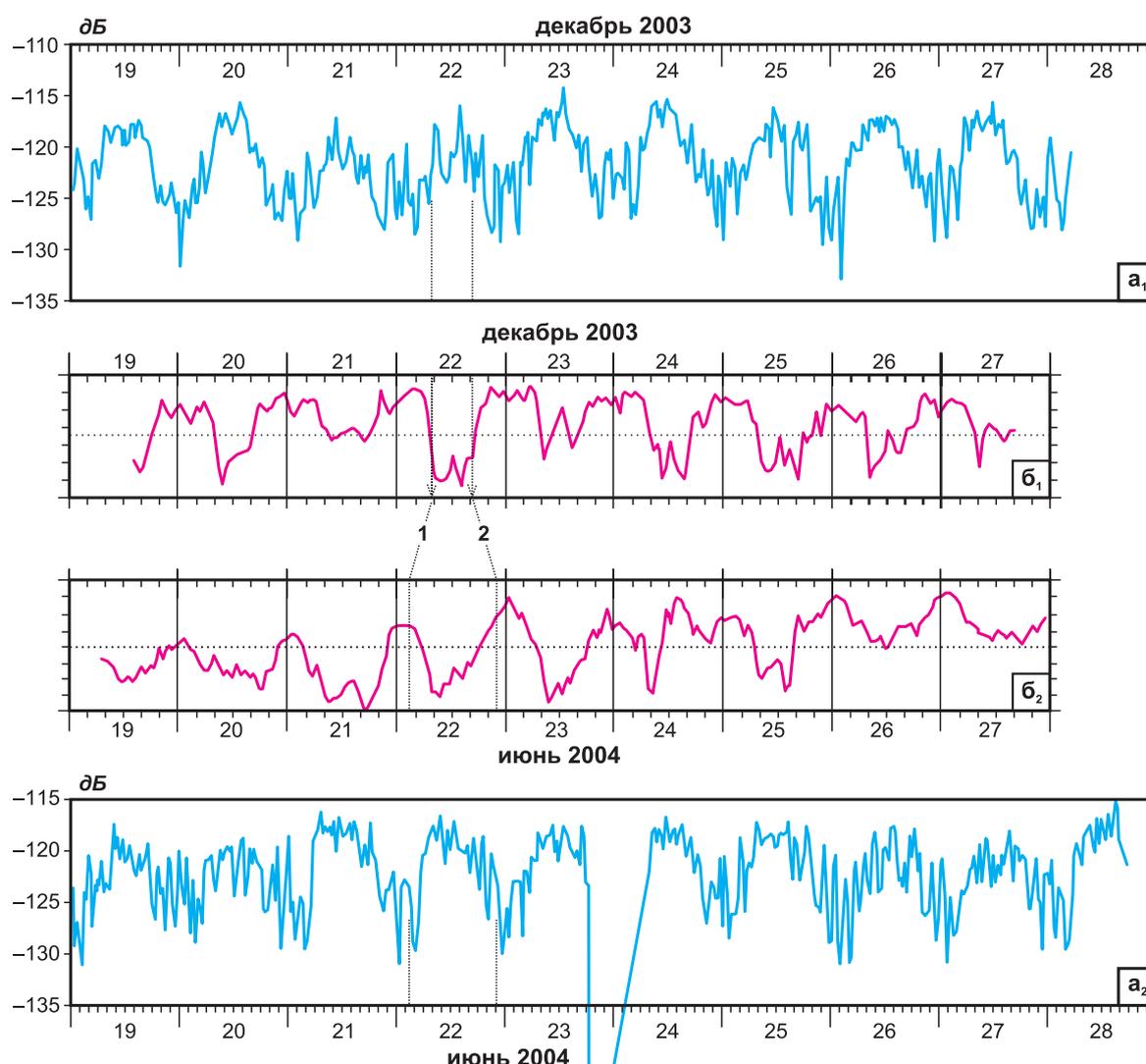


Рис. 16. Вид суточных вариаций микросейсмического шума (a_1 и a_2) и САЭ (b_1 и b_2) вблизи зимнего (декабрь 2003 г.) солнцестояния (a_1 или b_1) и летнего (июнь 2004 г.) солнцестояния (a_2 или b_2) по данным наблюдений на Русской платформе в шахте глубиной 30 м на геофизической обсерватории «Обнинск» для частоты в 6.4 Гц для шума и с использованием геофона с частотой 160 Гц для САЭ. Графики САЭ по вертикале показаны в условных относительных единицах (модифицированный рис. 16 из [Беляков и др., 2011]).

1 – начало утренних сумерек; 2 – конец вечерних сумерек

Тем самым, эту наблюдаемую взаимосвязь между микросейсмическим шумом и сейсмоакустической эмиссией, а также и с микроземлетрясениями [Беляков и др., 2011], можно рассматривать в качестве свидетельства достаточно тесной взаимосвязи между различными геофизическими процессами. В данном случае можно предположить, что в этом эффекте проявляется глубинное воздействие Солнца на колебательный процесс столь, казалось бы, различных природных явлений.

Заключение

Анализировалась спектральная структура микросейсмического шума в диапазоне частот

0.01–40 Гц в различное время суток и года, зарегистрированного широкополосной аппаратурой на восьми станциях Таджикской национальной сейсмической сети в Таджикистане в 2005–2020 гг.

Выделено два диапазона частот, называемых нами условно «высокочастотный» (2–40 Гц) и «низкочастотный» (0.01–0.75 Гц) шум. Они разделены узким частотным диапазоном (~0.75–2.0 Гц) с уменьшением амплитуды по сравнению с соседними диапазонами до 20–30 дБ.

Предполагается, что высокочастотный диапазон шума имеет локальную природу, обусловленную экзогенными источниками естественного

происхождения в виде порывов ветра, сотрясений от мощных водотоков и колебаний уровня крупных водохранилищ, а также в виде техногенных помех за счёт проведения дорожных и карьерных взрывов, работы крупных промышленных предприятий и сотрясений от дорожного трафика. Низкочастотный шум, скорее всего, обусловлен глобальными штормовыми микросейсами.

Высокочастотный шум обладает хорошо выраженной суточной периодичностью, которая полностью отсутствует в низкочастотном шуме. В обоих частотных диапазонах установлено существование чётко выраженной сезонной периодичности, амплитуда которой достигает 6–7 дБ для высокочастотного шума и примерно вдвое меньше для низкочастотного шума.

Рассмотрено поведение высокочастотного шума в зависимости от времени суток и времени года на характеристической частоте ~ 15 Гц, выбранной в центральной части плоского участка спектра высокочастотного шума в диапазоне частот 8–42 Гц. Было установлено, что шум имеет максимальную амплитуду в дневное время и находится примерно на одном уровне в достаточно широком временном интервале. При этом спад амплитуды шума после его плоской части к вечеру длится дольше и происходит по более пологой кривой на графике суточного хода, чем более крутой рост амплитуды от минимальных ночных значений к плоской части графика суточного хода в дневное время. Мы полагаем, что это может быть связано с более быстрым прогревом грунта и воздуха в утренние часы, чем с их остыванием в вечернее время.

Экстремум суточной периодичности шума заметно шире в июне-августе по сравнению с декабрём-февралём, а их различия по максимальной амплитуде шума достигают 6 дБ. Временные интервалы резкого возрастания и спада интенсивности экстремума шума неплохо коррелированы соответственно с утренними и вечерними сумерками в летнее и зимнее время года. В этом можно предполагать косвенное проявление воздействия Солнца на колебательные процессы, порождающие высокочастотный микросейсмический шум.

Работа выполнена по проекту № 0144-2019-0011 государственного задания ИФЗ РАН.

Авторы благодарны Gillian Shager, оказавшей всестороннюю помощь в доступе к данным IRIS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А. Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре // *Физика Земли*. – 2008. – № 6. – С. 77–85.
- Ананко М.Ю., Смирнов В.Б. Генерация высокочастотного сейсмического шума поверхностным ветровым воздействием // *Вулканология и сейсмология*. – 1994. – № 4–5. – С. 205–214.
- Беляков А.С., Журавлёв В.И., Лукк А.А. Суточная периодичность слабых землетрясений и высокочастотного подземного шума на Камчатке // *Физика Земли*. – 2011. – № 3. – С. 34–54.
- Гармский геофизический полигон* / Сидорин А.Я. (ред.). – М.: ИФЗ АН СССР, 1990. – 240 с.
- Горбатилов А.В. Возможность оценки параметров геологических объектов на основе использования фонового микросейсмического поля. Результаты экспериментальных исследований и моделирование // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы*. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 66–71.
- Горбатилов А.В. Метод микросейсмического зондирования: исследование разрешающей способности, области и примеры применения // *Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы третьей молодёжной школы семинара. Т. 2*. – М.: ИФЗ РАН, 2013. – С. 3–17.
- Горбатилов А.В., Барабанов В.Л. Опыт использования микросейсм для оценки состояния верхней части земной коры // *Физика Земли*. – 1993. – № 7. – С. 85–90.
- Дещеревская Е.В., Сидорин А.Я. Ложная годовая периодичность землетрясений, обусловленная сезонными изменениями помех // *Доклады Академии наук. Науки о Земле*. – 2005. – Т. 400, № 6. – С. 798–802.
- Дещеревский А.В., Журавлёв В.И., Лукк А.А., Сидорин А.Я. Сезонная периодичность и шумовая дискриминация микроземлетрясений на Гармском полигоне // *Вопросы инженерной сейсмологии*. – 2021. – Т. 48, № 2. – С. 24–46. doi: 10.21455/VIS2021.2-2
- Дещеревский А.В., Сидорин А.Я. Оценка количества взрывов в Душанбино-Вахшском каталоге землетрясений // *Вопросы инженерной сейсмологии*. – 2016. – Т. 43, № 4. – С. 61–76. doi: 10.21455/VIS2016.4-4
- Журавлёв В.И., Лукк А.А. Особенности суточной периодичности слабых землетрясений Ирана // *Физика Земли*. – 2012. – № 1. – С. 63–81.
- Журавлёв В.И., Лукк А.А. Полуденная активизация сейсмичности в Турции и ряде других регионов

- мира // Геофизические исследования. — 2011. — Т. 12, № 4. — С. 31–57.
- Журавлёв В.И., Лукк А.А., Мирзоев К.М., Сычёва Н.А. Суточная периодичность слабых землетрясений Средней Азии // Физика Земли. — 2006. — № 11. — С. 29–43.
- Журавлёв В.И., Сидорин А.Я. Общие свойства суточной периодичности землетрясений в некоторых регионах мира // Геофизические исследования. — 2005б. — Вып. 2. — С. 61–70.
- Журавлёв В.И., Сидорин А.Я. Спектральные исследования суточной периодичности землетрясений Гармского полигона // Геофизические исследования. — 2005а. — Вып. 1. — С. 48–57.
- Касимова В.А., Любушин А.А. Перспективы использования данных сети широкополосных сейсмических станций для изучения сигналов синхронизации поля микросейсм на Камчатке // Исследования в области наук о Земле. Материалы X региональной молодёжной конференции. — Петропавловск-Камчатский: ИВИС ДВО РАН, 2012. — С. 115–126.
- Кислов К.В., Гравиров В.В. Исследование влияния окружающей среды на шум широкополосной сейсмической аппаратуры // Вычислительная сейсмология. Вып. 42. — М.: КРАСАНД, 2013. — 240 с.
- Копылова Г.Н., Любушин А.А., Таранова Л.Н. Новая прогностическая технология анализа вариаций низкочастотного сейсмического шума (на примере районов Дальнего Востока России) // Российский сейсмологический журнал. — 2021. — Т. 3, № 1. — С. 75–91. doi: 10.35540/2686-7907.2021.1.05
- Любушин А.А. Карты свойств низкочастотных микросейсм для оценки сейсмической опасности // Физика Земли. — 2013. — № 1. — С. 11–20.
- Любушин А.А. Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки // Физика Земли. — 2008. — № 4. — С. 17–34.
- Любушин А.А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсам // Геофизические процессы и биосфера. — 2011. — Т. 10, № 1. — С. 9–35.
- Любушин А.А., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Таранова Л.Н. Мульти-фрактальные характеристики сейсмического шума на Камчатке, 2011–2013 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. — Обнинск: ГС РАН, 2013. — С. 471–475.
- Любушин А.А., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Таранова Л.Н. О свойствах поля низкочастотных шумов, зарегистрированных на Камчатской сети широкополосных сейсмических станций // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. — 2015. — № 2, вып. 26. — С. 20–36.
- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х. Влияние механических вибраций на сейсмичность // Доклады АН СССР. — 1990. — Т. 313, № 1. — С. 78–83.
- Негматуллаев С.Х. Современная цифровая сеть сейсмического мониторинга Таджикистана // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. — Обнинск: ГС РАН, 2012. — С. 125–131.
- Овсюченко А.Н., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Ларин Н.В., Рогожин Е.А. Сейсмоструктура и глубинное строение зоны Владикавказского активного разлома // Геофизические исследования. — 2011. — Т. 12, № 1. — С. 47–59.
- Орлов Р.А. Опыт использования микросейсмического шума для решения геологических задач в условиях платформы (на примере Воронежского кристаллического массива) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. — 2011. — № 1 (январь-июнь). — С. 184–192.
- Потапов В.А., Табулевич В.Н., Черных Е.Н. Влияние штормовых микросейсмических колебаний на сейсмичность в районе Курильских островов Тихого океана и на озере Байкал // Геология и геофизика. — 1997. — Т. 38, № 8. — С. 1411–1419.
- Сидорин А.Я. Влияние солнца на сейсмичность и сейсмический шум // Сейсмические приборы. — 2004. — Вып. 40. — С. 71–80.
- Сидорин А.Я. Различия внутри суточных фазовых диаграмм потоков землетрясений разной энергии // Сейсмические приборы. — 2013. — Т. 49, № 2. — С. 71–84.
- Сидорин А.Я. Сопоставление свойств суточной периодичности сейсмического шума, землетрясений и нагрузки промышленной электрической сети // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2010. — Т. 37, № 4. — С. 66–88.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А. Пространственная и временная структура глобального низкочастотного сейсмического шума // Физика Земли. — 2019. — № 4. — С. 3–14. doi: 10.31857/S0002-3337201943-14
- Ярошевич М.И., Ингель Л.Х., Лысенко Д.А. Сейсмические проявления атмосферных процессов // Научное обозрение. Технические науки. — 2016. — № 5. — С. 103–115. — URL: <https://science-engineering.ru/article/view?id=1119>
- Atef A.H., Liu K.H., Gao S.S. Apparent weekly and daily earthquake periodicities in the Western United States // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2009. — V. 99, N 4. — P. 2273–2279. doi: 10.1785/0120080217
- Beauduin R., Montagner J.-P. Time evolution of broadband seismic noise during the French pilot experiment OFM/SISOBS // Geophysical Research Letters. — 1996. — V. 23, N 21. — P. 2995–2998. doi: 10.1029/96GL02880.
- Casey R., Templeton M.E., Sharer G., Keyson L., Weertman B.R., Ahern T. Assuring the quality of IRIS

data with MUSTANG // Seismological Research Letters. – 2018. – V. 89, N 2A. – P. 630–639. doi: 10.1785/0220170191

Daily PDF Mode Timelines. IU.ANMO.00.BHZ.M: 2010-01-01 to 2013-12-31 // IRIS [Site]. – URL: <http://service.iris.edu/mustang/noise-mode-timeseries/1/query?target=IU.ANMO.00.BHZ.M&starttime=2010-01-01&endtime=2014-01-01&format=plot> (дата обращения 01.08.2021).

McNamara D.E., Boaz R.I. Seismic noise analysis system using power spectral density probability density functions: A Stand-alone software package // U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Open-File Report 2005-1438. – Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2006. – 29 p. – URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2005/1438/pdf/OFR-1438.pdf>

MetaData Aggregator. Channel Summary. TJ: GARM: --: HHZ (2005-10-22 - 2599-12-31) // IRIS [Site].

– URL: <http://ds.iris.edu/mda/TJ/GARM/--/HHZ/?starttime=2005-10-22&endtime=2599-12-31> (дата обращения 01.08.2021).

MUSTANG: MUSTANG/noise-psd: IRIS DMC Web Services // IRIS [Site]. – URL: <http://service.iris.edu/mustang/noise-psd>. – [New York: IRIS, 2021].

Search Earthquake Catalog. Earthquakes // USGS [Site]. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (дата обращения 01.08.2021).

Zhuravlev V., Sidorin A. A multiplicative model of the influence of seasonal variations on geophysical processes and the possibility of identifying and excluding such influence // “Problems of Geocosmos–2021”. Proceedings of the XIII International Conference and School. (In print).

Сведения об авторах

Журавлёв Владимир Ильич, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. Шмидта О.Ю. Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: vladimirzhuravlev53@yandex.ru

Лукк Альберт Артурович, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: lukk@ifz.ru

Features of time variations of microseismic noise at seismic stations in Tajikistan

© 2021 V.I. Zhuravlev, A.A. Lukk

IPE RAS, Moscow, Russia

Received September 28, 2021

Abstract The spectral structure of microseismic noise in the frequency range of 0.01–40 Hz at different times of the day and year, recorded by broadband equipment at eight IRIS group seismic stations in Tajikistan in 2005–2020, was analyzed. Two disjoint frequency ranges are distinguished, which we conditionally call “high-frequency” (2–40 Hz) and “low-frequency” (0.01–0.75 Hz) noise, separated by a natural drop in the noise amplitude to 20–30 Db. It is assumed that the high-frequency range of noise has a local nature, due to exogenous sources of natural origin in the form of wind gusts, concussions from powerful watercourses and fluctuations in the level of large reservoirs, as well as man-made interference due to road and quarry explosions, the work of large industrial enterprises and concussions from road traffic. Low-frequency noise is most likely caused by global storm microseisms. High-frequency noise has a well-defined daily frequency, which is completely absent in low-frequency noise. At the same time, in both frequency ranges, the existence of a clearly pronounced seasonal periodicity has been established, the amplitude of which reaches 6–7 Db for high-frequency noise and about half as much for low-frequency noise. However, at the same time, the seasonal frequency of high frequency and low-frequency noise turns out to be antiphase, which indicates in favor of the different genesis of these two components of microseismic noise. The amplitude of the diurnal periodicity in variations of the high-frequency noise level is maximal during the daytime, remaining approximately constant for 8–10 hours. At the same time, the decline in the noise amplitude in the evening lasts longer than the steeper morning growth. The time intervals of a sharp increase and decrease in the intensity of the discussed daily extreme are quite well correlated, respectively, with morning and evening twilight at different times of the year. This is reflected in the wider flat part of the maximum noise level in summer compared to winter and the differences in its level up to 6 Db in favor of summer time. This observation can be considered as a manifestation of the deep influence of the Sun on the oscillatory processes that generate high-frequency microseismic noise.

Keywords Microseismic noise, frequency range, seismic stations, spectra, daily periodicity, seasonal periodicity, exogenous and endogenous sources of noise.

For citation Zhuravlev, V.I., & Lukk, A.A. (2021). [Features of time variations of microseismic noise at seismic stations in Tajikistan]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(4), 18–37. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.02>

References

- Adushkin, V.V., Loktev, D.N., & Spivak, A.A. (2008). The effect of baric disturbances in the atmosphere on microseismic processes in the crust. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 44(6), 510–517. doi: 10.1134/S1069351308060086
- Ananko, M.Yu., & Smirnov, V.B. (1994). [Generation of high-frequency seismic noise by surface wind action]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 4–5, 205–214. (In Russ.).
- Atef, A.H., Liu, K.H., & Gao, S.S. (2009). Apparent weekly and daily earthquake periodicities in the Western United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(4), 2273–2279. doi: 10.1785/0120080217
- Beauduin, R., & Montagner, J.-P. (1996). Time evolution of broadband seismic noise during the French pilot experiment OFM/SISOBS. *Geophysical Research Letters*, 23(21), 2995–2998. doi: 10.1029/96GL02880.
- Belyakov, A.S., Zhuravlev, V.I., & Lukk, A.A. (2011). Diurnal periodicity of weak earthquakes and high-frequency underground noise in Kamchatka. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 47(3), 186–206. doi: 10.1134/S1069351311020029
- Casey, R., Templeton, M.E., Sharer, G., Keyson, L., Weertman, B.R., & Ahern, T. (2018). Assuring the quality of IRIS data with MUSTANG. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 630–639. doi: 10.1785/0220170191
- Descherevskaya, E.V., & Sidorin, A.Ya. (2005). [False annual periodicity of earthquakes caused by seasonal

- changes of noise]. *Doklady Akademii nauk. Nauki o Zemle* [Doklady Earth Sciences], 400(6), 798-802. (In Russ.).
- Deshcherevskii, A.V., Zhuravlev, V.I., Lukk, A.A., et al. (2021). Seasonal periodicity and noise discrimination of microearthquakes at the Garm test area. *Seismic Instruments*, 57, 552-571. doi: 10.3103/S0747923921050029
- Deshcherevskii, A.V., & Sidorin, A.Ya. (2017). Estimating the number of blasts in the Dushanbe-Vakhsh earthquake catalog. *Seismic Instruments*, 53, 356-369. doi: 10.3103/S074792391704003X
- Gorbatikov, A.V. (2006). [The possibility of estimating the parameters of geological objects based on the use of a background microseismic field. Results of experimental studies and modeling]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials from International seismological school dedicated to 100-anniversary foundation of seismic stations "Pulkovo" and "Ekaterinburg"] (pp. 66-71). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Gorbatikov, A.V. (2013). [Microseismic sounding method: Resolution study, areas and application examples]. In *Sovremennaya tektonofizika. Metody i rezul'taty. Materialy tret'ei molodezhnoi shkoly seminar. T. 2* [Modern Tectonophysics. Methods and Results. Materials of the third youth school-seminar. V. 2] (pp. 3-17). Moscow, Russia: IEP Publ. (In Russ.).
- Gorbatikov, A.V., & Barabanov, V.L. (1993). [Experience of using microseisms to assess the state of the upper part of the Earth's crust]. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth], 7, 85-90. (In Russ.).
- IRIS. (2021). Daily PDF Mode Timelines. IU.ANMO.00.BHZ.M: 2010-01-01 to 2013-12-31. Retrieved from <http://service.iris.edu/mustang/noise-mode-timeseries/1/query?target=IU.ANMO.00.BHZ.M&starttime=2010-01-01&endtime=2014-01-01&format=plot>
- IRIS. (2021). MetaData Aggregator. Channel Summary. TJ: GARM: --: HHZ (2005-10-22 - 2599-12-31). Retrieved from <http://ds.iris.edu/mda/TJ/GARM/--/HHZ/?starttime=2005-10-22&endtime=2599-12-31>
- IRIS. (2021). MUSTANG: MUSTANG/noise-psd: IRIS DMC Web Services. Retrieved from <http://service.iris.edu/mustang/noise-psd>
- Kasimova, V.A., & Lyubushin, A.A. (2012). [Prospects to use of data broadband seismic stations to study synchronization signals field of microseisms on Kamchatka]. In *Issledovaniia v oblasti nauk o Zemle. Materialy X regional'noi molodezhnoi konferentsii* [Research in the field of Earth sciences. Materials of the X Regional Youth Conference] (pp. 115-126). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: IVIS FEB RAS Publ. (In Russ.).
- Kislov, K.V., & Gravirov, V.V. (2013). [Investigation of the influence of the environment on the noise of broadband seismic equipment]. In *Vychislitel'naia seismologiya. Vyp. 42* [Computational Seismology. Issue 42]. Moscow, Russia: KRASAND Publ., 240 p. (In Russ.).
- Kopylova, G.N., Lyubushin, A.A., & Taranova, L.N. (2021). [New prognostic technology for analysis of low-frequency seismic noise variations (on the example of the Russian Far East)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(1), 75-91. doi: 10.35540/2686-7907.2021.1.05
- Lyubushin, A.A. (2008). Microseismic noise in the low frequency range (periods of 1-300 min): Properties and possible prognostic features. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 44(4), 275-290. doi: 10.1134/s11486-008-4002-6
- Lyubushin, A.A. (2011). Japan seismic catastrophe 11 of March 2011: long-term prediction by microseismic noise properties. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 47(8), 904-921. doi: 10.1134/S0001433811080056
- Lyubushin, A.A. (2013). Mapping the properties of low-frequency microseisms for seismic hazard assessment. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 49(1), 9-18. doi: 10.1134/S1069351313010084
- Lyubushin, A.A., Kopylova, G.N., Kasimova, V.A., & Taranova, L.N. (2013). [Multi-fractal characteristics of seismic noise in Kamchatka, 2011-2013]. In *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii. Trudy Chetvertoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii* [Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East. Proceedings of the Fourth Scientific and Technical Conference] (pp. 471-475). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Lyubushin, A.A., Kopylova, G.N., Kasimova, V.A., & Taranova, L.N. (2015). [The properties of fields of low frequency noise from the network of broadband seismic stations in Kamchatka]. *Vestnik Kamchatskoi regional'noi organizatsii Uchebno-nauchnyi tsentr. Seriya: Nauki o Zemle* [Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center». Earth Sciences], 2(26), 20-36. (In Russ.).
- McNamara, D.E., Boaz, R.I. (2006). Seismic noise analysis system using power spectral density probability density functions: A Stand-alone software package. *Open-File Report 2005-1438*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 29 p. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/of/2005/1438/pdf/OFR-1438.pdf>
- Mirzoev, K.M., & Negmatullaev, S.Kh. (1990). [Influence of mechanical vibrations on seismicity]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Doklady Earth Sciences], 313(1), 78-83. (In Russ.).
- Negmatullaev, S.Kh. (2012). [Modern digital seismic monitoring network in Tajikistan]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2006 god* [Earthquakes of the North Eurasia, 2006] (pp. 125-131). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

- Orlov, R.A. (2011). [Experience in the use of microseismic noise to solve the geological problems in the platform (For example, the Voronezh Crystalline Massif)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology], 1, 184-192. (In Russ.).
- Ovsyuchenko, A.N., Gorbatikov, A.V., Stepanova, M. Yu., Larin, N.V., & Rogozhin, E.A. (2011). [Seismotectonics and deep structure of the Vladikavkaz fault zone]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], 12(1), 47-59. (In Russ.).
- Potapov, V.A., Tabulevich, V.N., & Chernykh, E.N. (1997). [The effect of storm microseismic oscillations on seismicity in the Kuril Islands of the Pacific Ocean and Lake Baikal]. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 38(8), 1411-1419. (In Russ.).
- Sidorin, A.Ya. (2004). [Influence of the sun on seismicity and seismic noise]. *Seismicheskie pribory* [Seismic Instruments], 40, 71-80. (In Russ.).
- Sidorin, A.Ya. (2011). Comparison of the diurnal periodicity features of seismic noise, earthquakes, and electric power consumption. *Seismic Instruments*, 47, 368-385. doi: 10.3103/S0747923911040098
- Sidorin, A.Ya. (2013). [Distinctions between the diurnal phase diagrams for earthquake flows of different energy]. *Seismicheskie pribory* [Seismic Instruments], 49(2), 71-84. (In Russ.).
- Sidorin, A.Ya. (Ed.). (2004). *Garmskii geofizicheskii poligon* [Garm Geophysical Polygon]. Moscow, Russia: IPE AS USSR Publ., 240 p.
- Sobolev, G.A., & Zakrzhevskaya, N.A. (2019). Spatial and temporal structure of global low-frequency seismic noise. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 55(4), 529-547. doi: 10.1134/S1069351319040098
- USGS. (2021). Search Earthquake Catalog. Earthquakes. U.S. Geological Survey National Earthquake Information Center, Federal Center Denver, Colorado. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Yaroshevich, M.I., Ingel, L.Kh., & Lysenko D.A. (2016). [Seismic manifestations of the atmospheric processes]. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki* [Scientific Review. Technical science], 5, 103-115. Retrieved from <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1119>
- Zhuravlev, V., & Sidorin, A. (2021). A multiplicative model of the influence of seasonal variations on geophysical processes and the possibility of identifying and excluding such influence. In "Problems of Geocosmos-2021". *Proceedings of the XIII International Conference and School*. (In print).
- Zhuravlev, V.I., & Lukk, A.A. (2011). [Midday activation seismicity in turkey and several other world regions]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], 12(4), 31-57. (In Russ.).
- Zhuravlev, V.I., & Lukk, A.A. (2012). The pattern of diurnal periodicity of weak earthquakes in Iran. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 48(1), 61-77. doi: 10.1134/S1069351311120111
- Zhuravlev, V.I., & Sidorin, A.Ya. (2005a). [Spectral studies of diurnal earthquake periodicity in the Garm research area]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], 1, 48-57. (In Russ.).
- Zhuravlev, V.I., & Sidorin, A.Ya. (2005b). [Common characteristics of diurnal earthquake periodicity in some regions of the World]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], 2, 61-70. (In Russ.).
- Zhuravlev, V.I., Lukk, A.A., Mirzoev, K.M., & Sycheva, N.A. (2006). Diurnal periodicity of weak earthquakes in Central Asia. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 42(11), 890-903. doi: 10.1134/S1069351306110036

Information about authors

Zhuravlev Vladimir Il'ich, PhD, Leading Researcher of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia. E-mail: vladimirzhuravlev53@yandex.ru

Lukk Albert Arturovich, PhD, Leading Researcher of the IPE RAS, Moscow, Russia. E-mail: lukk@ifz.ru