

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН)

На правах рукописи

КОТОВ Андрей Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ
ПОЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОЭКОЛОГИИ**

Специальность 1.6.9 «Геофизика»

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

член-корреспондент РАН

Собисевич А. Л.

Москва - 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОНИТОРИНГА АКУСТИЧЕСКОГО И ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ	13
1.1. Описание природы микросейсмического шума	13
1.2. Использование информации о микросейсмических воздействиях для решения некоторых прикладных задач.....	16
1.3. Причины возникновения вибрационных шумов мегаполиса	17
1.4. Воздействие транспортных шумов	24
1.5. Защита строительных сооружений от вибрационных и акустических шумов	30
1.6. Геоэкология	31
1.7. Измерения вибрационных и акустических шумов в жилой квартире в районе Сокольники, г. Москва	37
Выводы к главе 1	46
2. АППАРАТУРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС, НЕОБХОДИМЫЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАТУРНЫХ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ	48
2.1. Внутреннее строение и описание гео-гидроакустического измерительного модуля и молекулярно-электронного преобразователя	48
2.2. Программное обеспечение, необходимое для работы с гео- гидроакустическим измерительным буюм	53
2.3. Сравнительные исследования гео-гидроакустического измерительного модуля с другой сейсмической аппаратурой	55
2.4. Лабораторно-стендовые испытания гео-гидроакустического измерительного модуля	56
Выводы к главе 2	63

3. РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОДХОДА К МОНИТОРИНГУ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НАСЕЛЁННОГО ПУНКТА	64
3.1. Метод микросейсмического зондирования	64
3.2. Сейсмическое микрорайонирование.	68
3.3. Теоретическое описание предлагаемой в работе методики мониторинга вибросейсмического загрязнения мегаполиса и опробование ММЗ в ледовых условиях оз. Байкал.....	72
Выводы к главе 3	76
4. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ.	77
4.1. Характеристика местности, выбранной в качестве главного объекта исследований	77
4.2. Анализ шумовой обстановки исследуемой территории	80
4.3 Построение карт пространственного распределения вибросейсмического и акустического шумового загрязнения в пределах исследуемой территории	90
4.3.1. Вибросейсмический шум.....	90
4.3.2. Акустический шум	94
4.4. Оценка свойств стационарности спектральных коэффициентов относительной интенсивности вибросейсмического шума.....	100
4.5. Оценка пространственной стабильности методики	105
Выводы к главе 4.....	106
5. ИЗУЧЕНИЕ ШУМОВОЙ ОБСТАНОВКИ НА ТЕРРИТОРИИ ГФО «МИХНЕВО» И СРАВНЕНИЕ С ОСНОВНЫМ ОБЪЕКТОМ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	108
Выводы к главе 5	116

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Одним из неизбежных последствий развития человеческой цивилизации на современном этапе является неуклонный рост крупных городских агломераций, характеризующихся высокой плотностью населения, многоуровневой транспортной инфраструктурой, включая и высокоскоростные авто- и железнодорожные магистрали, в совокупности формирующими комплекс негативных воздействий на окружающую среду.

Во многих междисциплинарных направлениях, занимающихся изучением экологической обстановки урбанизированных территорий, рассматривается неизбежно возникающее в условиях стремительно развивающейся городской инфраструктуры явление экологического загрязнения окружающей среды. В общем случае, под экологическим загрязнением понимается привнесение в окружающую среду или возникновение в ней новых, обычно не характерных физических, химических или биологических агентов (или т. н. «загрязнителей»), или превышение их естественного среднесноголетнего уровня в различных средах, приводящее к негативным последствиям. Подразделяется, в свою очередь, экологическое загрязнение на физическое, химическое и биологическое. Изучение всех перечисленных видов загрязнения окружающей среды является чрезвычайно важной задачей, однако настоящее исследование посвящено одним из наиболее важных и опасных для здоровья и жизнедеятельности людей аспектов физического загрязнения – вибрационного и шумового. Под вибрационным загрязнением понимается негативное воздействие механических колебаний твёрдых тел на объекты окружающей среды. Под акустическим (звуковым) шумовым загрязнением понимается раздражающий акустический шум антропогенного происхождения, нарушающий привычную жизнедеятельность живых организмов и человека.

Главным предметом при исследовании вибрационного загрязнения является вибрация – механические колебания твёрдых тел различной частоты и амплитуды. Но в настоящем исследовании вибрационное загрязнение

рассматривается как некая совокупность распространяющихся в твёрдых телах (в том числе в конструкциях зданий и сооружений) вибраций и инициирующего их, распространяющегося в толще земли сейсмического шума техногенного происхождения – т. н. вибросейсмический шум, способный оказывать негативное влияние на здоровье и качество жизнедеятельности людей, а также на состояние объектов городской инфраструктуры. Данный тип шума соответствует диапазону частот от 2 Гц и выше. Однако рассматриваемый шум может дополняться и низкочастотным малоамплитудным микросейсмическим шумом естественного, природного происхождения, обусловленным процессами, постоянно происходящими в атмосфере и океане – вариациями атмосферного давления, воздействием океанических волн на берег и шельф [24].

При изучении шумового загрязнения предметом исследования является акустический шум – беспорядочное сочетание упругих волн (звуков) разной частоты и амплитуды, распространяющихся в атмосфере. При этом отдельное внимание уделяется инфразвуку – акустическим волнам частотой менее 20 Гц.

Длительное и интенсивное воздействие рассматриваемых физических факторов экологического загрязнения способно вызывать у людей и прочих живых организмов не только ощущение дискомфорта и беспокойства, но и нарушения и отклонения в работе различных органов и систем организма. При длительном воздействии вибрации на человеческий организм возможно появление т. н. вибрационной болезни – заболевания, в основе которого лежат патологические изменения в рецепторном аппарате и различных отделах центральной нервной системы (ЦНС), возникающие при длительном воздействии общей или локальной вибрации, способные вызывать нарушения в работе желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) и тугоухость. Болезнь развивается вследствие возникающего под действием вибрации постоянного раздражения механорецепторов и деформации телец Фатера-Пачини, которое приводит к перераздражению выше расположенных нервных центров и нарушению их

функционирования. Вибрация воздействует на все ткани организма человека, но наиболее восприимчивы к ней нервная и костная ткани.

Длительное воздействие интенсивного акустического шума способно вызывать самый широкий спектр заболеваний и отклонений при функционировании различных систем человеческого организма. В первую очередь, возникает снижение остроты слуха, появляются чувство заложенности, давления, пульсации и боли в ушах. Наиболее опасен акустический шум для человеческого организма в диапазоне инфразвуковых частот примерно до 10-15 Гц, поскольку именно этому диапазону принадлежит большинство собственных колебательных частот человеческих органов и их совпадение с частотой внешнего возмущающего воздействия может привести к серьёзным сбоям в функционировании этих органов.

Таким образом, изучение шумового и вибросейсмического загрязнения, с возможной последующей дачей специализированным органам соответствующих рекомендаций о необходимости применения мер по снижению их негативного воздействия является чрезвычайно важной и актуальной на сегодняшний день задачей и настоящее исследование посвящено оценке акустических и вибросейсмических шумовых воздействий именно в тех диапазонах частот, в которых они являются потенциально наиболее вредоносными по отношению к здоровью и жизнедеятельности людей и объектам городской инфраструктуры и которые установлены специализированными нормативно-правовыми актами [ссылки на СН].

Степень разработанности темы исследования. Воздействия низкочастотных сейсмоакустических колебаний, генерируемых городским транспортом, на здания и сооружения подробно исследованы в работе [14]. В работе [28] подробно изучены вопросы влияния низкочастотных и инфразвуковых шумов на здоровье людей, приведены допустимые частотно-зависимые значения уровней звукового давления для различных видов профессиональной деятельности человека [51, 53].

Однако, вопросы пространственно-временной изменчивости сейсмоакустической обстановки густонаселённых районов крупных городов до сих пор не получили должного внимания [52].

Целью настоящей работы, является разработка технологии мониторинга вибросейсмического и акустического загрязнения жилых районов современных мегаполисов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка методических основ – создание алгоритма операций реализации методики мониторинга вибросейсмического и акустического загрязнения жилых районов городских агломераций.
2. Осуществление сбора натурных данных по вибросейсмическим и акустическим полям на территории плотной городской застройки;
3. Создание специального программного обеспечения, позволяющего осуществлять обработку полученных в результате эксперимента натурных данных;
4. Проведение анализа полученных в ходе обработки натурных данных результатов с целью определения области применимости описываемой в работе методики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Широкополосный молекулярно-электронный сейсмометр СМЕ-4211 в сочетании с цифровой системой сбора данных обладает достаточными чувствительностью и динамическим диапазоном, что позволяет проводить измерения вибросейсмических шумов в диапазоне среднегеометрических октавных частот, нормируемых специализированными нормативными актами СНиП.
2. Созданные технология эксплуатации сейсмических датчиков и методика обработки экспериментальных данных, основанная на анализе их спектральных отношений, позволяют осуществлять оперативный мониторинг

вибросейсмических шумов в пределах 2 км относительно опорного измерительного пункта.

3. По результатам натурных измерений вибросейсмических шумов на территории посёлка Мосрентген до и после ввода в эксплуатацию станции метро Тютчевская, превышений допустимых норм, установленных специализированными СНиП, не выявлено.

Научная новизна. Работа выполнена на стыке геофизики и геоэкологии. При этом постановка задачи, помимо междисциплинарного характера исследований, подразумевает проведение комплекса экспериментальных работ по изучению низкочастотных сейсмоакустических шумов на территории новой Москвы (пос. Мосрентген) с целью определения уровней их возможного негативного воздействия в непосредственной близости от скоростной автомагистрали с использованием пассивного способа сейсморазведки. Синхронная регистрация микросейсмического шума на опорном пункте и разнесённых пунктах измерений позволяет оценивать площадное распределение уровней шумов в любой момент времени с ограниченным числом точек измерения.

Таким образом, реализуется возможность оценки вибросейсмического загрязнения территории на основе данных опорной станции в произвольный момент времени, с учётом данных о предельно допустимых значениях, установленных нормативными документами в области труда и медицины (СНиП, СанПиН и т. д.), а также позволяет осуществлять мониторинг сейсмической обстановки в режиме реального времени.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в возможности осуществления мониторинга вибросейсмической обстановки, а также построения карт вибросейсмического загрязнения крупных городских агломераций по аналогии с методами микросейсмического зондирования и

микросейсмического районирования на основании данных, регистрируемых всего одной сейсмостанцией, в режиме реального времени.

Методология и методы исследования. Методические основы работы в значительной степени базируются на функционале пассивного способа сейсморазведки (ММЗ). Путём сравнительного анализа амплитудных спектров, полученных на опорном пункте и разнесённых по исследуемой территории точках наблюдения, представляется возможной оценка пространственного распределения интенсивности микросейсмических колебаний в произвольный момент времени [11].

Процедура построения карт низкочастотного шумового загрязнения в определённом смысле близка к сейсмическому микрорайонированию [5], когда строятся карты прогнозируемых опасных сейсмических воздействий для различных частотных диапазонов. Методическая близость здесь заключается в выявлении областей с доминирующими значениями интенсивности микросейсмических воздействий для различных частот и для данного населённого пункта.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах создания диссертационной работы. Автором лично выполнены: обширный анализ отечественных и зарубежных литературных данных, связанных с темой настоящего диссертационного исследования, сбор данных о вибросейсмической обстановке исследуемой территории в ходе полевого натурного эксперимента на территории пос. Мосрентген, Троицкого и Новомосковского административных округов г. Москвы при помощи специализированных гео-гидроакустических модулей. Выполнена обработка полученных в ходе натурного эксперимента данных по специальному алгоритму в программном комплексе MATLAB. В том же комплексе рассчитаны и построены разномасштабные карты распределения относительных интенсивностей сейсмического поля исследуемой территории, а также карты вибросейсмического загрязнения исследуемой территории в абсолютных величинах в диапазоне среднегеометрических октавных частот 3,8-

31,6 Гц. Также автором был проведён дополнительный эксперимент на территории пос. Мосрентген по сбору данных об акустическом загрязнении исследуемой территории. В результате были рассчитаны и построены карты акустического загрязнения исследуемой территории в диапазоне среднегеометрических октавных частот 31,6-500 Гц. Также автором были проведены измерения вибрационных и акустических шумов на территории жилой застройки в районе Сокольники, г. Москва, по результатам которых были выявлены многочисленные превышения допустимых норм в различных частотных диапазонах.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается достаточным количеством наблюдений, современными методами исследования, которые соответствуют цели работы и поставленным задачам. Сформулированные в тексте диссертации научные положения, выводы и практические рекомендации основаны на фактических данных, продемонстрированных в приведенных таблицах и рисунках. Статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных методов обработки информации и статистического анализа.

Апробация работы. Результаты работы представлены на: 7- Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» Санкт-Петербург, 24-26 мая, 5-й и 10-й Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Акустика среды обитания», Москва, научной школе-конференции «Рельеф Новой Москвы: ресурсы и риски природопользования», 10-й международной конференции аспирантов и молодых учёных «Молодёжь 21-го века: образование, наука, инновации», 15-я школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024», 35-й Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления: физика и применения» им. проф. А. П. Сухорукова, Конференции молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН 2022 и 2024 гг.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 11 работ, 4 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований. Также имеются 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Диссертация включает 135 страниц текста, 67 рисунков, 9 таблиц. Список литературы насчитывает 124 наименования.

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОНИТОРИНГА АКУСТИЧЕСКОГО И ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

1.1. Описание природы микросейсмического шума

Естественный микросейсмический шум, постоянно регистрируемый на поверхности нашей планеты в диапазоне периодов от 2 до 10 с, в настоящее время широко используется в пассивных геофизических методах изучения земных недр [17]. Одновременно с этим, развитая сеть долговременных сейсмологических наблюдений, включающая глобальные, региональные и локальные сегменты с различной плотностью инструментального покрытия исследуемой территории, позволяет успешно применять современные математические методы для обработки массивов микросейсмических «больших данных» [13].

История исследований микросейсм началась в XIX веке, одновременно с развитием инструментальной сейсмологии [1, 32].

Было выдвинуто несколько гипотез, касающихся причин возникновения микросейсм, однако ни одна из них не является полностью подтверждённой. Изначально предполагалось, что рассматриваемые сейсмические воздействия не связаны с землетрясениями, транспортными средствами или с какими-либо локальными метеорологическими условиями, к примеру, с дождём или порывами ветра [1]. Однако во второй половине XIX века многочисленные исследования итальянского учёного Бертелли подтвердили тесную связь микросейсм с неблагоприятными погодными условиями, особенно характерными для морских территорий. По его предположениям, повышенная микросейсмическая активность имеет тенденцию распространяться одновременно на территориях Европы и Северной Америки и наибольшие возмущения наблюдаются в прибрежных районах [2].

Геофизик Шольте стремился продемонстрировать, что микросейсмические волны могут быть порождены атмосферным давлением на поверхности моря. При этом он показал, что амплитуда волн сжатия, распространяющихся достаточно

широко на поверхности моря и созданных колебательным давлением, в незначительной степени превышает амплитуду гравитационных (океанических) волн. Однако данное утверждение может быть не совсем справедливо. Океанические волны генерируются не распределением колебательного давления, описанным Шольте, а, более вероятно, систематической разницей давления между передним и задним склонами гребней волнового цуга [13, 26].

Затем, в 1940 году геофизик Рамирес, используя треугольное расположение сейсмометров, на примере города Сент-Луис, штат Миссури, показал, что микросейсмы распространяются со стороны впадин у побережья Атлантического океана. Его методы определения направления распространения сейсмических воздействий также легли в основу успешного проекта по отслеживанию ураганов в районе Карибского моря. Он установил, что связи между исследованиями микросейсм в Сент-Луисе и показаниями барографа в Сент-Луисе и Флориссане практически не существует, даже во время близкого прохождения торнадо в марте 1938 года. В том же году Бэрдом и Банвеллом были проведены наблюдения на территории Новой Зеландии, которые показали, что амплитуда колебаний микросейсм мала и составляет всего несколько дюймов [37].

Однако существует более ранняя теория, принадлежащая немецкому физику Эмилю Вихерту, некоторое время поддерживаемая немецким сейсмологом Бено Гутенбергом. Рассматриваемая теория заключалась в том, что микросейсмы вызываются ударами океанических волн о скалы берегов. Есть утверждения, согласующиеся с этой теорией, которые говорят о том, что существует статистическая корреляция, например, между амплитудой микросейсм в Гамбурге и высотой волн у побережья Норвегии. Исходя из проведённых наблюдений, можно предположить, что микросейсмы, связанные со штормами на море, могут быть зарегистрированы за несколько часов до того, как морские волны достигнут берега [19].

Со временем многие авторы пришли к выводу о том, что, возможно, микросейсмические шумы вызваны колебаниями давления на морском дне,

вследствие распространения океанических волн. Однако ранее, ввиду некоторых теоретических возражений, данное предположение не рассматривалось всерьёз [30].

В период с 1937 по 1941 годы и сейсмолог Шуэ Бернар занимался исследованием распространения морских волн у побережья Марокко. Он пришёл к выводу, что периоды таких волн приблизительно вдвое больше периодов микросейсмических волн. К такому же выводу пришёл сейсмолог Дикон, сравнивая некоторые сейсмограммы с записями волн, полученными в Перранпорте, в графстве Корнуолл [37]. Однако, за несколько лет до этого Бернар придерживался мнения, что одной из причин образования микросейсмических колебаний могут являться стоячие волны. Он предполагал, что благоприятные условия для возникновения стоячих волн образуются в центре циклонической депрессии или, вероятно, на крутых склонах побережья, где происходило отражение от берега [37].

В 1944 году сейсмолог Мишэ, также занимавшийся изучением микросейсмических шумов, исследуя волновое движение, обнаружил, что стоячие волны приводят к изменению давления, оказывающего влияние на морское дно. Ещё одним примечательным фактом является то, что частота изменения давления вдвое превышает основную частоту волн [29, 37, 41].

В 1958 году Бено Гутенбергом была создана классификация источников микросейсмических шумов в зависимости от частоты. Затем, в 1978 году Астен и Хенстридж, также занимавшиеся изучением микросейсм, дополнили её [3]. Далее приведены упомянутые ранее классификации сейсмических воздействий. Помимо этого, в дальнейшем будут рассмотрены вопросы применения исследуемого микросейсмического шума для решения различных прикладных задач, а также причины возникновения и распространения вибрационных шумов мегаполиса.

Таблица 1.1.1. Классификации источников микросейсмических шумов

	Классификация Гутенберга (1958 г.)	Классификация Астена (1978 г.)
Океанические волны, сталкивающиеся с побережьем.	0,05-0,1 Гц	0,5-1,2 Гц
Крупномасштабные метеорологические возмущения	0,1-0,25 Гц	0,16-0,5 Гц
Циклоны над океанами	0,3-1 Гц	0,5-3 Гц
Локальные метеорологические условия	1,4-5 Гц	
Вулканический тремор	2-10 Гц	
Городские условия	1-100 Гц	1,4-30 Гц

1.2. Использование информации о микросейсмических воздействиях для решения некоторых прикладных задач

Исследование волновых форм микросейсмического шума, их природы, закономерностей распространения в земной толще является способом решения ряда научных и прикладных задач, одной из которых является прогноз землетрясений. Волновые формы микросейсмических воздействий являются наглядной моделью процессов, предваряющих землетрясения. Помимо этого, волновые формы, характерные для обширного частотного диапазона дают больше возможностей для пассивного акустического каротажа, использующегося для поиска нефтяных резервуаров [17].

В настоящее время, при проведении расчётов, чаще всего используется колебательная скорость частиц грунта, т.к., основываясь на её значениях, представляется возможным осуществлять оценку кинетической энергии,

поглощаемой объектом исследований при сейсмических воздействиях. При этом главным критерием при оценке ущерба зданий и сооружений вследствие низкочастотных сейсмических воздействий (менее 2 Гц) является виброускорение грунтов. Существует понятие возможного критического колебательного ускорения частиц грунта $a = 0.3g$, характерного для рыхлых грунтов, о котором писал один из основоположников инженерной сейсмологии [5].

В определённый период времени, до появления первых записей сильных движений, инженеры-сейсмологи определяли колебательное ускорение при сейсмических воздействиях по перемещениям предметов, находящихся в помещениях зданий. Позднее, геофизик Хаузнер, основываясь на некоторых фактах о физико-механических свойствах горных пород, слагающих грунтовые толщи, сделал вывод о том, что максимальное значение виброускорения грунтов может составлять $0.5g$. Для одного из районов Лос-Анджелеса, Калифорния, пиковые показатели ускорения частиц грунта, для которого варьируются в диапазоне $1.15-1.25g$, зафиксировано значение эффективного ускорения, соответствующее $0.75g$. Однако позднее инженер-сейсмолог Николас Амбрейзис предположил, что уровни колебательного ускорения частиц грунта при землетрясениях способны достигать значения $2g$. На основе данных, полученных при землетрясении в Ассаме в 1897 году, зафиксировано колебательное ускорение грунта значением $1.5g$ [6].

1.3. Причины возникновения вибрационных шумов мегаполиса

За последнее время, одной из наиболее активных областей сейсмических исследований является городская сейсмология, главной целью которой является определение характеристик подземных геологических структур, улучшение сейсмического микрорайонирования и определение сейсмических рисков в населённых районах [7].

За последнее десятилетие интерес к сейсмическим сигналам техногенного происхождения вырос после увеличения числа непрерывно записывающих

широкополосных цифровых сейсмических станций и разработки методов использования информации об окружающих сейсмических шумах для получения томографических изображений в различных масштабах. Информация о колебаниях грунта от движения железнодорожного и автомобильного транспорта использовалась для оценки данных о поперечных сейсмических волнах, для построения суммированных сейсмических изображений, а также для определения времён пробега поверхностных волн [31].

Сейсмические датчики были предложены как эффективный способ обнаружения и определения характеристик передвигающихся транспортных средств по автомагистралям. Размещение сети датчиков высокой плотности позволило не только отображать распространение сейсмических волн через городскую среду, но также контролировать движение поездов и взлёт и посадку самолётов, а также другие техногенные источники. Большинство таких исследований проводились при помощи короткопериодных или акселерометрических датчиков, поскольку они были предназначены для анализа высокочастотных сигналов [15].

Однако в последние годы были опубликованы некоторые исследования, основанные на изучении сейсмических данных, зарегистрированных широкополосными сейсмометрами, установленными в городских условиях. Грус и Риттер проанализировали данные широкополосной сети, установленной в Бухаресте, с целью исследования источника сейсмических воздействий в различных частотных диапазонах. Они пришли к выводу, что человеческая деятельность является доминирующим источником для частот ниже 0,1 Гц и выше 1 Гц, при этом наблюдался вклад ветряного воздействия в диапазоне 0,6-1,2 Гц для скоростей более 3-4 м/с [38].

В работе (Boese et al.) проводилось исследование спектра сейсмического сигнала, зарегистрированного скважинными сейсмометрами, установленными в Окленде, Новая Зеландия. Исследователи определили сигналы, генерируемые движущимися транспортными средствами и поездами в диапазонах частот 5-25

Гц и 8-50 Гц, а также повышенный уровень шума во время чемпионата мира по регби 2011 года. Не так давно в работе (Green et al.) проанализировали сеть из 5 широкополосных сейсмометров, установленных в центре Лондона приблизительно в течение месяца. Опять же, сигналы, создающиеся в результате человеческой деятельности, доминируют в большей части спектров сейсмических сигналов, за исключением вторичного микросейсмического пика (0,16-0,5 Гц), а колебания, связанные с передвижениями поездов метрополитена, наблюдаются как на высоких, так и на низких частотах [38].

Ещё одной целью установки сейсмических станций на территориях крупных мегаполисов является широкое распространение получаемых данных, которые также вызывают обширный интерес у лиц, не относящихся к научным сообществам [38].

Широко известным является тот факт, что сейсмические сигналы имеют разные источники и механизмы генерации в различных частотных диапазонах. Антропогенные факторы характерны для высоких частот сейсмической записи, о чём свидетельствует высокое различие интенсивности в дневное и ночное время суток, а также в будние и в выходные дни (в дневное время суток и в будние дни интенсивность сейсмических сигналов, разумеется, гораздо выше) [9]. Полоса частот 0,04-1 Гц, включающая, в том числе, микросейсмический диапазон, и зарегистрированная широкополосными станциями, расположенными в относительно тихих местах по всему миру, содержит в себе наибольшую сейсмическую энергию. Происхождение сейсмических воздействий, характерных для такой полосы связано с распространением океанических волн вкупе с упругими волнами, создающихся в толще морского дна. В полосе частот 0,05-0,1 Гц преобладают вариации день-ночь, которые не связаны с природными источниками микросейсм. В пределах 0,1 и 0,25 Гц изменения в зависимости от времени могут быть связаны с изменениями высоты океанических волн в Атлантическом и Средиземноморском бассейнах. Выше 0,25 Гц колебания явно имеют другую природу, наиболее вероятно связанную с локальными

метеорологическими условиями, а именно с циркуляцией ветра вблизи зданий и сооружений [9, 27, 36].

В различных исследованиях был проанализирован сейсмический шум, создаваемый железнодорожным транспортом, и предложены модели для прогнозирования индуцированных колебаний. Некоторые из них проводились неподалёку от исторических архитектурных сооружений, например Кельнский собор и колокольня в Сиане. В большинстве из этих исследований основное внимание уделяется высокочастотному диапазону сейсмических записей [20].

Исследования, проведённые вблизи станций метрополитена, показывают, что на высоких частотах отдельные прохождения поездов метро распознаются в диапазоне частот 20-40 Гц. Для сейсмического сигнала, создаваемого движением поездов метрополитена характерны периоды 20-125 с. Такой сигнал соответствует низкочастотной области спектра, а именно полосе 0,008-0,05 Гц. Как и в случае высоких частот, огибающая вертикального сейсмического ускорения позволяет идентифицировать отдельные поезда. Пики в этой полосе имеют меньшую амплитуду и размыты. Возможно, данный факт предполагает наличие других источников [25].

Грин и др. сообщили о кратковременной сигнатуре с малой амплитудой, которая была зафиксирована сейсмической станцией, расположенной практически над туннелем метрополитена. Эта сигнатура была интерпретирована как квазистатическая реакция на прохождение поезда после моделирования, предложенная Янгом и др. Согласно данной гипотезе, сигнал будет соответствовать величине деформации туннеля, вызываемой весом проходящего поезда [12]

Вайлендт в своих исследованиях отражал, что широкополосные сейсмометры чувствительны к вариациям магнитного поля Земли, особенно в городских условиях, что может объяснять возникновение низкочастотных сейсмических сигналов. Электрические железные дороги постоянного тока создают магнитные поля, как от предполагаемых тяговых токов, так и от

блуждающих токов, протекающих через толщу земли. Оценка интенсивности вариаций магнитного поля, индуцированных железными дорогами, сложна и зависит от множества параметров [16].

Помимо различных типов транспорта и промышленных предприятий, ощутимым источником сейсмических воздействий являются различные массовые мероприятия с большим скоплением людей – футбольные матчи, музыкальные концерты и фестивали и т. д. Существуют примеры исследований сейсмической активности при проведении таких мероприятий. Например, матч колледжа в американский футбол в Луизиане в октябре 1988 года, был зарегистрирован сейсмической аппаратурой и приобрёл название «Игра землетрясений». Не так давно состоялся матч между Seahawks и New Orleans Saints, зарегистрированная в Сиэтле в январе 2011. Эта игра была названа «Beast quake» и послужила стимулом для установки сейсмической аппаратуры на стадионе Seahawks, находящейся под управлением Тихоокеанской северо-западной сейсмической сети [38].

При проведении футбольных матчей были зарегистрированы ликования болельщиков во время забитых голов. К таковому относится событие «Gol del terremoto», зарегистрированное в 1992 году сейсмометром Observatorio Astronómico La Plata (Аргентина), расположенным приблизительно в 600 м от футбольного стадиона. При временном размещении широкополосных сейсмометров в Камеруне в 2006 году сигналы, схожие с сотрясениями, записанные одновременно по всей стране, удивили исследовательскую группу, выполняющую проекты по сейсмической разведке по всей стране. Эти сейсмические события были отнесены к ликованиям фанатов во время просмотра телевизионных футбольных трансляций национальной сборной по футболу на Кубке африканских наций 2006 года [38].

Одним из ярких примеров рассматриваемого исследования является регистрация сейсмических событий во время матча полуфинала Лиги чемпионов «Барселона – Бавария» в мае 2015 года. Три гола, забитые ФК «Барселона», пришлось на заключительные 15 минут матча. Записанные сигналы чётко

наблюдаются в диапазоне частот 1-6 Гц. Начало трёх проанализированных событий имеют выходящий характер, их длительность близка к значениям 17-18 с. Амплитуда пиковых ускорений различается в трёх случаях, причём во втором случае наибольшая амплитуда достигает значений $\pm 3.5 \times 10^5$ нм/с² для компоненты восток-запад. Во всех случаях амплитуда горизонтальной приблизительно в 3 раза больше амплитуды вертикальной составляющей. Диаграммы движения частиц не показывают чётко определённой поляризации, но подробный анализ начала каждого события характеризует эллиптическое движение в горизонтальной плоскости, предполагая взаимодействие нескольких волновых фронтов. Большая часть энергии поступает с обратным азимутальным направлением, близким к N50E, в приблизительном поперечном направлении распространения. Малая амплитуда вертикальной составляющей и преобладающая энергия вдоль поперечного направления горизонтальных составляющих, судя по всему, исключает распространение Рэлеевских волн [31].

В случае сравнения сейсмической активности во время футбольных матчей и музыкальных концертов, основное различие заключается в анализе частотного состава измеряемых волновых процессов. Сейсмическая энергия во время спортивных событий распределяется равномерно в полосе частот 1-10 Гц, при отсутствии гармонических составляющих. Это наблюдение интерпретируется как отражение характеристик движения массы людей, в тот момент, когда они подсакивают во время забитого гола и продолжают двигаться в течение нескольких секунд. Этот внезапный скачок футбольных фанатов, количество которых может достигать 90000 человек, приводит к внезапному образованию вибрации, но этого недостаточно для создания устойчивой вибрации, в которой могут прослеживаться определённые гармоники [22].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что сейсмические записи, зарегистрированные при помощи широкополосных сейсмометров в пределах крупных мегаполисов, представляют собой мощный информационный инструмент, используемый широкой публикой и средствами массовой

информации, для распространения полученной информации о сейсмической обстановке. Помимо этого, подробный анализ записанных данных выявляет некоторые весьма интересные факты, дающие представление о многих необычных источниках сейсмических сигналов [23].

Широкополосные сейсмометры приносят большую практическую пользу при осуществлении регистрации сейсмических воздействий, генерируемых передвигающимися транспортными средствами по проспектам и автомагистралям. Большим преимуществом такой аппаратуры является отсутствие необходимости её установки в непосредственной близости от исследуемых участков автодорог. Данное оборудование является очень надёжным, позволяет отслеживать регистрируемые сейсмические колебания в режиме реального времени, а также может быть установлено в любом относительно тихом безопасном месте. Возможность такого мониторинга позволяет проводить оценку спектральных характеристик сигналов, генерируемых курсирующими поездами в туннелях метрополитена [21].

Сейсмические события во время проведения общественных мероприятий весьма различны по своему частотному составу. Данные различия проявляются в диаграммах движения частиц, характеризующих простое эллиптическое движение при реакции людей на значимые события во время проведения общественных мероприятий [39].

Подводя итог, можно сказать, что городская сейсмология может использоваться не только для дифференциации различных источников вибрации, но для лучшего понимания многочисленных механизмов, связанных с возникновением сейсмических воздействий, включая такие разнообразные функции, как вариации магнитного поля, акустико-механическая связь или резонансные явления в зданиях.

1.4. Воздействие транспортных шумов

Постоянное увеличение транспортного трафика отрицательно сказывается на техническом состоянии жилых и инженерных сооружений, а также на комфорте жителей населённых пунктов [54]. Проблема воздействия вибрационных и акустических шумов, создаваемых транспортом, связана с состоянием и динамикой конструкции зданий, а также с субъективной психофизической реакцией людей на их воздействие [90]. Современные здания имеют более низкое собственное демпфирование и более низкие частоты собственных колебаний по сравнению с более старыми сооружениями в связи с использованием более лёгких и прочных строительных материалов, а также в связи с большей высотой [85]. В связи с этим, необходимо проводить измерения уровня транспортного шума и вибрации для оценки их совокупного воздействия на строительные объекты и для дальнейшего осуществления мероприятий по их защите. Для наиболее объективной оценки динамического воздействия транспортных шумов на строительные конструкции и людей рекомендуется проводить прямые измерения ускорения и скорости колебательного процесса [55].

Преобладающие частоты и амплитуда транспортных вибраций зависят от многих факторов. К таковым относятся состояние дорожного полотна; вес, скорость и система подвески транспортного средства; тип и степень неоднородности почвы, времени года; типа здания; удалённости строительного сооружения или точки наблюдения от дороги [55, 86].

Колебания, создаваемые потоками автомобильного транспорта, обычно лежат в диапазоне частот от 5 до 25 Гц. Наиболее амплитудные сейсмические волны создают тяжёлые транспортные средства, такие как автобусы и грузовики при движении по неровностям дорожного покрытия, например, по выбоинам, трещинам и выступающим на поверхность крышкам канализационных люков [87, 122]. Когда транспортное средство контактирует с такой неровностью, создаётся ударная нагрузка из-за последующего «раскачивания» оси транспортного средства. Такая нагрузка генерирует колебания, которые преобладают на

собственных частотах колебаний грунта, в то время как движение оси создаёт колебания, которые преобладают на собственной частоте колебаний подвески автомобиля [89]. Если частота колебаний, вызванных движущимися транспортными средствами, совпадает с собственной частотой колебаний какого-либо строительного сооружения, то возникают резонансные эффекты и вибрационное воздействие усиливается [59, 88].

Помимо дорожных неровностей, нормальная шероховатость дорожного полотна также вызывает постоянные динамические нагрузки [93]. Если шероховатость дорожного покрытия включает гармоническую составляющую, которая при определённой скорости приводит к воздействию с частотой, совпадающей с любой из собственных колебательных частот транспортного средства или грунта, может создаваться значительная вибрация [59, 92].

Влияние типа системы подвески также зависит от скорости автомобиля и от количества и величины неровностей дороги [91]. Для низкой скорости движения и ровной дороги влияние типа подвески незначительно. Но для высоких скоростей и неровных дорог тип системы подвески транспортного средства является важным [94]. При движении автобуса и грузового автомобиля на скорости 25 км/ч, уровни создаваемой ими вибрации были одинаковыми. Однако при движении таких транспортных средств на скорости 50 км/ч, уровень вибрации, вызванной автобусом, примерно вдвое превышал уровень вибрационного воздействия, вызванного грузовиком [59, 81].

Помимо всего прочего, вибрации от транспортных средств в значительной степени зависят от стратификации и типа почвы — чем ниже жёсткость и демпфирование почвы, тем выше уровень вибрационных воздействий [98, 99]. Для ударных нагрузок вибрации грунта максимальны на его собственных частотах. На таких частотах почва, как и любая структурная система, обладает наименьшим сопротивлением и, следовательно, наиболее сильно реагирует на нагрузки. Собственные частоты грунта также зависят от типа и стратификации почвы [97]. Как правило, дорожные колебания сильны в зонах, подстилаемых

мягким слоем глинистой почвы глубиной от 7 до 15 м. В таких областях собственные частоты почвы могут совпадать с частотами собственных колебаний зданий и их структурных элементов, что приводит к резонансу и вызывает усиление вибраций [59, 95].

В Канаде и других северных странах, где верхний слой почвы обычно замерзает в зимний сезон, уровень распространяющейся вибрации может быть в половину меньше, чем в более тёплые сезоны [96]. Наиболее негативный отклик населения на вибрационные воздействия приходится на весенний сезон. Принято считать, что для данного периода времени характерен наиболее высокий уровень грунтовых вод, способствующий значительному возрастанию уровню вибрационных воздействий [100]. При этом, возможно, что такая реакция связана с тем, что население «отвыкает» от сильных вибраций в зимний период [59].

В работе [56] приведены исследования воздействия транспортных шумов в историческом здании в Неаполе, по результатам которых были выявлены превышения предельно допустимого значения колебательной скорости, составляющего 0,14 мм/с, установленного международным стандартом ISO 2631 [55, 101].

В одной из своих работ Хао проводил измерения вибрации на четырёх участках в 20 м от автомобильной дороги. По полученным данным колебательное ускорение частиц грунта варьировалось от 0,005 до 2 м/с², а скорость смещения частиц варьировалась от 0,05 до 25 мм/с [55, 103].

В работе [54] приведены результаты измерений вибрационных шумов, воздействующих на жилое сооружение вблизи автотрассы. Целью исследования были: определение влияния транспортных средств, движущихся по окружной дороге, на жилое здание (выявление вибраций в здании и оценка их возможных вредных воздействий), определение потенциального распространения повреждений на различных элементах здания путём установки контрольных пломб на образовавшихся ранее трещинах и разрывах, оценка технического состояния элементов жилого сооружения и автотрассы, оценка интенсивности

движения вдоль автотрассы около жилого здания. Также дополнительно было проведено исследование влияния вибрации на людей, находящихся внутри рассматриваемого жилого здания [54, 102].

Перед проведением измерений, в течение нескольких дней был осуществлён мониторинг движения автомобильного транспорта по автодороге вблизи здания [104]. Около 8 часов утра наблюдалось движение большегрузных автомобилей, выезжающих с расположенной неподалёку транспортной компании. В районе 3-4 часов после полудня эти транспортные средства возвращались обратно на базу. За весь период наблюдений за автотранспортом был зафиксирован 21 грузовой автомобиль [106]. Помимо этого, изредка по дороге проезжала сельхозтехника. В большинстве случаев по дороге курсировали легковые автомобили. Скорость движения транспортных средств обычно не превышала 30 км/ч, поскольку на одном из своих концов дорога приобретает извилистую форму под достаточно острыми углами [54, 82].

Измерения проводились внутри здания, а именно – около несущей стены, на внешнем фасаде здания, около несущей стены со стороны источника вибраций, а также около несущей стены на первом этаже здания – для определения воздействия вибрационных шумов на людей [105]. Помимо этого измерения были проведены за пределами жилого помещения – около фундамента забора, на тротуаре и на специальном треножном штативе, вкопанном в почву на приусадебном участке. В качестве измерительной аппаратуры использовался трёхкомпонентный датчик вибрации FastTracer от компании Sequoia [54].

По результатам анализа данных, зафиксированных внутри жилого помещения, было выявлено, что в сигнале преобладают частоты от 10 до 25 Гц, а максимальное ускорение горизонтальных компонент колебательного процесса составляет $0,009 \text{ м/с}^2$. Указанное значение было получено в момент проезда грузового автомобиля массой 41,2 т со скоростью 35-40 км/ч. Виброускорение при передвижении других, более лёгких автотранспортных средств было на значительно более низком уровне и составляло не более $0,003 \text{ м/с}^2$ [54, 107].

При анализе данных, полученных с точек измерения, расположенных вне здания, было выявлено, что виброускорение горизонтальных компонент колебательного процесса не превышает значение $0,005g$ (где g – ускорение свободного падения) [108]. При этом спектральный состав сигналов в измерительных точках практически идентичен, что говорит об однородности грунта на измерительном участке и о том, что колебания в нём распространяются аналогичным образом, что и в здании [54, 110].

Для вертикальной компоненты колебательного процесса скорректированное предельно допустимое значение виброускорения составляет $0,16 \text{ м/с}^2$. Однако полученные в ходе эксперимента значения не превышают данный порог. Для горизонтальных компонент предельно допустимый уровень виброускорения составляет $0,1152 \text{ м/с}^2$ и также не был превышен на исследуемой территории [54, 109].

Также сильное влияние на строительные сооружения и жизнедеятельность людей оказывает железнодорожный транспорт [111]. Уровень воздействия железнодорожных шумов зависит от веса и скорости движущегося состава. В работе [57] отражено, что уровень отклика почвы и строительных сооружений на железнодорожный вибрационный шум увеличивается с возрастанием скорости состава и уменьшается с увеличением расстояния между железнодорожными путями и объектом [112]. Также было показано, что виброскорость горизонтальной компоненты колебательного процесса монотонно увеличивается с высотой здания, при этом колебательная скорость вертикальной компоненты увеличивается неравномерно [83, 113].

В работе [58] обсуждались параметры вибрационных шумов, вызванных движением железнодорожного состава по одному из путей японской пассажирской железнодорожной сети Синкансэн. При движении поезда со скоростью 300 км/ч была выявлена преобладающая частота, соответствующая 4 Гц , связанная с локальными грунтовыми условиями [58, 115].

В работе [55] описаны полевые исследования, проводимые для мониторинга вызванных поездом колебаний грунта вблизи железнодорожной станции Чандер Нагар Халт, Сахибабад, Индия, а также на станциях Видхан Сабха Делийского метрополитена. Железнодорожный экспресс *Rusrak*, двигаясь со скоростью 100 км/ч, на расстоянии 4 м от точки наблюдения, вызывает колебательное движение частиц с ускорением 153 мм/с^2 , со скоростью 392 мкм/с и генерирует звуковое давление в 94,3 дБ [116, 117]. Железнодорожный экспресс *Gomti*, при движении со скоростью 80 км/ч на расстоянии 4 м от измерительного пункта создаёт колебательное движение частиц грунта с ускорением 109 мм/с^2 , со скоростью 230 мкм/с и вызывает звуковое давление в 83,9 дБ [119]. При движении железнодорожного экспресса *Jan Shatabdi* со скоростью 70 км/ч, на расстоянии 10 м от точки наблюдения, зафиксированы виброускорение частиц грунта значением 65 мм/с^2 , виброскорость частиц значением 257 мкм/с и звуковое давление значением 85,7 дБ. При движении железнодорожного состава *Mall train* со скоростью 130 км/ч, на расстоянии 10 м от измерительного пункта, зафиксированы виброускорение частиц грунта значением 161 мм/с^2 , виброскорость частиц значением 445 мкм/с и звуковое давление значением 81,7 дБА. В низкочастотной области полученного сигнала присутствует пик, обусловленный резонансом колёс состава и железнодорожного полотна [121]. Затем энергия колебаний передаётся в виде поверхностных волн, при этом часть их энергии будет ослабляться вследствие геометрического расхождения и демпфирующих свойств грунта. Собственная частота колебания здания находится в низкочастотном диапазоне, в пределах 10 Гц, и, если частота создаваемых поездом колебаний находится в том же диапазоне, могут образоваться резонансные эффекты [55, 84].

Таким образом, было зафиксировано, что среднее значение виброускорения колебательного движения частиц грунта на расстоянии 4 м от точки наблюдения составляет 130 мм/с, виброскорость – 336 мкм/с при прохождении поездов со скоростью 80 км/ч. Следовательно, учитывая максимально допустимым значение

колебательной скорости частиц 3 мм/с, при котором образуются повреждения строительных сооружений, существует некий «запас» до достижения предельно допустимого значения виброскорости, который составляет 15 дБ [118]. При движении поездов со скоростью 50 км/ч зафиксировано виброускорение в 20 мм/с² и виброскорость в 47,8 мкм/с на расстоянии 5 м от точки наблюдения. Данные значения не достигают предельно допустимых показателей [55, 120].

1.5. Защита строительных сооружений от вибрационных и акустических шумов

Как было отражено в предыдущем разделе, строительные сооружения подвержены многочисленным воздействиям низкочастотных вибрационных шумов, создаваемых автомобильными и железнодорожными транспортными средствами. В связи с этим возникает необходимость осуществления мероприятий по защите строительных конструкций от такого рода воздействий [60].

Наиболее перспективным и экономически выгодным методом защиты строительных сооружений от вибрационных воздействий является использование тяжёлых масс, размещаемых на поверхности земли около дорог – бетонные или каменные блоки, специально спроектированные кирпичные стены и т.п. Большая часть энергии вибрации, генерируемой транспортными средствами, передаётся в виде поверхностных волн Рэлея. Способность подавлять такие колебания на пути их распространения является особенно важной в ситуациях, когда очень трудно или невозможно снизить интенсивность колебаний грунта в источнике.

Ранее, в качестве защиты от низкочастотных вибрационных воздействий использовались специальные защитные траншеи, способные экранировать строительные конструкции от поверхностных волн Рэлея. Но у таких средств защиты есть существенный недостаток – их строительство и содержание обходится слишком дорого. Более того, из-за особенностей рассеяния волн Рэлея, они не способны обеспечить их полное экранирование, независимо от их глубины [123].

Параметры рассматриваемых масс, такие как габаритные размеры и вес могут быть выбраны так, чтобы частоты их собственных колебаний, помимо всего прочего зависящие от жёсткости грунта, находились в диапазоне вибрационных воздействий, создаваемых автомобильным и железнодорожным транспортом. Принцип действия рассматриваемых объектов заключается в следующем – когда масса встряхивается под воздействием падающей на неё поверхностной волны Рэлея, она разделяет эту волну на объёмные продольные и поперечные волны, распространяющиеся в дальнейшем вглубь земли, а также рассеивает её в различных направлениях, что приводит к заметному резонансному затуханию передаваемых землёй колебаний. При использовании таких рассеивателей и их комбинаций, можно ожидать достижения эффективной виброизоляции строительных сооружений.

1.6. Геоэкология

Наиболее вероятно, самым первым человеком, употребившим термин «Геоэкология», был немецкий географ К. Троль. В конце XX века это понятие обрело широкую популярность в публикациях ведущих геологов России. Геологическое описание геоэкологии дал В. Б. Сочава, определивший данную дисциплину как науку о состоянии геологической среды и всех её компонентов, о происходящих в ней процессах, активизация которых может отражаться на состоянии других геосфер Земли [64, 77]. Он аргументировал появление данного термина желанием К. Троля отразить экологическую направленность ландшафтоведения. Также стоит отметить, что рассматриваемая наука развивается сначала в недрах уже ранее сложившихся дисциплин и лишь потом обретает своё название [67, 71].

В 1866 году крупнейший немецкий биолог Эрнст Геккель в работе «Всеобщая морфология» при построении иерархической системы классификации биологических наук назвал новым словом «экология» общую науку об отношении организмов с окружающей средой [72, 77].

Проблема взаимодействия человека с природой становится актуальной в XIX веке и по-разному рассматривается геологом Ч. Лайелем, географом Г. Маршем и философом Ф. Энгельсом. В России исследованиями в этом направлении занимались А. В. Воейков и В. В. Докучаев, несколько идей высказал и внедрил Д. И. Менделеев. Большая часть работы каждого из вышеупомянутых учёных связана с определённой фундаментальной научной дисциплиной, но, при изучении проблемы взаимодействия человека и природы, каждому им всем приходилось вставать на путь междисциплинарных исследований [68, 77].

Начиная с 50-х годов XX столетия, проблемы взаимодействия технически развитого человечества с окружающей средой также относят к области экологии. Хотя, согласно Ю. Одуму – это больше относится к большой экологии, согласно Ф. Рамаду – к прикладной экологии [65, 66].

Понятие «Геоэкология» стало утверждаться отчасти благодаря усилиям биолога и энциклопедиста Н. Ф. Реймерса. Он предложил называть классическую экологию биоэкологией, чтобы отличать её от социальной экологии и геоэкологии [69, 70, 77].

Термин «Геоэкология» появился в названиях некоторых кафедр и даже факультетов России, на обложках книг журналов, а также в названиях лекционных курсов. При этом смысл рассматриваемого понятия до сих пор трактуется по-разному [73, 114].

Ввиду огромного многообразия термина «Геоэкология» и большого количества предметов исследования данной науки, были сформулированы различные её определения с точки зрения научных подходов различных дисциплин наук о Земле [65].

Геобиосферный подход, сформулированный Е. А. Козловским, связан с широким и биологически ориентированным пониманием этого термина. В его понимании геоэкология – это новое научное направление, возникшее на стыке геологии и экологии, занимающееся изучением закономерных связей между

живыми организмами (в том числе и человеком), техногенными сооружениями и геологической «средой». Объектом исследования геоэкологии при рассматриваемом подходе является геоэкологическая система. В данном случае речь идёт об изучении не только абиотических сфер Земли, но и живого вещества через экосистемы различных уровней организации [64, 75].

Литосферный подход толкования термина «Геоэкология» вывел К. И. Сычёв, который сформулировал его следующим образом: «Геоэкология – это новое научное направление, возникшее в 80-х годах на стыке геологии и экологии. Это междисциплинарная и общепланетарная наука, изучающая в естественных и техногенно-нарушенных природных условиях закономерные изменения в литосфере, происходящие под действием внутренних (эндогенных) сил Земли и внешним влиянием атмосферы, гидросферы, биосферы и техносферы». Объектом исследований геоэкологии при данном подходе является геологическая среда во взаимодействии с внешними средами, но основной акцент делается на изучении изменений геологической среды, связанных с хозяйственной деятельностью человека [64, 65].

Геосферный подход толкования термина «Геоэкология» сформулирован в публикациях В. И. Осипова. В них геоэкология определяется как «междисциплинарная наука, изучающая неживое (абиотическое) вещество геосферных оболочек Земли как компоненту окружающей среды и минеральную основу биосферы. Объектом исследования геоэкологии при рассматриваемом подходе являются все абиотические геосферные оболочки Земли, при этом в центре внимания находятся верхняя часть литосферы и процессы, протекающие под влиянием природных и техногенных факторов» [64, 74, 76].

Существует ещё ряд толкований науки геоэкологии представителями геологических дисциплин:

- Новая метанаука о среде обитания разноуровневых геологических систем и реализующихся в ней взаимодействиях, в том числе между природой и обществом;

- Наука о взаимодействии литосферы и биосферы для решения экологических проблем, связанных либо с использованием первой, либо с взаимодействием литосферы и более глубоких недр;
- Междисциплинарная наука, изучающая состав, структуру и закономерности функционирования и эволюции естественных (природных) и антропогенно преобразованных экосистем высоких уровней организации;
- Междисциплинарная наука, исследующая закономерности формирования экологических функций геосферных оболочек Земли под влиянием природных и природно-техногенных процессов в связи с жизнедеятельностью человека и биоты, направленная на обоснование социально-экономических и нормативно-правовых механизмов рационального природопользования;
- Междисциплинарная наука, изучающая экологические функции абиотических сфер Земли, закономерности их формирования и пространственно-временного изменения под влиянием природных и техногенных причин в связи с жизнедеятельностью биоты и, прежде всего, человека.

В многочисленной геологической литературе отражены задачи геоэкологии, которые сформулированы следующим образом [64]:

- 1) Изучение изменений экосистем и их функционирование под влиянием эволюции природы и техногенеза;
- 2) Разработка теории и методов оценки устойчивости экосистем к техногенным воздействиям;
- 3) Разработка методов и способов управления состоянием и свойствами экосистем высокого уровня организации с целью сохранения их функциональной деятельности;
- 4) Участие в разработке экологически чистых и безотходных технологий;

5) Обоснование природоохранных мероприятий для защиты экосистем от воздействия негативных и катастрофических природных и антропогенных процессов.

Помимо основных задач, существуют основные направления геоэкологии, которые были сформулированы В. И. Осиповым [64, 79]:

Первое направление представляет собой анализ изменения геосфер вследствие влияния природных и техногенных факторов и разработка путей уменьшения этих изменений:

- Мониторинг состояния атмосферы, литосферы и гидросферы с целью изучения изменения жизнеобеспечивающих функций окружающей среды;
- Прогноз глобальных климатических изменений под влиянием природных и антропогенных факторов и их влияние на состояние геосфер Земли;
- Разработка теории и принципов оценки геоэкологической устойчивости геосфер Земли к действию природных и техногенных факторов;
- Анализ изменения ландшафтов урбанизированных, сельскохозяйственных и горнодобывающих районов, деформирования поверхности Земли в результате отбора воды, газообразных и жидких полезных ископаемых, подработки территорий;
- Анализ изменения режима поверхностных и подземных вод и связанных с ними процессов переувлажнения и обезвоживания территорий, приводящих к подтоплению, заболачиванию, опустошению, засолению почв, суффозии, карсту, площадной и линейной эрозии;
- Разработка теории оптимального функционирования природно-технических систем и создание нормативно-законодательной базы для экологически безопасного размещения элементов техносферы;
- Безопасное захоронение радиоактивных и токсичных отходов;
- Разработка критериев и требований геоэкологической экспертизы.

Второе направление представляет собой рациональное использование водных, земельных, минеральных и энергетических ресурсов Земли [64]:

- Установление предельных норм изъятия возобновляемых природных ресурсов;
- Применение комплексных и природоохраняющих способов добычи и переработки невозобновляемых природных ресурсов;
- Сохранение почв от истощения, деградации, эрозии и засоления;
- Защита от загрязнения и сохранение ресурсов питьевых вод;
- Рациональное потребление энергетических ресурсов и поиск новых источников энергии;
- Рекультивация нарушенных земель, утилизация отходов горнодобывающих, промышленных и сельскохозяйственных предприятий.

Третье направление представляет собой природные и природно-техногенные процессы и явления в геосферах Земли и их экологические последствия [64, 80]:

- Влияние гелиофизических процессов на биосферу Земли;
- Аномалии во внешних сферах Земли (атмосфере, гидросфере) и катастрофические природные явления;
- Экологические последствия эндогенных и экзогенных природных и природно-техногенных процессов и явлений;
- Геохимические и геофизические патогенные аномалии Земли, естественные и искусственные геохимические барьеры;
- Прогноз и предупреждение опасных природных и природно-техногенных процессов и явлений;
- Разработка мероприятий по снижению негативных экологических последствий от природных и природно-техногенных процессов и явлений в геосферах Земли.

1.7. Измерения вибрационных и акустических шумов в жилой квартире в районе сокольники, г. москва

В 2020 году в ИФЗ РАН поступило сообщение от жительницы района Сокольники о воздействии техногенных шумов, вызывающего сильное физиологическое недомогание. В связи с этим, летом и осенью 2020 года были проведены натурные измерения вибрационных и акустических шумов в квартире, находящейся на 5 этаже жилого дома, расположенного по адресу ул. Русаковская, д.12, к.1.

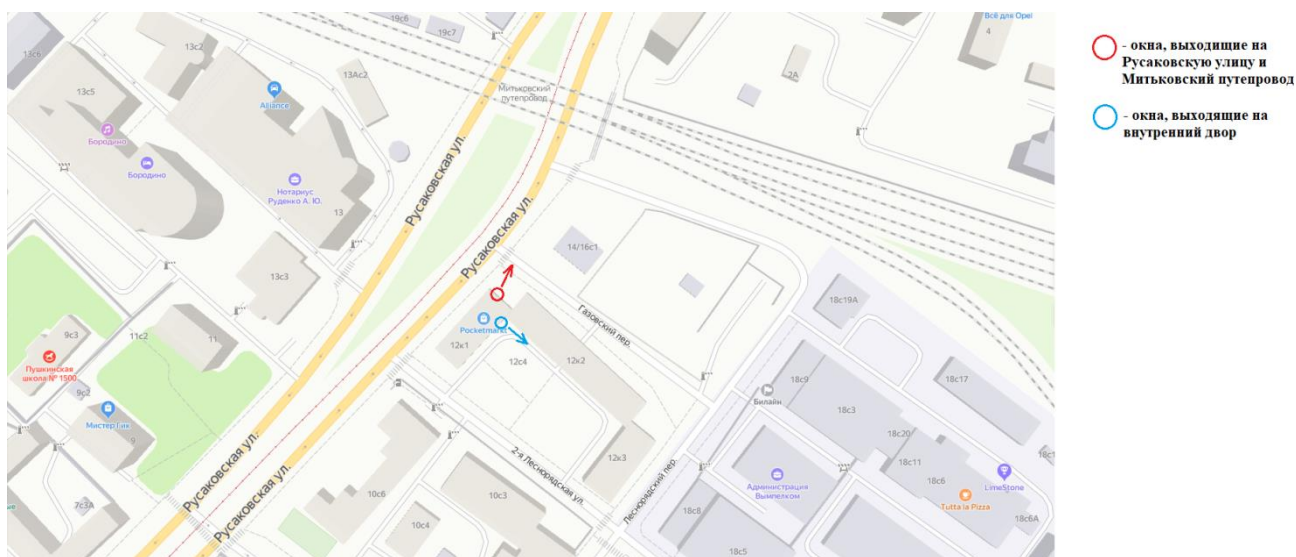


Рис. 1.7.1. Расположение дома на карте

В квартире имеется балкон, выходящий на Русаковскую улицу и Митковский проезд, а также окна, выходящие на внутренний двор.

Измерения вибрационных шумов выполнялись трёхкомпонентным сейсмометром СМЕ-4211-ВН15, с измерительным частотным диапазоном 0.033-50 Гц и чувствительностью 2000 В/(м/с), подключенным к цифровому регистратору REFTEK (рис. 1.7.2)

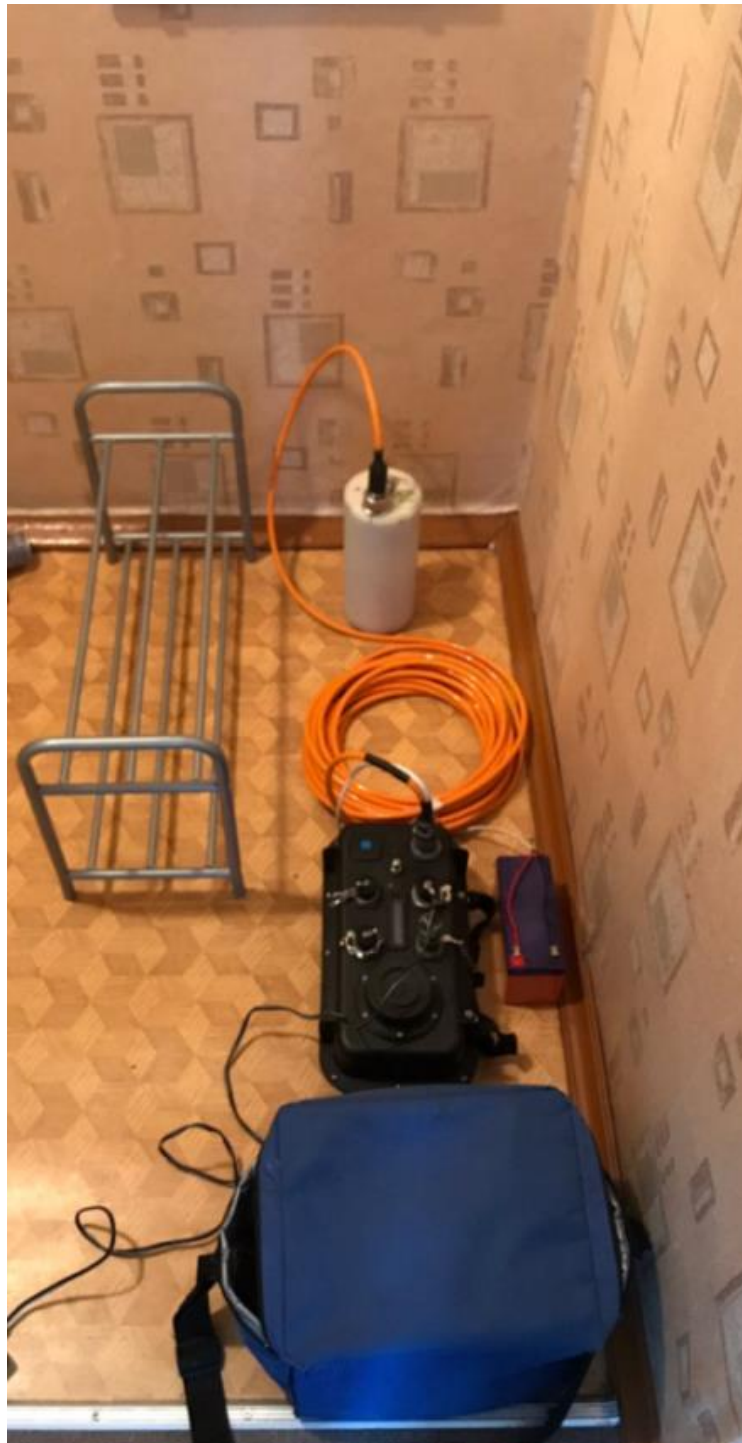


Рис. 1.7.2. Трёхкомпонентный сейсмометр СМЕ-4211-ВН15 (белый),
подключенный к цифровому регистратору REFTEK (чёрный)

Запись осуществлялась в два этапа: запись сигнала с 18.06.2020 по 23.06.2020, замена носителя и следующая запись с 23.06.2020 по 28.06.2020. На рисунке 1.7.3 приведена запись первого измерения.

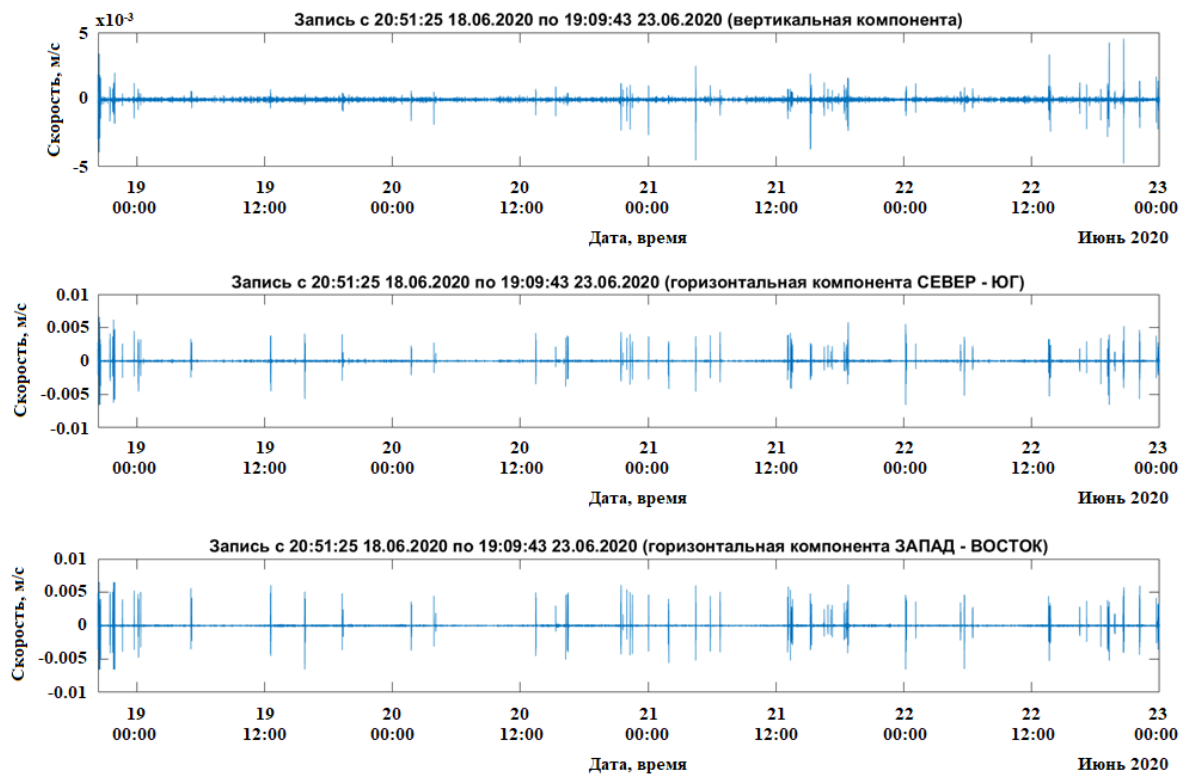


Рис. 1.7.3. Трёхкомпонентная запись первого измерения

На рисунке 1.7.4 приведены спектры полученных записей.

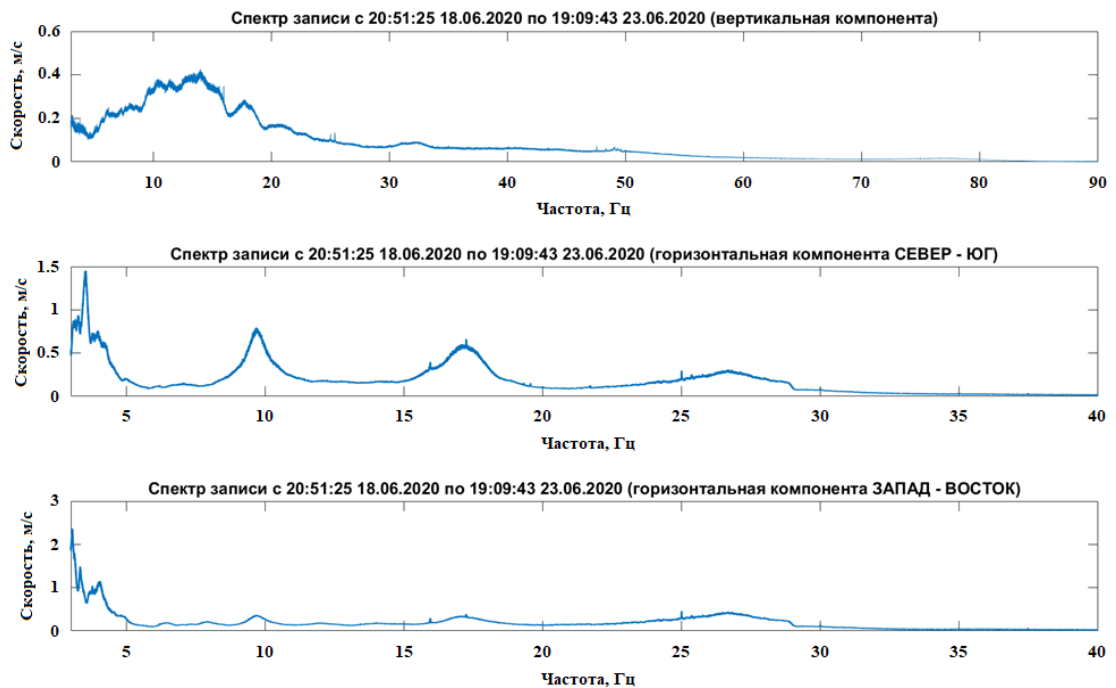


Рис. 1.7.4. Спектры записей первого измерения

Анализируя рисунок 1.7.4, становится заметным явное отличие спектра вертикальной компоненты колебательной скорости от двух разнополяризованных горизонтальных компонент. В спектре первой записи преобладают частоты в районе 12-14 Гц, в то время как в двух других преобладающими являются частоты 1-3 Гц. При этом в спектре компоненты СЕВЕР-ЮГ ярко выражены гармоники в районе 10 и 17 Гц, однако гармоники соответствующие таким же частотам спектра компоненты ЗАПАД-ВОСТОК выражены гораздо слабее. Затем имеющиеся значения скорости колебательного процесса были пересчитаны в ускорения (рис. 1.7.5).

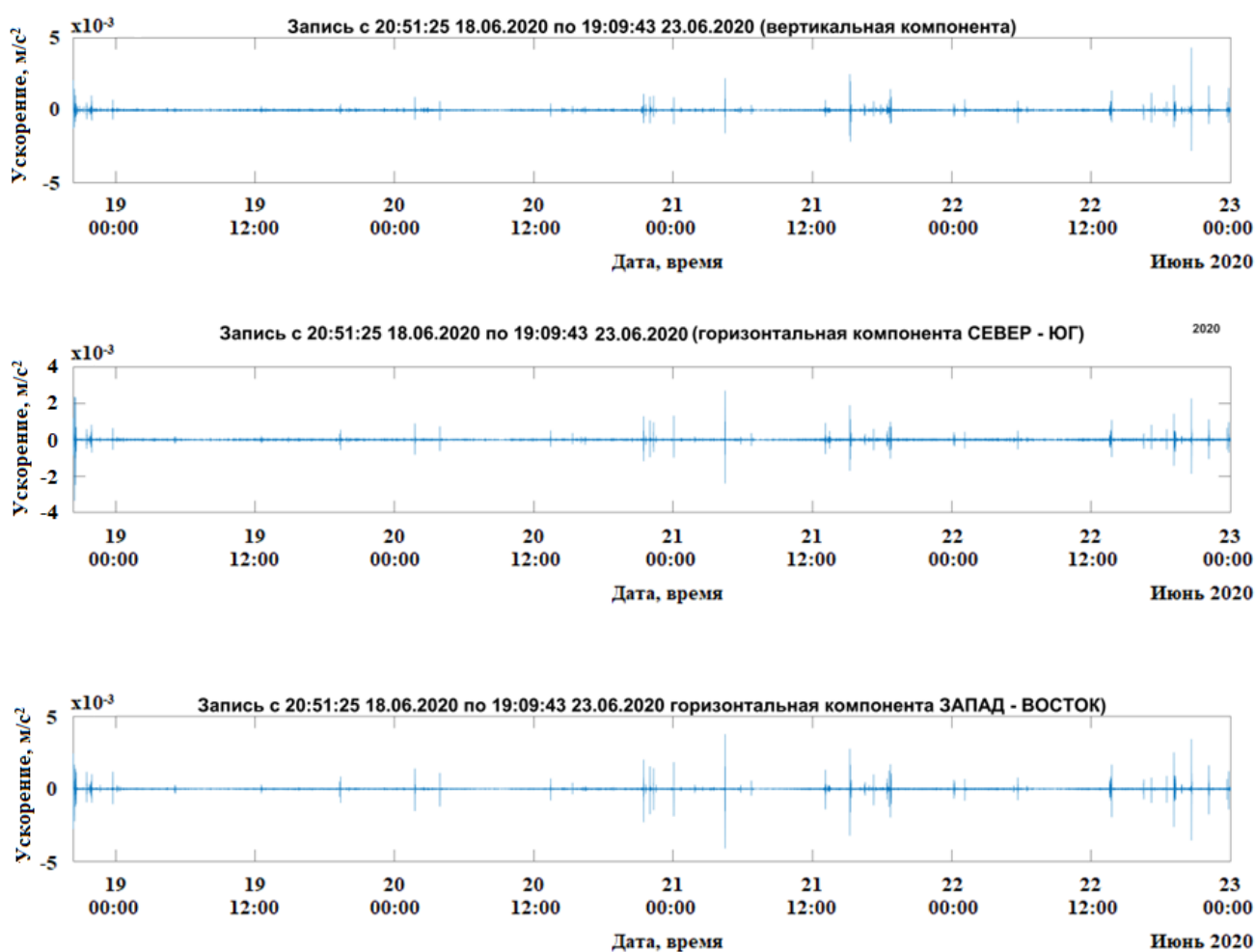


Рис. 1.7.5. Трёхкомпонентная запись первого измерения, выраженная через колебательное ускорение

На рисунке 1.7.6 приведены спектры данной записи.

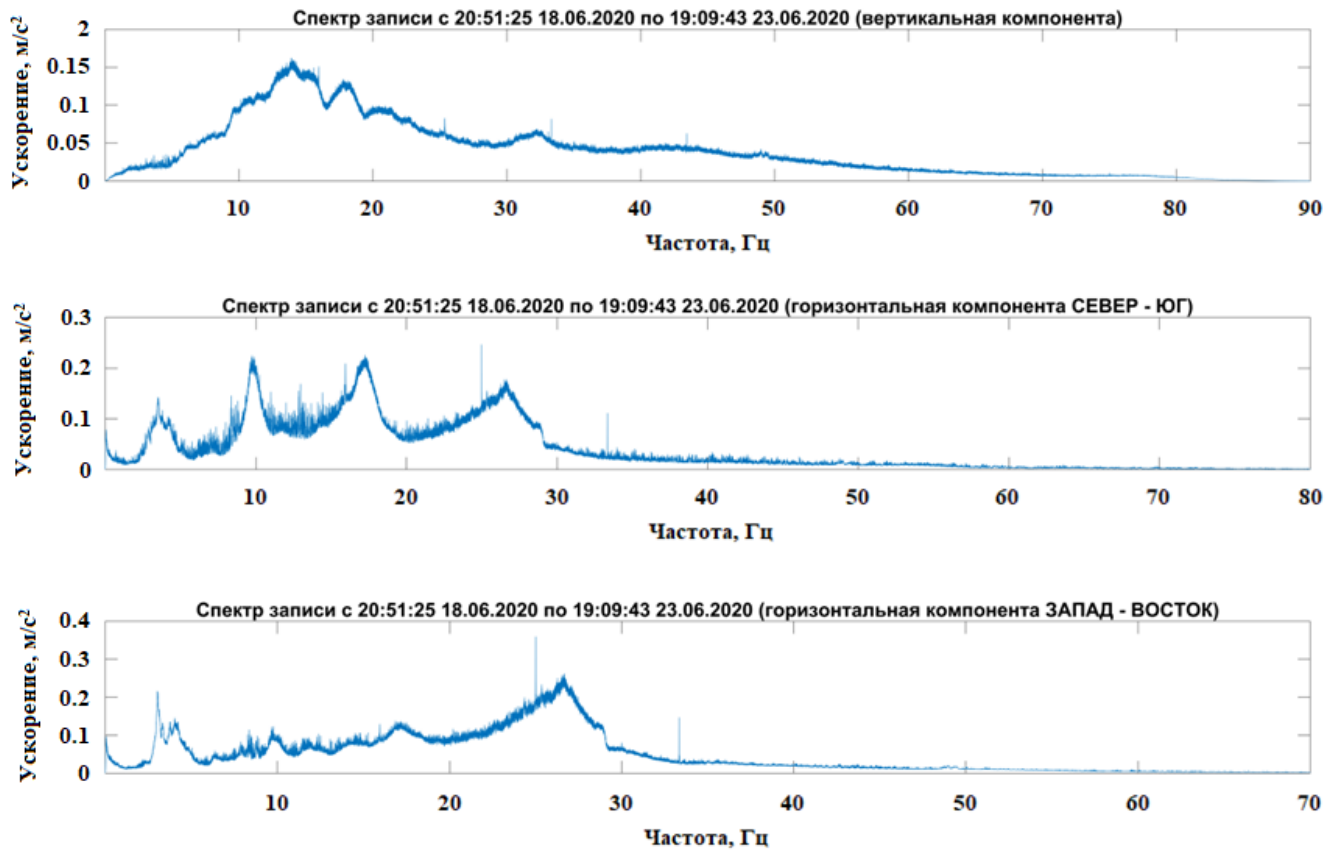


Рис. 1.7.6. Спектры полученных ускорений

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что спектры колебательной скорости и ускорения вертикальных компонент, в целом, схожи между собой. При этом горизонтальные компоненты изучаемых параметров существенно отличаются – в спектральном составе компоненты СЕВЕР-ЮГ преобладают частоты в районе 10 и 18 Гц, при этом наблюдаются ярко выраженные гармоники в районе 4 и 27 Гц. Преобладающая частота спектра компоненты ЗАПАД-ВОСТОК находится в районе 27 Гц, при этом отчётливо прослеживаются гармоники в районе 4-5 Гц.

На рисунке 1.7.7 представлены спектрограммы первой и второй записей.

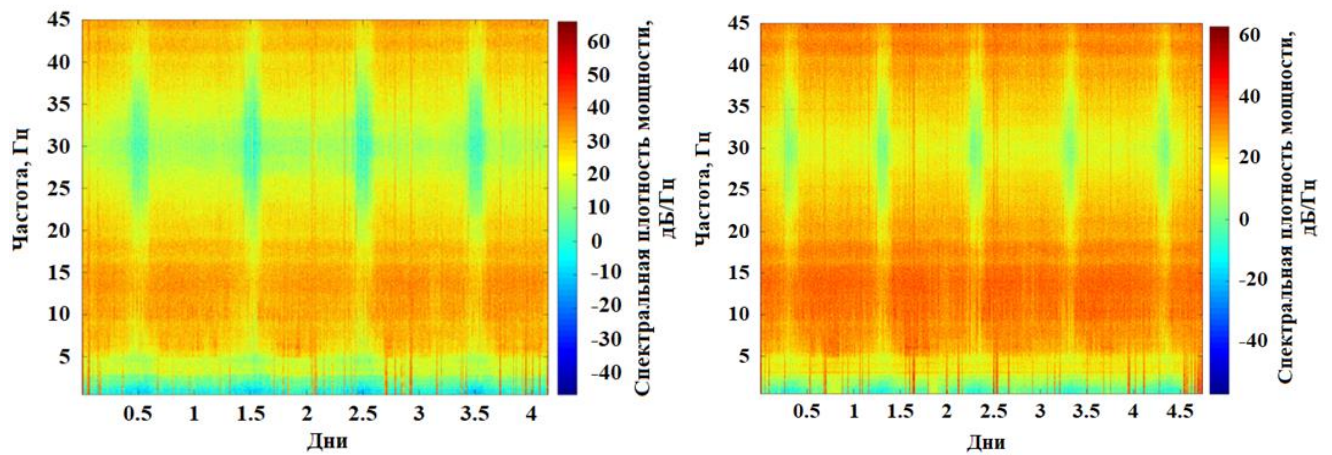


Рис. 1.7.7. Спектрограммы первой (слева) и второй записей (справа)

Из полученных данных видно, что наиболее шумным является частотный диапазон 5-20 Гц. Также, к удивлению, на спектрограмме за первый измерительный период, в диапазоне 25-53 Гц наблюдаются существенные понижения сейсмической активности, соответствующие утренним часам – в районе 7-8 часов. Однако на второй спектрограмме такие зоны соответствуют ночному времени суток, в районе 2-3 часов.

На рисунке 1.7.8 представлены аналогичные спектрограммы в диапазоне частот от 0,5 до 5 Гц.

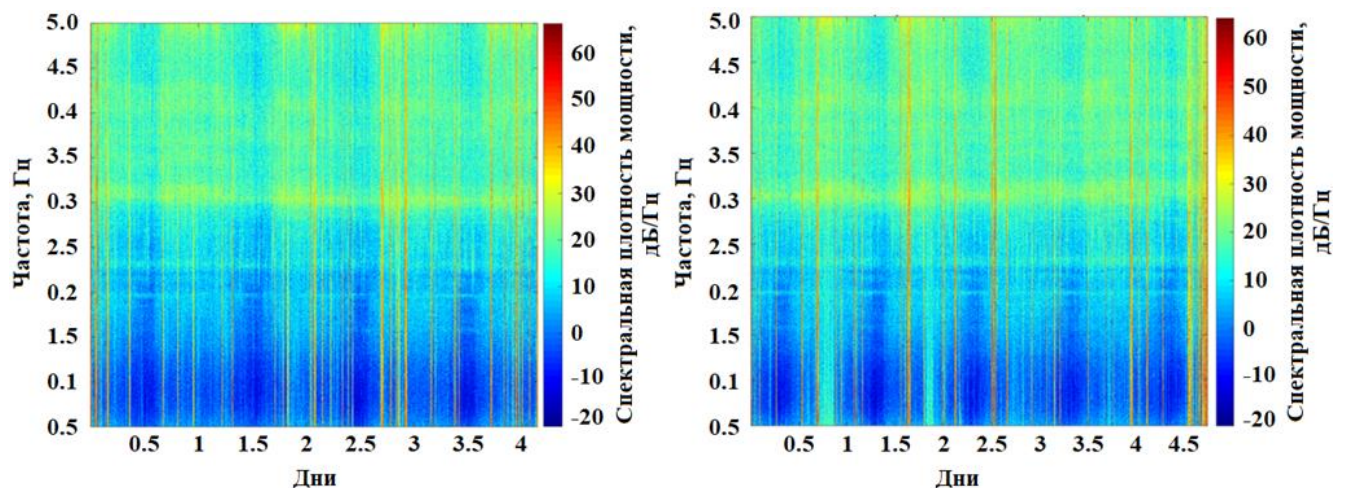


Рис. 1.7.8. Спектрограммы первой (слева) и второй записей (справа) в диапазоне частот от 0,5 до 5 Гц

На обеих спектрограммах отчётливо прослеживается гармоника частотой 3 Гц соответствующая приблизительно 27-30 дБ. Также заметны гармоники на

частотах около 1,62, 2,25 и 4 Гц, соответствующие приблизительно 11, 19 и 29 дБ соответственно.

Помимо регистрации вибросейсмического фона, в пределах рассматриваемой жилой площади были проведены измерения акустического фона. Запись акустических шумов осуществлялась в период с 27.11.2020 по 01.12.2020 при помощи шумомера компании Октава «ЭКОФИЗИКА 110-А». Установка измерительных микрофонов осуществлялась аналогичным образом, в различных местах квартиры – в коридоре, на кухне, в зале и на балконе. На рисунке 1.7.9 представлены спектрограммы сигналов, записанных в разных помещениях жилплощади.

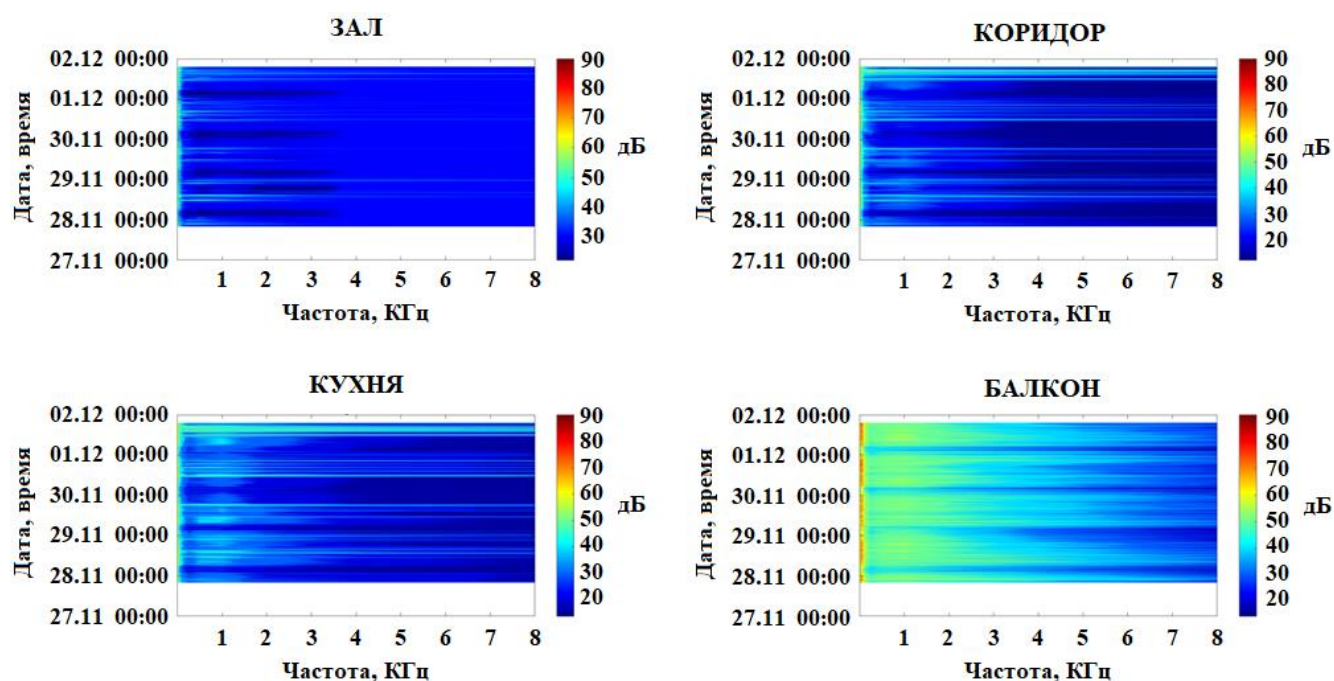


Рис. 1.7.9. Спектрограммы шумовых сигналов, зафиксированных в разных помещениях жилплощади

В первую очередь заметен высокий уровень шумов до 4 КГц, зафиксированный микрофоном, установленным на балконе. При этом наиболее низкий уровень шумов относительно других мест зафиксирован микрофоном, установленным в зале.

На рисунках 1.7.10-1.7.12 представлены спектрограммы сигналов, зафиксированных в зале, коридоре и на кухне в более узких временном и частотном масштабах.

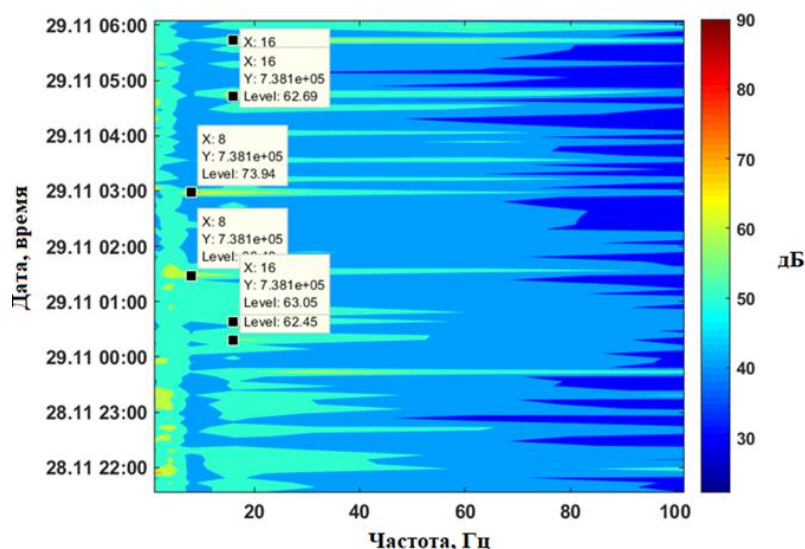


Рис. 1.7.10. Спектрограмма сигнала, зарегистрированного в зале с 22:00

28.11.2020 до 06:00 29.11.2020, в частотном диапазоне до 100 Гц

В полосе 4-8 Гц зафиксированы значения в 66,48 и 73,94 дБ, превышающие допустимые значения на 1,48 и 8,94 дБ соответственно. В диапазоне 8-16 Гц присутствуют значения 61,23, 62,45, 62,69 и 63,05 дБ, превышающие допустимые значения на 1,23, 2,45, 2,69 и 3,05 дБ соответственно. В диапазоне до 2 Гц превышений не наблюдается.

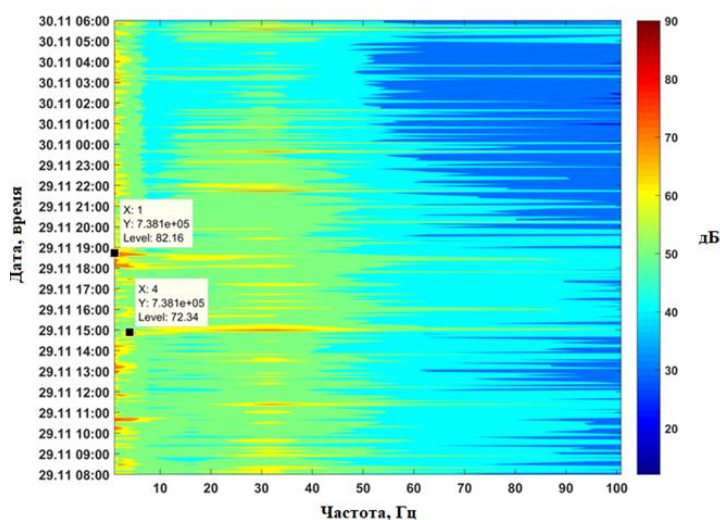


Рис. 1.7.11. Спектрограмма сигнала, зарегистрированного в коридоре с 08:00

29.11.2020 до 06:00 30.11.2020, в частотном диапазоне до 100 Гц

В диапазоне 1-2 Гц зафиксировано значение 82,16 дБ, превышающее допустимые нормы на 7,16 дБ. В полосе 2-4 Гц присутствует шум в 72,34 дБ, превышающий допустимые значения на 2,34 дБ.

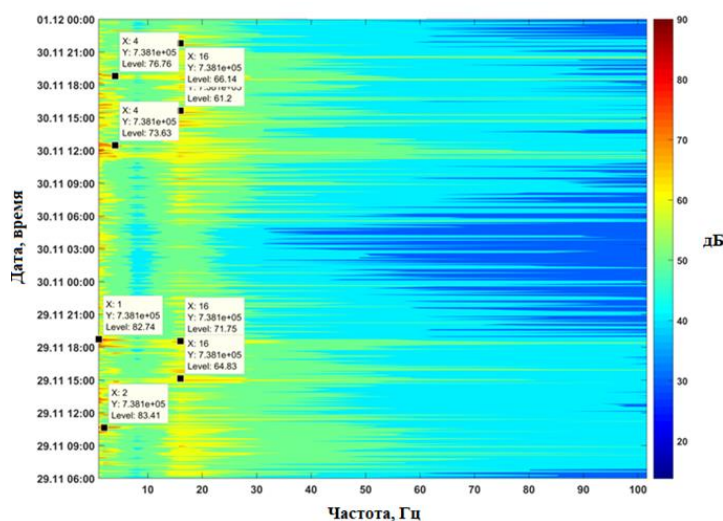


Рис. 6.10. Спектрограмма сигнала, зарегистрированного на кухне с 06:00

29.11.2020 до 00:00 01.12.2020, в частотном диапазоне до 100 Гц

В диапазоне 1-2 Гц присутствует шум в 82,74 и 83,41 дБ, превышающий нормативные значения на 7,74 и 8,41 дБ соответственно. В полосе 2-4 Гц зафиксирован шум в 73,63 и 76,76 дБ, превышающий допустимые значения на 3,63 и 6,76 дБ соответственно. В диапазоне 8-16 Гц присутствует шум в 61,2, 64,83, 66,14 и 71,75 дБ, который превышает допустимые значения на 1,2, 4,83, 6,14 и 11,75 дБ соответственно.

Как говорилось ранее, наиболее шумным местом является балкон. На спектрограмме шума, записанного с данного места, превышения присутствуют практически во всех октавных полосах (рис. 1.7.9).

Проанализировав полученные данные, были зафиксированы уровни шумов, превышающие допустимые в различных частотных диапазонах. В связи с этим, необходимо провести мероприятия по выявлению и устранению источников вибрационных и акустических шумов, вызывающего дискомфорт и наносящего вред здоровью организма. Также, возможно, стоит провести дополнительные

исследования за периметром жилой площади – на разных этажах подъезда и на улице – во внутреннем дворе и вблизи Русаковской улицы.

Выводы к главе 1

Проблема влияния низкочастотных сейсмических шумов естественного и техногенного происхождения, а также акустических шумов инфразвукового и звукового диапазонов на жизнедеятельность людей и состояние строительных сооружений, а также оценки закономерностей их распространения и защиты от их воздействия стоит довольно остро, начиная с XX столетия. Существует большое количество работ, посвящённых изучению как микросейсмических шумов природного происхождения, порождаемых ударами морских и океанических волн о береговые скалы, так и низкочастотных вибрационных шумов, генерируемых транспортными средствами, промышленными предприятиями и строительными установками. Помимо этого, существует немалое количество работ, посвящённых исследованиям акустических шумов, также вызывающих дискомфорт у людей. Также проанализированы работы, посвящённые разработкам защитных мер от влияния вибрационных и акустических шумов. В качестве основного средства защиты строительных сооружений от низкочастотных вибрационных шумов рассмотрены массивные крупногабаритные резонансные рассеиватели в виде бетонных или каменных блоков, которые рассеивают подходящую к ним Рэлеевскую в различных от построек направлениях, а также частично преобразуют её в объёмные Р- и S-волны, распространяющиеся вглубь земной коры. В качестве защиты населения и строительных сооружений от акустических шумов, исходящих от автомобильных дорог, железнодорожных путей и промышленных предприятий используются специальные шумозащитные экраны, отражающие звуковые волны в различных от строительных сооружений направлениях.

После поступившего в ИФЗ РАН обращения жительницы района Сокольники, г. Москва с жалобой на сильное физическое недомогание,

вследствие регулярного длительного вибрационного воздействия, по месту её жительства были проведены замеры вибросейсмического и акустического шумового фона. По результатам проведённых измерений были выявлены неоднократные превышения допустимых нормативных значений вибрационного и акустического шума в различных частотных диапазонах. Однако локализовать источник и определить характер его воздействия, вызывающего столь болезненные ощущение и сильное физическое недомогание, не удалось. В связи с этим, рекомендуется провести дополнительные измерения вибрационного фона за периметром жилой площади – на разных этажах подъезда жилого дома и на улице – во внутреннем дворе и вблизи Русаковской улицы.

В настоящей работе предложена методика оценки интенсивности низкочастотных сейсмоакустических шумов, а также закономерности их распределения на территории населённого пункта.

2. АППАРАТУРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС, НЕОБХОДИМЫЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАТУРНЫХ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ

2.1. Внутреннее строение и описание гео-гидроакустического измерительного модуля и молекулярно-электронного преобразователя

Поскольку основные нормируемые частоты при оценке вибрационного воздействия находятся ниже 50 Гц, для проведения полевого эксперимента по сбору натурных данных на исследуемой территории, в качестве измерительного оборудования был использован гео-гидроакустический измерительный буй с соответствующей рабочей частотной полосой, предназначенный для осуществления автономной регистрации сейсмических, гидроакустических и при необходимости акустических сигналов в течение длительных периодов времени (порядка нескольких недель), накопления и передачи данных по проводному или беспроводному интерфейсу. Строение данного устройства можно описать следующим образом: в его состав входят три основных модуля (рис. 2.1.1, *а*) – аналоговый однокомпонентный молекулярно-электронный измеритель типа СМЕ-4211V (1), источник тока, обеспечивающий функционирование всех узлов системы (2), и регистратор сейсмических сигналов типа NDAS-8224 (3) [42].

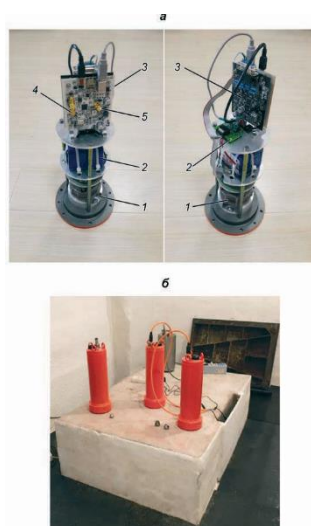


Рис. 2.1.1. Конструкция гео-гидроакустического модуля (*а*) и внешний вид размещения гео-гидроакустических буёв на постаменте в г. Обнинск 30.08.2017 г.

(*б*): 1 – аналоговый молекулярно-электронный вертикальный сейсмический

датчик; 2 – литий-ионная батарея с платой согласования; 3 – 24-разрядный регистратор сейсмических сигналов; 4 – разъем подключения внешней антенны Wi-fi; 5 – разъем подключения внешней антенны GPS

Аналоговый сейсмический датчик (1) работает на основе молекулярно-электронного переноса (МЭП). Чувствительный элемент представляет собой четырёхэлектродную электрохимическую ячейку, помещённую перпендикулярно каналу с гибкими мембранами на концах, заполненному низкотемпературным электролитом, выполняющим роль инерционной массы. Электролитом является раствор йодида лития с небольшим добавлением молекулярного йода. В присутствии электрического напряжения в пространстве между соседними электродами возникают градиенты концентрации носителей тока, определяющие величину текущих токов в системе. При движении электролита под действием внешнего волнового воздействия происходит изменение приэлектродных градиентов концентрации, что приводит к вариациям тока во внешней цепи, которые пропорциональны амплитуде возмущающего воздействия. Характерной особенностью рассматриваемого процесса является высокий коэффициент преобразования, что выражается в сильном электрическом отклике, значительно превышающем шумы усиливающей электроники, даже при низких уровнях входного механического воздействия [42, 44].

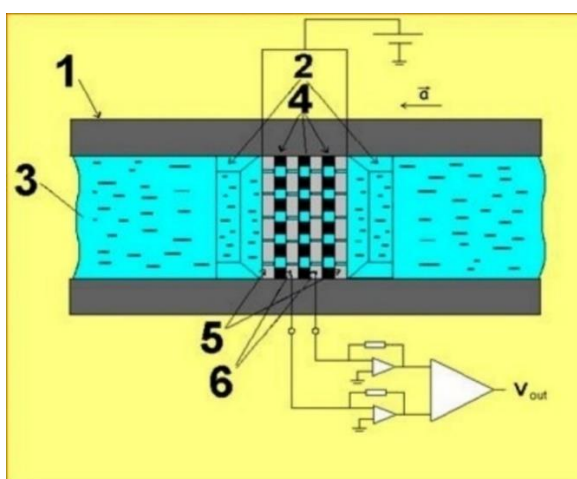


Рис. 2.1.2. Молекулярно-электронный преобразователь: 1 – диэлектрическая трубка (корпус преобразователя); 2,4 – установочные элементы; 3 – электролит; 5,6 – электроды

В конечном счёте обеспечивается высокое соотношение сигнал/шум для всего измерительного тракта. Универсальность механизма преобразования сигнала позволяет ориентировать ось чувствительности в любом направлении независимо от вектора силы тяжести, а отсутствие механических деталей делает конструкцию чрезвычайно прочной и устойчивой к внешним сильным ударам и вибрациям. Также стоит отметить, что чувствительный элемент дополняется механизмом отрицательной электродинамической силовой обратной связи, который обеспечивает стабильность выходных параметров, в том числе, температурную стабильность в широком диапазоне температур, наименьшие значения которого соответствуют $-40, -50^{\circ}\text{C}$ [34].

Сейсмические приёмники, построенные по технологии МЭП, являются крайне надёжным оборудованием, у которых отсутствуют какие-либо требования касательно специальных средств, специальных методик при транспортировке и установке. Помимо этого, такие устройства не нуждаются в обслуживании, арретировании и центрировании массы и хорошо подходят для полевых измерений, а также для быстрого развёртывания сейсмической сети [44]. Технические параметры датчика приведены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1. Параметры молекулярно-электронного сейсмодатчика

Полоса частот	0.033 ($T=30$ с)–50 Гц
Коэффициент преобразования	2000 В/(м/с) – дифф. Выход
Максимальный регистрируемый сигнал	± 5.0 мм/с
Интегральный шум в полосе 0.033–50 Гц	76 нм/с
Питание / потребление сейсмометра	10.5–30 В DC, 12 мА (стандарт)
Температурный диапазон работы	$(-40 \dots +55^{\circ}\text{C})$
Допустимый угол установки	$\pm 15^{\circ}$
Вес	0.4 кг

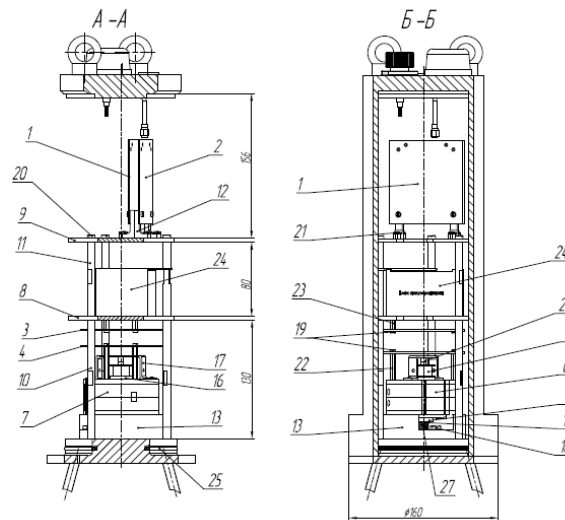


Рис. 2.1.3. Внутреннее строение и описание гео-гидроакустического измерительного модуля

Источник питания построен на основе цилиндрических литий-ионных элементов питания размером 8,5x56x67 мм и ёмкостью 3500 мА·ч каждый. Элементы электрически соединены между собой по конфигурационной схеме 3S2P. Общие габаритные размеры аккумулятора, заключённого в единый корпус, составляют 51x56x77 мм, а общая ёмкость батареи при комнатной температуре около 7000 мА·ч. Номинальное напряжение, выдаваемое батареей, составляет 9–12.6 В. Поскольку цифровой блок (3) и аналоговый молекулярно-электронный измеритель (1) имеют разные напряжения питания (+5 В и +12 В соответственно), предусмотрена специальная плата согласования, преобразующая напряжение батареи в +5 В для питания цифрового регистратора [34].

Регистратор сейсмических сигналов (3) предназначен для использования в составе автономных систем сбора данных с батарейным питанием. Его основу составляет аналого-цифровой преобразователь типа сигма-дельта с 22 эффективными разрядами. Частота оцифровки выбирается из следующих значений: 1, 10, 50, 100, 250, 500, 1000 Гц. Применяемый модуль отличается малым энергопотреблением (менее 300 мВт в процессе регистрации), что позволяет существенно увеличить время его автономной работы при заданных габаритах устройства [34]. Параметры регистратора приведены в Таблице 2.1.2.

Таблица 2.1.2. Параметры модуля регистратора

Тип АЦП	24 бит, сигма-дельта
Частота дискретизации	1, 10, 50, 100, 250, 500, 1000 Гц
Коэффициент усиления G	1, 2, 4, 8, 12, устанавливается программно
Макс. входное напряжение при коэфф. усил. G=1	± 24 В
Число эффективных разрядов @100Гц, G=1	22
Внешний источник питания	3,7 - 5,5 В / порт USB
Потребляемая мощность	менее 300 мВт
Тип энергонезависимой памяти	microSD
Объем памяти	32 ГБ
Файловая система	FAT32
Формат записи данных	Внутренний бинарный
Поддержка форматов	Конвертор в miniSeed, SEG
Интерфейс установки режима и считывания данных	USB 2.0 HS, Wi-Fi IEEE 802.11b/g/n
Температурный диапазон	-40 .. +85 °С
Входной импеданс	180 кОм 1000 пФ
Питание гидрофонов	$\pm 2,5$ В, 5 мА
Тестовые сигналы	Синус, одиночный импульс. 1 В амплитуды
Исполнение	2 платы соединённые в единый модуль
Размеры, мм	95 x 80 x 29
Вес	0,2 кг

Гео-гидроакустический измерительный модуль расположен в прочном металлическом пылевлагозащищённом корпусе со степенью защиты не ниже стандарта IP 67. На верхнюю крышку модуля выведены внешняя совмещенная антенна модуля Wi-Fi/GPS и герметичный многофункциональный разъем типа RS-10. Этот разъём обеспечивает возможность зарядки аккумулятора модуля, считывания записанных данных с регистратора, программирование цифрового

модуля, предоставляет информацию о работе устройств, за счёт световой индикации и наличия зафиксированного модулем спутникового сигнала GPS. При подключении к разъему светоиндикаторной заглушки на электронные платы прибора поступает энергоснабжение от внутреннего аккумулятора [34].



Рис. 2.1.4. Верхняя крышка корпуса гео-гидроакустического модуля: 1 – внешняя антенна Wi-fi/GPS, 2 – герметичный разъём типа PC-10, 3 – светоиндикаторная заглушка

2.2. Программное обеспечение, необходимое для работы с гео-гидроакустическим измерительным буюм

Для передачи данных и конфигурирования системы используются проводное USB или беспроводное Wi-Fi соединения (разъем (4) на рис. 10, а), а внутренняя память объемом 32 Гб позволяет вести длительную регистрацию данных в автономном режиме. В регистраторе имеются цепи для подачи тестовых сигналов на сейсмические датчики, а также питание ± 2.5 В. Интегрированный модуль GPS позволяет синхронизировать сейсмические события с точным мировым временем, автономно запускать и останавливать запись по заданному расписанию и идентифицировать пространственное расположение измерительного модуля на земной поверхности для индивидуализации модулей в телесеismicкой сети. Регистратор полностью работоспособен при подаче питания через USB-порт. Подключение по беспроводному интерфейсу позволяет

проводить настройку и проверку качества гео-гидроакустического сигнала дистанционно, без вмешательства в систему [34, 48].

Разработанное для буя программное обеспечение под названием NDAS_app позволяет осуществлять получение, накопление и передачу данных на удалённый пункт сбора по проводному и беспроводному интерфейсу, удалённую проверку надлежащей работы отдельных узлов информационно-измерительной системы, которая допускает объединение нескольких буюв в единую телесеismicкую сеть, образующую измерительную антенную систему, отображение списка устройств, отображение параметров состояния устройств – координаты, синхронизация часов, ориентация и т.п., отображение сейсмограммы для одного или нескольких устройств, отображение и сохранение сейсмограммы в памяти устройства. На рис. 2.2.1 представлено главное окно программы NDAS_app.

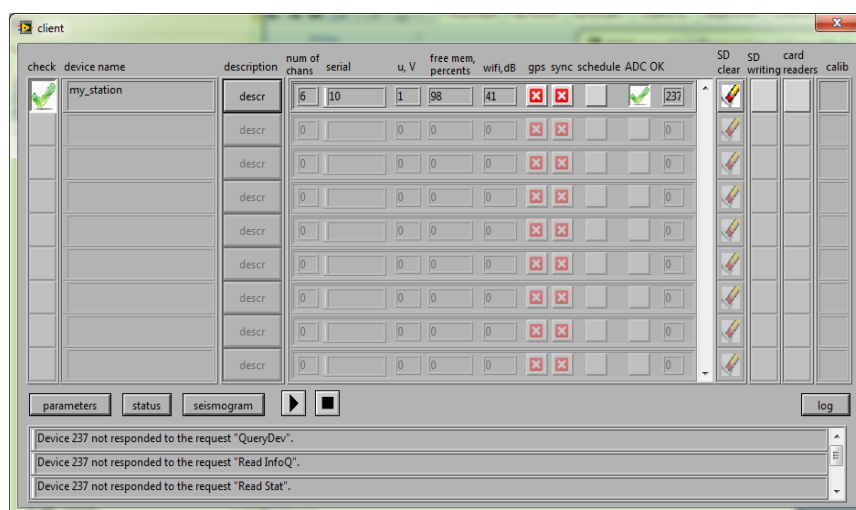


Рис. 2.2.1. Главное окно программы NDAS_app

В главном окне выводится таблица с устройствами: имя устройства, информация о наличии или отсутствии синхронизации часов, объём свободной памяти устройства, уровень сигнала Wi-fi, кнопки для включения card reader на каждом устройстве, кнопки для очистки памяти накопителя, «флажки» для выбора устройств. Для просмотра сейсмограммы необходимо нажать кнопку «seismogram», предварительно выбрав устройства. Далее откроется окно с графическими полотнами. На каждом полотне отображаются сейсмограммы для одного канала. При закрытии этого окна произойдёт возврат в главное окно. Для

того, чтобы задать параметры, необходимо выбрать устройство и нажать кнопку «parameters». Затем откроется окно параметров, где можно выбрать каналы для записи и/или отображения сейсмограмм, задать частоту, задать запись сейсмограммы по расписанию, а также просмотреть текущие значения перечисленных параметров. Чтобы детально просмотреть статусные данные – время GPS, температуру, связь со спутником, синхронизацию, напряжение, версию прошивки, давление, положение и ориентацию в пространстве – находясь в главном окне, следует выбрать интересующие устройства и нажать кнопку «status».

2.3. Сравнительные исследования гео-гидроакустического измерительного модуля с другой сейсмической аппаратурой

Были проведены сравнительные исследования молекулярно-электронных гео-гидроакустических приёмников и маятниковых электродинамических сейсмометров типа СМЗ-ОС. На измерительном стенде Геофизической службы РАН были определены кривые чувствительности для всех используемых приёмников. С учётом полученных данных сравнительные испытания проводились на геофизическом постаменте КПЦ ИФЗ РАН. Примеры синхронной записи приведены на рис. 2.3.1.

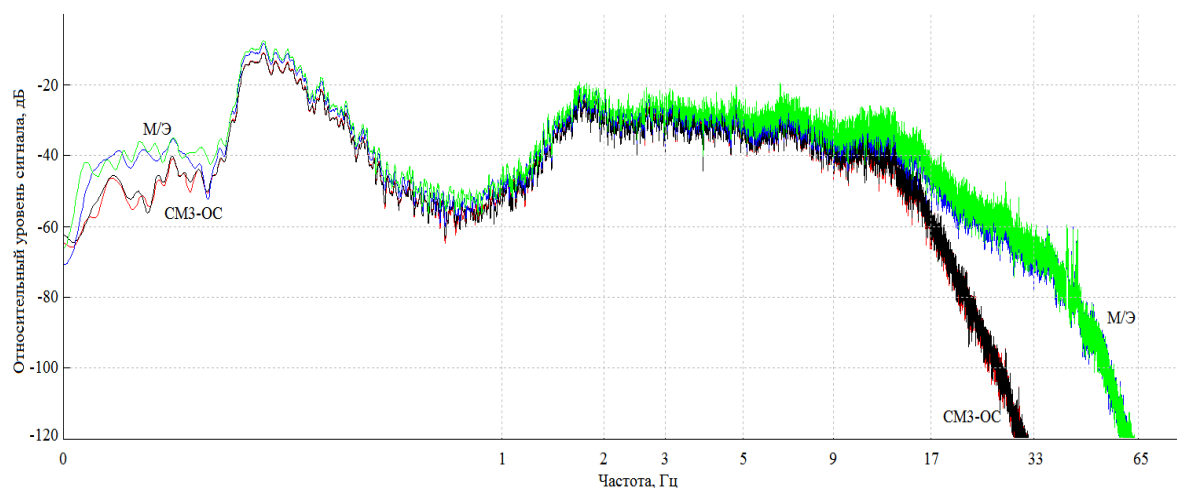


Рис. 2.3.1. Сравнение спектров двадцатиминутной синхронной записи двумя сейсмометрами СМЗ-ОС (чёрная и красная кривые) и двумя молекулярно-электронными сейсмометрами (синяя и зелёная кривые)

Стоит отметить, что чувствительность МЭП в области высоких частот превосходит чувствительность СМЗ-ОС, при этом незначительно уступает в стабильности на крайне низких частотах. Данное обстоятельство осложняет применение МЭП в решении задач классической сейсморазведки. Тем не менее, существуют методы, в которых точность регистрации фазы сигнала не требуется вследствие использования усреднённых спектров, накопленных в течение длительного времени сигналов.

2.4. Лабораторно-стендовые испытания гео-гидроакустического измерительного модуля

Для оценки качества функционирования измерительного модуля были проведены обсерваторские исследования основных характеристик широкополосных сенсоров в составе буев ледового класса в заглубленных боксах на измерительных постах геофизического комплекса Геофизической службы РАН (г. Обнинск). Многочасовой обсерваторский эксперимент (с 30.08. по 08.09.2017 г.) позволил сопоставить амплитудные и фазовые частотные характеристики буя с прецизионными сейсмометрами. В качестве эталонного оборудования был использован сейсмометр Streckeisen STS-1V/VBB, измеряющий скорость колебательного процесса и являющийся основным инструментом постоянно действующей сейсмической станции Обнинск (OBN); кроме того, были проанализированы данные с велосиметра Guralp CMG-3ESP [34, 45].

На рис. 2.4.1 представлено сопоставление частотных характеристик, заявленных изготовителями приборов, с частотными характеристиками гео-гидроакустического буя с установленным датчиком СМЕ. Streckeisen и Guralp обладают приемлемой чувствительностью вплоть до периодов 250 и 100 с соответственно; имеющиеся данные ограничены частотой Найквиста сверху – 10 и 20 Гц соответственно. В настоящей работе рассматривается частотный диапазон 0.03–10 Гц. Сеймостанции расположены в месте, защищённом от посторонних

помех, генерируемых расположенной неподалёку лесополосой. Геофизический постамент (рис. 2.1.1, б) расположен на глубине ~20 м, температура на момент измерений составляла ~12 °С, также была отмечена высокая влажность [34].

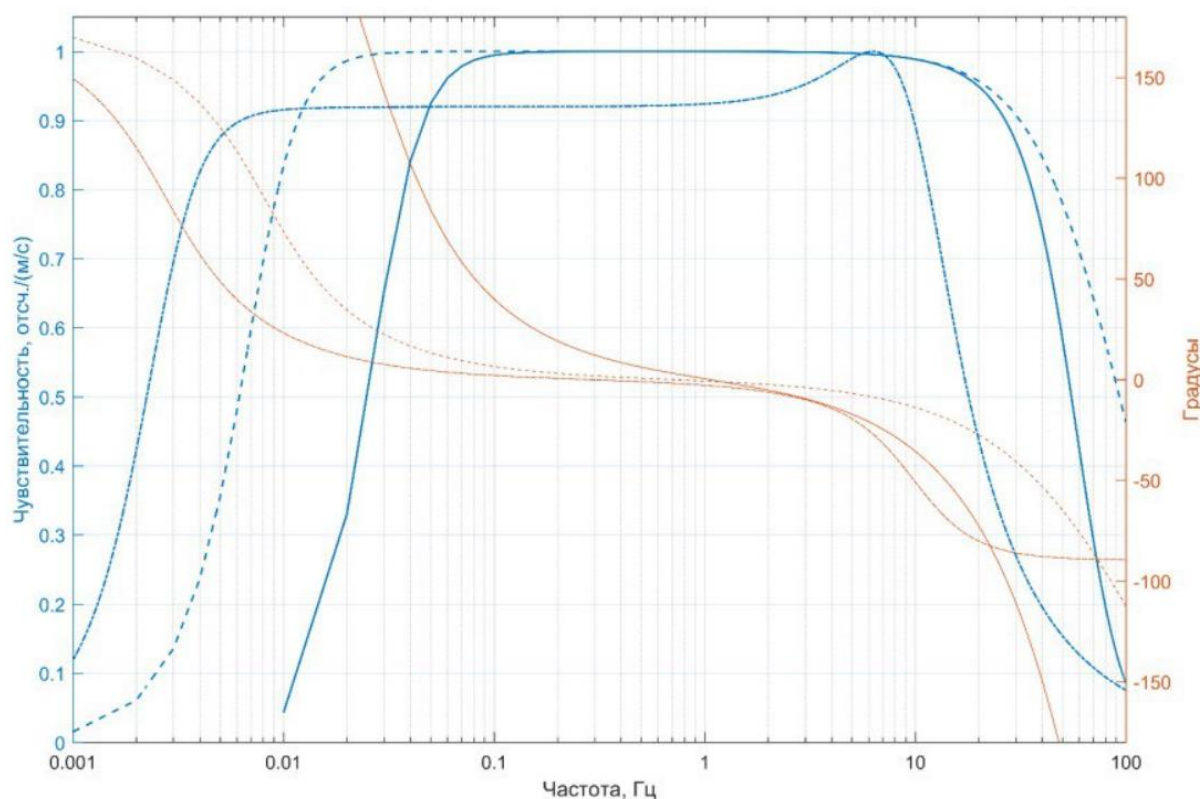


Рис. 2.4.1. Амплитудно-частотная (АЧХ) (голубой цвет) и фазо-частотная (ФЧХ) (оранжевый цвет) характеристики приборов Streckeisen (штрих-пунктирная линия), Guralp (штриховая линия) и CME (сплошная линия)

В первую очередь является заметной более низкая по сравнению с эталонными приборами чувствительность CME на периодах более 20 с. Такую проблему возможно решить применением другого калибровочного коэффициента, что делает записи абсолютно идентичными. Также стоит отметить, что на периодах более 20 с показания велосиметра Guralp оказались зашкаленными [34].

Наиболее информативное событие, произошедшее в мире за время измерений – это землетрясение магнитудой 8.1 в Мексике 08.09.2017 г. в 04:49 по всемирному времени. На рисунке 2.4.2 представлена синхронная (по максимальным значениям) запись этого события всеми тремя приёмниками,

отфильтрованная в частотном диапазоне 0,03-10 Гц, с учётом, представленной на рисунке 2.4.1 частотной характеристики прибора CME [34].

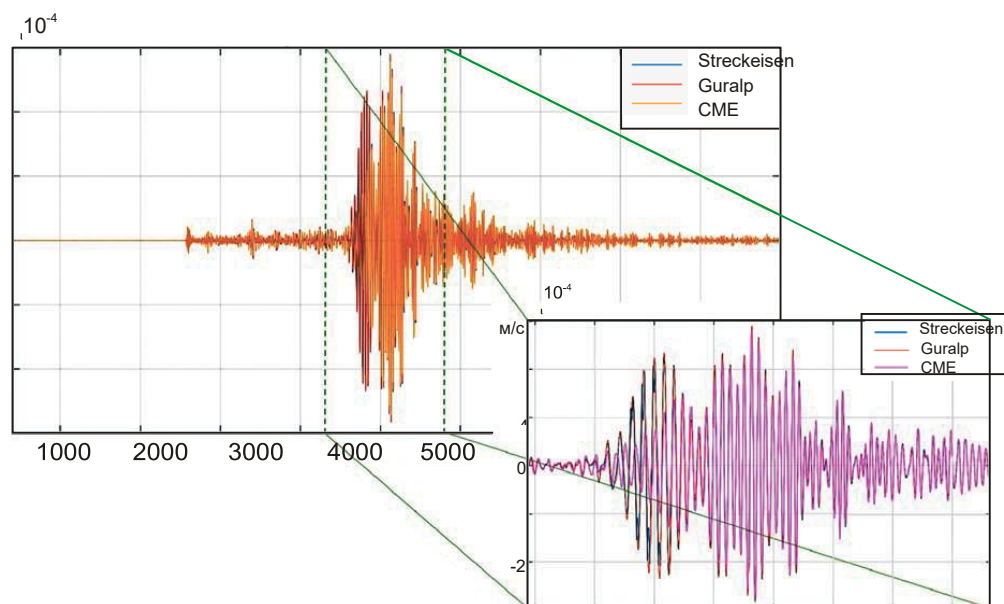


Рис. 2.4.2. Сопоставление записей, полученных приборами Streckeisen, Guralp и CME в частотном диапазоне 0.03–10 Гц, землетрясения магнитудой 8.1, произошедшего в Мексике 08.09.2017 г. в 04:49 по всемирному времени

Калибровка данных с других приборов, так как их АЧХ и ФЧХ можно считать линейными в указанной полосе частот [34, 43].

2.5. Использование разработанного гео-гидроакустического измерительного модуля в рамках эксперимента по изучению сейсмоакустических шумов ВЭУ

В июле 2023 года сотрудниками ИФЗ РАН и ИВиС ДВО РАН были проведены натурные измерения сейсмического и акустического шумовых полей, создаваемых ветроэнергетической станцией, расположенной на территории пос. Октябрьский, Усть-Большерецкого района, расположенного на западном побережье южной части полуострова Камчатка (рис. 2.5.1). Целью проводимых исследований являлись анализ механизмов формирования и спектрального состава сейсмоакустических шумовых полей, создаваемых ветроэнергетическими

установками. На рисунке 2.5.2 изображена схема установки измерительного оборудования.



Рис. 2.5.1. Один из ветрогенераторов в составе ветроэнергетической станции на территории пос. Октябрьский полуострова Камчатка



Рис. 2.5.2. Схема расположения измерительных пунктов на территории пос. Октябрьский (слева) и установка сейсмостанции в измерительной точке (справа)

Жёлтым цветом показано положение ветряных установок. Красным цветом отмечены места установок сейсмических станций, расстояние между которыми составляет 150 м. Длительность записи в первой точке (у северного ветрогенератора) составляла более 6,5 часов, во второй точке – около 4,5 часов, акустический шумомер осуществлял запись более 4,5 часов. Затем сейсмостанция во второй точке была переставлена примерно на 10 м в северном направлении и осуществляла второй непрерывный цикл записи более 2,5 суток.

На рисунке 2.5.3 изображена волновая форма сейсмического шума, зарегистрированного сейсмической станцией в первой измерительной точке.

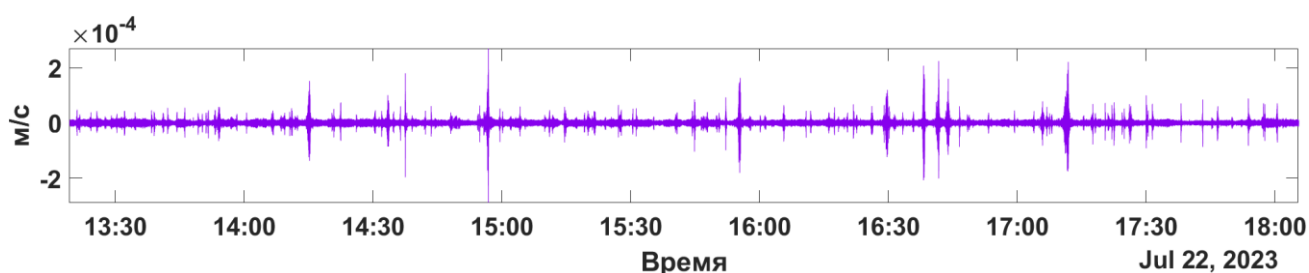


Рис. 2.5.3. Волновая форма сейсмического шума, зарегистрированного в первой измерительной точке

Неподалёку от места установки измерительной аппаратуры проводились ремонтные работы, а также курсировали автомобили по дороге, что отражается на полученной записи в виде многочисленных импульсных воздействий.

На рисунке 2.5.4 изображён амплитудный спектр полученной записи.

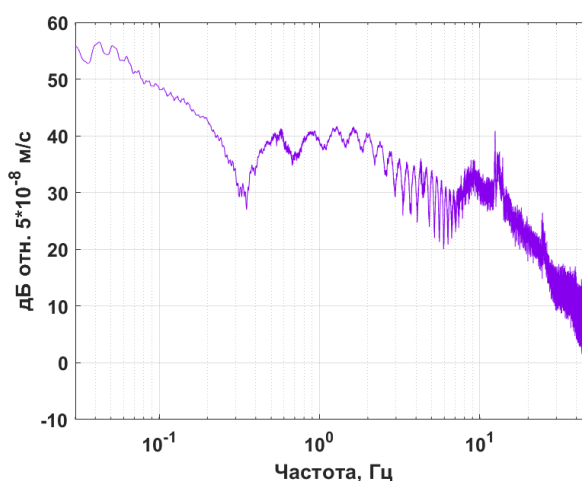


Рис. 2.5.4. Амплитудный спектр сейсмического сигнала с сейсмостанции в первой измерительной точке

На частоте около 0,57 Гц присутствует пик, наиболее вероятно, соответствующий изгибной моде, излучаемой в толщу земли вследствие качения опорной башни ветрогенератора под воздействием ветровых потоков. Значение его составляет около 40 дБ. На частоте около 0,9 Гц присутствует пик, соответствующий основной частоте вращения лопастей ВЭУ. Уровень тонального шума, создаваемого прохождением лопастей ВЭУ, составляет примерно 40,5 дБ. В более высокочастотной спектральной области, примерно до частоты 6,8 Гц, присутствуют многочисленные квазигармонические компоненты, кратные основной частоте вращения лопастей, а также частоте изгибной моды опорной башни ВЭУ.

На рисунке 2.5.5 представлена спектрограмма сейсмической записи в первой точке.

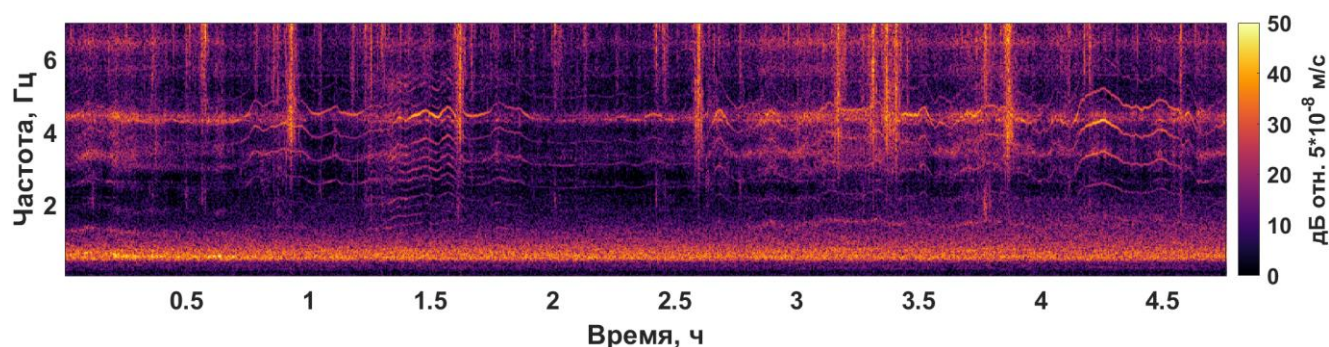


Рис. 2.5.5. Спектрограмма сейсмического сигнала с сеймостанции в первой измерительной точке

Отчётливо проявляются многочисленные кратные гармоники основного тона, связанного с взаимодействием вращающихся лопастей ветрогенератора с оказывающими на него воздействие потоков воздушных масс. При этом сам основной тон в низкочастотной области маскируется интенсивным микросейсмическим шумом, вызванным морским прибоем на побережье охотского моря, вблизи места проводимых измерений. Также очевидно, что тональные компоненты волнового поля обладают определённой динамикой во времени, связанной с изменениями скорости и направления потоков воздуха.

На рисунке 2.5.6 изображён вероятностный энергетический спектр длительной записи, полученной сейсмической станцией во второй измерительной точке.

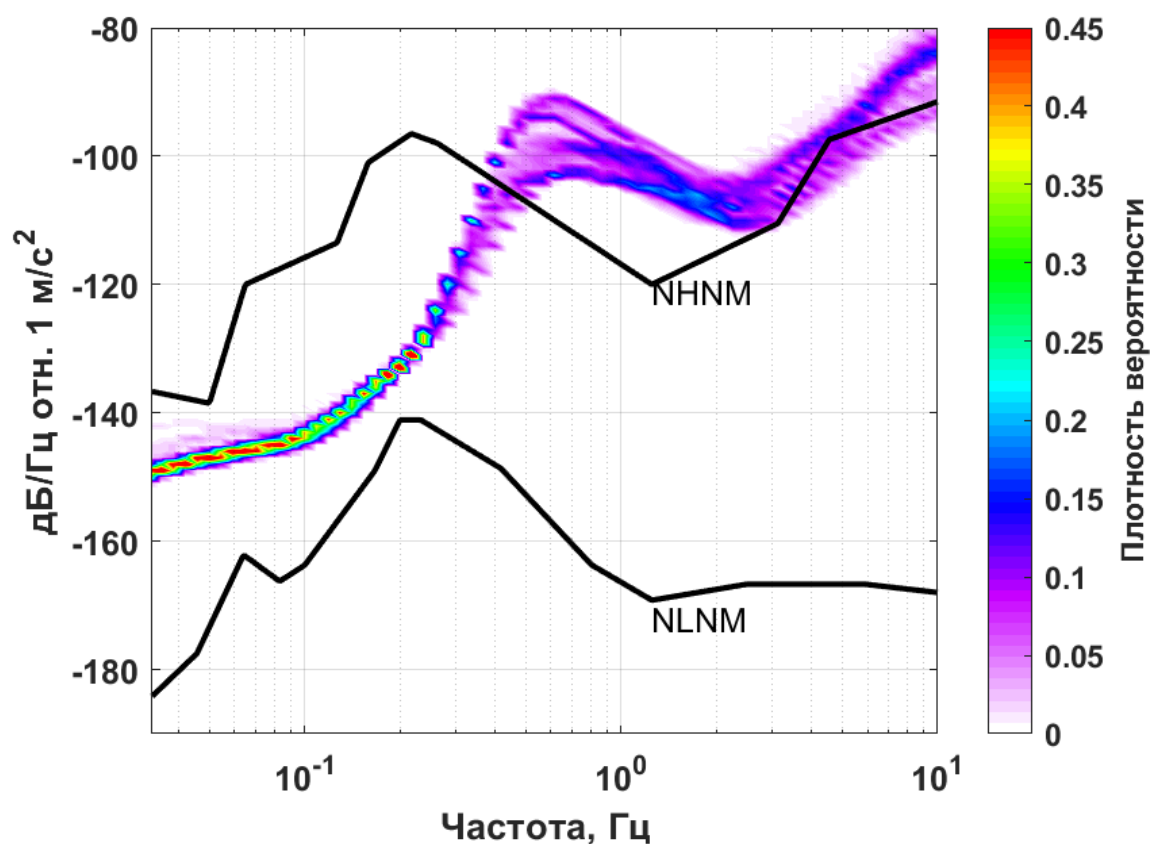


Рис. 2.5.6. Вероятностный энергетический спектр длительной записи, полученной сейсмической станцией во второй измерительной точке

Наиболее высокие значения функции плотности вероятности соответствуют низкочастотной области спектра примерно до 0,3 Гц, что совершенно отчётливо свидетельствует о наличии вторичных микросейсм, являющихся одной из основных компонент общего сейсмического шумового поля, вызываемых воздействием морских волн на морское побережье, ввиду близкого расположения места проводимых измерений к побережью Охотского моря. Также повышенные вероятностные значения соответствуют и более высокочастотной области спектра, что может говорить о наличии техногенных источников шума вблизи места проведения исследования, а также движению автомобильного транспорта в черте населённого пункта.

Выводы к главе 2

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что основные параметры гео-гидроакустического буя ледового класса стабильны также в диапазоне частот 0.03–50 Гц. По всем основным характеристикам информационно-измерительная система буя не уступает современным сейсмостанциям мирового уровня, а разработанные и использованные программы сбора, обработки и передачи информации являются достаточно надёжными. Помимо этого, необходимо отметить, что молекулярно-электронные преобразователи сегодня начинают применяться в сейсморазведке на суше [50], под водой [46], а также проходят первые испытания в ледовых условиях [47].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что с использованием инновационных технологий разработаны новые принципиальные подходы к созданию компактного сейсмоакустического прибора, реализующего многокомпонентную регистрацию гео-гидроакустического сигнала в сложных ледовых условиях, а построенный уникальный информационно-измерительный комплекс не уступает по основным показателям зарубежным аналогам. Созданное семейство опытных образцов гео-гидроакустических буюв ледового класса построено на модульной платформе, что позволяет использовать в их составе различные типы широкополосных сенсоров с большим динамическим диапазоном для автономной регистрации упругих колебаний.

Таким образом, проведённые натурные испытания в различных условиях подтверждают первое защищаемое положение – разработанный широкополосный молекулярно-электронный сейсмометр с цифровой системой регистрации данных обладает всеми необходимыми характеристиками для проведения измерений вибросейсмических шумов в соответствии с санитарными нормами.

3. РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОДХОДА К МОНИТОРИНГУ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НАСЕЛЁННОГО ПУНКТА

В рамках настоящего исследования предложена методика мониторинга вибросейсмического загрязнения населённых пунктов, реализуемая по аналогии с методом микросейсмического зондирования, результатом которой является построение, по аналогии с методом сейсмического микрорайонирования, карт распределения вибросейсмического загрязнения исследуемой территории в реальном времени. Под вибросейсмическим загрязнением, в данной работе, подразумевается превышение допустимых параметров вибрационного шума, вызванного как антропогенными воздействиями, так и естественным микросейсмическим фоном.

3.1. Метод микросейсмического зондирования

Метод микросейсмического зондирования (ММЗ) – пассивный способ сейсморазведки, основанный на измерении вертикальной составляющей естественного сейсмического шума. Преимущественно применяется для выделения вертикальных неоднородностей на глубинах 30-35 км [18].

При проведении исследований методом микросейсмического зондирования необходимо использовать минимум два широкополосных сейсмометра, один из которых является переносным и необходим для получения данных в пикетах на исследуемых профилях. Второй прибор устанавливается на определённом расстоянии от исследуемой территории и используется в качестве опорного, «базового» пункта, работающего в непрерывном режиме для устранения временных вариаций [18].

Реализация метода состоит из следующей последовательности действий:

- регистрация статистически устойчивых спектров микросейсмического поля на дневной поверхности в точках наблюдения, составляющих основу измерительной сети;

- построение карты или профиля распределения пространственных вариаций амплитуд микросейсм для каждой частоты спектра. В зависимости от способа измерений, могут быть получены различные результаты – при профильном зондировании строятся вертикальные геофизические разрезы, при площадной съёмке – объёмные сейсмические модели;

- привязка полученных карт или профилей к соответствующей глубине. Данная процедура осуществляется по следующей формуле:

$$H(f) = k \times \lambda(f) = k \times V_r(f)/f \quad (3.1.1)$$

где H – глубина, рассчитываемая для полученных карт или профилей;

k – коэффициент глубинной привязки, определяемый по результатам моделирования;

λ – длина волны;

V_r – скорость Рэлеевских волн [18].

В настоящей работе не проводятся глубинная привязка. Аналогия с ММЗ заключается лишь в определении отношения амплитуд в спектральной области в пикетах на исследуемых профилях к аналогичному параметру на опорном пункте. Это необходимо для определения интенсивности сейсмических воздействий в произвольный момент времени в местах, для которых определено соотношение пикет/база [11].

Далее будет рассмотрен наиболее общий случай реализации измерений с применением опорного пункта. Допустим, что результатом накопления и усреднения спектральной плотности мощности на переносном измерительном модуле на произвольной частоте f_i является величина $S_I + n_I$. В данном контексте слагаемое S_I характеризуется стационарной составляющей микросейсмической записи, при этом слагаемое n_I определяется нестационарной составляющей. Величина $S_2 + n_2$ характеризует результат накопления и усреднения спектра мощности на базовой станции, на частоте f_i , зафиксированным одновременно с переносным сейсмометром [10].

По аналогии со способом обработки спектров методом микросейсмического зондирования, оценка относительной интенсивности $\hat{H}$ на частоте f_i будет равна:

$$\hat{H} = (S_1 + n_1)/(S_2 + n_2) \quad (3.1.2)$$

Однако, при отсутствии в полученных спектрах нестационарной составляющей, оценка относительной интенсивности будет являться точным значением относительной реакции точек изучаемой площадки [10]:

$$\hat{H} = \frac{S_1}{S_2} = \check{H} * \frac{S_2}{S_2} = \check{H} \quad (3.1.3)$$

Ранее описанная ситуация построена на предположении о том, что даже на значительном удалении переносной и базовой станций друг от друга, при отсутствии нестационарных составляющих, сигнал S_2 будет зафиксирован одинаково на обеих станциях.

Однако если нестационарные составляющие присутствуют на обоих пунктах, соотношение (3.1.3) можно выразить в виде ряда по параметрам n_1 и n_2 в точке $(n_1; n_2) = (0;0)$:

$$\begin{aligned} \hat{H} = \frac{S_1 + n_1}{S_2 + n_2} &= \frac{S_1}{S_2} + \frac{\partial \hat{H}(0,0)}{\partial n_1} n_1 + \frac{\partial \hat{H}(0,0)}{\partial n_2} n_2 + \left(\frac{\partial^2 \hat{H}(0,0)}{\partial n_1^2} n_1^2 + \right. \\ &\left. \frac{\partial^2 \hat{H}(0,0)}{\partial n_1 \partial n_2} n_1 n_2 + \frac{\partial^2 \hat{H}(0,0)}{\partial n_2^2} n_2^2 \right) * \frac{1}{2} + \bar{o} \left(\sqrt{n_1^2 + n_2^2} \right) = \frac{S_1}{S_2} + \frac{n_1}{S_2} - \\ &\frac{n_2 * S_1}{S_2^2} + \frac{S_1 * n_2^2}{S_2^2} + \frac{n_1 n_2}{S_2^2} + \bar{o} \left(\sqrt{n_1^2 + n_2^2} \right) = \check{H} + \frac{n_1}{S_2} - \check{H} \frac{n_2}{S_2} + \\ &\check{H} \left(\frac{n_2}{S_2} \right)^2 - \frac{n_1 n_2}{S_2^2} + \bar{o} \left(\sqrt{n_1^2 + n_2^2} \right) \end{aligned} \quad (3.1.4)$$

Учитывая отношение (3.1.4), можно сделать вывод о том, что чем больше соотношение между нестационарными и стационарными компонентами сигнала в точках, тем сильнее будет отклонение оценки относительной интенсивности $\hat{H}$ от точного значения $\check{H}$ в присутствии нестационарной составляющей сигнала между пикетом профиля и опорным пунктом [10].

В случае наличия большого расстояния между точкой на профиле и базовой станцией, то нестационарные составляющие n_1 и n_2 могут иметь существенно

отличные значения, т.к. их источниками могут быть локальные слабые участки, сигналы от которых различимы только в их окрестности [10, 33].

Если же опорный пункт и профильный пикет находятся близко относительно друг друга, что, в свою очередь, характерно для класса инженерных задач, в которых размеры исследуемых объектов и характерные для них глубины ограничиваются первыми десятками метров, соотношение (3.1.4) может иметь следующий вид [10]:

$$\hat{N} = \check{N} + (1 - \check{N}) \left(\frac{n}{S}\right) - (1 - \check{N}) \left(\frac{n}{S}\right)^2 + \bar{\sigma} \left(\sqrt{n_1^2 + n_2^2}\right) \quad (3.1.5)$$

В данном случае $n_1 = n_2 = n$ и $S_1 = S_2 = S$ и присутствуют стационарные и нестационарные компоненты усреднённых спектров мощности для некоторой частоты f_i и являются общими для обеих станций, вследствие близкого их взаимного расположения. Исходя из полученного соотношения (3.1.5), можно сделать вывод о том, что используя стандартный способ сбора полевых данных и их дальнейшей обработки по методу микросейсмического зондирования, включающую в себя накопление и усреднение спектров в точках профиля и на базовом пункте, оценка относительной интенсивности $\hat{N}$ между точками получится с некоторой ошибкой. Такая ошибка пропорциональна отношению нестационарной и стационарной составляющих записи. При увеличении концентрации нестационарной компоненты в микросейсмическом сигнале зависимость ошибки становится пропорциональной квадрату отношения n/S [10].

Стоит отметить одно интересное обстоятельство. В случае если точка профиля и базовая станция расположены на близком расстоянии относительно друг друга, то для определения относительной интенсивности $\hat{N}$ не обязательно осуществлять накопление и усреднение спектров на каждой станции по отдельности и находить их соотношение. Так как в рассматриваемом случае геологическая среда практически однородна для обеих точек, сумму стационарно и нестационарной компонент сигнала S и n можно представить как некоторый детерминированный сигнал, сперва проходящий через одну станцию, а затем

через другую. В таком случае расчёт значения $\dot{N}$ можно осуществить напрямую, посредством определения отношения спектра мощности сигнала с точки профиля $S_{1\text{ DET}}$ к спектру на опорном пункте $S_{2\text{ DET}}$ [10]:

$$\frac{S_{1\text{ DET}}}{S_{2\text{ DET}}} = \frac{(H * S_{2\text{ DET}})}{S_{2\text{ DET}}} = \dot{N} \quad (3.1.6)$$

Однако определение соотношения (3.1.6) на практике подразумевает наличие расчётных погрешностей. Для избавления от такой погрешности необходимо осуществлять усреднение величины $\dot{N}$ по нескольким полученным измерениям, результат которого не будет зависеть от свойств зондирующего сигнала. Однако отношение (3.1.6) не даст благоприятных результатов для точек профилей и базы, находящихся на больших удалениях друг от друга, т.к. сигнал будет разный и будет определяться местными локальными источниками [10].

3.2. Сейсмическое микрорайонирование.

Сейсмическая опасность позволяет охарактеризовать возможные сейсмические воздействия, которые необходимо учитывать при проектировании новых сооружений или модернизации существующих. В местном масштабе эта оценка требует [4]:

- оценка последствий, которые могут быть вызваны сейсмическими толчками на устойчивость грунтов (например, оползни, разжижение, заселение);
- учёт наличия сейсмогенных разломов вблизи участков, когда их характеристики предполагают возможные косейсмические деформации на поверхности;
- определение сейсмических движений на каждом участке с учётом специфических почвенных условий и на эталонных грунтах.

Оценка локального отклика объекта является ключевым компонентом любого анализа локальной сейсмической опасности [4].

Сейсмическое районирование – направление сейсмологии, задача которого состоит в оценке потенциальной сейсмической опасности, выраженной в

максимально возможной интенсивности землетрясений в баллах. Оценка интенсивности землетрясений основывается на результатах совместного анализа сейсмических данных о землетрясениях прошлых лет и особенностях геологического строения. Результатом работ по сейсмическому районированию являются карты, содержащие сведения о потенциальной сейсмической опасности, выраженной в интенсивности ожидаемых сейсмических воздействий для исследуемой территории [1]. В России и странах СНГ общая площадь сейсмоопасных районов составляет 28.6 % территории (в том числе на 9-балльные районы приходится 2.4 %, на 8-балльные – 3.2 %) [4].

В свою очередь, сейсмическое районирование подразделяется на:

- Общее сейсмическое районирование – исследования по оценке потенциальной сейсмической опасности для весьма обширных территорий путем выделения крупных сейсмогенерирующих зон, определяющих сейсмичность районов. В результате таких работ строятся карты масштаба 1:5 000 000 – 1:2 500 000, позволяющие рационально планировать развитие различных районов, оценивать общие затраты, необходимые для проведения антисейсмических мероприятий в масштабе страны.;

- Детальное сейсмическое районирование – главной задачей такого типа районирования является выделение и уточнение сейсмогенерирующих зон и параметров очагов землетрясений опасных для населённых пунктов, промышленных предприятий и т.д. Карты сейсмической опасности при таких исследованиях строятся в масштабе 1:500 000-1:100 000;

- Сейсмическое микрорайонирование – районирование, при котором даётся оценка сейсмической опасности, учитывающая влияние местных тектонических, геоморфологических и грунтовых условий на интенсивность сейсмических колебаний на поверхности Земли и определяются поправки, уменьшающие или увеличивающие сейсмичность района, задаваемую картами общего или детального сейсмического районирования. Карты сейсмического микрорайонирования строятся в масштабе 1:50 000 и крупнее [4].

Данная работа во многом схожа с методом сейсмического микрорайонирования, а именно основана на изучении низкочастотных сейсмических воздействий, а также закономерности их распространения в пределах исследуемой территории. Микросейсмические колебания частиц грунта, присутствующие практически повсеместно, также могут использоваться в целях сейсмического микрорайонирования. Но, поскольку спектральный состав микросейсм и землетрясений несколько различен, метод регистрации микросейсм следует применять в качестве вспомогательного в комплексе с другими инструментальными методами для оценки резонансных характеристик грунтов [6].

При измерении микросейсм регистрируются три компоненты движения грунта – две горизонтальные и вертикальная. По записям микросейсм определяются приращения сейсмической интенсивности и амплитудно-частотные характеристики грунтов. Для оценки изменения интенсивности сильного землетрясения по максимальной амплитуде микроколебаний на том или ином преобладающем периоде используется следующая формула:

$$\Delta I = 20 \lg \frac{A_{max_i}}{A_{max_3}} \quad (3.2.1)$$

где A_{max_i} и A_{max_3} – максимальные амплитуды микроколебаний соответственно на исследуемом и эталонном грунте. Преимуществами метода является возможность получения оценки сейсмической реакции грунтов в большом диапазоне частот – 0,03-50 Гц, а также его простота [4].

Метод Накамуры

Данный метод был основан и описан в Японии, в 1989 году. Суть метода состоит в записи окружающего фонового сейсмического шума (микросейсмы), вызванного городским транспортом и производственной деятельностью человека, затем в вычислении отношения вертикальной и горизонтальной компонент записанного сигнала. Микросейсмами (иногда микротремор) являются колебания малой амплитуды, генерируемые в результате человеческой деятельности –

высокочастотный техногенный шум, поверхностные источники, такие как промышленные предприятия, торговля, естественный низкочастотный шум, создаваемый приливами ветрами и т.д.

Рассматриваемый метод основан на предположении о том, что [4]:

- Микросейсмический шум состоит преимущественно из волн Рэлея, распространяющихся в мягком приповерхностном слое;
- Влияние волн Рэлея одинаково для вертикальной и горизонтальной компонент микросейсмического шума;
- Вертикальная составляющая микросейсм не усиливается мягким слоем почвы;
- Для довольно широкого диапазона частот (0,2-20 Гц), спектральное отношение вертикальной и горизонтальной компонент движения в нижней части слоя близко к единице:

Полученное таким образом спектральное отношение H/V позволяет адекватно определить основную частоту микросейсм исследуемой территории. Однако данный метод не даёт всей информации, необходимой для оценки усиления движения частиц грунта [4].

Спектральное отношение H/V позволяет построить карты преобладающих частот микросейсмического шума.

Также данное отношение компонент микросейсмического шума предоставляет надёжную информацию о сейсмическом поведении тонких, слегка погружающихся приповерхностных слоёв. Использование записей микросейсм даёт весьма полезное дополнение к численным методам, традиционно используемых в исследованиях сейсмического микрорайонирования для определения подавляющей частоты поверхностных образований в линейной области, когда они слабо ограничены отсутствием геотехнических данных [4].

Преимуществом метода Накамуры является отсутствие необходимости синхронности измерений микросейсм на исследуемых и эталонных грунтах. Более того, нет необходимости в информации о самих эталонных грунтах,

следовательно, оценку локальных усилений можно осуществлять, используя всего одну станцию с трёхкомпонентным датчиком, не беря во внимание ни расположение источников микросейсм, ни изменение их временных характеристик [4].

Однако рассматриваемый метод имеет некоторые ограничения и недостатки. Во-первых, невозможность использования пиковых значений измеренных усилений. Причиной этого явления могут быть как физические – эллиптичность волн Рэлея теоретически бесконечна на резонансной частоте, так и численные – тип обработки сигнала может существенно влиять на амплитуды расчётных спектральных соотношений. Во-вторых, нет возможности подтвердить, что результаты, полученные методом H/V для малых деформаций, могут быть перенаправлены в движения. Нелинейные эффекты обычно приводят к уменьшению коэффициентов усиления ускорения грунта и небольшому смещению доминирующей частоты в область более низких частот. При низких значениях колебательных ускорений частиц, основные частоты, определённые при помощи линейных и нелинейных предположений, вероятно не существенны. Поэтому, для решения такой проблемы и повышения точности и детальности сейсмического микрорайонирования, метод Накамуры целесообразно использовать с другими методами [4, 78].

3.3. Теоретическое описание предлагаемой в работе методики мониторинга вибросейсмического загрязнения мегаполиса и опробование ММЗ в ледовых условиях оз. Байкал

В настоящее время мониторинг сейсмоакустического загрязнения мегаполисов осуществляется при помощи размещения большого количества сейсмических станций в строительных сооружениях, а также в жилых зонах и на территории промышленных предприятий. Но размещение десятков, возможно, сотен сеймостанций довольно трудоёмкая и затратная с финансовой точки зрения задача. Причём, в отличие от акустического загрязнения, которое имеет

локальный временной характер и, которое возможно регистрировать в течение малого промежутка времени, вибросейсмическое загрязнение наибольшую опасность для населения и строительных сооружений представляет в течение длительного времени воздействия, в связи с чем, его необходимо регистрировать в значительно более длительный период времени, по сравнению с акустическим фоном.

Но, по ряду объективных причин, размещать большое количество сейсмостанций в жилых районах мегаполисов не представляется возможным. В связи с этим, в настоящей работе предлагается методика мониторинга вибросейсмического загрязнения населённого пункта по аналогии с методом микросейсмического зондирования, который, как было упомянуто ранее, впервые был опробован автором в ледовых условиях оз. Байкал.

Рассматривая применимость метода микросейсмического зондирования к описываемой в работе методике мониторинга вибросейсмического загрязнения обширной территории, стоит отметить, что его преимущество заключается в использовании малого количества сейсмической аппаратуры – от двух до одной сейсмостанции на разных этапах проведения полевых работ. Одна станция устанавливается на некотором опорном пункте и работает стационарно и в непрерывном режиме для устранения временных вариаций, а при помощи другой сейсмостанции ведётся измерение сейсмического поля в различных точках контролируемой территории. Возможность реализации такой методики достигается тем, что при получении и последующей обработке натурных данных, используются не абсолютные их значения, а относительные, то есть, данные, фиксируемые переносной сейсмостанцией, нормируются на данные, которые регистрируются сейсмостанцией на опорном пункте. При использовании рассматриваемой методики, за основу берётся предположение о том, что сейсмическое поле повсеместно диффузное. Это означает, что, на определённой частоте, при изменении величины сейсмического поля в одной произвольной точке в определённое количество раз, уровень сейсмического поля во всех других

точках контролируемой территории изменяется во столько же. И, если в ММЗ относительные интенсивности микросейсмических шумов на переносной и опорной сейсмостанциях интерпретируются как зоны с повышенными или пониженными скоростями сейсмических волн, то в подходе, рассматриваемом в настоящей работе, такая интерпретация не требуется. Далее, располагая информацией о коэффициентах относительной интенсивности сейсмического поля в различных точках контролируемой территории, и, ведя непрерывную регистрацию вибросейсмического фона на опорной станции, осуществляется пересчёт значений сейсмического поля исследуемой территории в абсолютные единицы путём перемножения данных с опорной сейсмостанции на описанные ранее коэффициенты относительной интенсивности для каждой точки контролируемой площади. В дальнейшем строятся карты распределения вибросейсмического загрязнения исследуемой территории в абсолютных значениях.

Как упоминалось ранее, впервые автором метод микросейсмического зондирования был опробован в ледовых условиях оз. Байкал.



Рис. 3.3.1. Работы по методу микросейсмического зондирования в ледовых условиях оз. Байкал

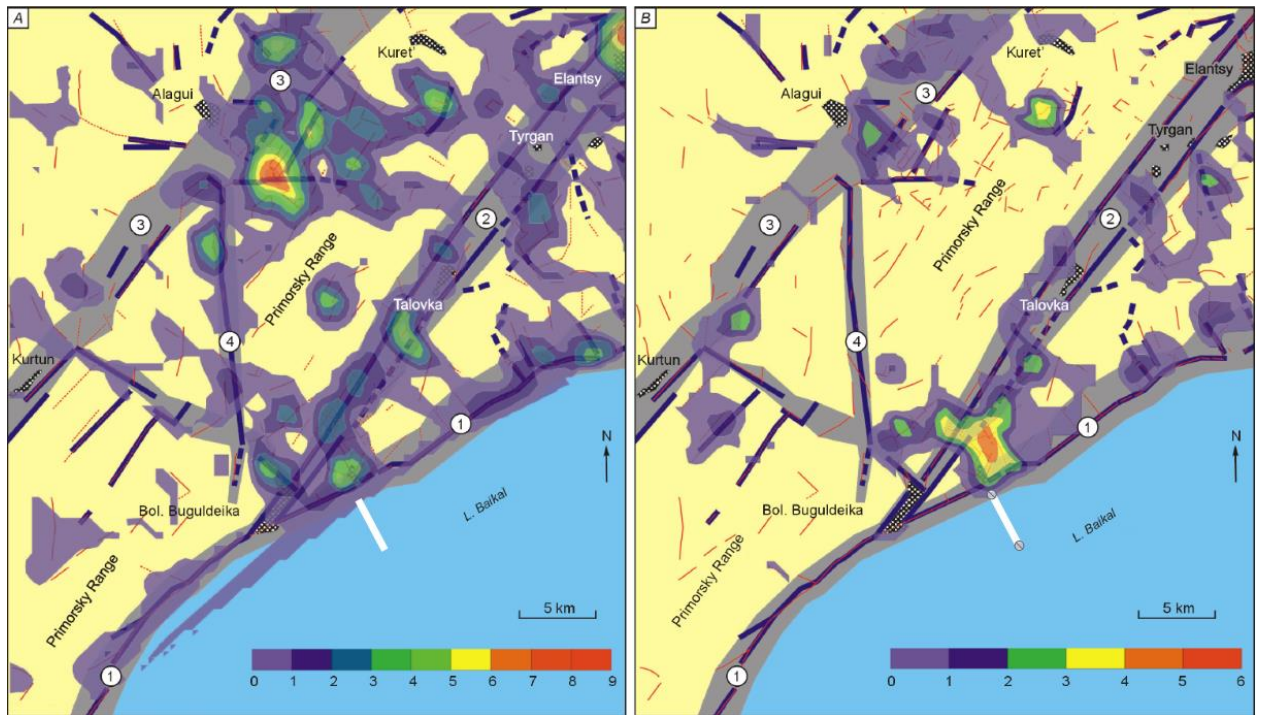


Рис. 3.3.2. Расположение профиля ММЗ в ледовых условиях оз. Байкал, вблизи пос. Бугульдейка (отмечен белой линией)

По результатам работ был построен глубинный разрез по рассматриваемому профилю (рис. 3.3.3).

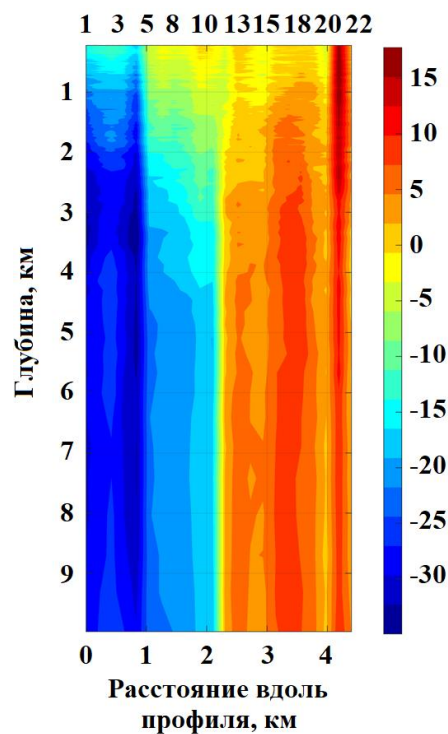


Рис. 3.3.3. Глубинный разрез, полученный по профилю метода микросейсмического зондирования на оз. Байкал

Выводы к главе 3

Описанная в главе технология эксплуатации разработанных широкополосных молекулярно-электронных сейсмических датчиков, а также созданная, основанная на оценке спектральных отношений специальная методика обработки экспериментальных данных, позволяют осуществлять оперативный мониторинг вибросейсмического шумового загрязнения контролируемой территории, что подтверждает второе положение, выносимое на защиту.

4. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

4.1. Характеристика местности, выбранной в качестве главного объекта исследований

Проверку разработанной методики было решено провести на территории посёлка Мосрентген, Новомосковского административного округа города Москвы (рис. 4.1.1).

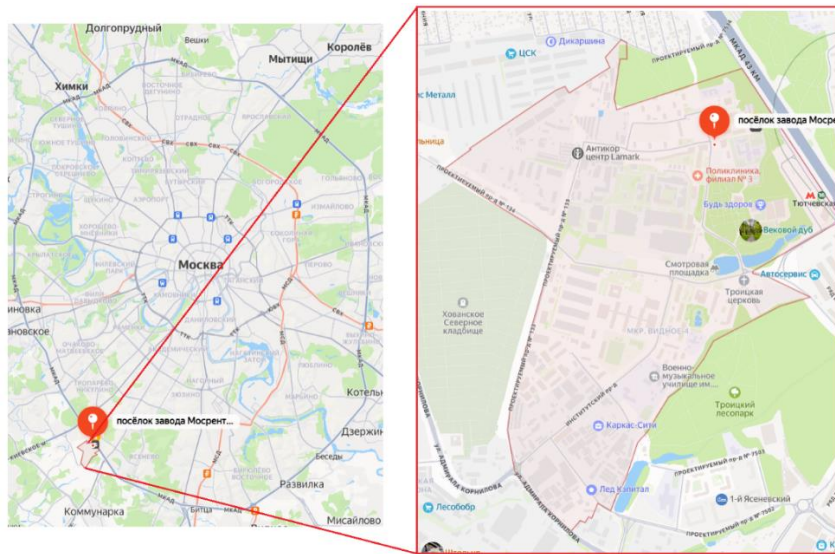


Рис. 4.1.1. Расположение посёлка Мосрентген на карте Москвы

Посёлок имеет развитую инфраструктуру, расположен на юго-западной стороне МКАД, население составляет около 22,2 тыс. человек [<https://stroim.mos.ru/stroitelstvo-v-okrugah-raionah/stroitelstvo-v-nao/mosrientghien>]. С 2019 года на территории посёлка велось строительство станции «Славянский мир» Троицкой линии Московского метрополитена, позднее станция сменила название на «Тютчевская». С сентября 2024 года станция введена в эксплуатацию. Также на территории посёлка Мосрентген находится Координационно-прогностический центр Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (КПЦ ИФЗ РАН), чем и обусловлен выбор посёлка Мосрентген в качестве главного объекта проводимых исследований (рис. 4.1.2).



Рис. 4.1.2. Координационно-прогностический центр ИФЗ РАН (КПЦ ИФЗ РАН), расположенный на территории пос. Мосрентген, г. Москва

В связи с этим, существует предположение о том, что в рассматриваемом районе возможно возникновение вибротсейсмических и акустических шумов, уровень которых превышает допустимые значения, установленные нормативно-правовыми документами [61-63].

На рисунке 4.1.3 представлена схема пространственного расположения измерительных точек вибротсейсмического шумового поля.

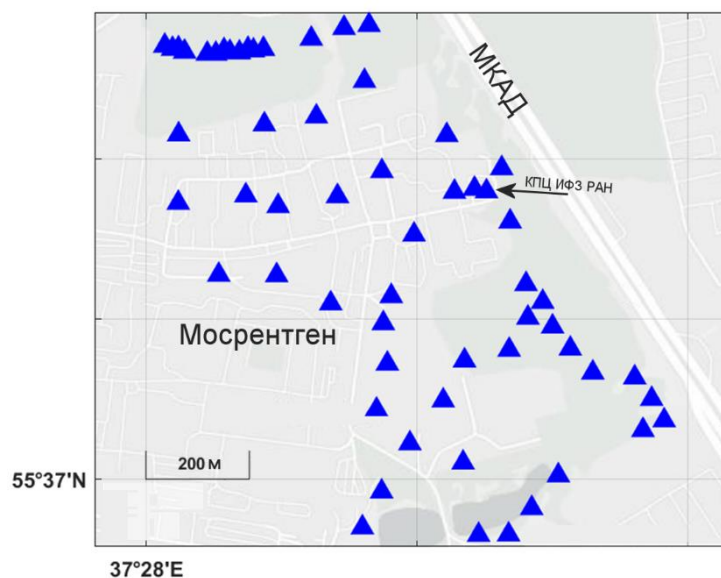


Рис. 4.1.3. Схема пространственного расположения измерительных точек вибротсейсмического шумового поля

Как упоминалось ранее, при проведении работ, измерительным оборудованием являются два широкополосных сейсмометра, один из которых используется как переносной и необходим для проведения измерений на исследуемых профилях и пикетах. Второй сейсмометр устанавливается на определённом расстоянии от исследуемой территории, а именно на постаменте подвального помещения КПЦ ИФЗ РАН, созданного специально для стационарных обсерваторских геофизических и сейсмологических наблюдений, свободного от локальных источников нестационарных помех и подходящего для использования в качестве опорного, «базового» пункта, функционирующего в непрерывном режиме для устранения временных вариаций (рис. 4.1.4).



Рис. 4.1.4. Переносная сейсмостанция, установленная в одной из измерительных точек (слева) и сейсмостанция, расположенная на опорном пункте в КПЦ ИФЗ РАН (справа)

Размеры охватываемой полемым экспериментом территории составляют примерно 1200×621 м. Измерения проводились в 58-и точках. Переносная сейсмостанция устанавливалась в каждой точке контролируемой территории в заранее подготовленные приямки на глубину, приблизительно соответствующую $2/3$ высоты корпуса прибора. Так как частотный диапазон измеряемых в рамках

настоящего исследования шумов близок к частотному диапазону микросейсмического фона в ММЗ, регистрация вибрационного фона в каждой точке исследуемой территории осуществлялась относительно длительное время – в течение 1,5 – 2,5 ч. Одновременно с переносной сейсмостанцией непрерывную запись вибрационных шумов вела станция, расположенная на опорном пункте в подвальном помещении КПП ИФЗ РАН.

4.2. Анализ шумовой обстановки исследуемой территории

На рисунке 4.2.1 в качестве примера приведены записи вибросейсмического шума переносной и опорной сейсмическими станциями.

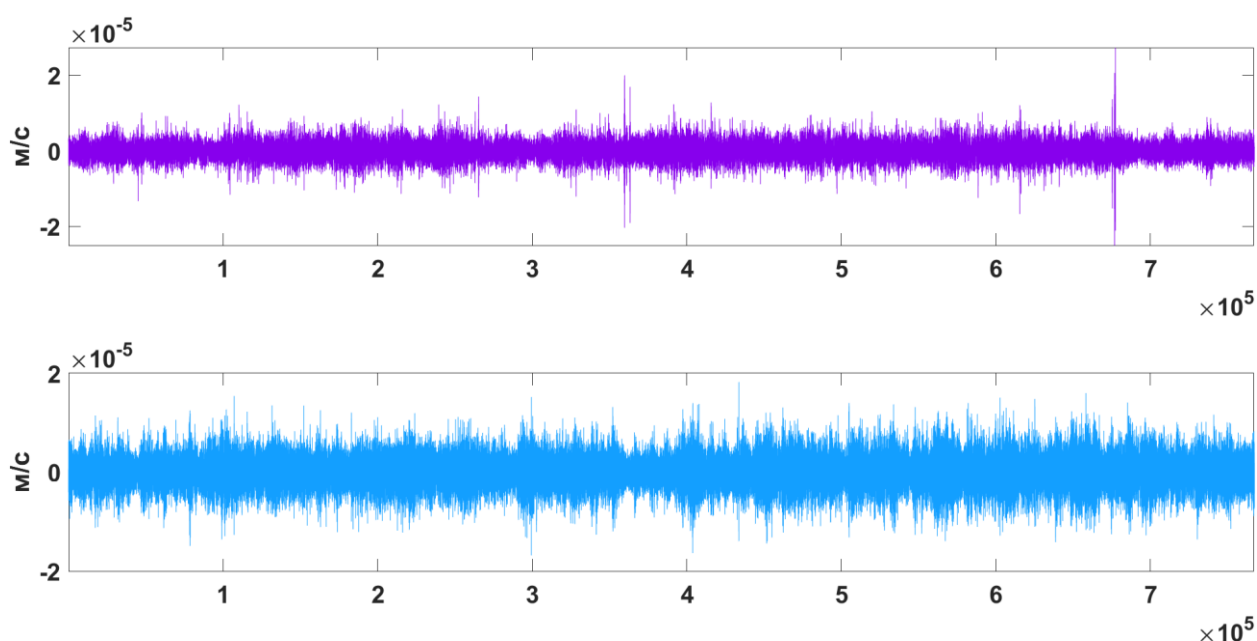


Рис. 4.2.1. Записи сейсмического шума переносной (сверху) и опорной (снизу) сейсмостанциями

Шум, регистрируемый на постаменте КПП, является более стабильным, с отсутствием нестационарных, локальных, импульсных помех. Однако, в целом, уровень шума, зарегистрированного переносной сейсмостанцией, практически, идентичен уровню шума с опорной точки.

Далее оценка спектральных уровней измеренных шумовых полей будет проводиться в логарифмических значениях – дБ. Для пересчёта абсолютных

значений вибросейсмического шума в логарифмические (дБ), используется следующее выражение:

$$L_v = 20 \lg \left(\frac{v}{v_{\text{оп}}} \right) \quad (4.2.1)$$

где v – измеренное значение виброскорости, а $v_{\text{оп}}$ – опорное значение виброскорости, установленное нормативными актами, составляющее $5 \cdot 10^{-8}$ м/с [СН 2.2.4/2.1.8.566-96, 1996].

Для пересчёта абсолютных значений акустического шума в логарифмические, используется следующее выражение:

$$L_p = 20 \lg \left(\frac{p}{p_{\text{оп}}} \right) \quad (4.2.2)$$

где p – измеренное значение звукового давления, а $p_{\text{оп}}$ – опорное значение звукового давления, установленное нормативными актами, соответствующее порогу слышимости человеческого слухового аппарата на частоте 1 кГц, составляющее $2 \cdot 10^{-5}$ Па (20 мкПа) [СН 2.2.4/2.1.8.562-96, 1996].

На рисунке 4.2.2 приведены спектры рассматриваемых записей. Здесь и далее (рис. 4.2.3-4.2.4) спектральные значения получены на основе оценки спектральной плотности мощности методом Уэлча по следующему алгоритму процедур:

- разделение исходной записи на 5-минутные фрагменты;
- вычисление квадрата модуля преобразования Фурье (периодограммы) для каждого 5-минутного фрагмента при помощи оконной функции Хэмминга с 85-процентным перекрытием между ними;
- усреднение полученных периодограмм по всем 5-минутным фрагментам;
- извлечение квадратного корня из результата усреднения;
- переход от абсолютных спектральных значений колебательной скорости к логарифмическим по формуле 4.2.1.

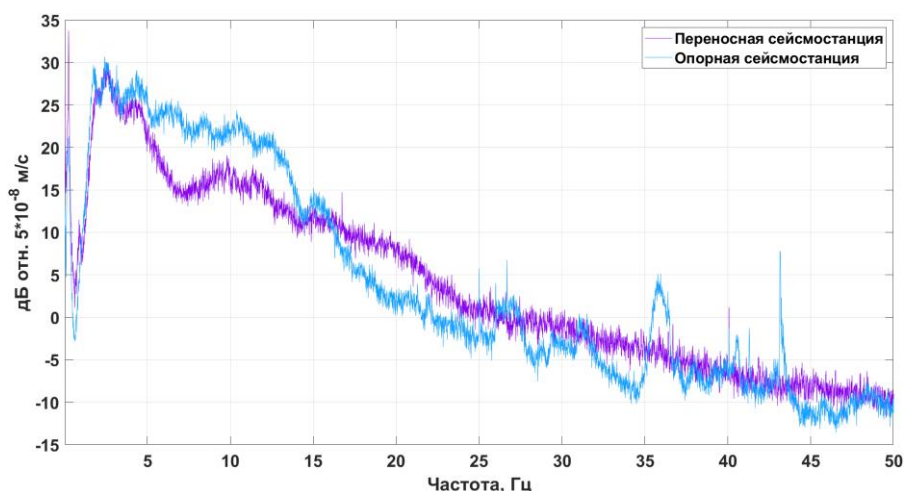


Рис. 4.2.2. Спектры записей с переносной и опорной сейсмостанций

В диапазоне примерно от 2 до 15 Гц наблюдаются более высокие спектральные значения записи с опорной сейсмостанции в сравнении с переносного ввиду более близкого её расположения к МКАД. Выше 20 Гц значения шума на опорной станции, в целом, ниже, чем на переносной, однако на некоторых частотах график спектра имеет пики, наиболее вероятно, связанные с работой строительной техники, эксплуатируемой при строительстве метро.

На рисунке 4.2.3 приведено сравнение спектральных значений фоновой сейсмического шума за двухчасовой вечерний интервал времени в рабочие дни, зарегистрированного на постаменте КПЦ ИФЗ РАН в осенние сезоны с 2019 по 2024 годы.

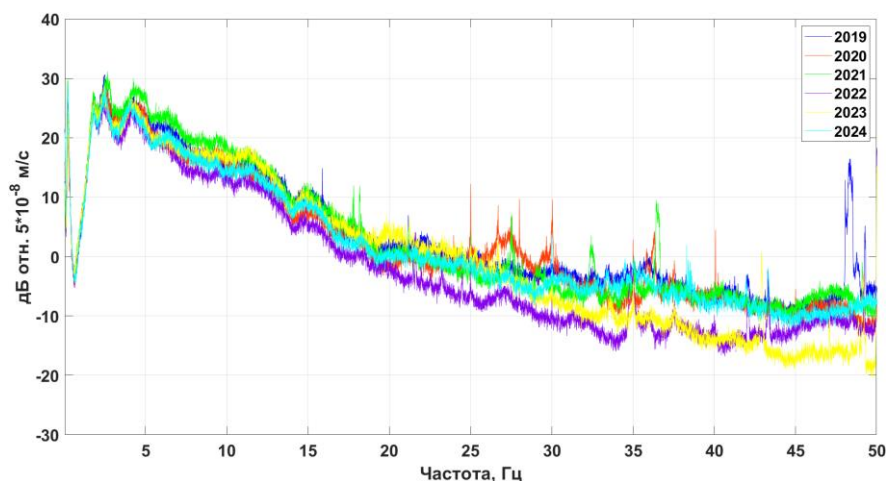


Рис. 4.2.3. Сравнение спектров вечерних двухчасовых записей с КПЦ ИФЗ РАН в рабочие дни осенних сезонов с 2019 по 2024 годы

Автомобильный транспорт создаёт наиболее сильный шум в диапазоне частот примерно от 2 до 20 Гц. В связи с этим, в рассматриваемом диапазоне наблюдается не слишком сильное различие уровней шума для указанных периодов времени, не превышающее 7-8 дБ, поскольку интенсивность дорожного трафика на кольцевой автодороге в вечернее время суток приблизительно одинаковая. Наибольшие различия уровней шумов наблюдаются в диапазоне выше 20 Гц и наиболее высокие значения соответствуют периоду с 2019 по 2021 год, что связано с наземной эксплуатацией строительной техники при разработке тоннеля метрополитена, возможно, сопровождавшейся ударными воздействиями, поскольку уровни шума отличаются в широкой полосе частот. В рассматриваемой полосе частот наблюдается множество пиков, вероятнее всего, связанных с работой силовых агрегатов и прочих механических устройств машин при строительстве станции метро. Наименьшие уровни вибросейсмического шума соответствуют осенним сезонам в 2022 и 2023 годах. Вероятно, это связано с окончанием наземных работ и выводом из эксплуатации соответствующей строительной техники. Об этом также свидетельствует уменьшение количества и значений спектральных пиков в диапазоне выше 20 Гц. Также в этой полосе наблюдается высокий уровень шума, зарегистрированного в 2024 году, сопоставимый с аналогичным в 2019-2021 годах, связанный с курсированием поездов в перегонном тоннеле между станциями «Тютчевская» и «Генерала Тюленева» после ввода в эксплуатацию Троицкой линии Московского метрополитена.

На рисунке 4.2.4 представлены спектры записей с постаментов КПЦ ИФЗ РАН после открытия станции метрополитена в дневное и ночное время.

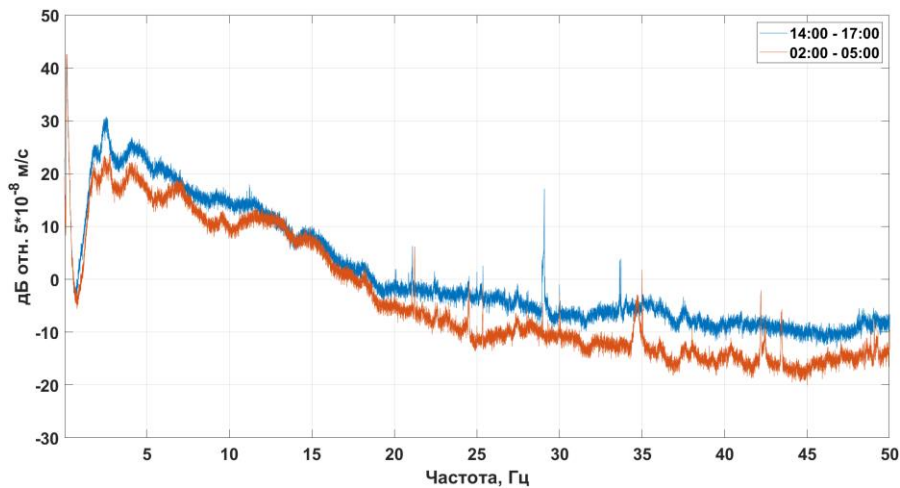


Рис. 4.2.4. Спектры записей с опорной станции на постаменте КПЦ ИФЗ РАН в дневное и ночное время суток, записанных после открытия станции метро «Тютчевская»

Наблюдается вполне закономерное снижение уровня вибр Сейсмического шума в диапазоне до 20 Гц в ночные часы, связанное со снижением активности жизнедеятельности населения в это время. Также наблюдается снижение уровня техногенного шума в диапазоне выше 20 Гц, связанное с завершением работы метрополитена в ночные часы. Средние значения шума в дневное и ночное время в рассматриваемой полосе частот отличаются примерно на 6 дБ. Аналогичный показатель в диапазоне 1-20 Гц отличается примерно на 2,6 дБ. Стоит отметить, что, возможно, в ночное время могут проводиться какие-либо технические работы, о чём свидетельствуют пики около 34 и 42 Гц спектральной кривой, соответствующей ночным часам.

На рисунках 4.2.5 и 4.2.6 рассмотрены частотно-временные представления рассматриваемых данных, рассчитанные по аналогии со спектрами на рисунках 4.2.2-4.2.3, но без усреднения спектральной плотности мощности по отдельным временным фрагментам записи на одном из заключительных этапов. И, поскольку, в данном случае, более приоритетным было более высокое разрешение во временном масштабе, размер окна спектральных преобразований был уменьшен до значения в одну минуту.

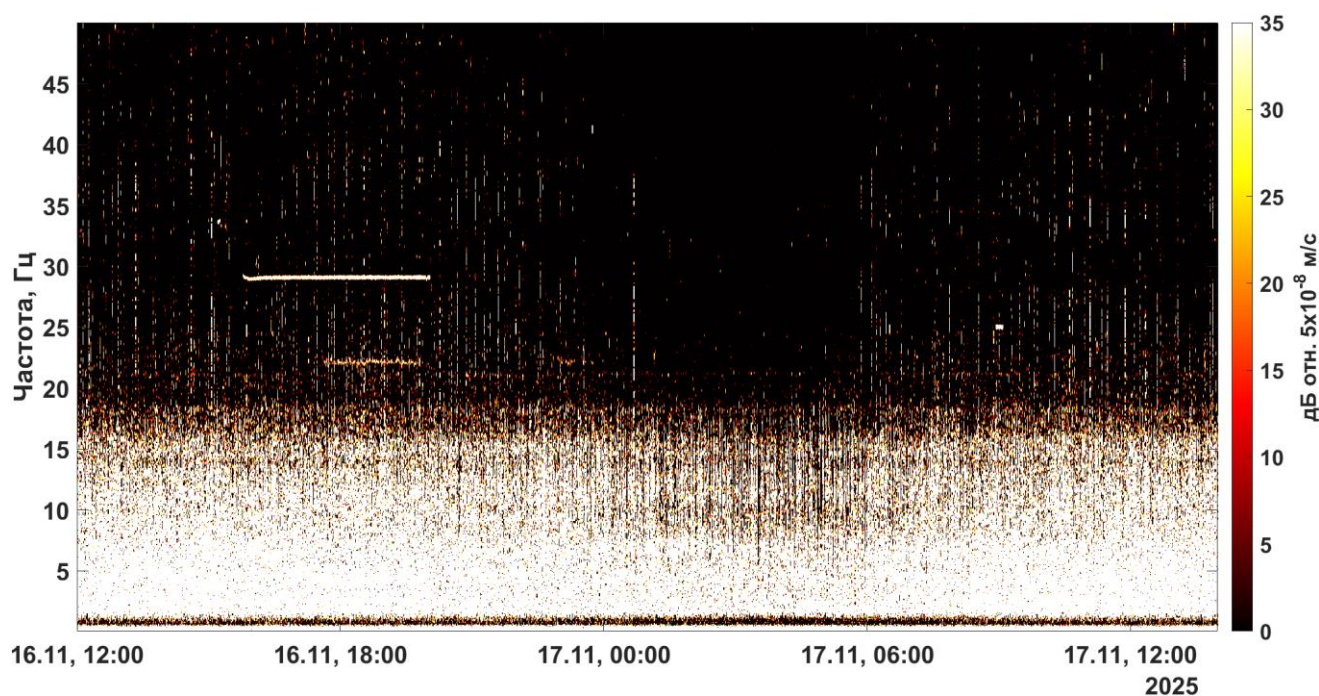


Рис. 4.2.5. Спектрограмма записи с опорной станции на постаменте КПЦ ИФЗ
РАН

В диапазоне от 2 до 18 Гц наблюдаются наиболее высокие значения вибросейсмического шума, связанного с автомобильным транспортом, регистрируемого, практически, постоянно. Этому же диапазону частично соответствует и шум, связанный с движением поездов метрополитена, однако он имеет более широкополосный спектр и наиболее заметно проявляется в полосе от 20 до 50 Гц, где автомобильный шум не вносит свой вклад. Об этом совершенно чётко и вполне закономерно свидетельствует отсутствие рассматриваемого шума в ночной период времени с 01:45 по 05:45 ч. Также в это время наблюдается меньший его вклад и в более низкочастотной спектральной области, в которой также наблюдаются более низкие значения автотранспортного шума, да и, в целом, рассматриваемый временной интервал является более «разреженным» на спектрограмме.

Более детально шум, связанный с работой метрополитена, проиллюстрирован на рисунке 4.1.9.

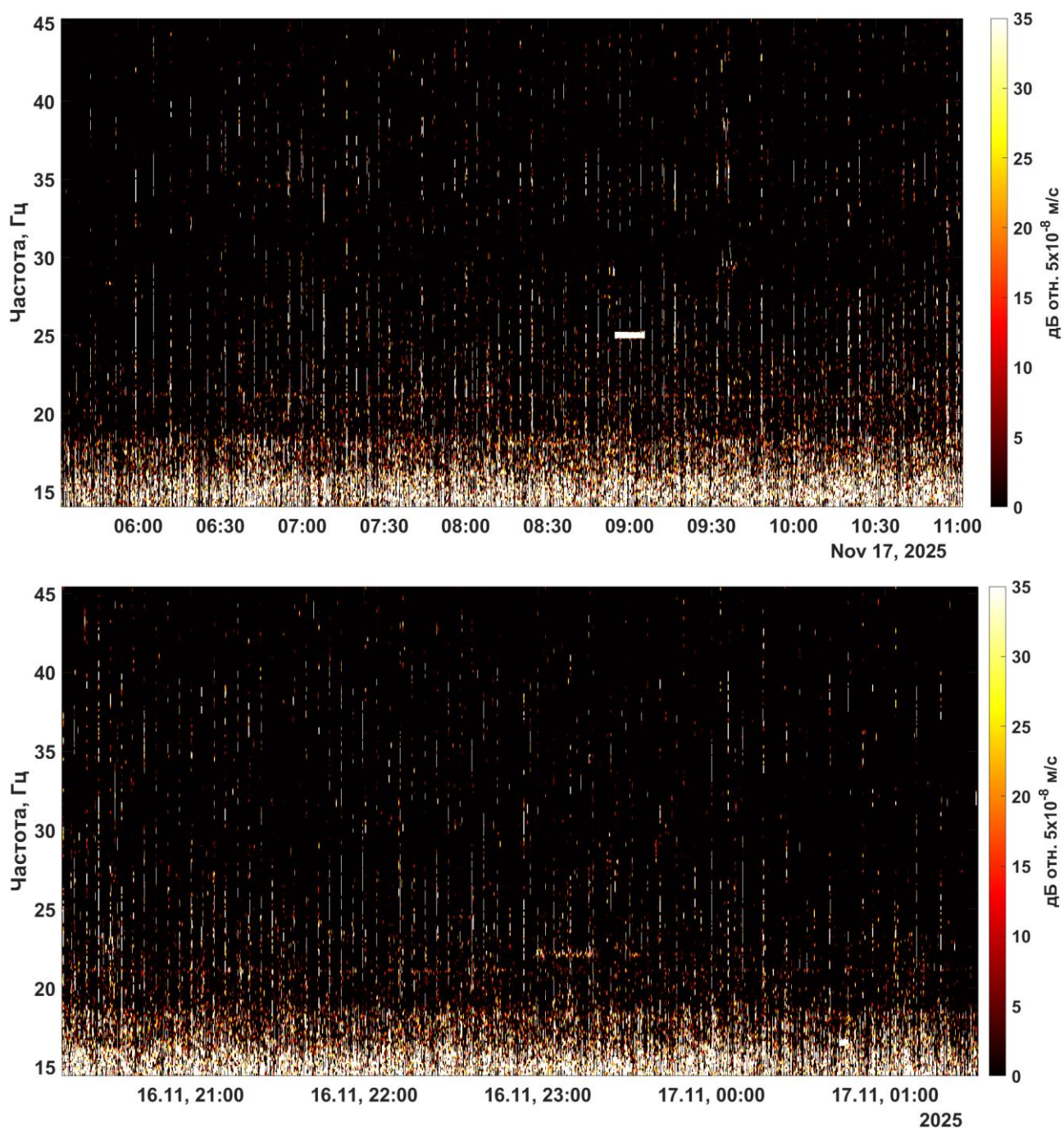


Рис. 4.2.6. Спектрограммы записи с опорной станции на постаменте КПЦ ИФЗ

РАН в утренние (сверху), вечерние и ночные (снизу) часы

Наблюдается совершенно чётко выраженная периодичность широкополосных спектральных линий, связанных с регулярным движением поездов метрополитена. Отчётливо видно повышение частоты движения поездов с 06:45 часов в сравнении с более ранними часами, а также снижение частоты их движения примерно в 00:00 часов, связанное со значительным изменением

пассажиропотока метрополитена в утреннее и вечернее время суток. Также наблюдается различие интенсивности шума метрополитена на разных частотах. Вероятно, это связано с неким экранированием обсадной колонны тоннеля создаваемых при движении поезда вибраций, а также его удалённого расположения относительно опорной станции КПП ИФЗ РАН. Ещё, возможно, это связано с резонансными эффектами в тоннеле. Максимальный уровень шума, создаваемый совместным действием автомобильного и подземного железнодорожного транспорта, в диапазоне до 20 Гц составляет около 47,8 дБ. Максимальный уровень шума, создаваемого отдельно взятым подземным транспортом в диапазоне выше 20 Гц, зарегистрированного станцией КПП, составляет примерно 15,4 дБ.

Для дальнейшего сравнительного анализа полученных результатов с нормативно-правовыми актами, в таблицах 4.2.1 и 4.2.2 приведены допустимые уровни вибрационного и акустического шумов для жилых помещений в соответствии с санитарными нормами.

Таблица 4.2.1. Допустимые уровни вибрации согласно [61]

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	2	4	8	16	31,5
Уровни вибрации по скорости, дБ	76	71	67	67	67
Эквивалентный уровень вибрации, дБ	67				

Представленные допустимые уровни вибрации определены для жилых помещений, палат больниц и санаториев.

Таблица 4.2.2. Допустимые уровни акустического шума согласно [62, 63]

Время суток	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц					Эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	
с 07:00 до 23:00	79	63	52	45	39	40
с 23:00 до 07:00	72	55	44	35	29	30

Представленные уровни акустического шума определены для жилых комнат квартир, жилых помещений домов отдыха, пансионатов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, спальных помещений в детских дошкольных учреждений и школах-интернатах.

Среднегеометрические частоты являются центральными частотами октавных полос и определяются выражением:

$$f_{cp} = \sqrt{f_n f_v} \quad (4.2.1)$$

где f_n и f_v – нижняя и верхняя граничные частоты октавной полосы соответственно.

На рисунке 4.2.7 приведено вероятностное спектральное распределение с опорной точки за период с ноября 2024 по март 2025 года.

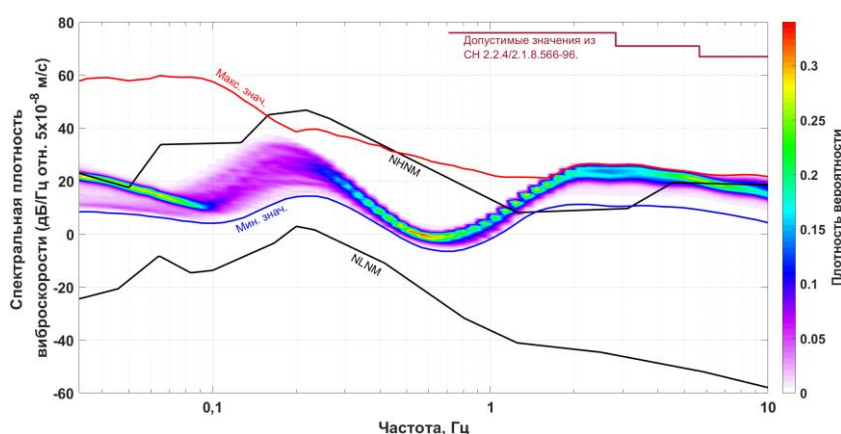


Рис. 4.2.7. Вероятностное спектральное распределение значений вибросейсмического шума, зарегистрированного опорной станции на постаменте КПЦ ИФЗ РАН с ноября 2024 по март 2025 года

В основу построения рассматриваемого распределения лёг расчёт значений функции плотности вероятности по логарифмическим спектральным значениям колебательной скорости 13-минутных фрагментов записи вибросейсмического шума с постаментов КПЦ за указанный период времени [124]. Спектральные значения интервалов записи рассчитаны аналогично тем, что изображены на рисунках 4.2.2-4.2.4. Красная и синяя кривые на графике характеризуют максимальные и минимальные спектральные значения вибросейсмического шума, зафиксированные за весь измерительный период соответственно. Чёрные кривые характеризуют минимальный и максимальный уровни фонового сейсмического шума Земли по модели Питерсона, пересчитанные в логарифмические величины в соответствии с указаниями нормативно-правового акта СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [61]. Высокие значения функции плотности вероятности ниже 0,1 Гц могут свидетельствовать о вкладе в шумовое поле естественных первичных микросейсм от сильно удалённых источников – океанические и морские волнения, соударения океанических волн о береговые скалы и т.д. Высокие значения рассматриваемой функции в интервале от 0,4-0,5 до 1 Гц, вероятно, свидетельствуют о наличии микросейсмического шума, создаваемого локальными естественными источниками – движение вод и формирование волновых процессов на участках местных акваторий (озёра, пруды), взаимодействие ветровых потоков с растительностью. Высокие вероятностные значения в высокочастотной области спектра (выше 1 Гц), заметно превышающие по оси ординат максимальные модельные значения фонового сейсмического шума, свидетельствуют об обилии техногенных источников шума, наибольший вклад из которых вносит интенсивный автомобильный трафик по участку МКАД. Однако по оси ординат вероятностная функция далека от допустимых значений из санитарных норм, отмеченных на рисунке бордовым оттенком. Максимальные спектральные значения шума в низкочастотной области с малой долей вероятности могут достигать значений около 60 дБ.

На рисунке 4.2.8 представлены октавные спектры сигналов с переносной и опорной сейсмостанций в соответствии с допустимыми значениями из нормативно-правовых документов. Рассматриваемые спектры были рассчитаны путём усреднения квадрата модуля преобразования Фурье в октавных полосах со среднегеометрическими частотами из СНиП, извлечения из полученных данных квадратного корня и последующим переходом от абсолютных значений к логарифмическим по формуле 4.2.1.

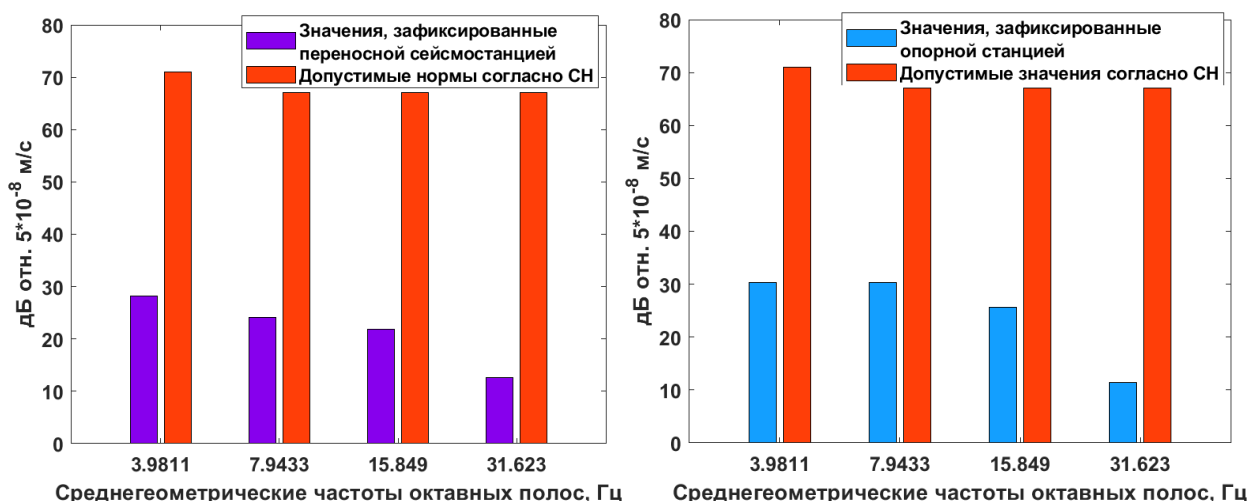


Рис. 4.2.8. Октавные спектры сигналов, зарегистрированных переносной (слева) и опорной (справа) сейсмостанциями в соответствии с допустимыми значениями из нормативно-правовых документов

Спектральные значения шума второй и третьей октав с опорной станции имеют повышенные значения в связи с близким расположением кольцевой автодороги по отношению к КПЦ ИФЗ РАН. Превышений допустимых норм по измеренным значениям не наблюдается.

4.3 Построение карт пространственного распределения вибросейсмического и акустического шумового загрязнения в пределах исследуемой территории

4.3.1. Вибросейсмический шум

Используя коэффициенты относительной интенсивности вибросейсмического шумового поля, рассчитанные ранее в ходе обработки

полученных данных, представляется возможным осуществлять оценку вибросейсмического загрязнения исследуемой территории в абсолютных значениях, в режиме реального времени. Таким образом, в качестве основного результата проведённого исследования, были получены карты пространственного распределения вибросейсмического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное и ночное время суток, выраженного в децибелах (рис. 4.3.1.1-4.3.1.4).

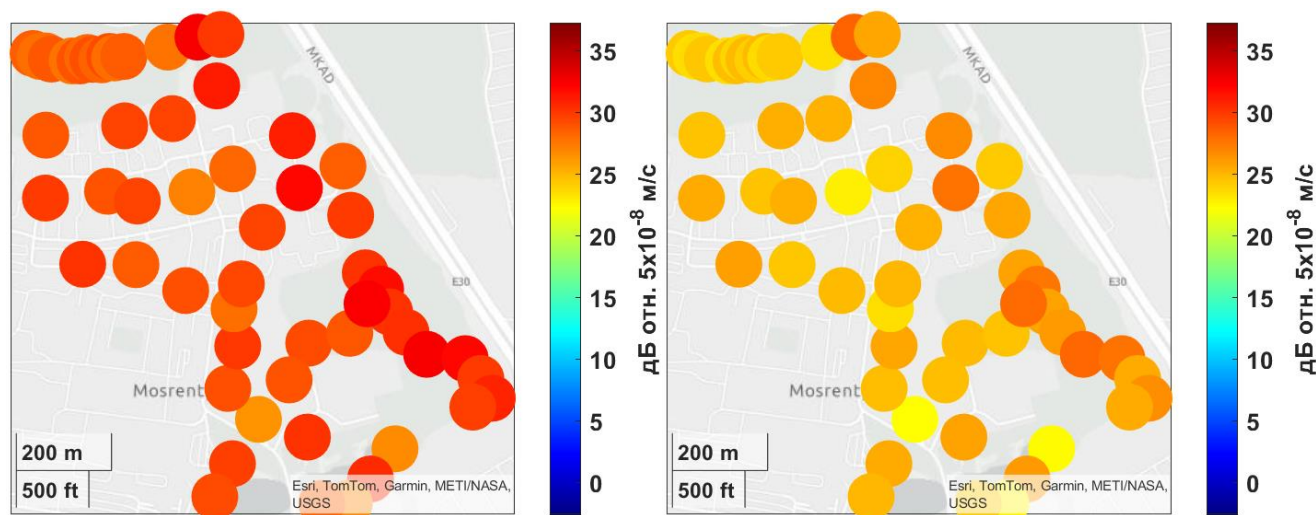


Рис. 4.3.1.1. Карты распределения вибросейсмического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 3,9 Гц

Для рассматриваемой частоты наблюдается практически равномерное пространственное распределение шумового фона в пределах исследуемой территории как днём, так и ночью, в связи с чем, выявить какие-либо характерные места с наиболее высоким и наиболее низким значениями измеряемого параметра довольно затруднительно. Уровень вибросейсмического шума в дневное время суток превышает уровень шума в ночное время примерно на 4-5 дБ. Максимальный уровень шума днём составляет около 32,5 дБ, в ночное – 28,2 дБ. Превышений допустимых значений вибрации, установленных СН 2.2.4/2.1.8.566-96 для жилых помещений, палат больниц и т.д., не зафиксировано.

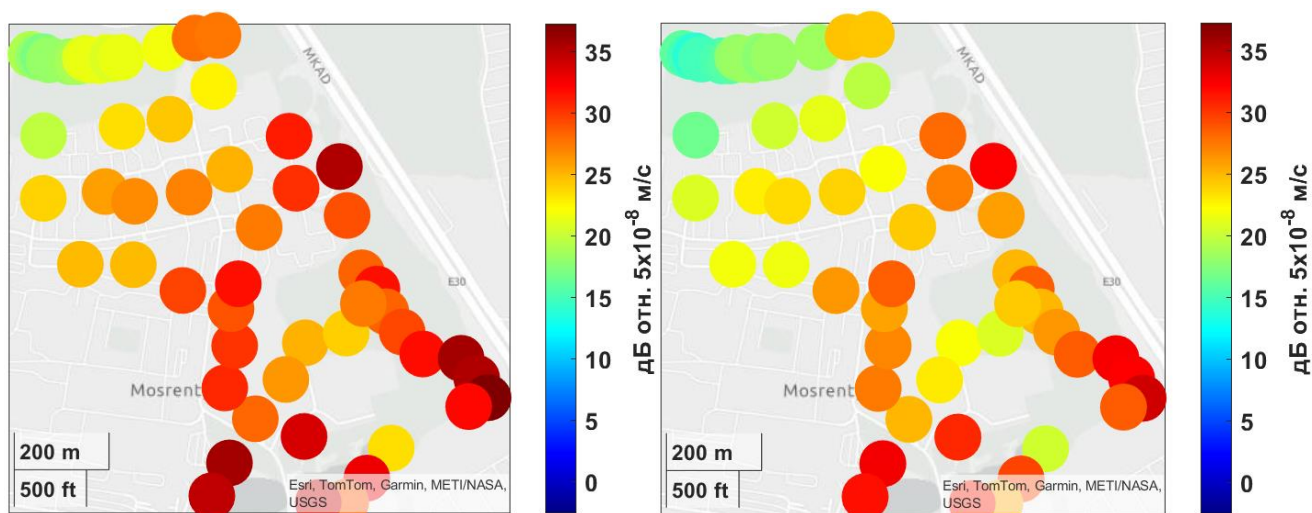


Рис. 4.3.1.2. Карты распределения вибросейсмического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 7,9 Гц

Для рассматриваемой частоты высокие значения шума наблюдаются вблизи участка МКАД. Наиболее низкие значения шума наблюдаются в лесной зоне в северной части исследуемой территории, имеющие тенденцию к увеличению в южном направлении. Уровень шума в ночное время имеет аналогичное пространственное распределение, но ниже дневных значений примерно 3-4 дБ. Максимальный уровень шума днём составляет 37,3 дБ, ночью – 34 дБ.

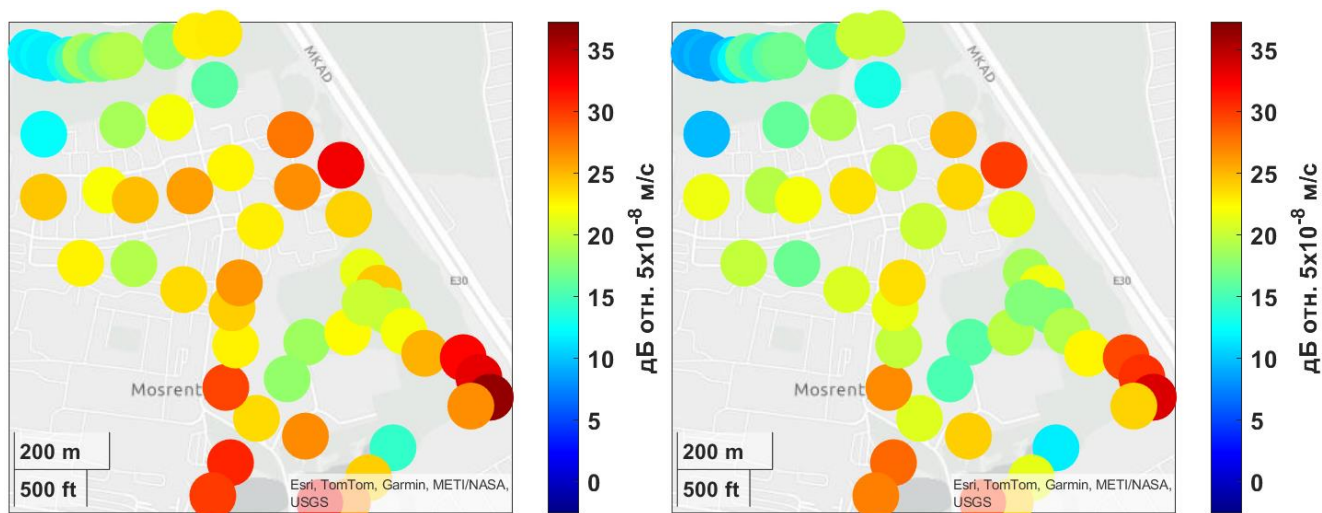


Рис. 4.3.1.3. Карты распределения вибросейсмического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 15,8 Гц

В данном случае наиболее высокие значения шума наблюдаются в юго-восточной части вблизи МКАД, а также в южной части вблизи пруда. Наиболее низкие значения характерны для лесной зоны в северной части, а также для центральной части исследуемой территории в парке развлечений и отдыха. В ночное время уровень шума распределён идентично. Максимальный уровень шума днём составляет 36,3 дБ, ночью – 33,6 дБ. Превышений допустимых нормативных значений не наблюдается.

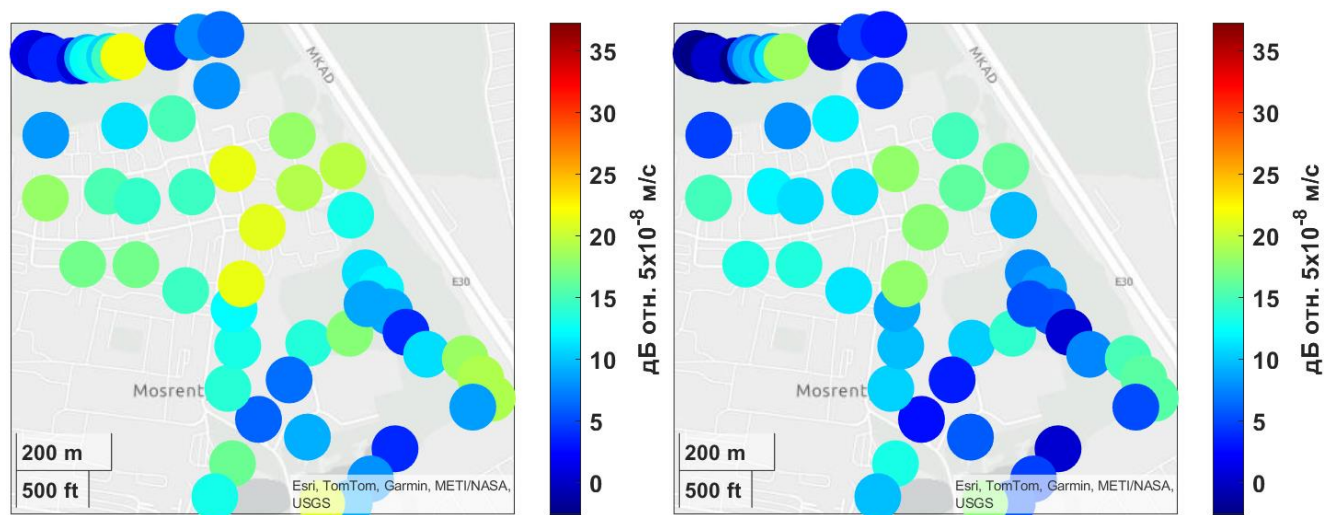


Рис. 4.3.1.4. Карты распределения вибросейсмического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 31,6 Гц

Для данной частоты характерны наиболее низкие значения шума в сравнении с другими частотами. Наиболее высокие значения наблюдаются в районе центральной площади пос. Мосрентген. Уровень шума в дневное и ночное время отличается в среднем на 3-4 дБ. Максимальный уровень шума днём составляет 21,8 дБ, ночью – 18,5 дБ. Превышений допустимых нормативных значений не зафиксировано.

Как говорилось ранее, наибольшая доля энергии зарегистрированных шумовых полей, имеющая широкополосный спектральный состав, соответствует техногенным источникам, основным из которых является автомобильный транспорт. В связи с этим, наиболее высокие значения вибросейсмического

шумового фона почти для всех из рассматриваемых частот, ожидаемо, сосредоточены вдоль участка автодороги МКАД, а также в южной и юго-восточной частях исследуемой территории. Для среднегеометрической частоты 7,9 Гц, помимо выделенных областей, в дневной период зафиксированы высокие значения в центральной части посёлка Мосрентген, где расположена кольцевая транспортная развязка, остановки маршрутного транспорта и торговые площадки. Наиболее высокие значения вибросейсмического шума в дневной и ночной периоды времени зафиксированы в юго-восточной части исследуемой территории вблизи участка МКАД, соответствуют среднегеометрической частоте 7,9 Гц и составляют 37,3 и 34 дБ соответственно. Допустимых значений, установленных санитарными нормами, ни в одном частотном диапазоне не выявлено.

4.3.2. Акустический шум

Помимо основного эксперимента по сбору информации о вибросейсмической обстановке, на исследуемой территории были проведены дополнительные измерения акустического (звукового) шума. Измерения проводились при помощи шумомера компании Октава «ЭКОФИЗИКА-110А» и акустического микрофонного капсюля «ВМК-205» (рис. 4.3.2.1).



Рис. 4.3.2.1. Шумомер Октава «ЭКОФИЗИКА-110А» (слева) и акустический микрофонный капсюль «ВМК-205» (справа)

В таблицах 4.3.2.1 и 4.3.2.2 приведены технические характеристики шумомера и микрофона.

Таблица 4.3.2.1. Технические характеристики шумомера Октава «ЭКОФИЗИКА-110А»

Параметр	Значение
Рабочий частотный диапазон	1 Гц-16 кГц
Частотный диапазон измерения ультразвука	До 40 и до 100 кГц
Измерение уровня звука	Класс 1 по ГОСТ 17187-2010 (МЭК 61672-1)
Измерение вибрации	ГОСТ ИСО 8041
Спектральный анализатор	1/3-октавный и 1/12-октавный
Память	Энергозависимая, 4 Гб
Дополнительные возможности: • Прямое подключение микрофонов, вибродатчиков и измерительных антенн; • Измерение инфразвука; • Функции БПФ и селективного микровольтметра-частотомера; • Автоматическая запись в память результатов измерений и оцифрованных сигналов; • Режим постобработки записанных сигналов; • Канал телеметрии, дистанционное управление и работа с прибором; • Подключение цифровых измерительных преобразователей; • Металлический корпус, прочность к внешнему воздействию;	

Таблица 4.3.2.2. Технические акустического микрофонного капсуля «ВМК-205»

Параметр	Значение
Характеристика направленности	Свободного поля
Номинальная чувствительность	45 мВ/Па
Частотный диапазон	1,6 – 20 000 Гц
Максимальный измеряемый УЗД	146 дБ
Поляризация	Внешняя, 200 В
Диаметр с сеткой	13,2 мм ($1/2$ ")
Резьба для соединения	11,7 – 60 UNS

По результатам проведённых прямых измерений построены карты пространственного распределения акустического шумового фона для диапазона среднегеометрических октавных частот от 31,5 до 500 Гц, нормируемых СН 2.2.4/2.1.8.562-96, представленных в таблице 4.2.2 (рис. 4.3.2.2-4.3.2.9).

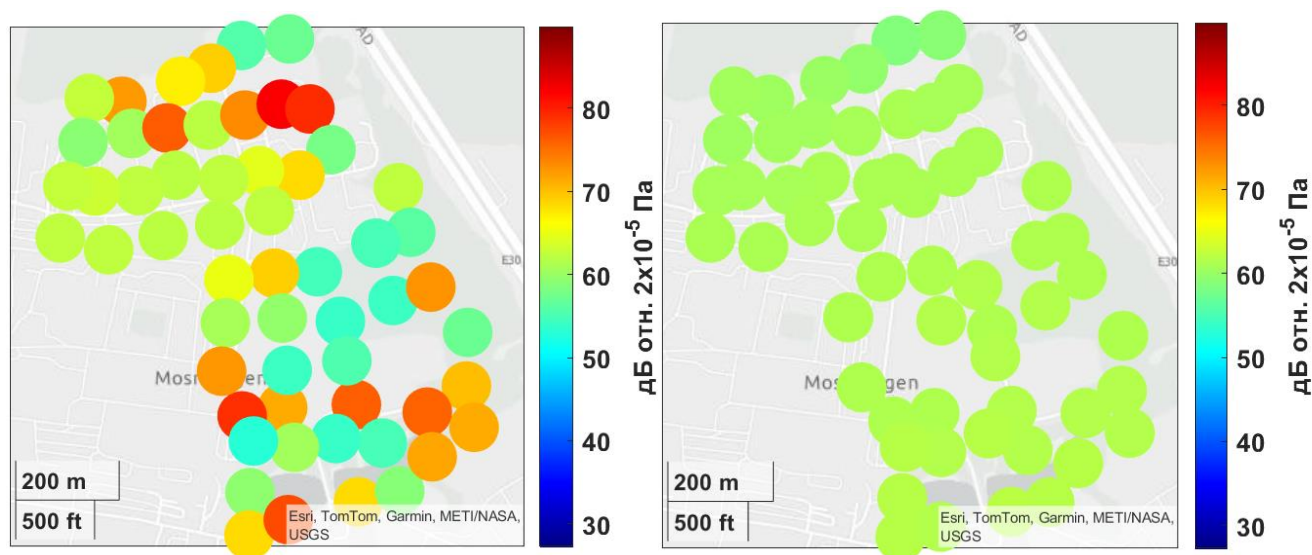


Рис. 4.3.2.2. Карты распределения акустического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 31,6 Гц

Наблюдается сильное отличие пространственного распределения шумового фона в дневное и ночное время суток. Днём уровень акустического шума распределён неравномерно, наиболее высокие значения зафиксированы в дворовой зоне в северной части исследуемой территории, а также в юго-восточной и южной областях, на территории парка развлечений и отдыха, что обусловлено обилием автомобильных транспортных средств, а также активностью населения в дневные часы. В ночное время шум распределён, практически, полностью равномерно по всей исследуемой территории, в связи с чем, выявление отдельных зон с пиковыми значениями не представляется возможным. Поэтому, при равномерном пространственном распределении, вместо пикового будет использоваться средний показатель на рассматриваемой частоте. Наибольшее значение звукового шума в дневное время для рассматриваемой частоты составляет 82,1 дБ, что на 3,1 дБ превышает допустимое значение, установленное санитарными нормами. В ночное время, в среднем, уровень шума составляет 69,1 дБ и отличается от пикового значения в дневное время на 13 дБ.

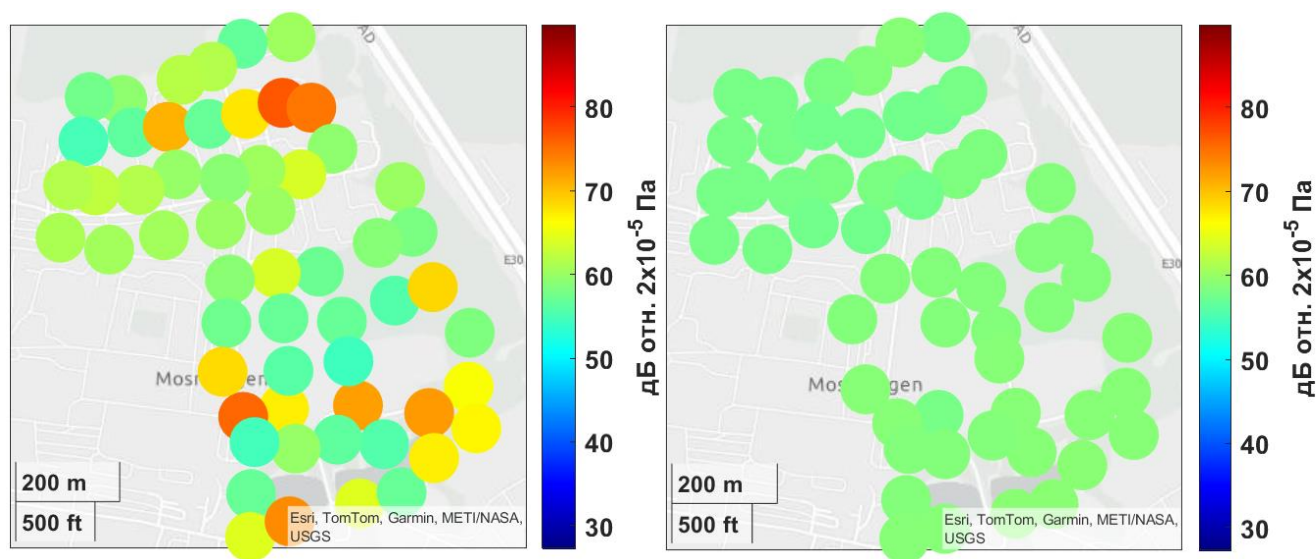


Рис. 4.3.2.3. Карты распределения акустического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 63 Гц

В целом, для данного случая картина распределения шума идентична той, что характерна для среднегеометрической частоты 31,6 Гц – повышенные значения

акустического шума фиксируются в тех же точках, что и в предыдущем случае. В ночное время суток шум так же, как и ранее, практически, равномерно распределён по площади исследований. Максимальный уровень акустического шума в дневной период составляет 76,4 дБ, что превышает допустимое значение из санитарных норм на 13,4 дБ. В ночное время средний уровень шума составляет 58,35 дБ, что на 3,35 дБ превышает допустимое значение из санитарных норм.

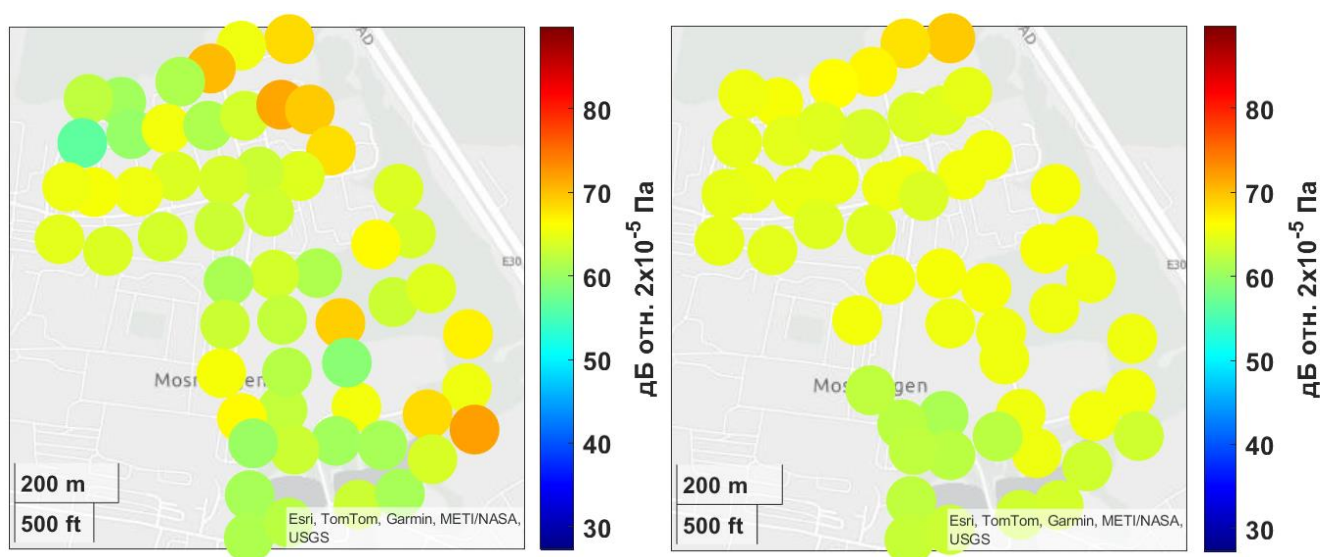


Рис. 4.3.2.4. Карты распределения акустического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 125 Гц

В дневной период наблюдается более плавное изменение значений акустического шумового фона в сравнении с рассмотренными ранее частотами. Наиболее высокие значения также характерны для дворовой зоны в северной части территории, однако также высокое значение шума зафиксировано в точке в юго-восточной части. В ночное время наблюдается уже менее равномерное распределение значений шумового фона, наиболее высокое значение зафиксировано в лесной зоне в северной части исследуемой территории, вблизи участка МКАД. Максимальный уровень шума днём составляет 72 дБ и превышает допустимое значение для соответствующей частоты из таблицы 4.2.2 на 20 дБ. Максимальный уровень шума ночью составляет 69,3 дБ и превышает допустимое значение на 25,3 дБ.

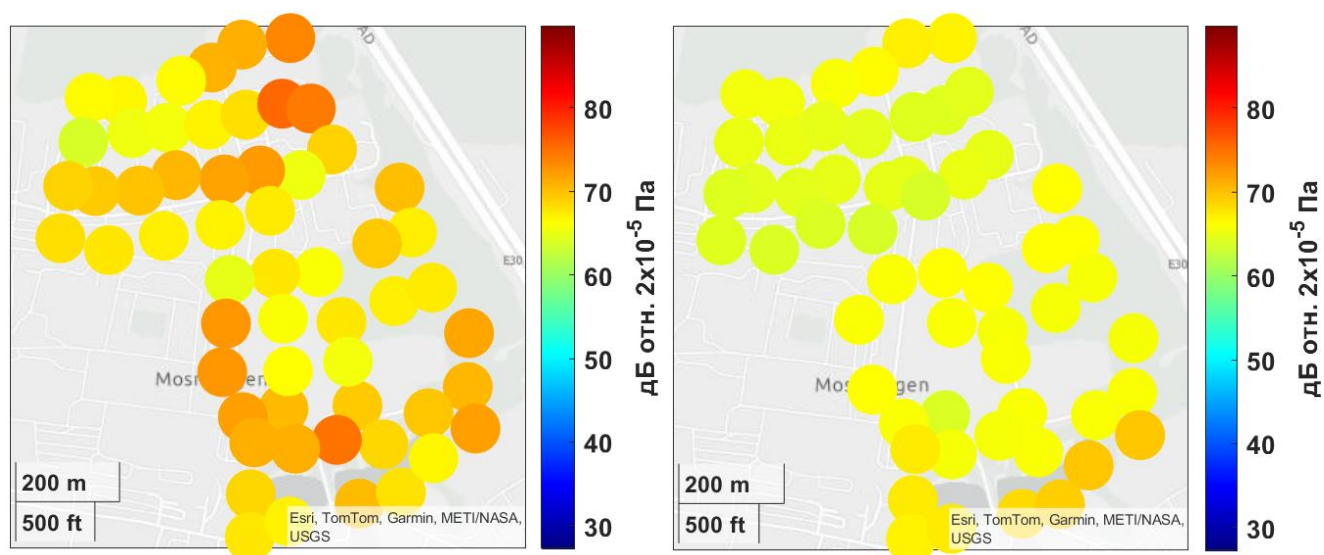


Рис. 4.3.2.5. Карты распределения акустического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 250 Гц

Наиболее высокие значения акустического шума днём наблюдаются в дворовой зоне в северной части исследуемой территории, ночью – в юго-восточной части. Максимальный уровень шума днём составляет 75,6 дБ, ночью – 69,7 дБ. Превышение допустимых норм в дневное время составляет 30,5 дБ, в ночное – 34,7 дБ.

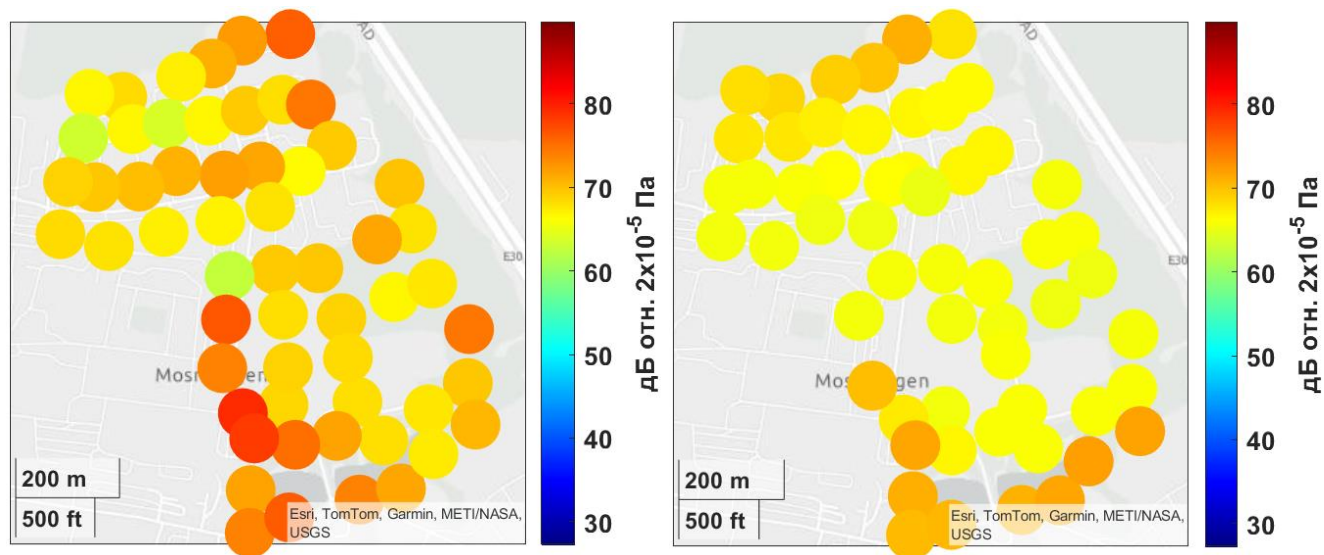


Рис. 4.3.2.6. Карты распределения акустического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 500 Гц

Наиболее высокие значения акустического шума днём наблюдаются вблизи автомобильной дороги неподалёку от пруда, расположенного в южной части территории. В ночное время наиболее высокие значения характерны для южной и юго-восточной части исследуемой территории. Максимальный уровень шума днём составляет 79,2 дБ и превышает допустимое значение на 40,2 дБ. Максимальный уровень шума ночью составляет 72 дБ и превышает допустимое значение на 43 дБ.

Таким образом, проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о том, что с ростом частоты пространственное распределение значений звукового шума в дневной период становится более равномерным и менее контрастным и, при этом, обратный эффект наблюдается в ночное время – картина распределения шума становится более разнообразной. Весьма вероятно, это связано со снижением влияния техногенных источников шума, которые являются доминирующим фактором при формировании волновых полей на селитебных территориях, и увеличением влияния атмосферных явлений по мере роста частоты. Превышения допустимых нормативных значений в дневное время суток выявлены для всех рассмотренных среднегеометрических октавных частот, в ночное время превышений не наблюдается лишь на частоте 31,6 Гц. Наибольшие превышения в дневной и ночной периоды зафиксированы для среднегеометрической 500 Гц.

4.4. Оценка свойств стационарности спектральных коэффициентов относительной интенсивности вибросейсмического шума

В настоящем разделе проводится оценка стационарности во времени коэффициентов относительной интенсивности сейсмического шума в различных точках исследуемой территории, полученные путём нормировки спектральных значений сейсмического шума во всех измерительных токах на аналогичный параметр на опорном пункте. Для этого были проведены дополнительные измерения в трёх точках с различным характерным шумовым фоном – в лесной

зоне, характеризующейся невысокими значениями виброейсмического фона, на территории парка рядом с прудом и на территории одного из жилых дворов, где ожидалось наиболее высокие значения фонового виброейсмического шума, ввиду наличия регулярно проезжающего рядом автомобильного транспорта, а также обилием людей. На рисунке 4.4.1 показано расположение точек дополнительных измерений на территории пос. Мосрентген.

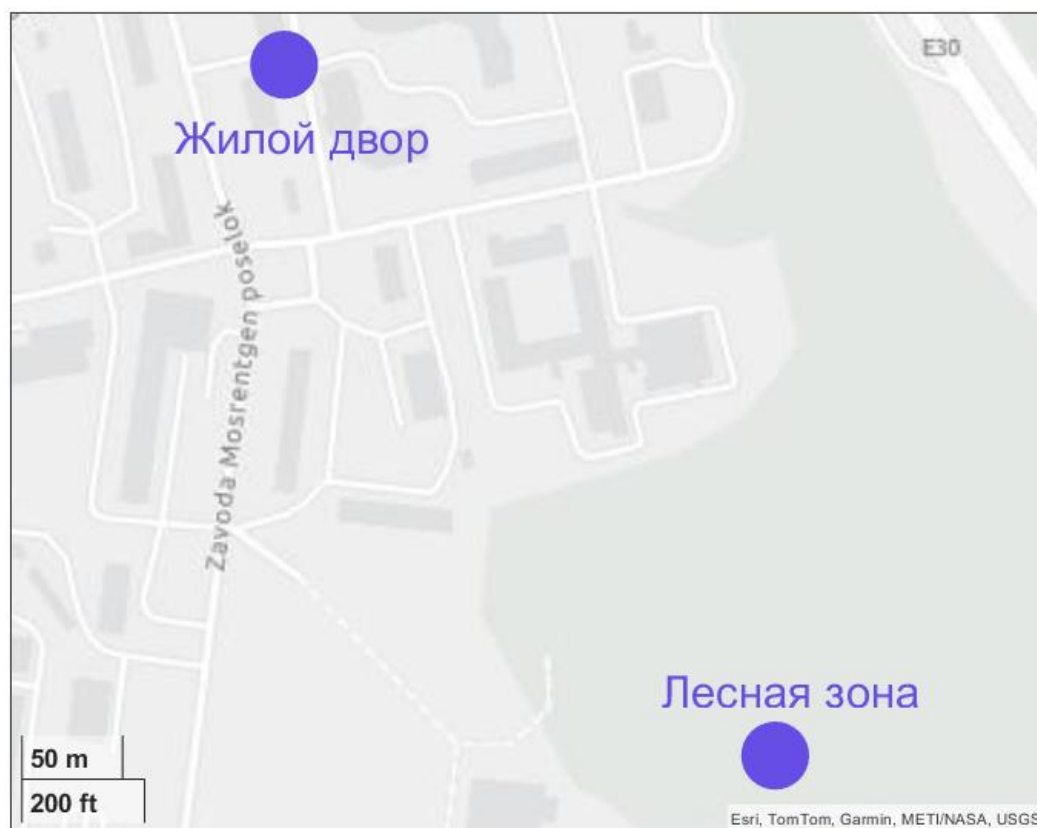


Рис. 4.4.1. Карта с расположением точек дополнительных измерений виброейсмического шума на территории пос. Мосрентген

В точке, расположенной в лесной зоне, вначале проводились измерения в течение одного дня (около 7 часов), затем около 2-х часов ежедневно на протяжении недели, затем были проведены трёхкратные измерения с интервалом в два месяца. Аналогичные измерения с интервалом в два месяца были проведены на территории жилого двора.

В качестве статистических параметров для оценки стационарности были выбраны среднее абсолютное и среднеквадратическое отклонения, определяемые выражениями 4.4.1 и 4.4.2 соответственно:

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(x_i - \mu)| \quad (4.4.1)$$

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (4.4.2)$$

где μ – среднее значение выборки (математическое ожидание), N – количество значений выборки.

На рисунке 4.4.2 представлены временная зависимость спектральных коэффициентов относительной интенсивности виброрейсмического шума по данным с точки в лесной зоне (слева) и рассчитанные по ним абсолютное отклонение от среднего значения и среднеквадратическое отклонение (справа).

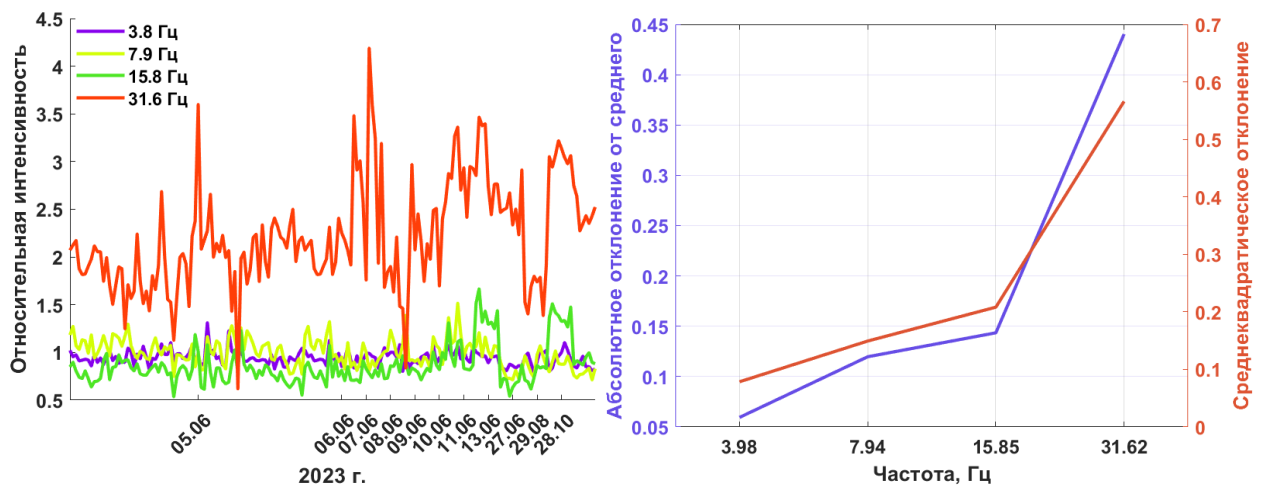


Рис. 4.4.2. Временная зависимость спектральных коэффициентов относительной интенсивности виброрейсмического шума в лесной зоне (слева) и рассчитанные по ним абсолютное отклонение от среднего значения и среднеквадратическое отклонение (справа)

Наибольшая стабильность во времени, ожидаемо, характерна для коэффициентов на самой низкой среднегеометрической октавной частоте – 3,9 Гц. С ростом частоты до значения 15,8 Гц рассматриваемые коэффициенты проявляют чуть меньшую стабильность во времени, при этом имеют небольшую погрешность. Наибольший разброс значений, а, соответственно, и наибольшие абсолютное отклонение от среднего и среднеквадратическое отклонение имеют спектральные

коэффициенты на частоте 31,6 Гц. Это объясняется меньшими значениями длин волн спектральных компонент шумового поля на рассматриваемой частоте в разных точках, соответственно, они наиболее изменчивы во времени. В таблице 4.4.1 представлены значения статистических показателей, отображённых на рисунке 4.4.2, справа.

Таблица. 4.4.1. Значения абсолютного отклонения от среднего среднегеометрического отклонения спектральных коэффициентов в лесной зоне

	Среднегеометрические октавные частоты, Гц			
	3,8	7,9	15,8	31,6
Абсолютное отклонение от среднего	0,06	0,12	0,14	0,44
Среднеквадратическое отклонение	0,08	0,15	0,21	0,57

На рисунке 4.4.3 представлены зависимости, аналогичные тем, что показаны на рисунке 4.4.2, по измерениям в точке, расположенной в одном из жилых дворов.

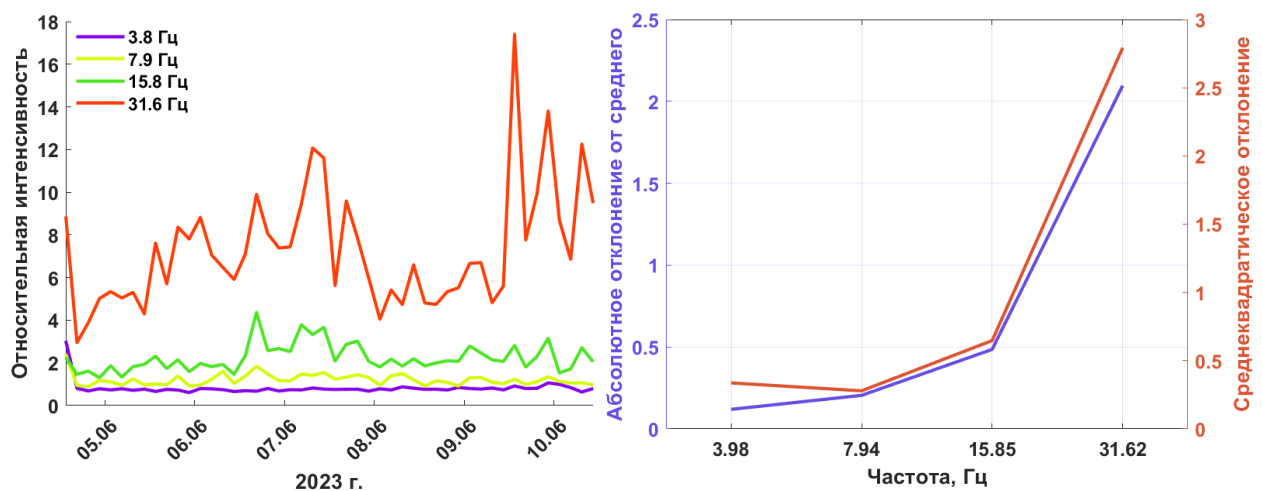


Рис. 4.4.2. Временная зависимость спектральных коэффициентов относительной интенсивности вибросейсмического шума в жилом дворе (слева) и рассчитанные

по ним абсолютное отклонение от среднего значения и среднеквадратическое отклонение (справа)

Картина временной зависимости спектральных коэффициентов аналогична рассмотренной ранее – наиболее стабильно проявляют себя коэффициенты характерные для среднегеометрической октавной частоте 3,9 Гц, а наибольший разброс значений характерен для частоты 31,6 Гц по той же причине, что описана в предыдущем случае. Однако количественно разбросы значений спектральных коэффициентов, их абсолютное отклонение от среднего значения и среднеквадратическое отклонение заметно отличаются от аналогичных показателей, полученных по измерениям в лесной зоне. Это объясняется наличием куда большего количества людей в этом месте, особенно, в дневное время, а также наличием автомобильного транспорта. В таблице 4.4.2 представлены значения статистических показателей, рассчитанных по результатам измерений в жилом дворе.

Таблица 4.2.2. Значения абсолютного отклонения от среднего среднегеометрического отклонения спектральных коэффициентов в лесной зоне

	Среднегеометрические октавные частоты, Гц			
	3,8	7,9	15,8	31,6
Абсолютное отклонение от среднего	0,12	0,2	0,48	2,1
Среднеквадратическое отклонение	0,34	0,28	0,65	2,8

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная в ходе исследования методика позволяет довольно надёжно, с малой погрешностью прогнозировать поведение шумовых полей в диапазоне среднегеометрических октавных частот от 3,9 до 15,8 Гц, как в относительно тихих, так и довольно

зашумлённых зонах контролируемой территории. На частоте 31,6 Гц такой прогноз несколько менее надёжен.

4.5. Оценка пространственной стабильности методики

В рамках настоящего исследования были проведены дополнительные измерения с целью определения наибольшего расстояния относительно опорного пункта, в пределах которого будет корректно функционировать разработанная методика мониторинга шумовой обстановки. Для этого были проведены замеры вибросейсмического шумового фона вдоль линейного профиля в направлении Филатовского шоссе относительно КПЦ ИФЗ РАН с шагом в 1 км (рис. 4.5.1).

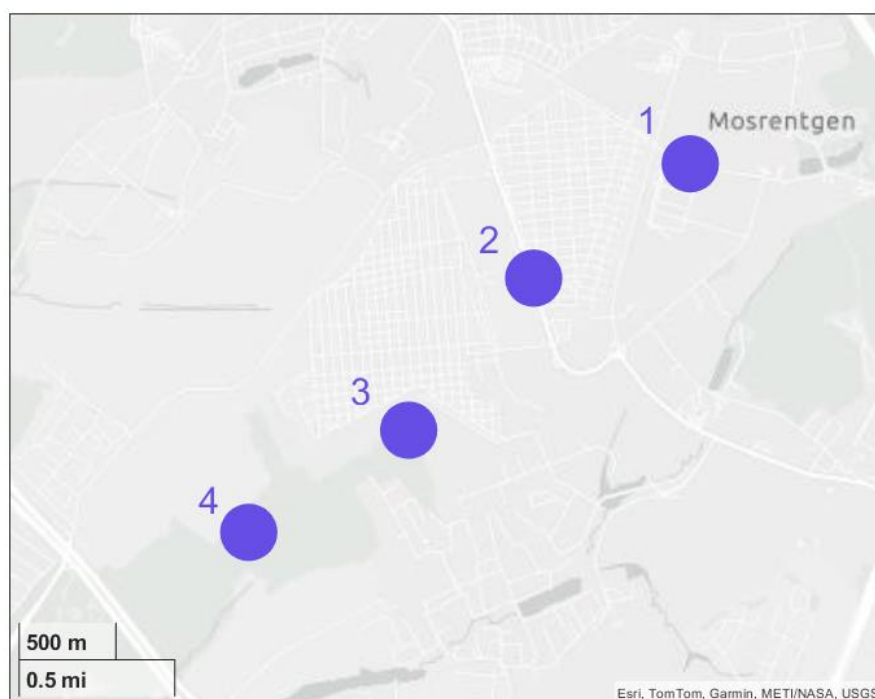


Рис. 4.5.1. Схема расположения измерительных точек вдоль профиля в юго-западном направлении относительно пос. Мосрентген

В качестве статистического параметра для оценки максимального расстояния, которое способна покрыть разработанная методика, использовался коэффициент корреляции, определяемый по максимуму взаимно-корреляционной функции сигналов с опорного пункта в КПЦ и измерительных точек на профиле. На рисунке 4.5.2 представлена зависимость коэффициента корреляции сигналов от расстояния относительно опорного пункта.

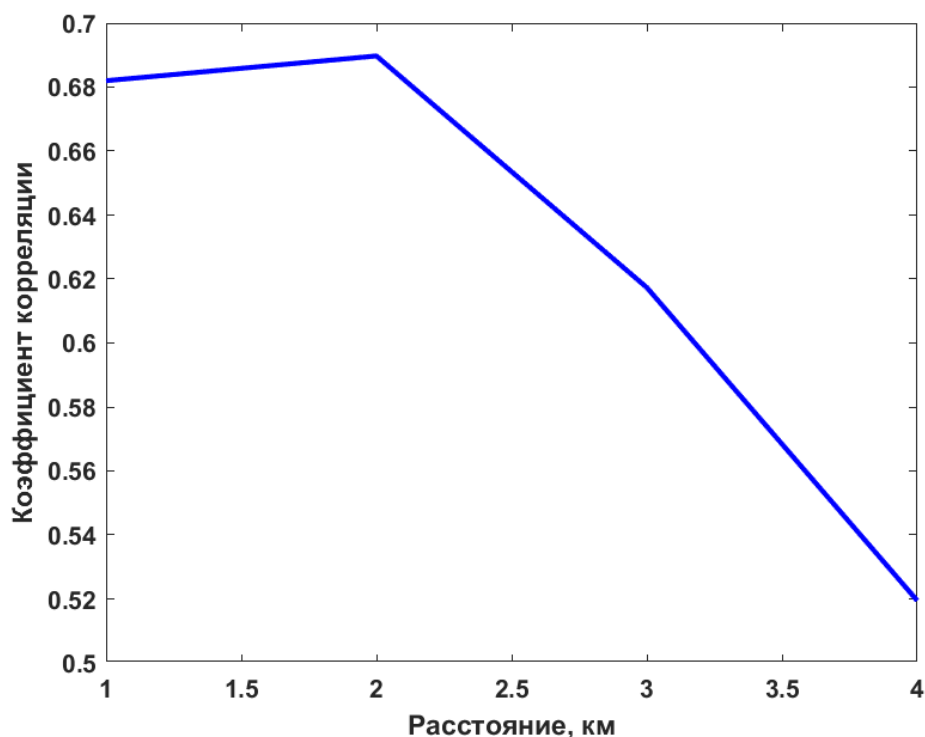


Рис. 4.5.2. Зависимость коэффициента корреляции сигналов в зависимости от расстояния до опорного пункта

Хорошая корреляция данных наблюдается на расстоянии до 2 км – 0,68-0,69. На расстоянии 3 км корреляция слегка снижается до значения 0,62, а на расстоянии 4 км спадает до значения 0,53.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная методика мониторинга вибросейсмического шумового загрязнения способна корректно функционировать и покрывать территорию в радиусе 2 км относительно опорного измерительного пункта.

Выводы к главе 4.

Проведён анализ спектрального состава шумовых полей на территории посёлка Мосрентген. Выявлены спектральные пики в высокочастотной области, связанные с работой специальной техники при строительстве метро, а после его открытия на спектрограмме сигнала с опорной станции появились широкополосные линии, связанные с движением поездов. Однако, в целом, на уровень фонового вибросейсмического шума открытие станции метрополитена сильно не повлияло. Построены частотно-зависимые карты пространственного

распределения значений вибросейсмического шума. Однако выявить зон с превышениями допустимых нормативных значений не удалось, что подтверждает третье положение, выносимое на защиту.

Построены аналогичные карты для акустического шума. Выявлены неоднократные превышения допустимых нормативных значений в различных диапазонах среднегеометрических октавных частот.

Проанализированы свойства стационарности рассчитываемых в ходе обработки экспериментальных данных спектральных коэффициентов относительной интенсивности вибросейсмического шума. Наибольшая стабильность характерна для коэффициентов в диапазоне от 3,9 до 15,8 Гц, что позволяет осуществлять длительный мониторинг на опорной станции с малой погрешностью.

Проанализированы корреляционные свойства шумов в зависимости от расстояния. Установлено, что разработанная методики позволяет корректно осуществлять мониторинг шумового загрязнения в радиусе 2 км от базовой точки.

5. ИЗУЧЕНИЕ ШУМОВОЙ ОБСТАНОВКИ НА ТЕРРИТОРИИ ГФО «МИХНЕВО» И СРАВНЕНИЕ С ОСНОВНЫМ ОБЪЕКТОМ ИССЛЕДОВАНИЙ

Использование единых площадных систем наблюдений было предложено академиком РАН Гамбурцевым Григорием Александровичем. Он доказал многократное снижение порога обнаружения сигнала по сравнению с одиночными измерительными станциями. В основе площадной системы наблюдений, объединённой в единую сеть, лежит интерференционный приём, реализуемый путём суммирования сигналов, накопленных отдельными измерительными каналами системы, направленный на повышение уровня когерентного полезного сигнала и подавление некоррелированной шумовой помехи или на повышение, так называемого, соотношения сигнал/помеха. При суммировании уровень полезного сигнала увеличивается в n раз, а уровень помехи в $\sqrt{n}$ раз, то есть, общее соотношение сигнал/помеха увеличивается в $\sqrt{n}$ раз, где n – количество измерительных каналов единой системы наблюдений, а величина задержек между вступлениями на различных каналах системы позволяет определять направление на источник сейсмического события. Однако эффективность суммирования зависит от корреляционных свойств регистрируемых сигналов и помехи. В связи с этим, предварительно осуществляется некий опрос волнового поля в месте планируемой многоканальной регистрации, направленный на анализ корреляционных свойств полезного сигнала и помехи, в результате которого определяются радиусы их когерентности. Исходя из этого принимается решение о пространственной конфигурации и определении расстояний между измерительными каналами планируемой единой системы регистрации или, так называемой, сейсмической антенны или группы.

В 2004 году на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево»), находящейся в относительно слабо заселённом

Ступинском районе Московской области, расположенном в 70 км к югу от Москвы, установлена одноимённая малоапертурная сейсмическая антенна, направленная на мониторинг слабых сейсмических событий на локальных и региональных эпицентральных расстояниях и пространственную локализацию их источников – МСА «Михнево». В месте установки антенны залегают осадочные горные породы. Энергетический уровень микросейсмического шума по смещению на частоте 1 Гц составляет $2 \text{ нм}^2/\text{Гц}$, а на частоте 10 Гц – $5 \times 10^{-4} \text{ нм}^2/\text{Гц}$. Корреляция шума в пределах апертуры группы составляет менее 0,2 уже на расстоянии 300 м, что создаёт хорошие условия для регистрации слабых региональных сейсмических событий, с магнитудой менее 2. Пространственная конфигурация антенны изображена на рисунке 5.1.

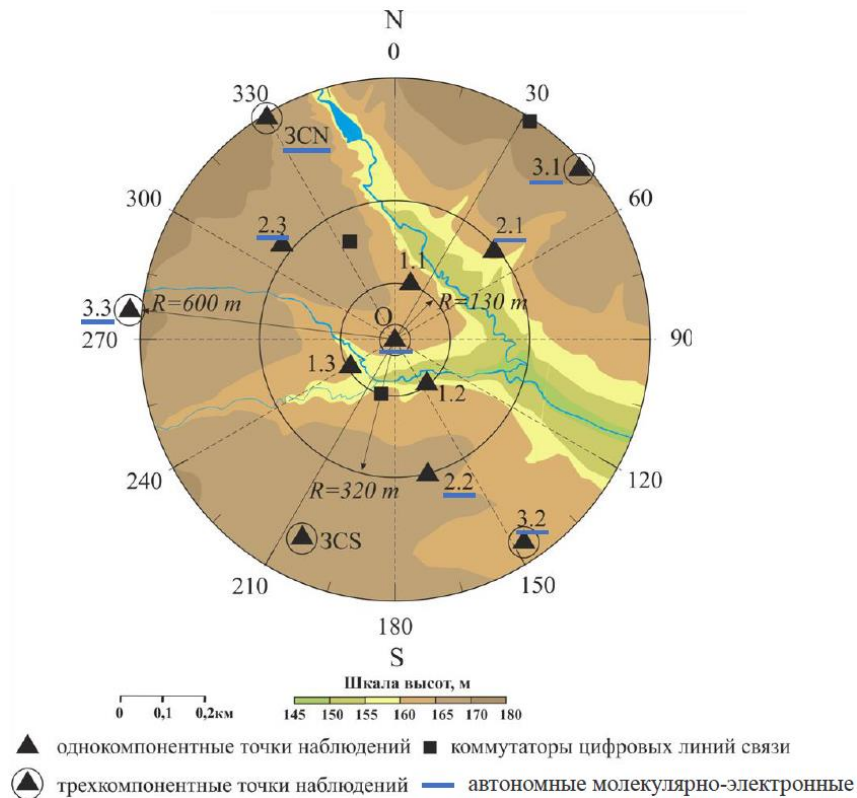


Рис. 5.1. Пространственная конфигурация измерительных каналов МСА «Михнево»

В состав антенны входит 12 каналов. Радиусы трёх concentric окружностей составляют 130, 320 и 600 м соответственно. В центре антенны

установлена трёхкомпонентная сейсмическая станция, в состав которой входят сейсмические датчики СМ-3ОС, рабочая частотная полоса которого соответствует диапазону от 0,008 до 20 Гц (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Центральная станция МСА, расположенная на геофизическом постаменте подземной штольни ГФО «Михнево»

По периферии на концентрических окружностях установлены станции с датчиками СМ-3КВ с рабочей частотной полосой 0,5-40 Гц. Центральная станция установлена на геофизическом постаменте в штольне на глубине 20 м, все остальные – на глубине 0,5 м (рис. 5.3).



Рис. 5.3. Одна из периферийных станций МСА

После ввода в эксплуатацию МСА было зарегистрировано более 5000 событий различной природы: региональных и телесеismicических землетрясений, карьерных взрывов. МСА регистрирует практически все землетрясения мира с магнитудой $M > 5.5$, а на территории Восточно-Европейской платформы — все события, начиная с $M = 1.5$ до расстояний порядка 400 км. Сейсмическая группа наилучшим образом отслеживает события с южного и юго-западного направлений.

Включение МСА в систему сейсмологических наблюдений на территории ВЕП снижает порог регистрации событий на единицу магнитудной шкалы по сравнению с одиночными станциями, входящими в состав классических сейсмологических сетей.

Таким образом, имеются определённые основания полагать, что малоапертурная сейсмическая антенна может быть эффективна и при решении геоэкологических задач, связанных с сильным техногенным сейсмоакустическим шумовым загрязнением на территориях городских агломераций, позволяя пространственно локализовывать длительно функционирующие источники интенсивных сейсмических воздействий, вследствие чего становится возможной дача рекомендаций к принятию соответствующих мер по снижению их негативного воздействия на качество жизни населения и объекты городской инфраструктуры.

В июне 2023 года сотрудниками Лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии ИФЗ РАН была предпринята попытка оценить эффективность работы трёхкомпонентных молекулярно-электронных сейсмических датчиков модели СМЕ-6111ND производства компании «R-Sensors» в качестве единой малоапертурной сейсмической группы, аналогичной МСА «Михнево» (рис. 5.4). Всего в состав группы вошло 8 датчиков, пространственное расположение которых отмечено на рисунке 5.1 горизонтальными синими линиями.



Рис. 5.4. Трёхкомпонентные сейсмометры СМЕ-6111ND: слева – установленный на постаменте ГФО «Михнево», справа – установленный в одной из периферических точек

Информация о значениях фонового сейсмического шума, полученная в результате данного эксперимента, оказалась весьма полезной для количественного сравнения с аналогичным параметром на территории города Москвы. На рисунке 5.5 представлены сигналы, зарегистрированные на геофизических постах КПЦ ИФЗ РАН и ГФО «Михнево».

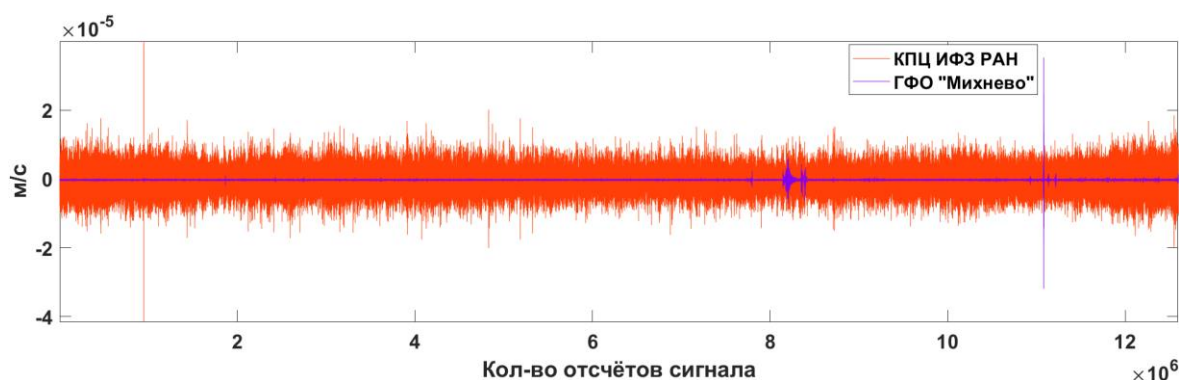


Рис. 5.5. Сигналы, зафиксированные на геофизических постах КПЦ ИФЗ РАН и ГФО «Михнево» в июне 2023 года

Крайне очевиден значительно более высокий уровень шума на территории пос. Мосрентген в сравнении с ГФО «Михнево» на всём интервале записи.

На рисунке 5.6 изображены спектры мощности рассматриваемых сигналов.

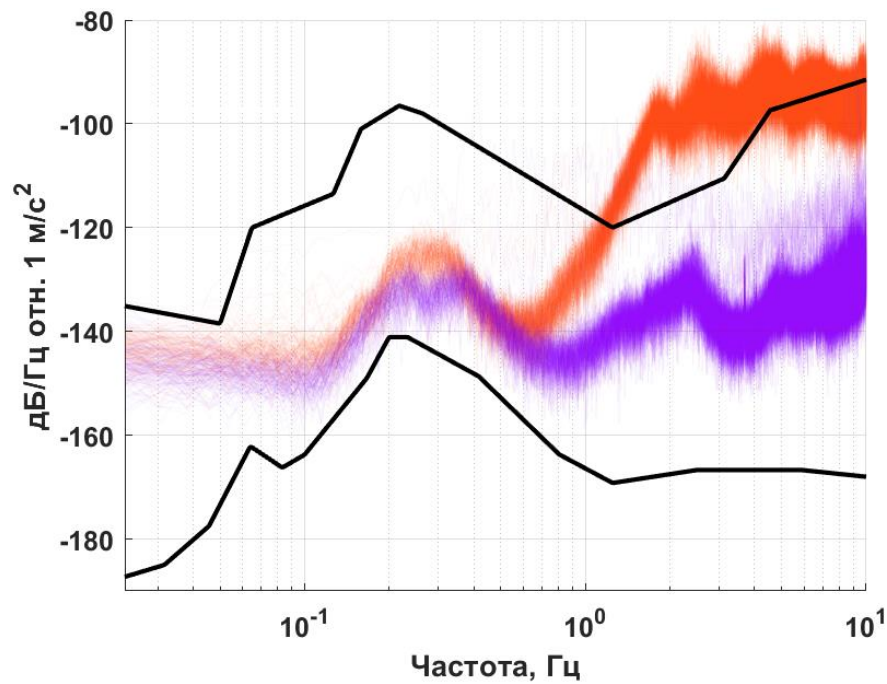


Рис. 5.6. Спектры мощности: оранжевый цвет – сигнала с постаментов КПЦ ИФЗ РАН, фиолетовый цвет – с постаментов ГФО «Михнево»

Очевиден высокий уровень высокочастотного техногенного сейсмического шума (более 1 Гц), источником которого является ежедневный интенсивный дорожный трафик на участке МКАД, расположенном в непосредственной близости от КПЦ, значительно превышающий уровень шума в аналогичном диапазоне частот, зафиксированный в ГФО «Михнево».

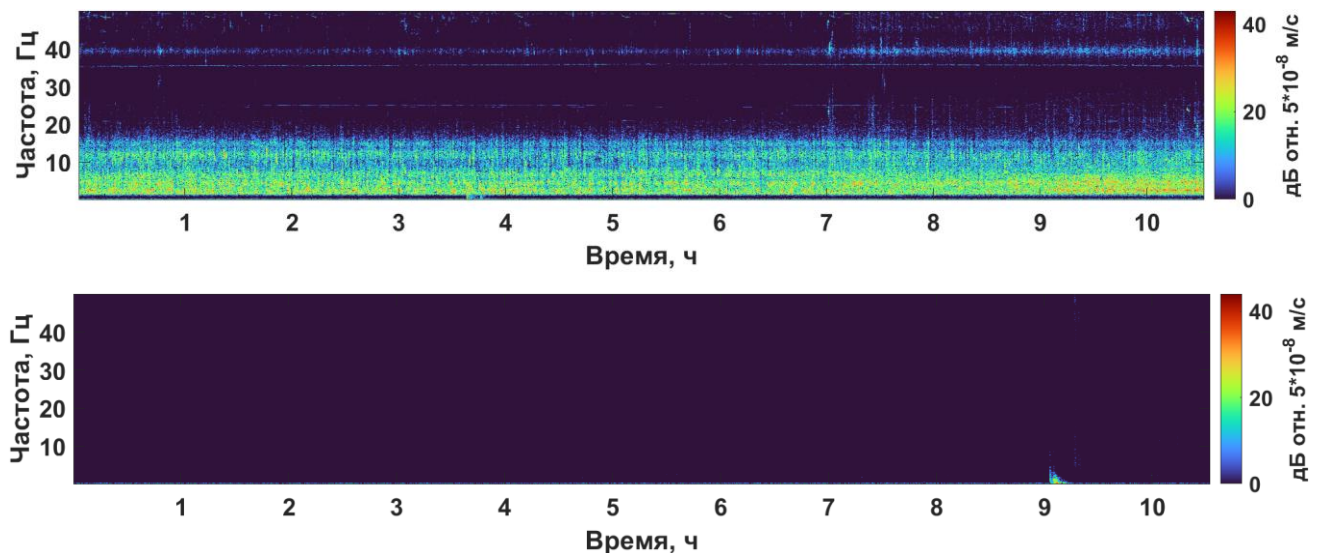


Рис. 5.7. Спектрограммы сигнала с постаментов КПЦ ИФЗ РАН (сверху) и с постаментов ГФО «Михнево» (снизу)

Как видно, картины различаются кардинально. Эквивалентные уровни вибрации в Мосрентгене и в Михнево составляют 40,9 и 31,7 дБ соответственно.

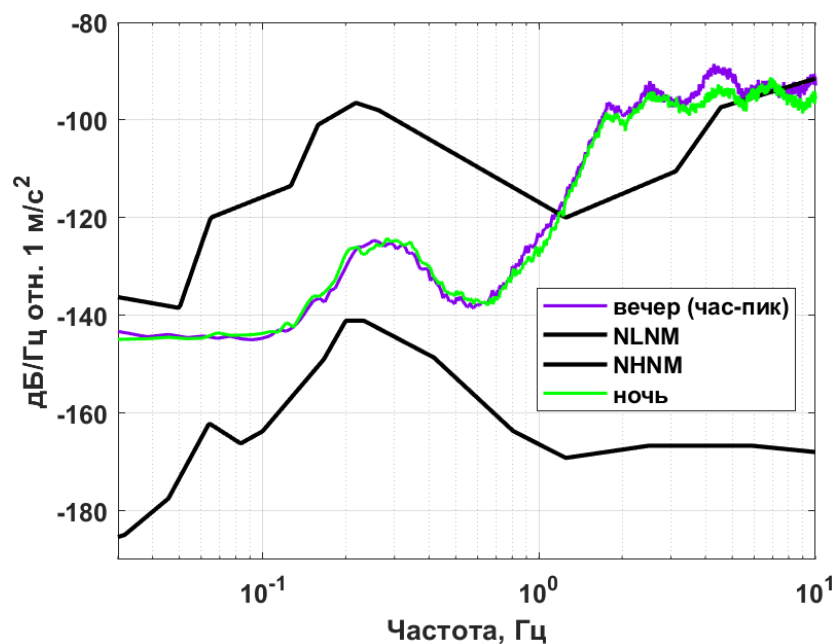


Рис. 5.8. Сравнение спектров сигнала с постамента КПЦ ИФЗ РАН в вечерний час-пик (19:00-21:00) и ночное время суток (01:00-03:00)

Как видно, значение шумового фона в вечернее время незначительно превышает аналогичный показатель в ночной период – примерно на 5 дБ.

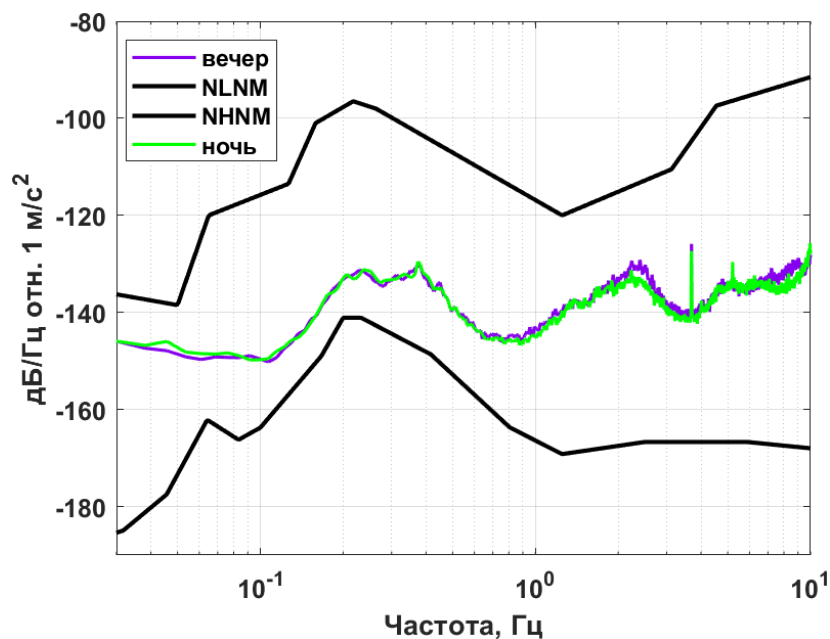


Рис. 5.9. Сравнение спектров записей на территории ГФО «Михнево» в вечернее и ночное время суток

Значения фонового сейсмического шума на территории ГФО «Михнево» практически неизменны в вечернее и ночное время во всём диапазоне частот. При этом наблюдается гармоника на частоте 3,7 Гц, вызванная работой устройств системы водоснабжения ГФО.

На рисунке 5.10 представлены вероятностные энергетические спектры сейсмического шума, зарегистрированного на поверхности и на постаменте в штольне ГФО «Михнево», расположенной на глубине 16,5 м.

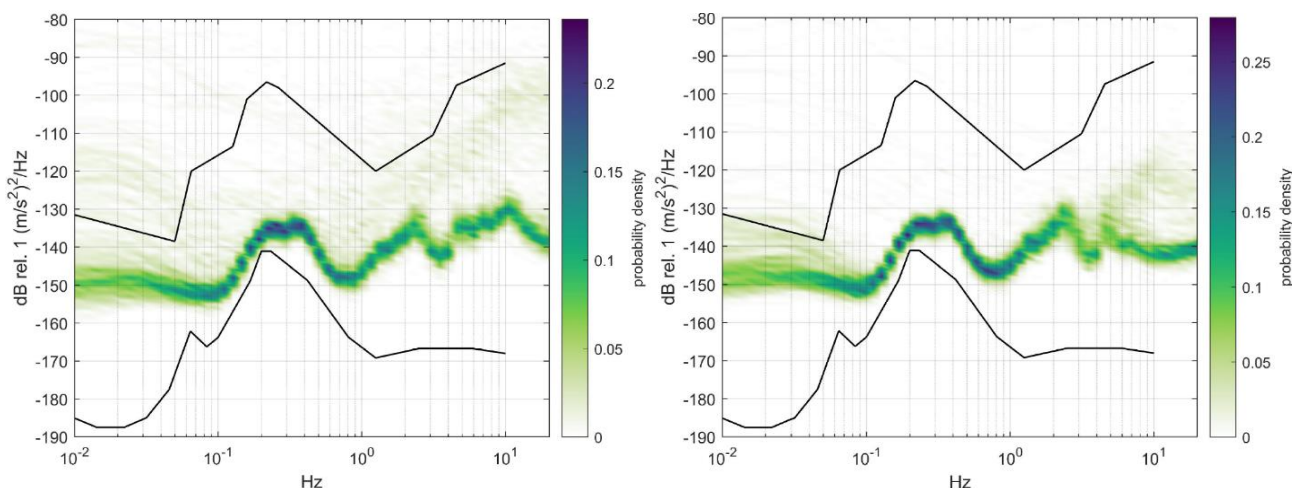


Рис. 5.10. Вероятностные энергетические спектры сейсмического шума, зарегистрированного на поверхности и на постаменте в штольне ГФО «Михнево», расположенной на глубине 16,5 м

В целом, на обоих графиках наблюдается практически идентичная картина, однако в спектре по поверхностным данным малые значения вероятности соответствуют повышенным значениям фонового микросейсмического шума, что, наиболее вероятно, связано с локальными метеорологическими условиями на поверхности, а также с функционированием инженерных коммуникационных систем и систем водоснабжения на территории ГФО.

На рисунке 5.11 представлены сейсмограммы землетрясения в районе г Севастополь, Республика Крым, произошедшего 22 июня 2023 года, записанные разными каналами МСА «Михнево» и сейсмической аппаратурой ИФЗ РАН, установленной по аналогии с МСА. Магнитуда события составляла 5,1, глубина гипоцентра – 10 км.

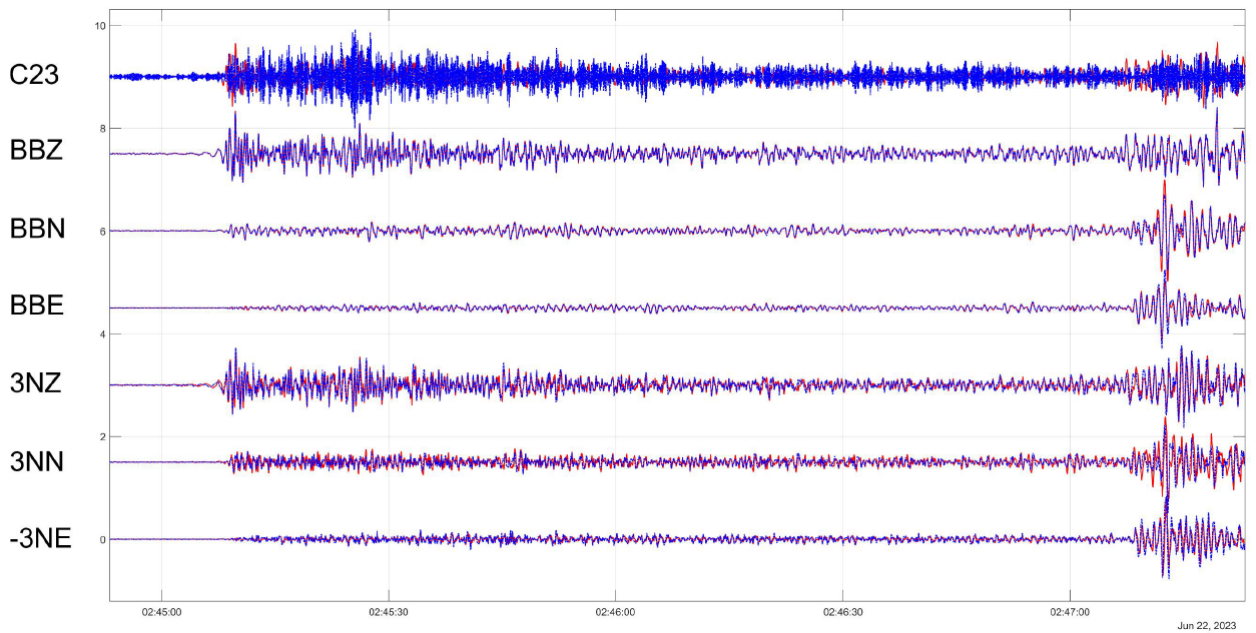


Рис. 5.11. Сейсмограммы землетрясения в районе г. Севастополь, Республика Крым, произошедшего 22.06.2023 в 02:42:26, записанного МСА «Михнево» (ИДГ РАН) и группой сейсмометров ИФЗ РАН

Красный цвет соответствует записям МСА «Михнево», синий – группе сейсмометров ИФЗ РАН. В целом, наблюдается неплохая корреляция волновых форм, зарегистрированных обоими измерительными комплексами, однако канал 3NN демонстрирует небольшое несоответствие поверхностноволновых фаз в конце записи. Также стоит отметить, что наблюдается довольно высокая зашумлённость данных с канала C23 группы ИФЗ РАН.

Таким образом, учитывая значительно более высокую чувствительность интерференционной системы к слабым сейсмическим событиям, а также способность определять азимут направления их прихода, мы полагаем, что рассматриваемый инструмент может применяться для решения геоэкологических проблем в условиях плотной городской застройки, для выявления и определения направления прихода сейсмических шумовых воздействий от различных техногенных источников.

Выводы к главе 5

Малоапертурная сейсмическая антенна «Михнево» предназначена для регистрации слабых локальных и региональных сейсмических событий,

магнитудой менее 3. Также данная система, благодаря фазовой задержке сигналов на её входах, позволяет определять азимут на источник события. Таким образом, есть основания полагать, что подобная система может быть эффективна как инструмент для выделения слабых воздействий в условиях высокого уровня фонового техногенного шума на территориях мегаполисов, позволяя при этом определять направление на источники таких событий. Проведено сравнение уровней шума на территории ГФО «Михнево» и посёлка Мосрентген. Шумовая картина различается кардинально – уровень фонового шума Михнево гораздо ниже, чем в Мосрентгене.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постоянный рост городов, непрерывное увеличение численности населения, развитие промышленной и транспортной инфраструктуры в настоящий момент являются неотъемлемой частью человеческой жизнедеятельности. В свою очередь, такая тенденция приводит к значительному увеличению уровня шумов, генерируемых различными источниками, негативно сказывающихся на здоровье и жизнедеятельности людей. В настоящее время большинство работ посвящены исследованию акустических шумов среднего и высокого частотных диапазонов. При этом крайне мало внимания уделяется сейсмоакустическим воздействиям, характерным для низких частот. В настоящей работе предложена методика оценки интенсивности низкочастотных сейсмоакустических шумов, а также закономерности их распределения на территории населённого пункта.

В настоящей работе проведён анализ литературных данных, который показал, что проблема влияния сейсмоакустических шумов, характерных для различных источников (транспорт, заводы и предприятия и т.д.), является весьма актуальной на сегодняшний день. В результате проведённого литературного анализа, в настоящей работе были описаны природа, классификация и история исследований микросейсмических шумов. Также в обзоре проанализированы работы, посвящённые происхождению сейсмических шумов, возникающих на территориях населённых пунктов. Проанализированы волновые формы и частотные составы изучаемых сейсмических колебаний. Также приведены примеры исследований микросейсмических шумов, проведённые зарубежными сейсмологами и геофизиками.

В рамках настоящей работы, по аналогии с методом микросейсмического зондирования, была разработана методика, позволяющая осуществлять непрерывный мониторинг вибрационного загрязнения современных мегаполисов, реализуемая при помощи одной сеймостанции. Аналогия с ММЗ заключается в определении отношения амплитудных спектров сигналов, зарегистрированных переносным датчиком в пикетах профилей исследуемой территории к

амплитудному спектру сигнала, регистрируемого на опорном пункте для того, чтобы понять, во сколько раз уровень шумов в различных участках населённого пункта превышает уровень сейсмических колебаний на базовой станции. Как говорилось ранее, рассматриваемый параметр позволяет определять уровень сейсмических воздействий в различных зонах исследуемой площади в произвольный момент времени.

Разработан программно-аппаратурный комплекс, позволяющий осуществлять накопление данных вибросейсмического и акустического шума и их последующую обработку. Для сбора натурных полевых данных использовался гео-гидроакустический измерительный буй на базе молекулярно-электронного преобразователя, подробное описание которого представлено в главе 4. Обработка и дальнейший анализ накопленных натурных данных осуществлялись в программном комплексе MATLAB.

Выполнены экстенсивные натурные измерения вибросейсмического и акустического шумовых полей на территории пос. Мосрентген, Новомосковского административного округа г. Москва. Проведён спектральный анализ измеренных шумовых полей. Установлено, что превышений допустимых значений вибрационного шума, установленных санитарными нормами, не наблюдается. Построены частотно зависимые карты значений вибросейсмического шума с целью изучения механизмов их формирования и пространственного распределения в пределах контролируемой территории, при этом выявить где-либо превышений допустимых норм также не удалось. При изучении пространственного распределения акустического шума, в ряде точек выявлены сильные превышения допустимых норм практически во всех нормируемых октавных диапазонах частот.

Проанализированы свойства стационарности рассчитываемых в ходе обработки экспериментальных данных спектральных коэффициентов относительной интенсивности вибросейсмического шума. Наибольшая стабильность характерна для коэффициентов в диапазоне от 3,9 до 15,8 Гц, что

позволяет осуществлять длительный мониторинг на опорной станции с малой погрешностью.

Проанализированы корреляционные свойства шумов в зависимости от расстояния. Установлено, что разработанная методики позволяет корректно осуществлять мониторинг шумового загрязнения в радиусе 3 км от базовой точки.

Приведена характеристика малоапертурной сейсмической антенны ИДГ РАН на территории геофизической обсерватории «Михнево». Предполагается, что такой инструмент, помимо классических сейсмологических наблюдений, может быть эффективен для мониторинга вибросейсмического шумового загрязнения на территории мегаполиса. Проведён небольшой сравнительный анализ шумовой обстановки в Мосрентгене и Михнево. Уровень фонового шума в Михнево гораздо ниже ввиду отсутствия интенсивных техногенных источников.

Проанализированы шумовые поля на территории жилплощади жительницы района Сокольники, г. Москва, после поступившего в Институт физики Земли обращения от её имени, в содержании которого сообщалось о сильных болезненных ощущениях и физическом недомогании вследствие регулярных длительных вибрационных воздействий. По результатам проведённых измерений выявлены неоднократные превышения допустимых нормативных значений вибрационного и акустического шумового фона, однако выявить источник и механизм его воздействия на жилой объект не удалось. Это обстоятельство приводит к мысли о сборе дополнительной информации о шумовой обстановке за периметром жилплощади – на разных этажах многоквартирного дома, а также за его пределами, на территории примыкающего к нему двора.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Разработанная методика позволяет выявлять потенциальные зоны экологического дискомфорта различных районов мегаполиса, на основании чего возможна дача рекомендаций соответствующим экологическим организациям к принятию мер по снижению влияния физико-экологических факторов на качество жизни населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bonnefoy-Claudet S., C. Fabrice, Y.-B. Pierre. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies / S. Bonnefoy-Claudet, C. Fabrice, Pierre Y.-B. // *Earth-Science Reviews*. – 2006. – P. 205-227.
2. Bour M., Fouissac D., Dominique P., Martin C. On the use of microtremor recordings in seismic microzonation / M Bour, D. Fouissac, P. Dominique, C. Martin // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 1998. – P. 465-474.
3. Bonnefoy-Claudet S., Cornou C., Bard P., Cotton F., Moczo P., Kristek J., Fäh D. H/V ratio : a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations / S. Bonnefoy-Claudet, C. Cornou, P. Bard, F. Cotton, P. Moczo, J. Kristek, D. Fäh // *Geophysical Journal International*. – 2006 – P. 827-837.
4. Дягилев Р. А., Д. А. Маловичко. Микросейсмическое районирование / Р. А. Дягилев, Д. А. Маловичко. – Перм. гос. ун-т, 2007. – 120 С.
5. Заалишвили В. Б. Некоторые проблемы практической реализации сейсмического микрорайонирования. Факторы, формирующие интенсивность землетрясения / В. Б. Заалишвили // *Геология и геофизика Юга России*. – 2014. – № 3. С. 3-39.
6. Заалишвили В. Б., Рогожин Е. А. Оценка сейсмической опасности территории на основе современных методов инженерной сейсмологии / В. Б. Заалишвили, Е. А. Рогожин // *Экологический вестник научных центров ЧЭС*. – 2012. – № 1. – С. 70-90.
7. Жигалин А. Д., Николаев А. В., Попова О. Г. Природно-техногенная сейсмичность московского региона / А. Д. Жигалин, А. В. Николаев, О. Г. Попова // *Региональные риски чрезвычайных ситуаций и управление природной и техногенной безопасностью муниципальных образований*. – 2004. – С. 365-369.
8. Осипов В. И. Урбанизация и природные опасности. Задачи, которые необходимо решать / В. И. Осипов // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. – 2007. – № 1. – С. 3-9.

9. Адушкин В. В., Овчинников В. М., Санина И. А., Ризниченко О. Ю. «Михнево»: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории / В. В. Адушкин, В. М. Овчинников, И. А. Санина, О. Ю. Ризниченко // Физика Земли. – 2016. – № 1. – С. 108-119.
10. Горбатилов А. В., Степанова М. Ю., Кораблёв Г. Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм / А. В. Горбатилов, М. Ю. Степанова, Г. Е. Кораблёв // Физика Земли/2008. – № 7. – С. 66-84.
11. Цуканов А. А., Горбатилов А. В. Метод микросейсмического зондирования: влияние аномальных значений коэффициента Пуассона и оценка величины нелинейных искажений / А. А. Цуканов, А. В. Горбатилов // Физика Земли. – 2015. – № 4. – С. 94-102.
12. Машина И. Р., Корямжина Ю. А., Сычкина Е. Н. Влияние транспортной вибрации на здания и сооружения / И. Р. Машина, Ю. А. Корямжина, Е. Н. Сычкина // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии. – 2015. – № 4. – С. 1-4.
13. Любушин А. А. Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные диагностические признаки / А. А. Любушин // Физика Земли. – 2008. – № 4. – С. 17-34.
14. Балькин В. М. Элементы воздействия транспорта на здания и сооружения. Их защита от транспортного шума и вибраций / В.М. Балькин // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2013. – № 3 (11). – С. 44-45.
15. Пятунин М. С., Наумов С. Б. Измерения уровня микросейсмических шумов на территории Приморского края / М. С. Пятунин, С. Б. Наумов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. – 2015. – С. 273-276.

16. Андреева П. И., Шаблинский Г. Э. Изучение влияния прохождения железнодорожного транспорта на вибрации расположенного вблизи здания КБ «Вертолёты России» / П. И. Андреева, Г. Э. Шаблинский // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 1. – С. 53-58.
17. Беляков А. С., Лавров В. С., Николаев А. В. О волновых формах микросейсмического шума / А. С. Беляков, В. С. Лавров, А. В. Николаев // Технологии сейсморазведки. – 2008. – № 2. – С. 55-57.
18. Жостков Р. А., Преснов Д. А., Собисевич А. Л. Развитие метода микросейсмического зондирования / Р. А. Жостков, Д. А. Преснов, А. Л. Собисевич // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2015. – № 2. – С. 11-19.
19. Liptai P., Moravec M., Zbojovský J. Using of sound visualization techniques for identification and analysis of vehicle noise sources / P. Liptai, M. Moravec, J. Zbojovský // Technical sciences and technologies. – 2017. – № 2(8). – P. 129-134.
20. Салтыков В. А., Кугаенко Ю. А., Синицын В. И., Чебров В. Н. Мониторинг параметров высокочастотного сейсмического шума в рамках проблемы прогноза землетрясений / В. А. Салтыков, Ю. А. Кугаенко, В. И. Синицын, В. Н. Чебров // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. – 2006. – С. 122-125.
21. Башилов И. П. Аппаратура для геоэкологических исследований, мониторинга инженерных сооружений и среды обитания по обеспечению безопасности / И. П. Башилов // Научное приборостроение. – 2001. – № 3. – С. 92-99.
22. Золотухин Е. П., Кузьменко А. П., Нескородев В. Д., Комаров А. В., Сабуров В. С., Короленко Д. Б. Структура базового программно-технического комплекса системы сейсмометрического мониторинга технического состояния зданий и сооружений / Е. П. Золотухин, А. П. Кузьменко, В. Д. Нескородев, А. В. Комаров, В. С. Сабуров, Д. Б. Короленко // Сейсмические приборы. – 2017. – № 2. – С. 23-36.

23. Невский М. В., Чулков А. Б., Уломов И. В., Лавров В. С., Волосов С. Г., Межберг В. Г., Беляков А. С., Ерёменко О. А. Исследование короткопериодных микросейсмических шумов в глубокой скважине в мегаполисе г. Москвы / М. В. Невский, А. Б. Чулков, И. В. Уломов, В. С. Лавров, С. Г. Волосов, В. Г. Межберг, А. С. Беляков, О. А. Ерёменко // Сейсмические приборы. – 2002. – № 37. – С. 62-73.

24. Любушин А. А. Карты свойств низкочастотных микросейсм для оценки сейсмической опасности / А. А. Любушин // Физика Земли. – 2013. – № 1. – С. 11-20.

25. Беляков А. С., Лавров В. С., Николаев А. В., Худзинский Л. Л. Подземный шум большого города / А. С. Беляков, В. С. Лавров, А. В. Николаев, Л. Л. Худзинский // Сейсмические приборы. – 2003. – № 39. – С. 76-83.

26. Любушин А. А., Копылова Г. Н., Касимова В. А., Таранова Л. Н. О свойствах поля низкочастотных шумов, зарегистрированных на Камчатской сети широкополосных сейсмических станций / А. А. Любушин, Г. Н. Копылова, В. А. Касимова, Л. Н. Таранова // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2015. – № 26. – С. 20-36.

27. Касимова В. А., Копылова Г. Н. Спектральная структура низкочастотного сейсмического шума на широкополосных станциях Камчатки / В. А. Касимова, Г. Н. Копылова // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Четвёртой научно-техн. конф. Обнинск: ГС РАН. – 2013. – С. 64-68.

28. Зинкин В. Н., Солдатов С. К., Богомолов А. В., Драган С. П. Актуальные проблемы защиты населения от низкочастотного шума и инфразвука / В. Н. Зинкин, С. К. Солдатов, А. В. Богомолов, С. П. Драган // Технологии гражданской безопасности. – 2015. – № 1(43). – С. 90-96.

29. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Рябов А. В., Першин А. В., Бёзингер Т., Чжоу К. Исследование вариаций параметров широкополосного спектрального максимума в естественных шумовых полях крайне низкочастотного диапазона / Е.

Н. Ермакова, Д. С. Котик, А. В. Рябов, А. В. Першин, Т. Бёзингер, К. Чжоу // Известия вузов. Радиофизика. – 2012, № 10 – 11. – С. 671-682.

30. Зинкин В. Н., Богомолов А. В., Драган С. П., Ахметзянов И. М. Кумулятивные медико-экологические эффекты сочетанного действия шума и инфразвука / В. Н. Зинкин, А. В. Богомолов, С. П. Драган, И. М. Ахметзянов // Экология и промышленность. – 2012. – № 3. – С. 46-49.

31. Уразов А. К. Производственный шум на предприятиях железнодорожного транспорта / А. К. Уразов // Экология России: на пути к инновациям. – 2013. – № 7. – С. 116-119.

32. Монахов Ф. И. Низкочастотный сейсмический шум Земли / Ф. И. Монахов. М.: Наука. – 1997. – 94 С.

33. Горбатиков А. В., Степанова М. Ю., Камшилин А. Н. Специфика применения метода микросейсмического зондирования в инженерных задачах / А. В. Горбатиков, М. Ю. Степанова, А. Н. Камшилин // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2008. – № 2. – С. 25-30.

34. Собисевич А. Л., Преснов Д. А., Агафонов В. М., Собисевич Л. Е. Вмораживаемый автономный гео-гидроакустический буй нового поколения / А. Л. Собисевич, Д. А. Преснов, В. М. Агафонов, Л. Е. Собисевич // Наука и технологические разработки. – 2018. – № 1. – С. 25-34.

35. Азаров А. В., Сердюков А. С., Никитин А. А. Численное моделирование микросейсмического шума в блочно-иерархических неоднородных средах / А. В. Азаров, А. С. Сердюков, А. А. Никитин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 9. – С. 328-335.

36. Надежка Л. И., Семёнов А. Е., Евсеев А. В., Сизаск И. А. О суточных вариациях микросейсмического шума на территории Воронежского кристаллического массива / Л. И. Надежка, А. Е. Семёнов, А. В. Евсеев, И. А. Сизаск // XIV Уральская молодёжная научная школа по геофизике. – 2013. – С. 233-236.

37. Longuet-Higgins M. S. A theory of the origin of microseisms / M. S. Longuet-Higgins // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1950, Vol. 243, № 857. – P. 1-35.
38. Díaz J., Ruiz M., Pilar S., Pastor S., Romero P. Urban Seismology: on the origin of earth vibrations within a city / J. Díaz, M. Ruiz, S. Pilar., S. Pastor, P. Romero // Scientific reports. – 2017. – Т. 7, №. 1. – С. 1-11.
39. Lecocq T. et al. Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures / T. Lecocq et al. // Science. – 2020. – Т. 369, №. 6509. – С. 1338-1343.
40. Шутова О. А., Пономарёв А. Б. Численное моделирование вибрационного воздействия автотранспорта на фундаменты зданий / О. А. Шутова, А. Б. Пономарёв // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – № 1. – С. 93-102.
41. Longuet-Higgins M. S., Ursell F. Sea waves and microseisms / M. S. Longuet-Higgins, F. Ursell // Nature. – 1948. – Т. 162, №. 4122. – С. 700-700.
42. Агафонов В.М., Авдюхина С.Ю., Егоров Е.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е. Патент РФ № 2650839 // Б. И. 2018. № 11.
43. Патент 2650839. Российская Федерация, МПК G01V1/16. Низкочастотный векторный акустический приёмник: № 2016149288: заявл. 15.12.2016: опубл. 17.04.2018 / В. М. Агафонов, С. Ю. Авдюхина, Е. В. Егоров, А. Л. Собисевич, Л. Е. Собисевич – 13 С.
44. Агафонов В. М., Егоров И. В., Шабалина А. С. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью / В. М. Агафонов, И. В. Егоров, А. С. Шабалина // Сейсмические приборы. – 2013. – Т. 49, № 1. – С. 5-18.
45. Горбенко В. И., Жостков Р. А., Лиходеев Д. В., Преснов Д. А., Собисевич А. Л. Вопросы применимости молекулярно-электронных сейсмоприемников в пассивной сейсморазведке на примере изучения глубинного строения Калужской кольцевой структуры по данным анализа поверхностных

волн / В. И. Горбенко, Р. А. Жостков, Д. В. Лиходеев, Д. А. Преснов, А. Л. Собисевич // Сейсмические приборы. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 5-19.

46. Антонов А. Н., Авдюхина С. Ю., Егоров И. В., Жостков Р. А., Лиходеев Д. В., Преснов Д. А., Шабалина А. С. Широкополосная сейсмическая станция для сейсморазведки на морском дне и в транзитной зоне на основе молекулярно-электронных датчиков / А. Н. Антонов, С. Ю. Авдюхина, И. В. Егоров, Р. А. Жостков, Д. В. Лиходеев, Д. А. Преснов, А. С. Шабалина // Материалы научно-практической конференции “Сейсмические технологии-2017”. – 2017. – С. 64-67.

47. Преснов Д. А., Жостков Р. А., Собисевич А. Л., Шуруп А. С. Натурные наблюдения сейсмоакустических волн в условиях покрытого льдом водоема / Д. А. Преснов, Р. А. Жостков, А. Л. Собисевич, А. С. Шуруп // Изв. РАН. Сер. Физ. – 2017. – Т. 81, № 1. – С. 76-80.

48. Agafonov V. M., Neeshpapa A. V., Shabalina A. S., Electrochemical Seismometers of Linear and Angular Motion / V. M. Agafonov, A. V. Neeshpapa, A. S. Shabalina // Encyclopedia of Earthquake Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2015. – DOI: 10.1007/978-3-642-36197-5_403-1. – 19 P.

49. Ведерников Г. В. Методы пассивной сейсморазведки / Г. В. Ведерников // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2013. – Т. 44, №. 2. – С. 30-36.

50. Горбенко В. И., Жостков Р. А., Лиходеев Д. В., Преснов Д. А., Собисевич А. Л. Вопросы применимости молекулярно-электронных сейсмоприемников в пассивной сейсморазведке на примере изучения глубинного строения Калужской кольцевой структуры по данным анализа поверхностных волн / В. И. Горбенко, Р. А. Жостков, Д. В. Лиходеев, Д. А. Преснов, А. Л. Собисевич // Сейсмические приборы. – 2016. – Т. 52, №. 3. – С. 5-19.

51. Broner N. The effects of low frequency noise on people—a review / N. Broner // Journal of Sound and Vibration. – 1978. – Т. 58, №. 4. – P. 483-500.

52. Berglund B., Hassmen P., Job R. F. S. Sources and effects of low-frequency noise / B. Berglund, P. Hassmen, R. F. S. Job // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1996. – T. 99, №. 5. – P. 2985-3002.
53. Broadbent D. E. Effects of noises of high and low frequency on behavior / D. E. Broadbent // Ergonomics. – 1957. – T. 1, №. 1. – P. 21-29.
54. Beben D., Anigacz W., Bobra P. Evaluation of the traffic impact on residential building / D. Beben, W. Anigacz, P. Bobra // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences. – 2017. – T. 107. – P. 00063.
55. Garg N., Sharma O. Investigations on transportation induced ground vibrations / N. Garg, O. Sharma // Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA. – 2010. – P. 23-27.
56. Crispino M., D'apuzzo M. Measurement and prediction of traffic-induced vibrations in a heritage building / M. Crispino, M. D'apuzzo // Journal of Sound and Vibration. – 2001. – T. 246. – №. 2. – P. 319-335.
57. Xia H., Chen J., Xia C., De Roeck G., Degrande G. Experimental investigation of railway train-induced vibrations of surrounding ground and a nearby multi-story building / H. Xia, J. Chen, C. Xia, G. De Roeck, G. Degrande // Earthquake engineering and engineering vibration. – 2009. – T. 8. – №. 1. – P. 137-148.
58. Yokoyama H., Ashiya K., Iwata N. Ground Vibration Characteristics Induced at High-Speed by Shinkansen and Evaluation Method for Speed Dependency / H. Yokoyama, K. Ashiya, N. Iwata // Quarterly Report of RTRI. – 2006. – T. 47. – №. 3. – P. 156-161.
59. Hunaidi O. Traffic vibrations in buildings / O. Hunaidi. – Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada. – 2000.
60. Krylov V. V. Attenuation of low frequency ground vibrations by means of resonant scattering of rayleigh waves on heavy masses / V. V. Krylov. – 2006.
61. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Санитарные нормы. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.

62. СН 2.2.4/2.1.8.583-96. Санитарные нормы. Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки.
63. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Санитарные нормы. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
64. Трофимов В. Т., Барабошкина Т. А., Харькина М. А., Жигалин А. Д. Эволюция термина «геоэкология» в геологии / В. Т. Трофимов, Т. А. Барабошкина, М. А. Харькина, А. Д. Жигалин // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2017. – Т. 92. – №. 3. – С. 3-11.
65. Жигалин А. Д., Николаев А. В. Электромагнитное воздействие на ионосферу: геофизический и геоэкологический аспекты / А. Д. Жигалин, А. В. Николаев // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2010. – №. 4. – С. 367-373.
66. Жигалин А. Д., Николаев А. В. Особенности сейсмичности Восточно-Европейской платформы / А. Д. Жигалин, А. В. Николаев // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2012. – №. 5. – С. 449-454.
67. Голубев Г. Н. Геоэкология / Г. Н. Голубев. – М: ГЕОС, 1999. – 338 с.
68. Горшков С. П. Концептуальные основы геоэкологии / С. П. Горшков. – М.: Желдориздат. – 2001. – 592 с.
69. Горшков С. П. Наука геоэкология – одна или несколько? / С. П. Горшков // Мат-лы Всерос. науч. конф. «Инновации в геоэкологии: теория, практика, образование». – М.: Изд-во Моск. Ун-та. – 2010. – С. 11 – 15.
70. Клубов С. В., Прозоров Л. Л. Геоэкология: история, понятия, современное состояние / С. В. Клубов, Л. Л. Прозоров. – М.: ВНИИ «Зарубежгеология: департамент геоэкологии». – 1993. – 162 с.
71. Кофф Г. Л. Геоэкология и экологическая ориентация традиционных наук геологического цикла / Г. Л. Кофф // Инженерная геология сегодня и завтра. Тр. Междунар. конф. 5 – 7 февраля 1996 г. – М.: Изд-во Моск. ун-та. – 1996. – С. 131 – 132.

72. Осипов В. И. Геоэкология: понятие, задачи, приоритеты / В. И. Осипов // Инженерная геология сегодня и завтра. Тр. Междунар. конф. 5 -7 февраля 1996 г. – М.: Изд-во Моск. ун-та. – 1996. – С. 188 -120.
73. Петров К. М. Геоэкология / К. М. Петров. – Основы природопользования. – СПб.: Изд-во СПбГУ. – 1994.
74. Сычёв К. И. Научное содержание и основы направления геоэкологии / К. И. Сычёв // Разведка и охрана недр. – 1991. – № 11. – С. 2 - 6.
75. Осипов В. И. Геоэкология – междисциплинарная наука об экологических проблемах геосфер / В. И. Осипов // Геоэкология. – 1993. – № 1. – С. 4 – 18.
76. Косинова И. И. Геоэкология в разделе естественных наук / И. И. Косинова // Экология, нравственность, здоровье. – Воронеж: Российская экологическая академия. – 1996. – С. 80.
77. Горшков С. П. Геоэкология – новый уровень междисциплинарной интеграции / С. П. Горшков // Вестник Московского ун-та, Серия География. – 1997. – №. 3.
78. Krylov V. V. Generation of low-frequency Rayleigh waves by heavy lorries / V. V. Krylov // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. – 1995. – Т. 14. – №. 4. – P. 165-172.
79. Карлович И. А. Геоэкология. / И. А. Карлович. – М.: Академический проект: Альма-матер. – 2005. – 512 С.
80. Сунгатуллин Р. Х. Экологическая геология и устойчивое развитие промышленно-урбанизированных регионов / Р. Х. Сунгатуллин. Учебное пособие – Казань: Казанский университет. – 2012. – 220 С.
81. Krylov V. V. Computation of ground vibrations generated by accelerating and braking road vehicles / V. V. Krylov // Journal of Vibration and Control. – 1996. – Т. 2. – №. 3. – P. 299-321.
82. Krylov V. V. Comparison of two main mechanisms of generating ground vibrations by road vehicles / V. V. Krylov // Proc. IOA. – 1995. – 17 (4). – P. 75-82.

83. Krylov V. V. Generation of ground elastic waves by road vehicles / V. V. Krylov // *Journal of Computational Acoustics*. – 2001. – Т. 9. – №. 03. – P. 919-933.
84. Krylov V. V. Spectra of low-frequency ground vibrations generated by high-speed trains on layered ground / V. V. Krylov // *Journal of low frequency noise, vibration and active control*. – 1997. – Т. 16. – №. 4. – P. 257-270.
85. Камышов С. С. Исследование акустических сигналов, излучаемых автомобильным транспортом / С. С. Камышов // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. – 2011. – Т. 116. – №. 3. – С. 187-194.
86. Хохлов В. К., Молчанов С. А., Константинов Н. А. Выбор информативных признаков акустических сигналов вертолета и самолета в адаптивных автономных информационных системах распознавания / В. К. Хохлов, С. А. Молчанов, Н. А. Константинов // *Машиностроение и компьютерные технологии*. – 2017. – №. 5. – С. 140-159.
87. Шатров М. Г., Яковенко А. Л., Кричевская Т. Ю. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания / М. Г. Шатров, А. Л. Яковенко, Т. Ю. Кричевская. – М.: МАДИ. – 2014. – 68 С.
88. Gutowski T. G., Dym C. L. Propagation of ground vibration: a review / T. G. Gutowski, C. L. Dym // *Journal of Sound and Vibration*. – 1976. – Т. 49. – №. 2. – P. 179-193.
89. Mennitt D., Johnson M. Multiple-array passive acoustic source localization in urban environments / D. Mennitt, M. Johnson // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2010. – Т. 127. – №. 5. – P. 2932-2942.
90. Aljaafreh A. F. Collaborative classification of multiple ground vehicles in wireless sensor networks based on acoustic signals / A. F. Aljaafre // *Western Michigan University*. – 2010.
91. Astapov S., Riid A. A multistage procedure of mobile vehicle acoustic identification for single-sensor embedded device / S. Astapov, A. Riid // *International Journal of Electronics and Telecommunications*. – 2015. – Т. 59. – №. 2. – P. 151-160.

92. Schclar A., Averbuch A., Rabin N., Zheludev V., Hochman K. A diffusion framework for detection of moving vehicles / A. Schclar, A. Averbuch, N. Rabin, V. Zheludev, K. Hochman // *Digital Signal Processing*. – 2010. – T. 20. – №. 1. – P. 111-122.
93. Bhawe N., Rao P. Vehicle engine sound analysis applied to traffic congestion estimation / N. Bhawe, P. Rao // *Proc. of International Symposium on CMMR and FRSM2011*. – 2011.
94. Bikdash M., Kozhisseri S., Tettey D. Features for the classification of civilian vehicles from acoustic data / M. Bikdash, S. Kozhisseri, D. Tettey // *US Army RDECOM under contract W911QX-07-C-0062*. – 2008.
95. Brown C. L., Reed S. E., Dietz M. S., Fristrup K. M. Detection and classification of motor vehicle noise in a forested landscape / C. L. Brown, S. E. Reed, M. S. Dietz, K. M. Fristrup // *Environmental management*. – 2013. – T. 52. – №. 5. – P. 1262-1270.
96. Clouteau D., Degrande G., Lombaert G. Numerical modelling of traffic induced vibrations / D. Clouteau, G. Degrande, G. Lombaert // *Meccanica*. – 2001. – T. 36. – №. 4. – P. 401-420.
97. Daigavane P. M., Bajaj P. R., Daigavane M. B. Vehicle detection and neural network application for vehicle classification / P. M. Daigavane, P. R. Bajaj, M. B. Daigavane // *2011 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*. – IEEE. – 2011. – P. 758-762.
98. Dalir A., Beheshti A. A., Masoom M. H. Classification of vehicles based on audio signals using quadratic discriminant analysis and high energy feature vectors / A. Dalir, A. A. Beheshti, M. H. Masoom // *arXiv preprint arXiv:1804.01212*. – 2018.
99. Evans N. Automated vehicle detection and classification using acoustic and seismic signals : дис. – University of York, 2010.
100. George J., Cyril A., Koshy B. I., Mary L. Exploring sound signature for vehicle detection and classification using ANN / J. George, A. Cyril, B. Koshy I., L. Mary // *International Journal on Soft Computing*. – 2013. – T. 4. – №. 2. – P. 29.

101. George J., Mary L., Riyas K. S. Vehicle detection and classification from acoustic signal using ANN and KNN / J. George, L. Mary, K. S. Riyas // 2013 international conference on control communication and computing (ICCC). – IEEE, 2013. – P. 436-439.
102. Ghosh R., Akula A., Kumar S., Sardana H. K. Time–frequency analysis based robust vehicle detection using seismic sensor / R. Ghosh, A. Akula, S. Kumar, H. K. Sardana // Journal of Sound and Vibration. – 2015. – T. 346. – P. 424-434.
103. Guo B., Nixon M. S., Damarla T. R. Acoustic information fusion for ground vehicle classification / B. Guo, M. S. Nixon, T. R. Damarla // 2008 11th international conference on information fusion. – IEEE, 2008. – P. 1-7.
104. Hanazato T., Ugai K., Mori M., Sakaguchi R. Three-dimensional analysis of traffic-induced ground vibrations / T. Hanazato, K. Ugai, M. Mori, R. Sakaguchi // Journal of geotechnical engineering. – 1991. – T. 117. – №. 8. – P. 1133-1151.
105. Haschke G., Stanfield R. Modeling ground vehicle acoustic signatures for analysis and synthesis / G. Haschke, R. Stanfield // Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States). – 1995. – №. SAND-95-1012C; CONF-950787-19.
106. Göksu H. Engine speed–independent acoustic signature for vehicles / H. Göksu // Measurement and Control. – 2018. – T. 51. – №. 3-4. – P. 94-103.
107. Kakar V. K., Kandpal M. Techniques of acoustic feature extraction for detection and classification of ground vehicles / V. K. Kakar, M. Kandpal // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2013. – T. 3. – №. 2. – P. 419-426.
108. Kandpal M., Kakar V. K., Verma G. Classification of ground vehicles using acoustic signal processing and neural network classifier / M. Kandpal, V. K. Kakar, G. Verma // 2013 international conference on signal processing and communication (ICSC). – IEEE, 2013. – P. 512-518.
109. Ketcham S. A., Moran M. L., Lacombe J. Seismic waves from light trucks moving over terrain / S. A. Ketcham, M. L. Moran, J. Lacombe // 2004 Users Group Conference (DOD_UGC'04). – IEEE, 2004. – P. 65-70.

110. Klausner A., Erb S., Tengg A., Rinner B. DSP based acoustic vehicle classification for multi-sensor real-time traffic surveillance / A. Klausner, S. Erb, A. Tengg, B. Rinner // 2007 15th European Signal Processing Conference. – IEEE, 2007. – P. 1916-1920.

111. Kongrattanaprasert W., Nomura H., Kamakura T., Ueda K., Tanizaki T., Usami J. Discrimination of Winter and Summer Tires Using Road Surface Vibration Caused by Passing Vehicles / W. Kongrattanaprasert, H. Nomura, T. Kamakura, K. Ueda, T. Tanizaki, J. Usami // Procedia-Social and Behavioral Sciences. – 2013. – T. 88. – P. 258-264.

112. Kouroussis G., Alexandrou G., Dolimont A., Verlinden O. Investigating the effect of wheel flat on railway traffic vibration using a numerical model / G. Kouroussis, G. Alexandrou, A. Dolimont, O. Verlinden // 21st International Congress on Sound and Vibration, Beijing, China. – 2014. – P. 1-8.

113. Lombaert G., Degrande G., Clouteau D. Numerical modelling of free field traffic-induced vibrations / G. Lombaert, G. Degrande, D. Clouteau // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2000. – T. 19. – №. 7. – P. 473-488.

114. Спивак А. А., Локтев, Д. Н., Рыбнов Ю. С., Соловьев С. П., Харламов В. А. Геофизические поля мегаполиса / А. А. Спивак, Д. Н. Локтев, Ю. С. Рыбнов, С. П. Соловьев, Харламов В. А. // Геофизические процессы и биосфера. – 2016. – Т. 15. – №. 2. – С. 39-54.

115. Mhanna M., Sadek M., Shahrour I. Study of traffic induced ground vibrations using a combined finite difference model / M. Mhanna, M. Sadek, I. Shahrour // CFM 2011-20ème Congrès Français de Mécanique. – AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie. – 2011.

116. Moran M. L., Greenfield R. J. Estimation of the acoustic-to-seismic coupling ratio using a moving vehicle source / M. L. Moran, R. J. Greenfield // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 2008. – Т. 46. – №. 7. – P. 2038-2043.

117. Moukas P., Simson J., Norton-Wayne L. Automatic identification of noise pollution sources / P. Moukas, J. Simson, L. Norton-Wayne // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1982. – T. 12. – №. 5. – P. 622-634.

118. Necioglu B. F., Christou T. C., George E. B., Jacyna G. M. Vehicle acoustic classification in netted sensor systems using Gaussian mixture models / B. F. Necioglu, T. C. Christou, E. B. George, G. M. Jacyna // Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XIV. – International Society for Optics and Photonics. – 2005. – T. 5809. – P. 409-419.

119. Sabatier J. M., Ekimov A. E. Detection of Humans and Light Vehicles Using Acoustic-to-Seismic Coupling / J. M. Sabatier, A. E. Ekimov. – MISSISSIPPI UNIV UNIVERSITY. – 2009.

120. Succi G. P., Prado G., Gampert R., Pedersen T. K., Dhaliwal H. Problems in seismic detection and tracking / G. P. Succi, G. Prado, R. Gampert, T. K. Pedersen, H. Dhaliwal // Unattended Ground Sensor Technologies and Applications II. – International Society for Optics and Photonics. – 2000. – T. 4040. – P. 165-173.

121. Wang H., Quan W., Wang Y., Miller G. R. Dual roadside seismic sensor for moving road vehicle detection and characterization / H. Wang, W. Quan, Y. Wang, G. R. Miller // Sensors. – 2014. – T. 14. – №. 2. – P. 2892-2910.

122. Albert D. G. The effect of snow on vehicle-generated seismic signatures / D. G. Albert // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1987. – T. 81. – №. 4. – P. 881-887.

123. Krylov V. V. Ground vibrations from accelerating and braking road vehicles / Krylov V. V. – 1995.

124. McNamara D, Buland R. P. Ambient noise levels in the continental United States / D. McNamara, R. P. Buland // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2004. – T. 94. – №. 4. – C. 1517-1527.