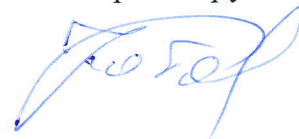


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики  
Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

На правах рукописи



КОТОВ Андрей Николаевич

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

Специальность 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных  
ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук

Собисевич А.Л.

Москва - 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОНИТОРИНГА АКУСТИЧЕСКОГО И ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ .....	12
1.1. Описание природы микросейсмического шума .....	12
1.2. Использование информации о микросейсмических воздействиях для решения некоторых прикладных задач.....	15
1.3. Причины возникновения вибрационных шумов мегаполиса .....	17
1.4. Примеры численного моделирования микросейсмического шума.....	23
1.5. Воздействие транспортных шумов .....	30
1.6. Защита строительных сооружений от вибрационных и акустических шумов .....	36
1.7. Геоэкология.....	38
Выводы к главе 1 .....	43
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НОВОГО ПОДХОДА К МОНИТОРИНГУ ВИБРОМИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НАСЕЛЁННОГО ПУНКТА .....	45
2.1. Метод микросейсмического зондирования .....	45
2.2. Сейсмическое микрорайонирование. ....	49
2.3. Теоретическое описание предлагаемой в работе методики мониторинга вибромикросейсмического загрязнения мегаполиса и опробование ММЗ в ледовых условиях оз. Байкал и .....	53
Выводы к главе 2.....	57

3. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФРАЗВУКОВОГО И ВИБРОМИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОС. МОСРЕНТГЕН.....	58
3.1. Характеристика местности, выбранной в качестве объекта исследований	58
3.2. Построение карт распределения относительной интенсивности сейсмического поля.....	61
Выводы к главе 3.....	65
4. АППАРАТУРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС, НЕОБХОДИМЫЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАТУРНЫХ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ.....	66
4.1. Внутреннее строение и описание гео-гидроакустического измерительного модуля и молекулярно-электронного преобразователя.....	66
4.2. Программное обеспечение, необходимое для работы с гео- гидроакустическим измерительным бумом .....	72
4.3. Сравнительные исследования гео-гидроакустического измерительного модуля с другой сейсмической аппаратурой .....	75
4.4. Лабораторно-стендовые испытания гео-гидроакустического измерительного модуля .....	76
Выводы к главе 4.....	78
5. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ НАТУРНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ХОДЕ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ТЕРРИТОРИИ ПОС. МОСРЕНТГЕН, НОВАЯ МОСКВА.....	80
5.1. Обработка и анализ данных вибрационного загрязнения .....	80
5.2. Построение карт распределения сейсмического загрязнения исследуемой территории .....	88
5.3. Измерение акустических шумов на территории пос. Мосрентген, Новая Москва.....	99

5.4. Верификация предложенной методики мониторинга вибрационного загрязнения мегаполиса.....	116
5.5. Измерения вибрационных и акустических шумов в жилой квартире в районе Сокольники, г. Москва .....	118
Выводы к главе 5.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	139
СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ.....	154
СПИСОК ТЕРМИНОВ .....	160
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	161

## 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.

Среди актуальных проблем геоэкологии современных мегаполисов особое место занимает низкочастотное сейсмоакустическое загрязнение среды обитания, оказывающее негативное влияние как на техническое состояние зданий и сооружений, так и на качество жизни населения. Следует отметить, что инфразвуковые шумы и вибрации способны при длительном воздействии стать одной из причин развития у человека целого ряда заболеваний внутренних органов, нервной и сердечно-сосудистой систем [28]. При этом одним из основных источников проблемы следует признать интенсивные транспортные потоки, нередко используемые в качестве зондирующего сигнала при проведении разномасштабных исследований геофизических [16].

Естественный сейсмический фон Земли или микросейсмы является одним из наиболее активно используемых в настоящее время источников информации о процессах в земной толще. Основанные на использовании сейсмического шума в качестве зондирующего сигнала пассивные геофизические методы, позволяют достаточно быстро и экономически эффективно получать представление о глубинном строении Земли [49, 50].

Микросейсмический шум нашей планеты в значительной части обусловлен процессами, постоянно происходящими в атмосфере и океане: вариациями атмосферного давления, воздействием океанических волн на берег и шельф [24]. Помимо естественных (природных) источников, низкочастотные

сейсмоакустические шумы нередко являются и следствием техногенных процессов.

Наиболее разработанными на сегодня следует признать вопросы снижения негативного влияния звукового и инфразвукового шумов (шумовые ограждения, барьеры, рассеиватели). При этом недостаточно внимания уделяется сейсмическим воздействиям, влияние которых нередко ощущается в населённых пунктах, расположенных в окрестностях скоростных транспортных магистралей.

Настоящее исследование посвящено изучению временных и пространственных вариаций вибросейсмических и акустических шумов современного мегаполиса, оценке влияния низкочастотных вибраций на биологические объекты, построению карт низкочастотного сейсмоакустического загрязнения окружающей среды, формирующих научную основу для выработки адаптационных сценариев решения актуальных и грядущих проблем геоэкологии урбанизированных территорий.

**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, выполненной на стыке геофизики и геоэкологии, является разработка технологии мониторинга вибромикросейсмического и акустического загрязнения жилых районов современных мегаполисов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

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

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Созданный на основе отечественного первичного преобразователя программно-аппаратный комплекс вибросейсмического мониторинга позволяет оперативно выявлять на исследуемой территории нарушения установленных для условий городской застройки специализированными нормативно-правовыми актами СНиП и СанПиН уровней шумов в частотном диапазоне от 0,1 до 31,5 Гц, а также акустических шумов в частотном диапазоне от 1 до 8000 Гц.
2. Адаптация подхода, реализуемого в методе микросейсмического зондирования на основе анализа отношений компонент амплитудных спектров микросейсм в передвижных пунктах к таковым на опорном измерительном пункте, позволяет определять уровень вибромикросейсмического загрязнения исследуемой территории на основе данных однократных площадных измерений с последующей регистрацией микросейсмических шумов на единственном опорном пункте.

3. Разномасштабные карты низкочастотного микросейсмического загрязнения окружающей среды современного мегаполиса в частотном диапазоне от 0,1 до 31,5 Гц, а также карты акустического шумового загрязнения исследуемой территории в частотном диапазоне от 1 до 8000 Гц позволяют выявлять и контролировать зоны геоэкологического дискомфорта, снижающие качество жизни в пределах крупной городской агломерации.

**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.



**Практическая значимость работы** заключается в возможности осуществления мониторинга вибросейсмической обстановки, а также построения карт вибромикросейсмического 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 сейморазведки (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 натурального эксперимента данных по специальному алгоритму в программном комплексе MATLAB. Рассчитаны и построены в программном комплексе SURFER компании GOLDEN SOFTWARE разномасштабные карты распределения относительных интенсивностей сейсмического поля исследуемой территории, а также карты вибромикросейсмического загрязнения исследуемой территории в абсолютных величинах в частотном диапазоне 0,1 – 31,5 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 частот 1 Гц – 8 КГц. 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.

**Апробация работы.** Результаты работы представлены на: 7-й Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» Санкт-Петербург, 24-26 мая 2022, 5-й Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Акустика среды обитания», Москва, 24 апреля 2020, Научной конференции молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН, Москва, 22-23 апреля 2019.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 2 работы, которые в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований.

**Структура и объём работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка иллюстраций, списка терминов и списка сокращений. Диссертация включает 158 страниц текста, 69 рисунков, 5 таблиц. Список литературы насчитывает 123 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, 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 [37]. Затем Бэрдом и Банвеллом были проведены наблюдения на территории Новой Зеландии, которые показали, что амплитуда колебаний микросейсм мала и составляет всего несколько дюймов.

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 микросейсм, 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].

Швейцарский 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, сейсмолог 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].

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. 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. Немаловажное прикладное значение имеет оперативный прогноз землетрясений на определённой территории. 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, используемого 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].

Начиная с 1955 года, значения максимальных колебательных ускорений грунтов, соответствующих модернизированной шкале Меркалли (сейсмической шкале ММ), возросли приблизительно в 5 раз и достигли для 7-9 баллов значений  $0.1 - 0.55g$  соответственно. При этом существует, так называемое, «эффективное» ускорение, определение которого несёт большую практическую пользу при оценке сейсмической устойчивости при строительстве зданий и сооружений, в отличие от значений максимального (пикового) ускорения [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 греческий инженер-сейсмолог Николас Амбрасеис 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 структур, улучшение сейсмического микрозонирования 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 нескольких датчиков с высокой плотностью 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 1 – 35 Гц и 8 – 35 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 вкуче 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 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 лежит в низкочастотной области спектра, а именно в 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]

Wielandt 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  $\pm 3.5 \cdot 10^5$  нм/с<sup>2</sup> 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. Примеры численного моделирования микросейсмического шума

Обычно принято, что релаксация напряжений в массиве горных пород происходит за счёт подвижек уже имеющихся дислокаций различного масштаба. При создании модели структуры дислокаций используется блочно-иерархическая модель геологической среды. Каждому такому блоку соответствуют источники типа сдвига с характерными для них энергетическими характеристиками, частотой срабатывания и пространственным распределением в объёме пласта. Далее рассматривается неоднородная среда, примером которой служит скоростная модель углеродного массива (Рис. 1).

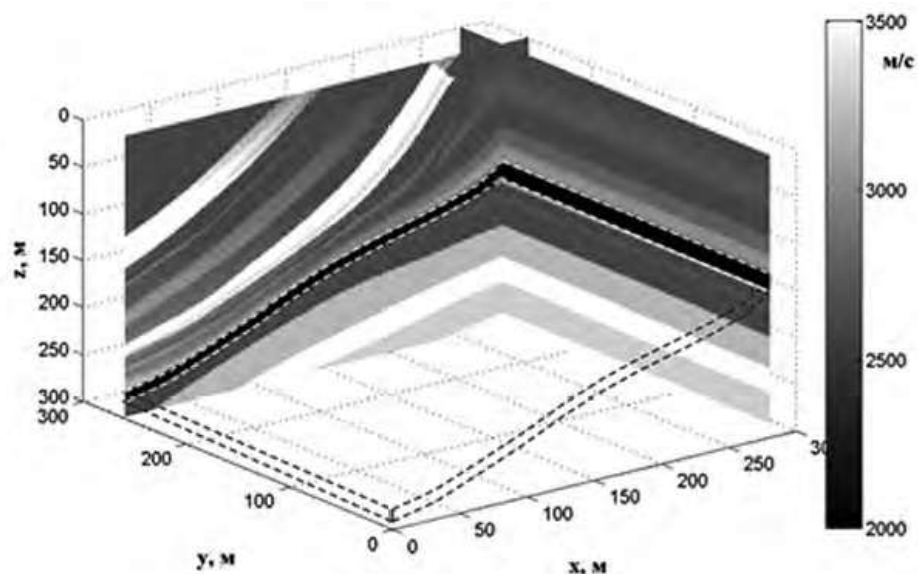


Рис. 1. Модель угольного пласта и вмещающих горных пород. Показано пространственное распределение продольных волн [35]

Принято, что подвод энергии к дислокациям различных масштабов является одинаковым и стационарным. Предполагается, что доминантная частота

источника является обратно пропорциональной характерному линейному размеру блока:

$$f \sim \frac{M}{c} * \frac{1}{a} \quad (1)$$

Формула для расчёта энергии сейсмической волны, возбуждаемой импульсом, выглядит следующим образом:

$$E = 2\pi^2 \rho V_p A^2 f^2 S \quad (2)$$

где:  $S$  – площадь поверхности сферы, окружающей блок,

$f$  – частота волны,

$A$  – амплитуда импульса,

$V_p$  – скорость распространения продольной волны,

$\rho$  – плотность среды:

$$E = 2\pi^2 \rho V_p A^2 f^2 S = 2\pi^2 \rho V_p A^2 f^2 (\pi a^2) \sim 2\pi^2 \rho V_p A^2 \left(\frac{1}{a^2}\right) (\pi a^2) \sim A^2 \quad (3)$$

т.е.  $E \sim A^2$ .

Для задания временного режима срабатывания источников, за основу взят известный закон повторяемости землетрясений [35]:

$$\lg(N) = c - dM \quad (4)$$

где  $N$  – число землетрясений с магнитудой  $M$ ,

$c, d$  – эмпирически определяемые константы.

Допускается предположение, что рассматриваемый закон применим для любого заданного промежутка времени. Магнитуда  $M$  – эмпирическая мера силы землетрясения, которая пропорциональна логарифму энергии сейсмических колебаний и может быть выражена следующим соотношением:

$$\lg(E) = pM + q \quad (5)$$

где  $b, p$  и  $q$  – эмпирически определяемые коэффициенты.



Закон повторяемости землетрясений можно переписать в следующем виде [35]:

$$\lg(N) = \frac{b}{p} \lg(E) + (a - q) \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что оценка состояния массива горных пород определяется следующим соотношением:

$$N = \frac{10^{a-q}}{E^{(b/p)}} \quad (7)$$

Так как  $E \sim a^2$ , получаем:

$$N \sim \frac{1}{a^{2(b/p)}} \quad (8)$$

Исходя из полученных соотношений, если принять, что отношение  $b/p = 1$ , то получается, что количество микросейсмических событий обратно пропорционально площади дислокации. Иными словами можно сказать, что частота срабатывания источников обратно пропорциональна площади дислокации [35].

Для численного моделирования микросейсмического шума в блочно-иерархических неоднородных средах используется параллельная программная реализация конечно-разностной схемы решения уравнений упругости на сдвинутых сетках. В данном случае построение схемы осуществляется на примере изотропных уравнений упругости в двумерном пространстве. Следовательно, уравнения упругости будут представлены в виде системы первого порядка [35]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial V_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial V_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial V_z}{\partial z} + \lambda \frac{\partial V_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} &= \mu \left( \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

(9)

где  $V = (V_x, V_z) = \bar{u}$  – вектор смещений скорости.

Далее будет рассмотрена стандартная схема второго порядка на сдвинутых сетках. Для этого вводится дискретизация по пространству:  $x_i = x_0 + i\Delta x, z_i = z_0 + i\Delta z$  и по времени:  $t_n = n\Delta t$ . Помимо этого будут рассмотрены т.н. «полуцелые» узлы  $(i \pm \frac{1}{2}, j \pm \frac{1}{2}, n \pm \frac{1}{2})$ . Таким образом, получаются две сетки, находящиеся на определённом сдвиге по отношению друг к другу. Как правило, шаги дискретизации по пространственным переменным выбираются равными по отношению к друг к другу [35]:

$$\Delta x = \Delta z = h \tag{10}$$

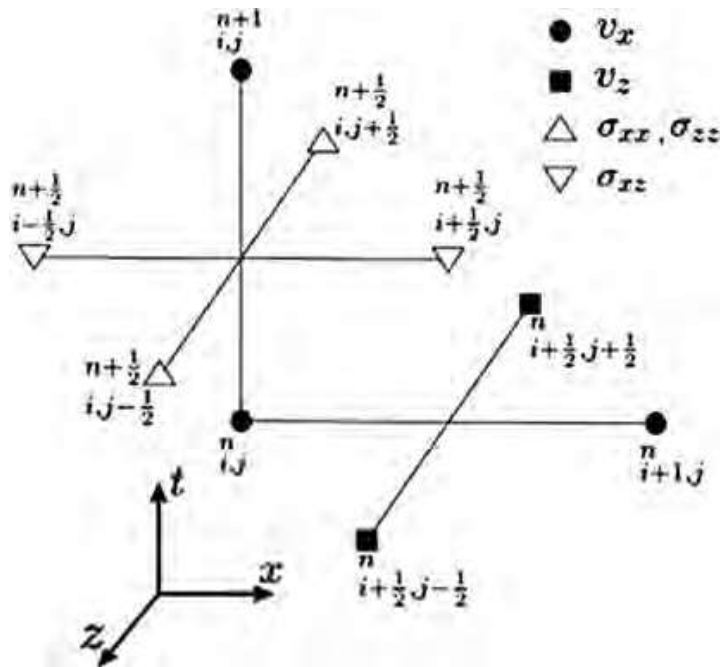


Рис. 2. Шаблон конечно-разностной схемы второго порядка на сдвинутых сетках

При определении параметра  $h$  наиболее важным фактором является количество шагов дискретизации, укладывающихся на наименьшую длину волны. Для рассматриваемой схемы второго порядка шаг дискретизации по пространству определяется исходя из условия [35]:

$$h \leq \frac{v_s^{min}}{12 * \omega_{max}} \tag{11}$$

где  $\omega_{max}$  – максимальная частота рассматриваемых колебаний,  $V_S^{min}$  – минимальное значение скорости поперечной волны в рассматриваемой среде.

Временной шаг  $\Delta t$  определяется условием устойчивости рассматриваемой конечно-разностной схемы. Для схемы второго порядка временной шаг определяется исходя из следующего условия:

$$t \leq \frac{0.6h}{V_p^{max}} \quad (12)$$

где  $V_p^{max}$  – максимальное значение скорости продольной волны в среде [35].

Моделью источника сейсмических событий в рассматриваемом случае является модель источника сдвигового типа. Такого типа источник можно задать с помощью симметричного тензора сейсмического момента  $M$ . Определение компоненты  $M_{pq}$  рассматриваемого тензора говорит о том, что к токе прикладывается пара сил в направлении  $p$  с моментом  $M_{pq}$  и с плечом в направлении  $q$  [40].

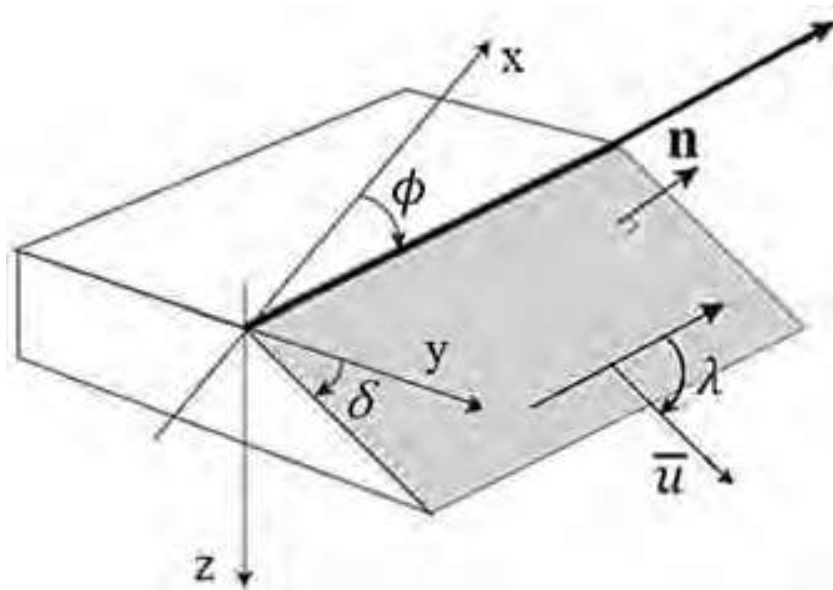


Рис. 3. Схематичное изображение углов, определяющих сдвиг

Рассматривая наиболее общий случай, при произвольной ориентации поверхности разрыва компоненты тензора сейсмического момента в декартовых координатах для сдвиговой дислокации в изотропной среде выражаются следующим образом [35]:

$$\begin{aligned}
M_{xx} &= -M_0(t)(\sin(\delta) \cos(\eta) \sin(2\varphi) + \sin(2\delta) \cos(\eta) \sin^2(\varphi)) \\
M_{xy} &= M_0(t) \left( \sin(\delta) \cos(\eta) \cos(2\varphi) + \frac{1}{2} \sin(2\delta) \sin(\eta) \sin(2\varphi) \right) = M_{yx} \\
M_{xz} &= -M_0(t)(\cos(\delta) \cos(\eta) \cos(\varphi) + \cos(2\delta) \sin(\eta) \sin(\varphi)) = M_{zx} \\
M_{yy} &= M_0(t)(\sin(\delta) \cos(\eta) \sin(2\varphi) - \sin(2\delta) \sin(\eta) \cos^2(\varphi)) = M_{zy} \\
M_{yz} &= -M_0(t)(\cos(\delta) \cos(\eta) \sin(\varphi) + \cos(2\delta) \sin(\eta) \cos(\varphi)) = M_{zy} \\
M_{zz} &= M_0(t)(\sin(2\delta) \sin(\eta))
\end{aligned} \tag{13}$$

В рассматриваемой системе уравнений множитель перед скобкой является скалярным сейсмическим моментом, который можно выразить следующим образом [35]:

$$M_0(t) = \mu \tilde{u}(t) A \tag{14}$$

где  $\tilde{u}(t)$  – осреднённое смещение на разрыве в момент времени  $t$ ,  $A$  – площадь разрыва,  $\mu$  - модуль сдвига в области разрыва,  $\delta$ ,  $\eta$ ,  $\varphi$  - углы, описывающие разрыв смещения. Углы  $\delta$  и  $\varphi$  определяют ориентацию разрыва в пространстве, а угол  $\eta$  определяет направление подвижки [35].

Рассматривая конечно-разностную схему, двойные пары наиболее удобно задавать при помощи тензора напряжений. Далее будет рассмотрен элементарный объём упругой среды, находящийся в состоянии равновесия.

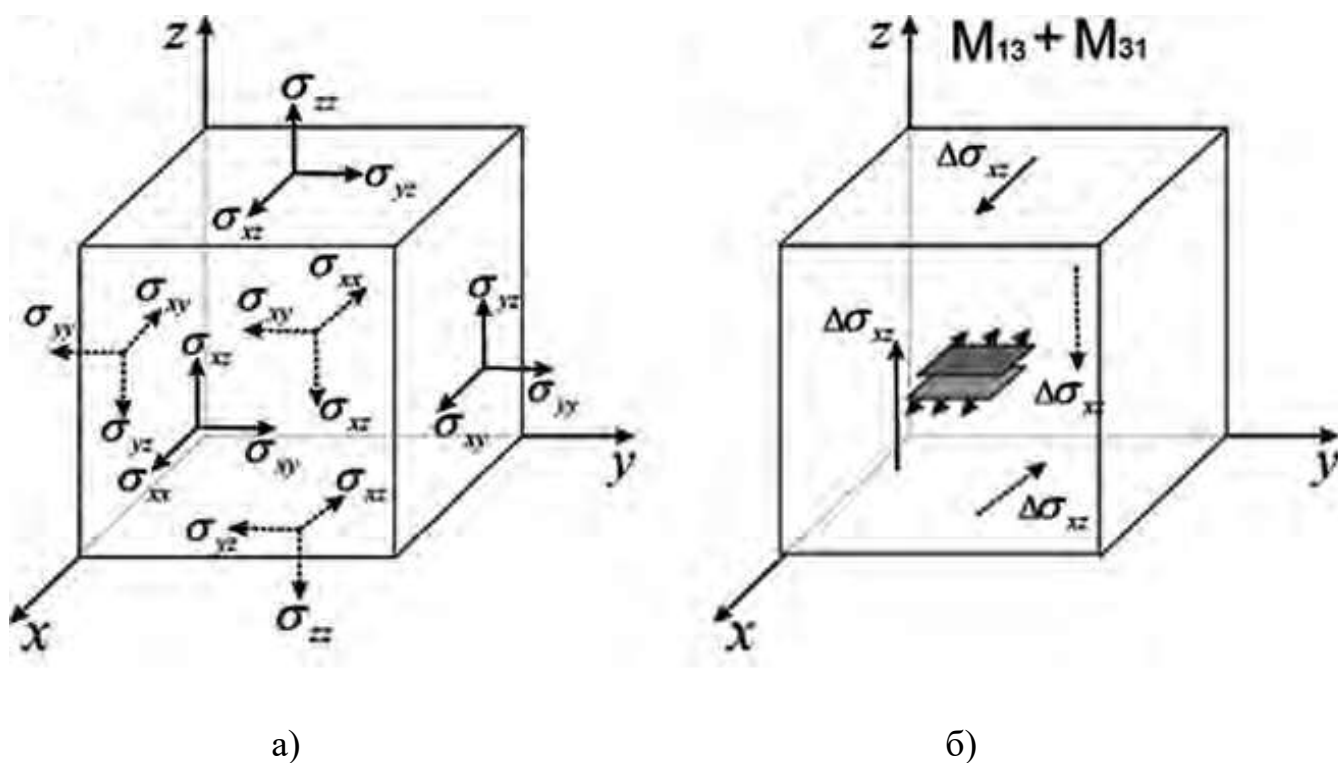


Рис. 4. Напряжения, приложенные к элементарному объёму (а); приращения напряжений, эквивалентные точечному источнику типа сдвига (б)

Суммарные сила и момент девяти пар напряжений, показанные на Рис. 4(а) при отсутствии внешних сил равны нулю.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что численная реализация источников осуществляется путём прибавления к напряжениям добавок, эквивалентных парам сил [35].

При создании модели распространения микросейсмического шума, источники колебаний распределяются регулярным образом: по одному источнику в соответствующий блок угольного пласта, который обозначен пунктирной линией на Рис. 1. Расстояния между источниками соответствуют размерам блоков. Пространственное расположение площадки разрыва для каждого сдвигового источника выбиралось случайным образом. В источниках был использован импульс Риккера [35].

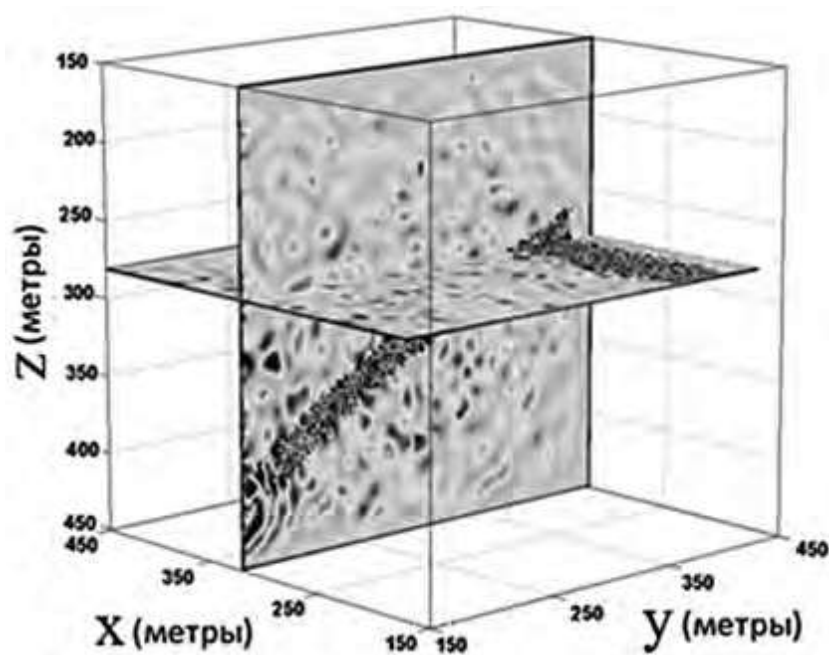


Рис. 5. Мгновенный снимок волнового поля вблизи шумящего пласта

На верхней границе модели использовались условия свободной поверхности, на других поверхностях для подавления искусственных отражений использовались поглощающие слои [35].

### 1.5. 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 вполовину 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/с<sup>2</sup>, 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 Pusrak, двигаясь со скоростью 100 км/ч, на расстоянии 4 м от точки наблюдения, вызывает колебательное движение частиц с ускорением  $153 \text{ мм/с}^2$ , 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  $109 \text{ мм/с}^2$ , 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<sup>2</sup>, 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<sup>2</sup>, 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/с<sup>2</sup> и виброскорость в 47,8 мкм/с на расстоянии 5 м от точки наблюдения. Данные значения не достигают предельно допустимых показателей [55, 120].

### **1.6. 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.

## 1.7. 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].

В виду 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 в 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.

### **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.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НОВОГО ПОДХОДА К МОНИТОРИНГУ ВИБРОМИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НАСЕЛЁННОГО ПУНКТА**

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

### **2.1. 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:

$$H(f) = k * \Lambda(f) = k * Vr(f)/f \quad (15)$$

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

$k$  – коэффициент глубинной привязки, определяемый по результатам моделирования;

$\Lambda$  – длина волны;

$Vr$  – 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  $S_1 + n_1$ . В данном контексте слагаемое  $S_1$  характеризуется стационарной составляющей микросейсмической записи, при этом слагаемое  $n_1$  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:

$$\hat{H} = (S_1 + n_1)/(S_2 + n_2) \quad (16)$$

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

$$\hat{H} = \frac{S_1}{S_2} = \check{H} * \frac{S_2}{S_2} = \check{H} \quad (17)$$

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 (17) можно выразить в виде ряда по параметрам  $n_1$  и  $n_2$  в точке  $(n_1; n_2) = (0;0)$ :

$$\begin{aligned} \hat{H} &= \frac{S_1 + n_1}{S_2 + n_2} = \frac{S_1}{S_2} + \frac{\partial \hat{H}(0,0)}{\partial n_1} n_1 + \frac{\partial \hat{H}(0,0)}{\partial n_2} n_2 + \left( \frac{\partial^2 \hat{H}(0,0)}{\partial n_1^2} n_1^2 + \frac{\partial^2 \hat{H}(0,0)}{\partial n_2^2} n_2^2 + \right. \\ &2 \frac{\partial^2 \hat{H}(0,0)}{\partial n_1 \partial n_2} n_1 n_2 \left. \right) * \frac{1}{2} + \bar{\sigma} \left( \sqrt{n_1^2 + n_2^2} \right) = \frac{S_1}{S_2} + \frac{n_1}{S_2} - \frac{n_2 * S_1}{S_2^2} + \frac{S_1 * n_2^2}{S_2^2} + \frac{n_1 n_2}{S_2} + \bar{\sigma} \left( \sqrt{n_1^2 + n_2^2} \right) \\ &= \check{H} + \frac{n_1}{S_2} - \check{H} \frac{n_2}{S_2} + \check{H} \left( \frac{n_2}{S_2} \right)^2 - \frac{n_1 n_2}{S_2^2} + \bar{\sigma} \left( \sqrt{n_1^2 + n_2^2} \right) \quad (18) \end{aligned}$$

Учитывая отношение (3), 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 (4) может иметь следующий вид [10]:

$$\hat{H} = \check{H} + (1 - \check{H}) \left(\frac{n}{S}\right) - (1 - \check{H}) \left(\frac{n}{S}\right)^2 + \bar{\sigma} \left(\sqrt{n_1^2 + n_2^2}\right) \quad (19)$$

В данном случае  $n_1 = n_2 = n$  и  $S_1 = S_2 = S_3$  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 (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  $\hat{H}$  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  $\hat{H}$  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  $S_{1\text{ DET}}$  [10]:

$$\frac{S_{1\text{ DET}}}{S_{2\text{ DET}}} = \frac{(H * S_{2\text{ DET}})}{S_{2\text{ DET}}} = \dot{N} \quad (20)$$

Однако определение соотношения (20) 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 (20) 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].

## 2.2. Сейсмическое микрорайонирование.

Сейсмическая опасность позволяет охарактеризовать потенциальные 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);
- учет наличия сейсмогенных разломов вблизи участков, когда их характеристики предполагают возможные косейсмические деформации на поверхности;
- определение эталонных сейсмических движений для каждого участка с учетом специфических почвенных условий.

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:

$$\Delta I = 2lg \frac{A_{max_i}}{A_{max_э}} \quad (21)$$

где  $A_{max_i}$  и  $A_{max_э}$  – 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 (микросейсм), 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. Причинами 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].

### **2.3. Теоретическое описание предлагаемой в работе методики мониторинга вибромикросейсмического загрязнения мегаполиса и опробование ММЗ в ледовых условиях оз. Байкал и**

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 сейсмостанций 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, вибромикросейсмическое 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 вибромикросейсмического 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 вибромикросейсмического 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 натуральных 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 вибромикросейсмического загрязнения исследуемой территории в абсолютных значениях.

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



Рис. 6. Работы по методу микросейсмического зондирования в ледовых условиях оз. Байкал

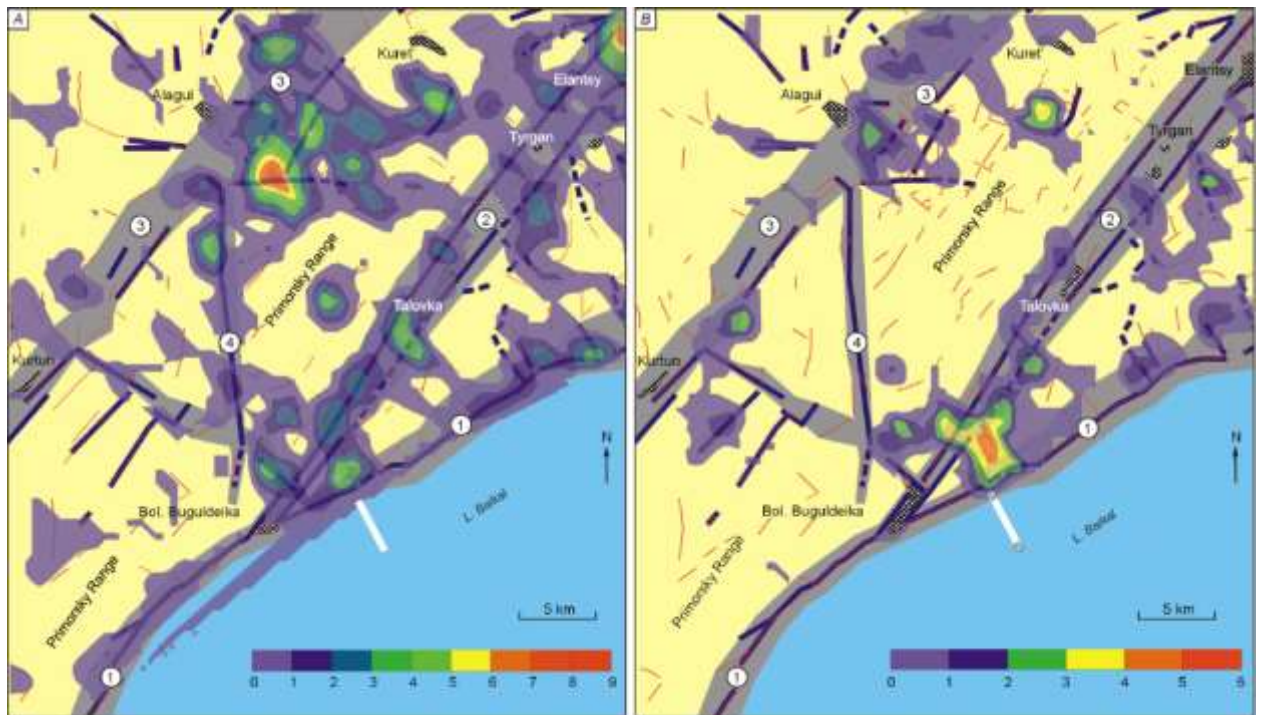


Рис. 7. Расположение профиля ММЗ в ледовых условиях оз. Байкал, вблизи пос. Бугульдейка (отмечен белой линией) [124]



По результатам работ был построен глубинный разрез по рассматриваемому профилю (Рис. 8).

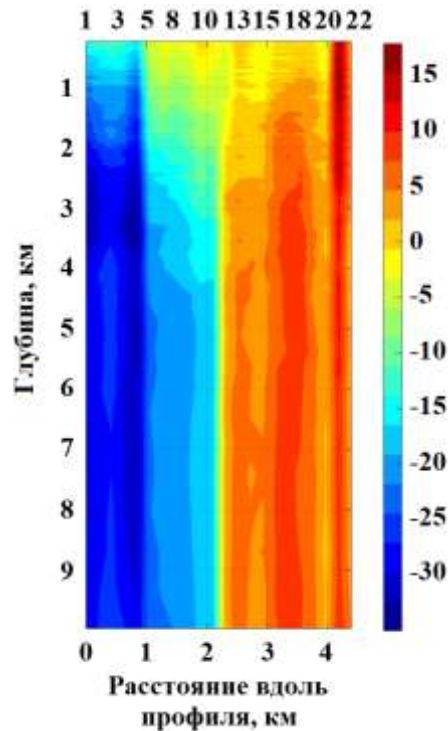


Рис. 8. Глубинный разрез, полученный по профилю метода микросейсмического зондирования на оз. Байкал

## Выводы к главе 2

Таким образом, представлена методика оценки низкочастотного вибромикросейсмического загрязнения исследуемой территории, реализуемая по аналогии с ММЗ при помощи всего двух сейсмостанций, одна из которых является переносной и служит для получения натуральных данных в различных точках исследуемой площади, вторая располагается на опорном пункте и работает одновременно с переносным оборудованием в непрерывном режиме. Также описаны работы по ММЗ в ледовых условиях оз. Байкал.

### **3. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФРАЗВУКОВОГО И ВИБРОМИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОС. МОСРЕНТГЕН**

#### **1.1. Характеристика местности, выбранной в качестве объекта исследований**

Проверку разработанной методики было решено провести на территории пос. Мосрентген, Троицкого и Новомосковского административных округов г. Москва. В первую очередь, выбор данного места был обусловлен тем, что именно в этом населённом пункте находится Координационно-прогностический центр ИФЗ РАН (КПЦ ИФЗ РАН), в котором размещены помещения и измерительное оборудование лаборатории 703 ИФЗ РАН, необходимое для сбора натуральных данных в рамках рассматриваемого в работе эксперимента, а также для проведения прочих полевых экспедиций лаборатории.



Рис. 9. Координационно-прогностический центр ИФЗ РАН (КПЦ ИФЗ РАН), расположенный на территории пос. Мосрентген, г. Москва

Также, пос. Мосрентген является густонаселённым районом с развитой инфраструктурой, с численностью населения более 16 тыс. человек, на

территории которого ведётся строительство станции Московского метрополитена «Тютчевская» и вблизи которого расположен оживлённый участок автомагистрали МКАД-ЮГ. В связи с этим, предполагается, что в рассматриваемом районе будут зафиксированы значения вибросейсмического и инфразвукового фона, превышающие допустимые показатели, установленные специализированными нормативно-правовыми актами СНиП и СанПиН [61-63]. На рис.10 показана схема расположения профилей и пикетов на исследуемой территории.

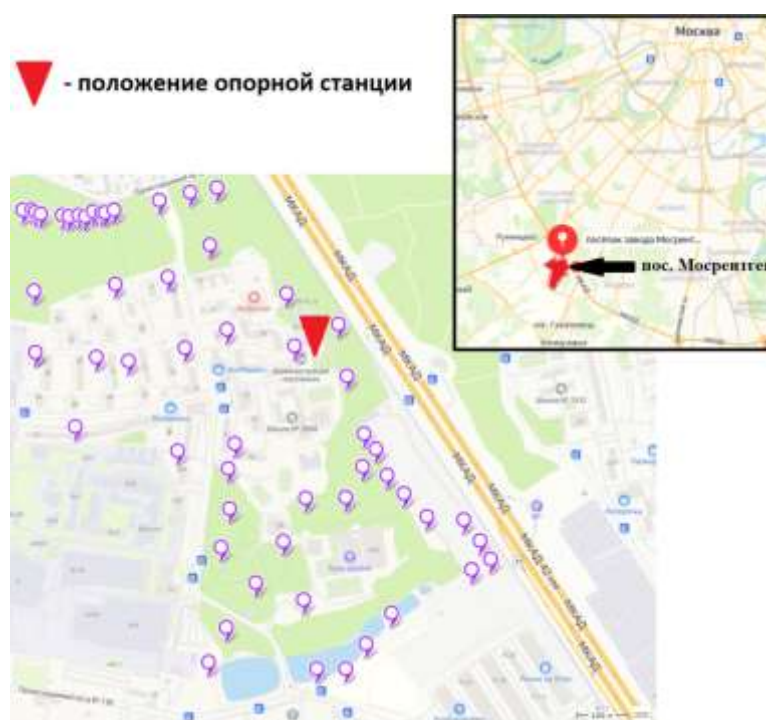


Рис.10. Схема расположения измерительных точек на территории пос. Мосрентген, г. Москва

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 и используется в качестве опорного,

«базового» пункта, функционирующего в непрерывном режиме для устранения временных вариаций.

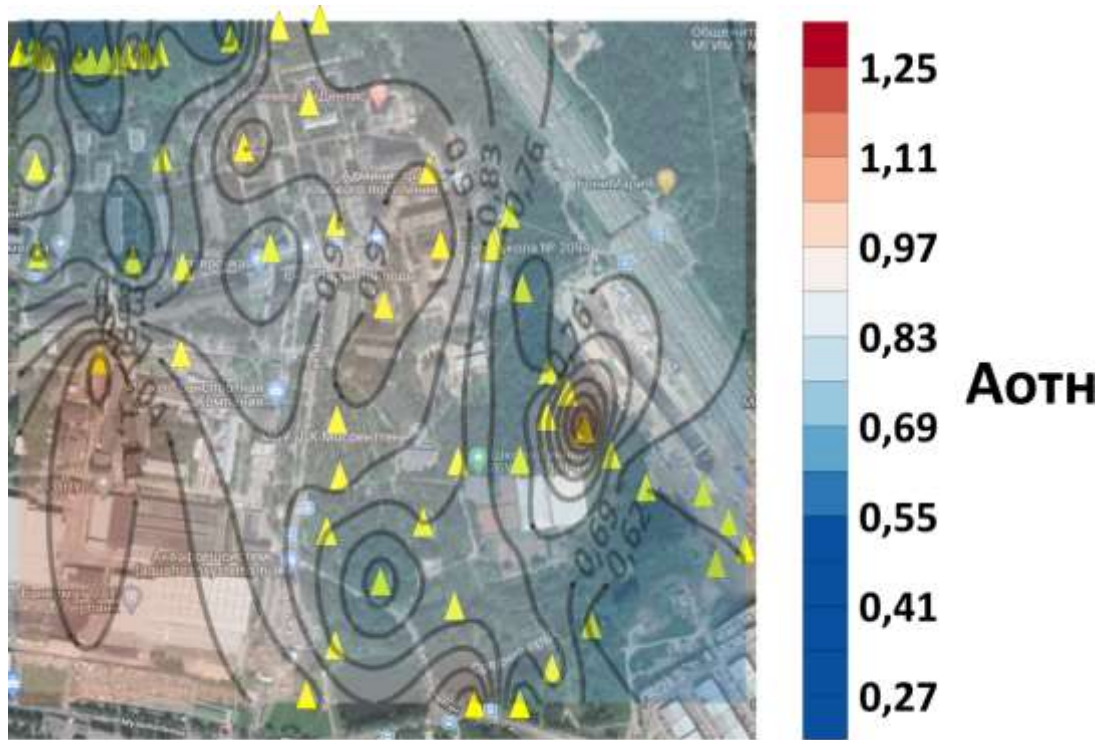


Рис. 11. Измерительное оборудование: слева – переносная сейсмостанция, используемая в различных точках исследуемой территории, справа – сейсмостанция, расположенная на опорном пункте – на постаменте подвального помещения КПЦ ИФЗ РАН

Измерения проводились в 69-ти точках. Переносная сейсмостанция устанавливалась в каждой точке контролируемой территории в заранее подготовленные приемки 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 КПЦ ИФЗ РАН.

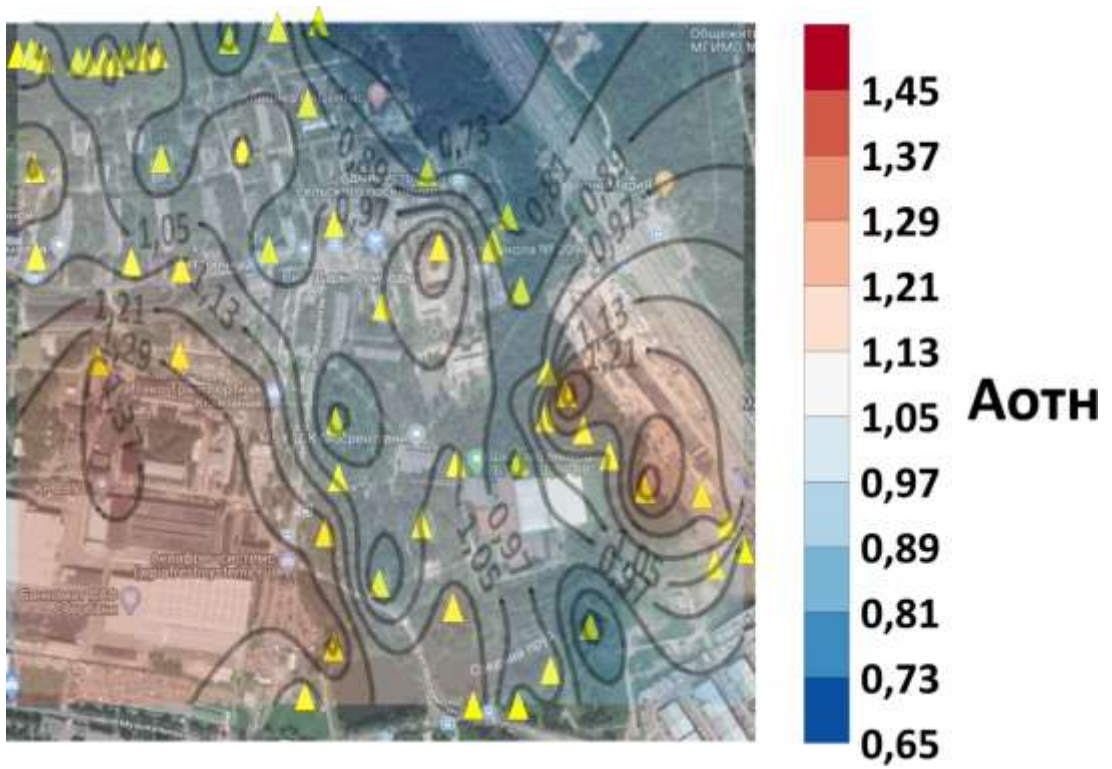
## 1.2. Построение карт распределения относительной интенсивности сейсмического поля

В результате реализации рассматриваемого метода, на одном из этапов обработки полученных в ходе натурных измерений данных, строятся карты распределения относительных интенсивностей сейсмического поля по площади исследования для определённого диапазона частот.

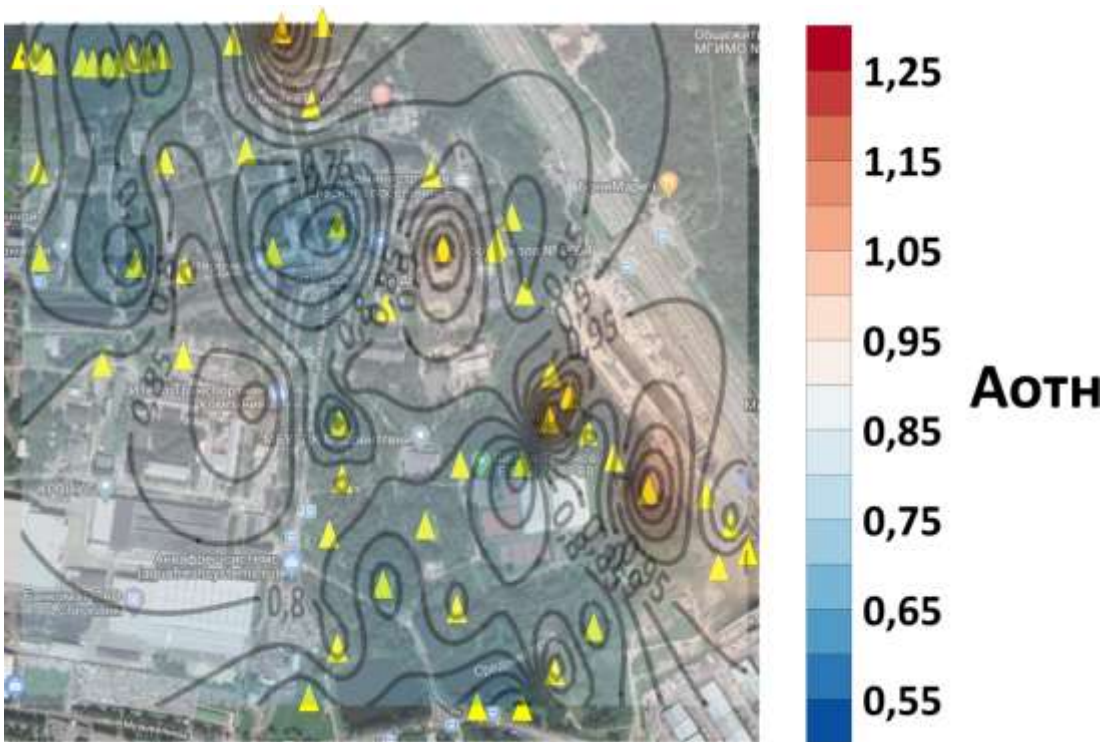


a)

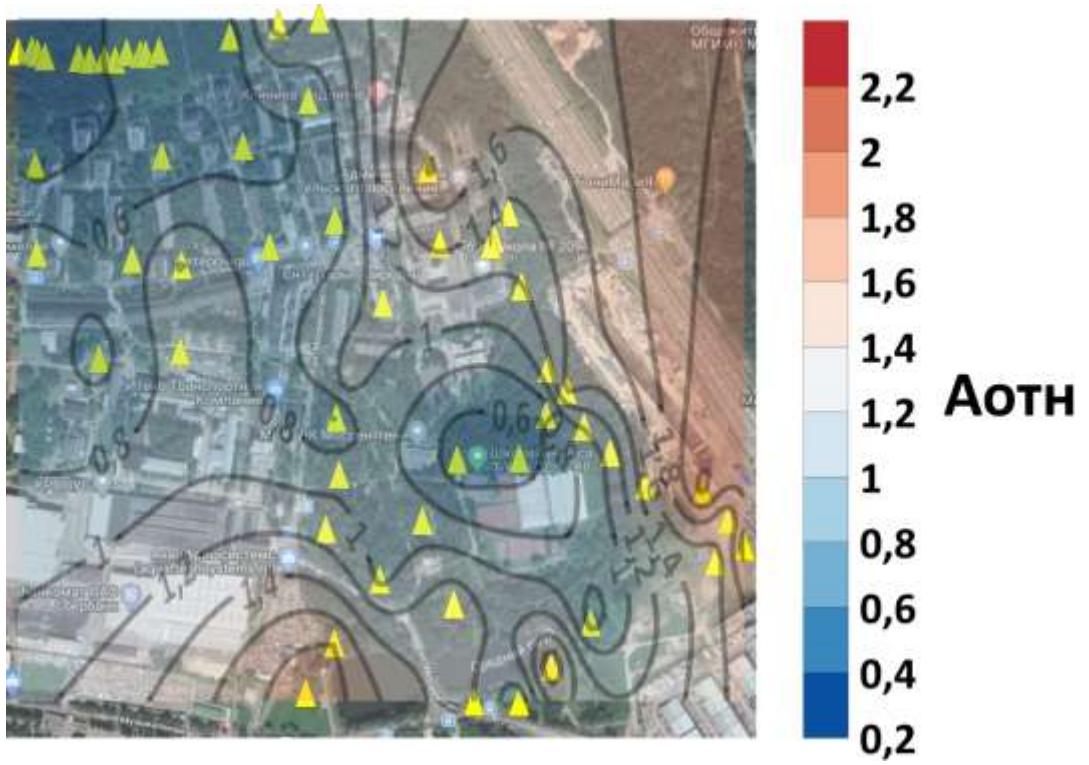




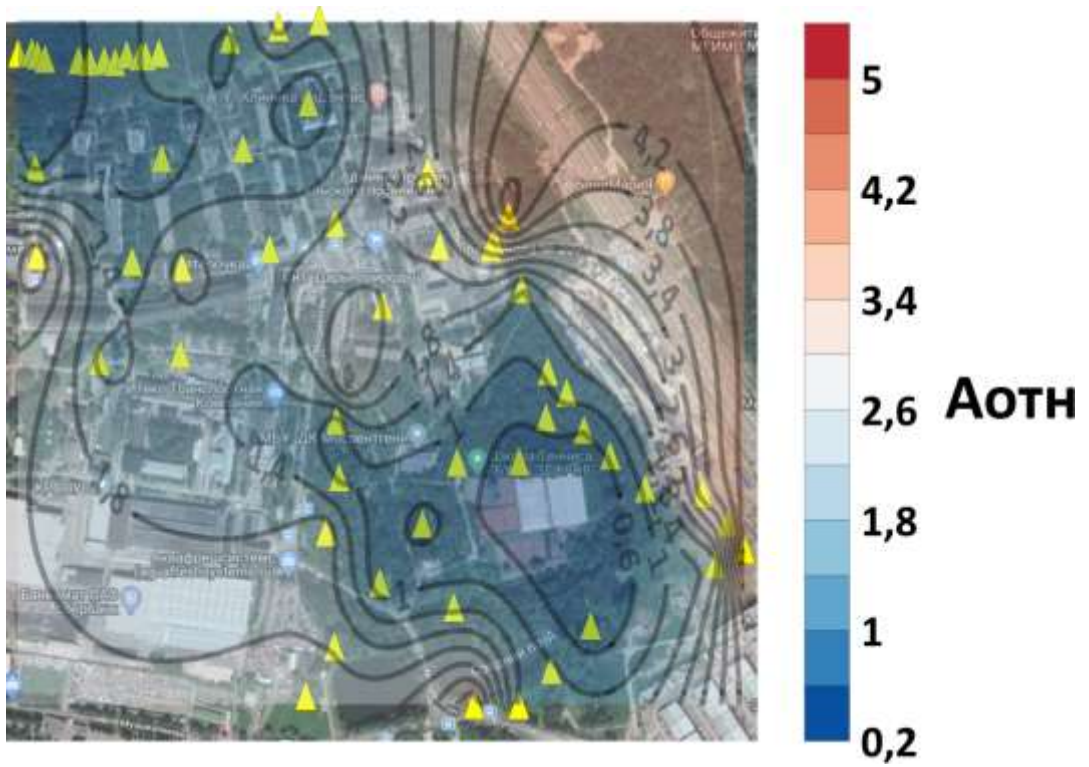
б)



в)

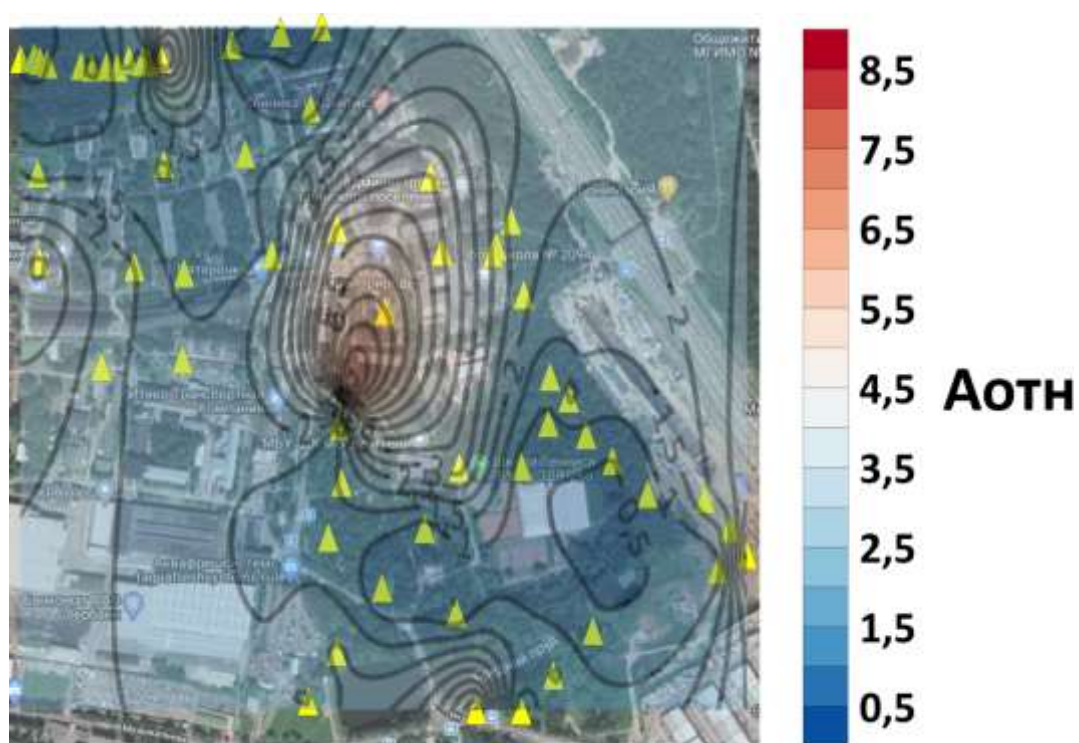


г)



д)





е)

Рис. 12. Карты распределения относительных интенсивностей сейсмического поля на территории пос. Мосрентген для нескольких частот: а) 1 Гц; б) 2 Гц; в) 4 Гц; г) 8 Гц; д) 16 Гц; е) 31,5 Гц

Отметки цветовой шкалы характеризуют отношение усреднённых амплитудных спектров сигналов в измерительных пунктах на всей площади исследования к такому же параметру на опорном измерительном пункте. Как видно из полученных данных, на частотах 1, 2 и 4 Гц интенсивность сейсмоакустических шумов на всей площади исследования практически не превышает сейсмический фон, зафиксированный на опорном пункте. На частоте 8 Гц уровень вибросейсмического фона в районе участка автострады МКАД-ЮГ, а также вблизи строительного рынка «Славянский мир» примерно в 2 раза превышает фон, зафиксированный опорной сейсмической станцией, расположенной в КПЦ ИФЗ РАН. Также наблюдается превышение примерно в 1,8 раза вблизи Проектируемого проезда № 139, на остальных участках заметных превышений не наблюдается. На частоте 16 Гц превышения вибросейсмического



фона относительно опорного пункта наблюдаются практически повсеместно, а наиболее высокие превышения характерны для участка автомагистрали МКАД-ЮГ – сейсмическое загрязнение в данной области примерно в 5 раз выше, чем на опорном пункте. На частоте 31,5 Гц превышения вибросейсмического фона относительно опорного пункта наблюдается практически по всей площади исследования, наиболее сильное превышение наблюдается в жилом дворе, вблизи центральной площади пос. Мосрентген – примерно в 8 раз выше, чем на опорной станции.

### **Выводы к главе 3**

Таким образом, представлено описание и обоснован выбор территории, являющейся объектом проведения оценки вибромикросейсмического загрязнения. Представлены карты распределения относительных интенсивностей сейсмического поля по площади исследования для определённого диапазона частот.

## **4. АППАРАТУРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС, НЕОБХОДИМЫЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАТУРНЫХ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ**

### **4.1. Внутреннее строение и описание гео-гидроакустического измерительного модуля и молекулярно-электронного преобразователя**

При проведении полевого эксперимента по сбору натуральных данных на исследуемой территории, в качестве измерительного оборудования был использован гео-гидроакустический измерительный буй, 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. 10, *a*) – 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].

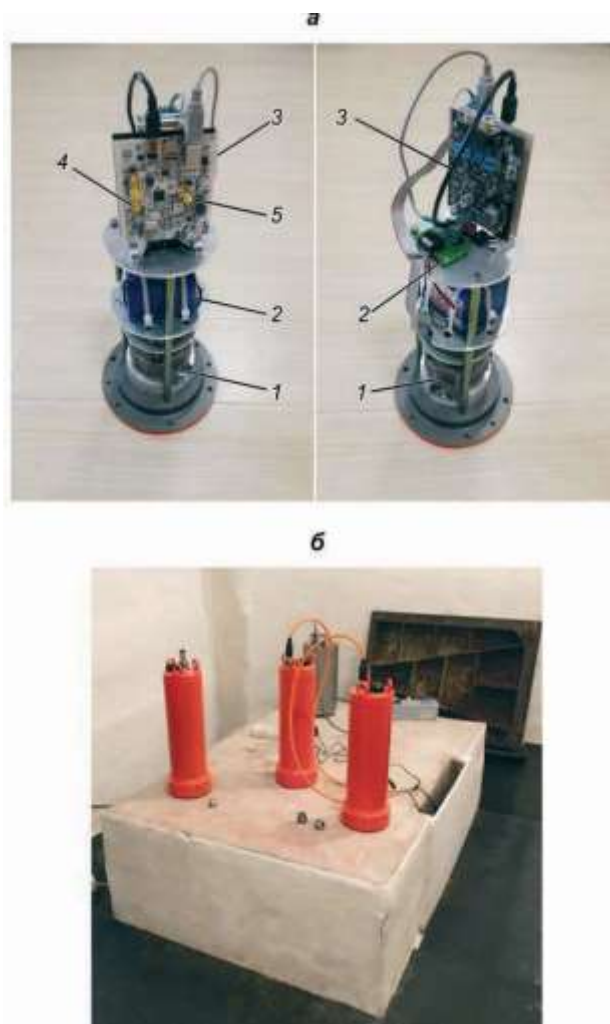


Рис. 13. Конструкция гео-гидроакустического модуля (а) и внешний вид размещения гео-гидроакустических буёв на постаменте в г. Обнинск 30.08.2017 г.

(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].

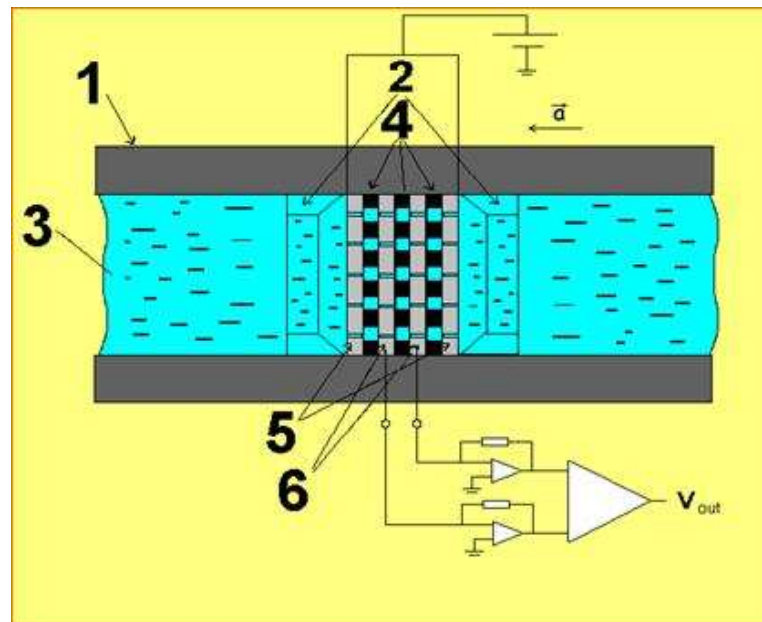


Рис. 14. Молекулярно-электронный преобразователь: 1 – диэлектрическая трубка (корпус преобразователя); 2,4 – установочные элементы; 3 – электролит; 5,6 – электроды

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.

Таблица 2. Параметры молекулярно-электронного сейсмодатчика

Полоса частот	0.033 ( $T=30$ с)–50 Гц
Коэффициент преобразования	2000 В/(м/с) – дифф. Выход
Максимальный регистрируемый сигнал	$\pm 5.0$ 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	( $-40\dots+55$ °C)
Допустимый угол установки	$\pm 15^{\circ}$
Вес	0.4 кг

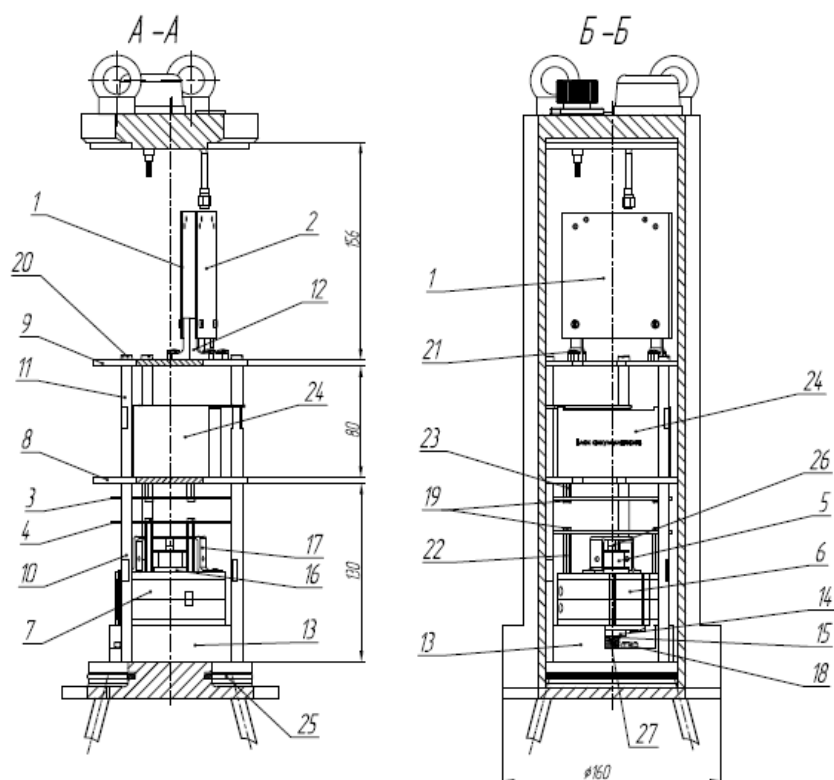


Рис. 15. Внутреннее строение и описание гео-гидроакустического измерительного модуля

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 3.

Таблица 3. 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	$\pm 24$ 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 PC-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. 16. Верхняя крышка корпуса гео-гидроакустического модуля: 1 – внешняя антенна Wi-fi/GPS, 2 – герметичный разъем типа PC-10, 3 – светоиндикаторная заглушка

#### **4.2. 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  $\pm 2.5$  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 буёв 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. 17 представлено главное окно программы NDAS\_app.



Рис. 17. 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».

### 4.3. 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. 12.

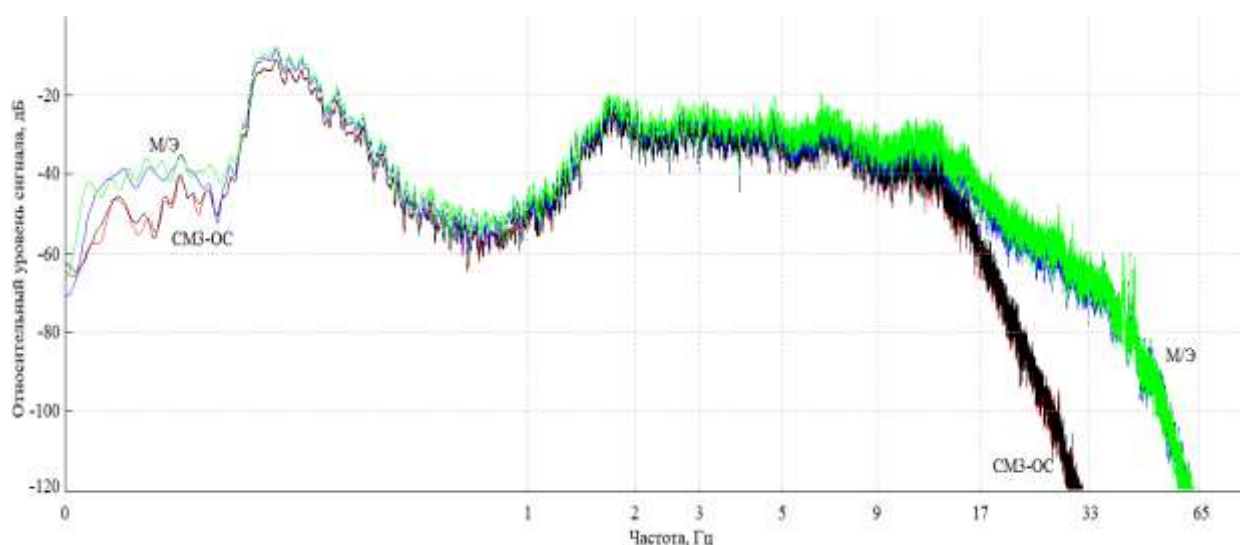


Рис. 18. Сравнение спектров двадцатиминутной синхронной записи двумя сейсмометрами СМЗ-ОС (чёрная и красная кривые) и двумя молекулярно-электронными сейсмометрами (синяя и зелёная кривые)

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.

#### 4.4. 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. 19 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. Сейсмостанции расположены в месте, защищенном от посторонних помех, генерируемых расположенной неподалёку лесополосой. Геофизический постамент (рис. 1, б) расположен на глубине ~20 м, температура на момент измерений составляла ~12 °С, также была отмечена высокая влажность [34].

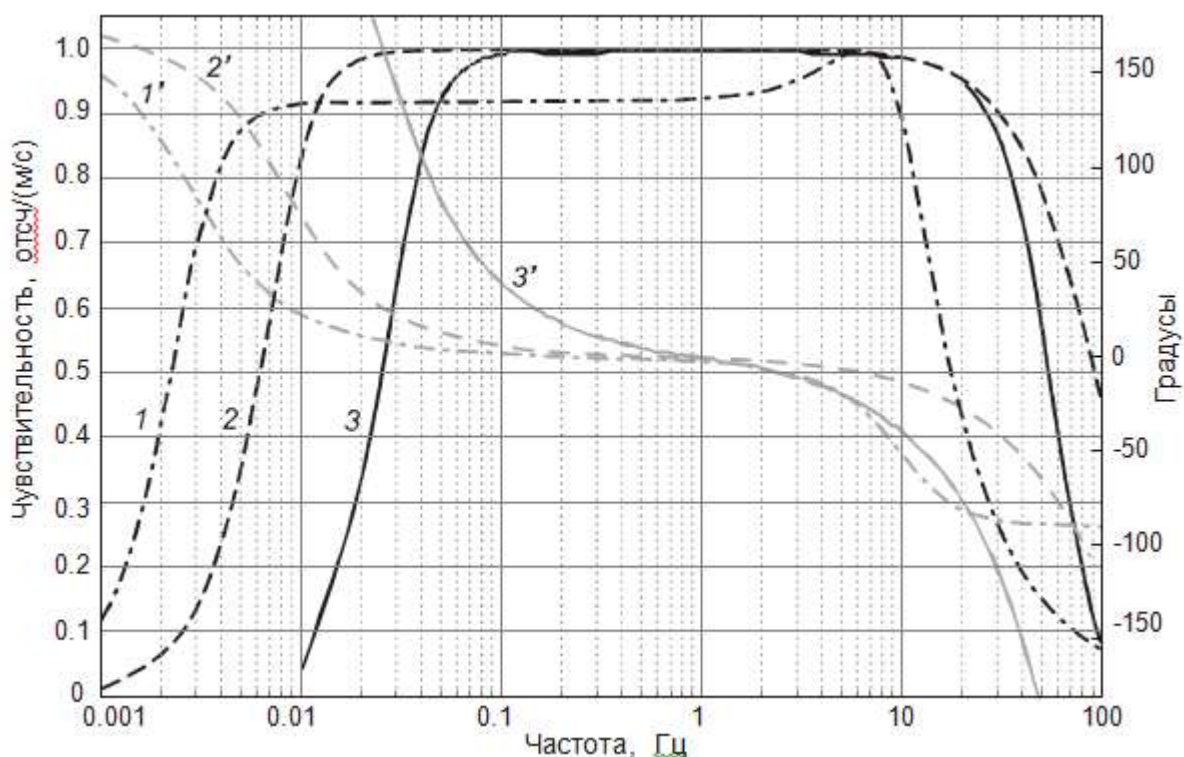


Рис. 19. Амплитудно-частотная (АЧХ) ( $1'–3'$ ) и фазо-частотная (ФЧХ) ( $1'–3'$ ) характеристики приборов Streckeisen ( $1, 1'$ ), Guralp ( $2, 2'$ ) и СМЕ ( $3, 3'$ )

В первую очередь является заметной более низкая по сравнению с эталонными приборами чувствительность СМЕ 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 рис. 3 представлена синхронная (по максимальным значениям) запись этого события всеми тремя приёмниками, отфильтрованная в частотном диапазоне 0.03–10 Гц, с учетом, представленной на Рис. 2 частотной характеристики прибора СМЕ [34].

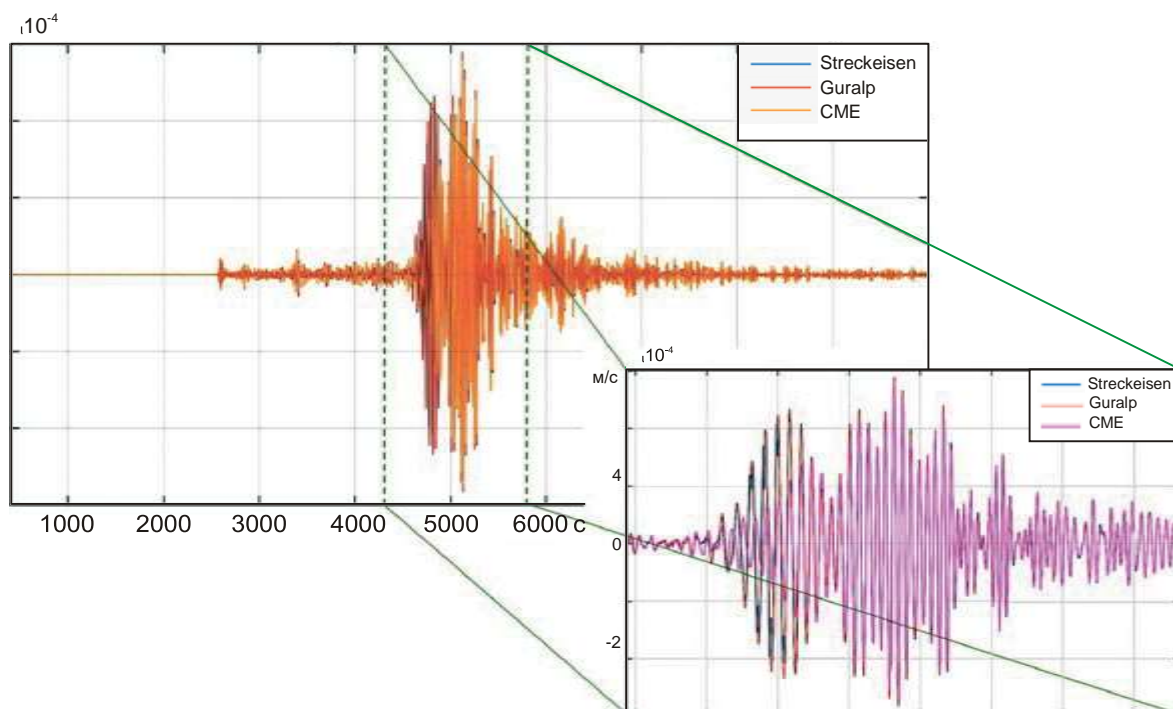


Рис. 20. Сопоставление записей, полученных приборами Streckeisen, Guralp и CME в частотном диапазоне 0.03–10 Гц, землетрясения магнитудой 8.1, произошедшего в Мексике 08.09.2017 г. в 04:49 по всемирному времени

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

#### Выводы к главе 4

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 буев 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.

Проведённые испытания в сложных ледовых условиях, приближенных к условиям Арктики, подтвердили работоспособность таких систем и показали, что разработанный авторским коллективом универсальный измерительный модуль с успехом может стать отдельным элементом поисковой распределённой антенной системы ледового класса [34].

## 5. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ НАТУРНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ХОДЕ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ТЕРРИТОРИИ ПОС. МОСРЕНТГЕН, НОВАЯ МОСКВА

### 5.1. Обработка и анализ данных вибрационного загрязнения

Полученные полевые данные для последующей обработки нуждались в конвертировании из двоичного формата в формат, совместимый с обрабатывающим программным комплексом MATLAB. На рис. 15 схематично представлен алгоритм обработки натуральных данных, полученных в ходе полевого эксперимента.

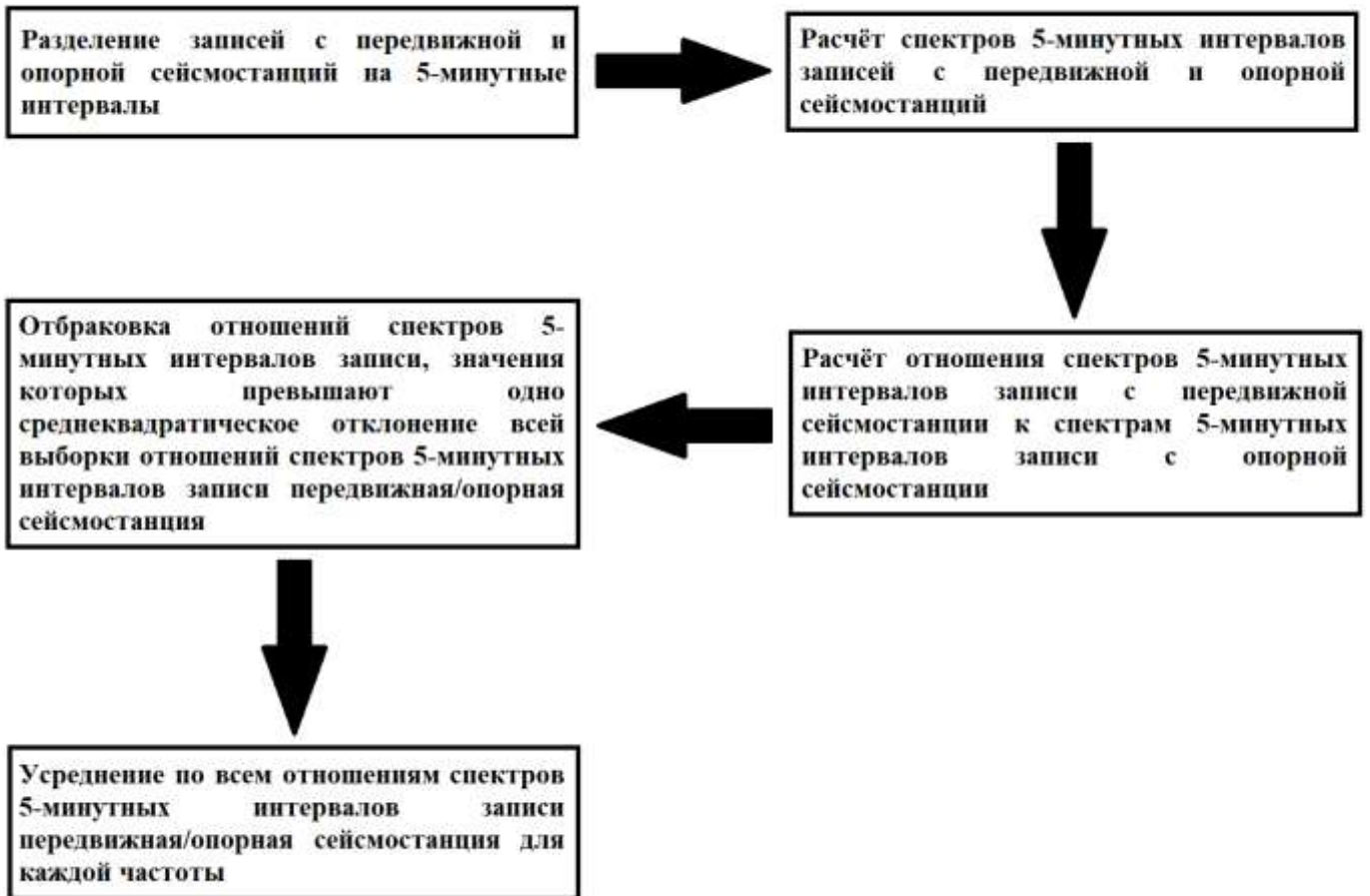


Рис. 21. Алгоритм обработки данных, полученных в ходе натурального эксперимента

Далее, в качестве примера, приведены записи волновых форм с передвижной и опорной сейсмостанций за июль 2019 года.



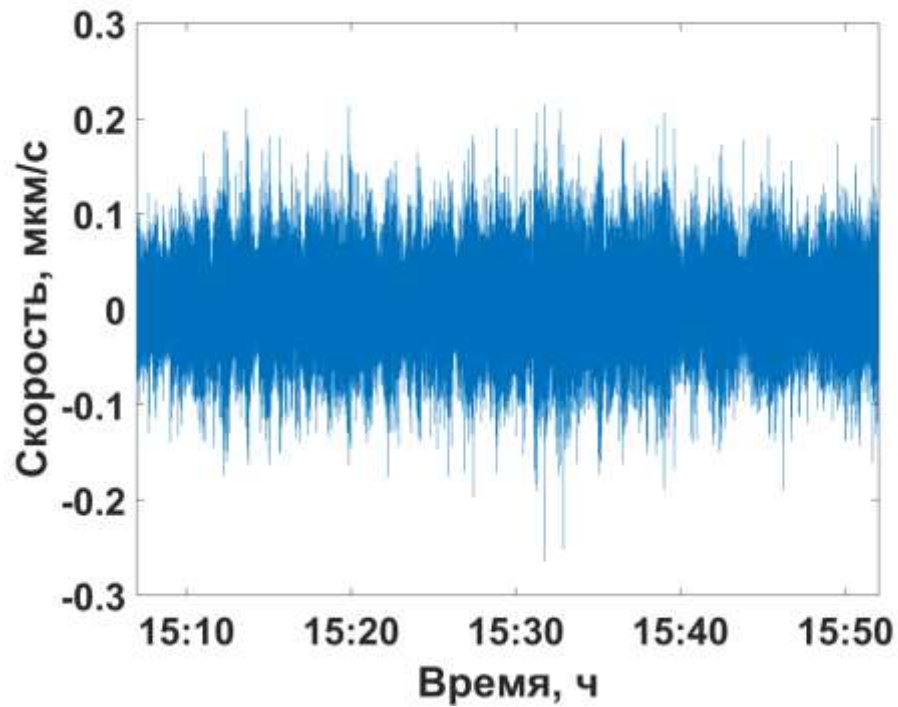


Рис. 22. Пример записи волновой формы с переносной сейсмостанции за 05.07.2019

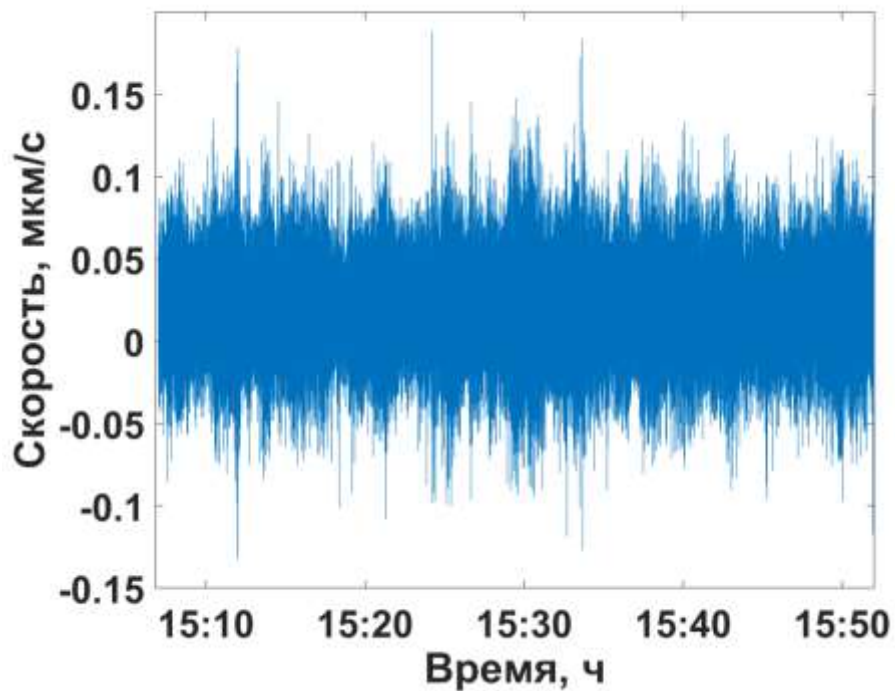


Рис. 23. Пример записи волновой формы с опорной сейсмостанции для 05.07.2019  
Для рассматриваемых сигналов были получены их амплитудные спектры.

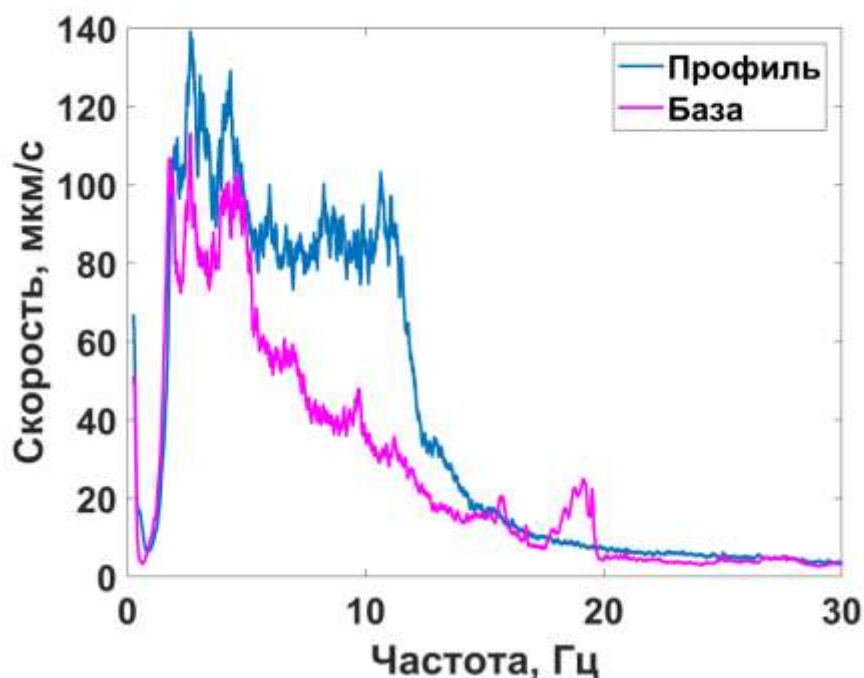


Рис. 24. Амплитудные спектры записей на профильном и опорном пунктах за 05.07.2019

Как видно из полученных данных, амплитуда колебаний на профиле на частоте 2.6 Гц превышает амплитуду на опорном пункте на 26.1 мкм/с, на частоте 4.2 Гц - на 23.5 мкм/с, на частоте 5.9 Гц - на 46.4 мкм/с, на частоте 8.2 Гц - на 56.3 мкм/с, на частоте 10.6 Гц - на 73.8 мкм/с. Также стоит отметить, что на частоте приблизительно 19 Гц наблюдается гармоника амплитудой 24.8 мкм/с, образовавшаяся, наиболее вероятно, в результате работы водоснабжающей системы, расположенной в подвальном помещении Координационно-прогностического центра ИФЗ РАН.

Также для оценки была построена спектрограмма сигнала с опорного пункта в диапазоне частот 0 – 45 Гц за период с 12.07.2019 по 17.07.2019, с целью изучения закономерности изменения сейсмического фона в зависимости от времени суток и дня недели.

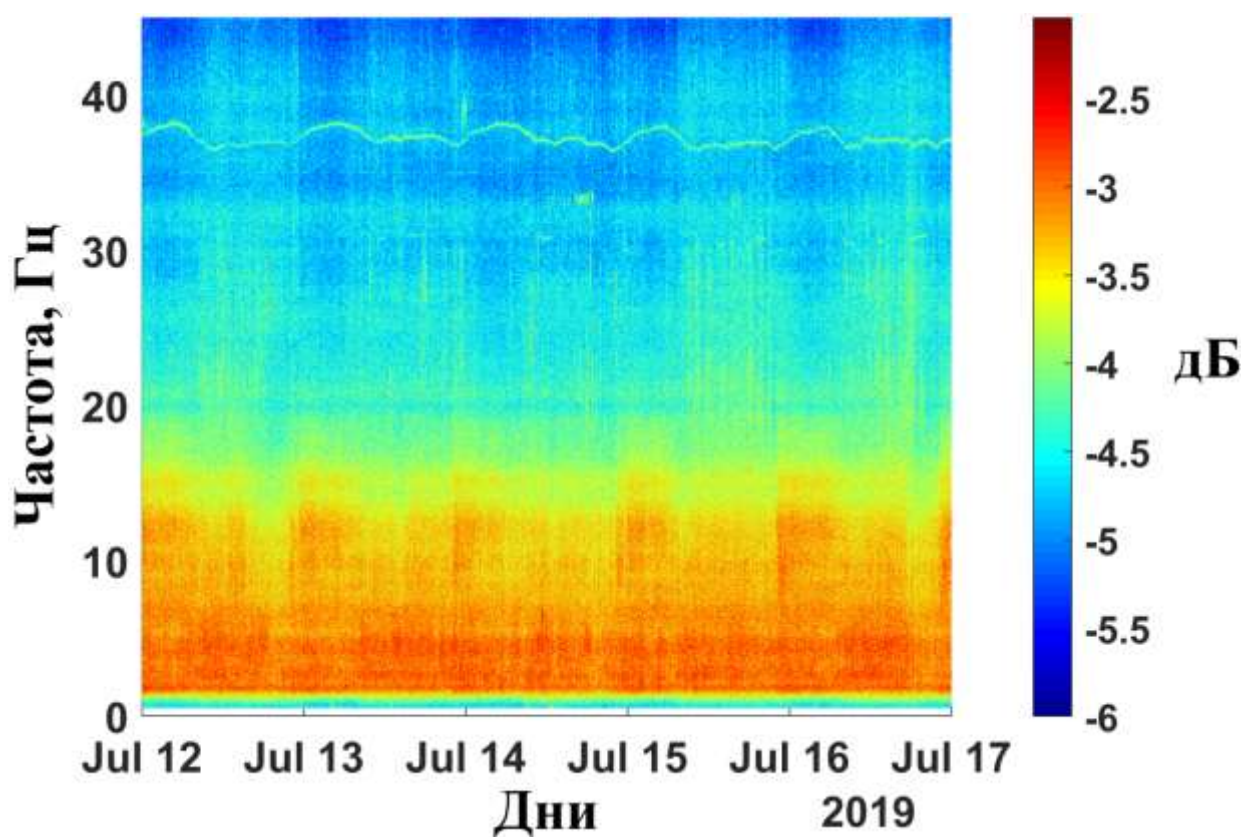


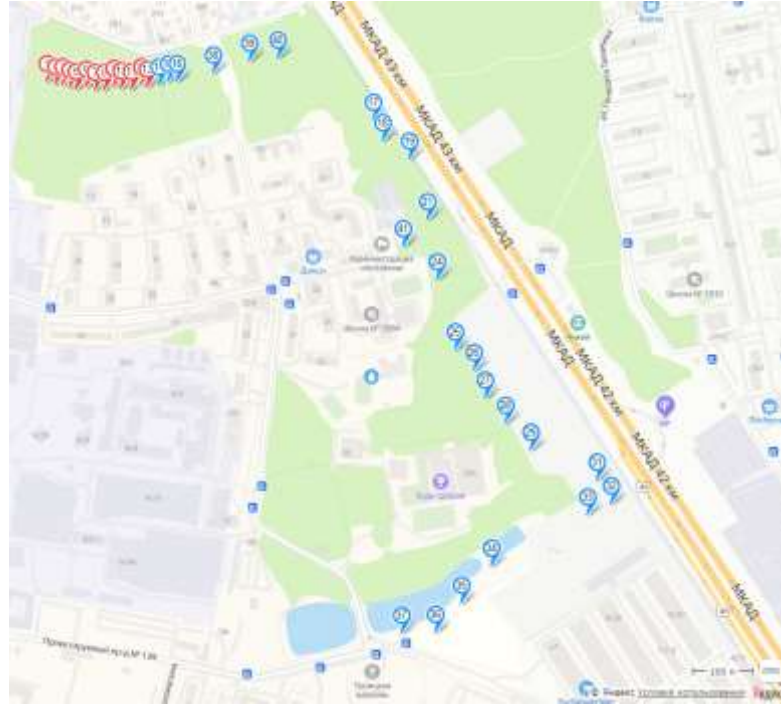
Рис. 25. Спектрограмма сигнала с опорного пункта в период с 12.07.2019 по 17.07.2019

Из полученных данных видно, что наиболее существенный вклад в сейсмическое поле вносят колебания в диапазоне частот 2 – 13,5 Гц по большей части, создаваемые автомобильными транспортными средствами. Также наблюдается снижение сейсмической активности в ночное время суток. Расчёт данной спектрограммы проводился относительно опорного значения виброскорости –  $5 \cdot 10^{-8}$  м/с, соответствующего 0 Дб, установленного санитарными нормами и правилами.

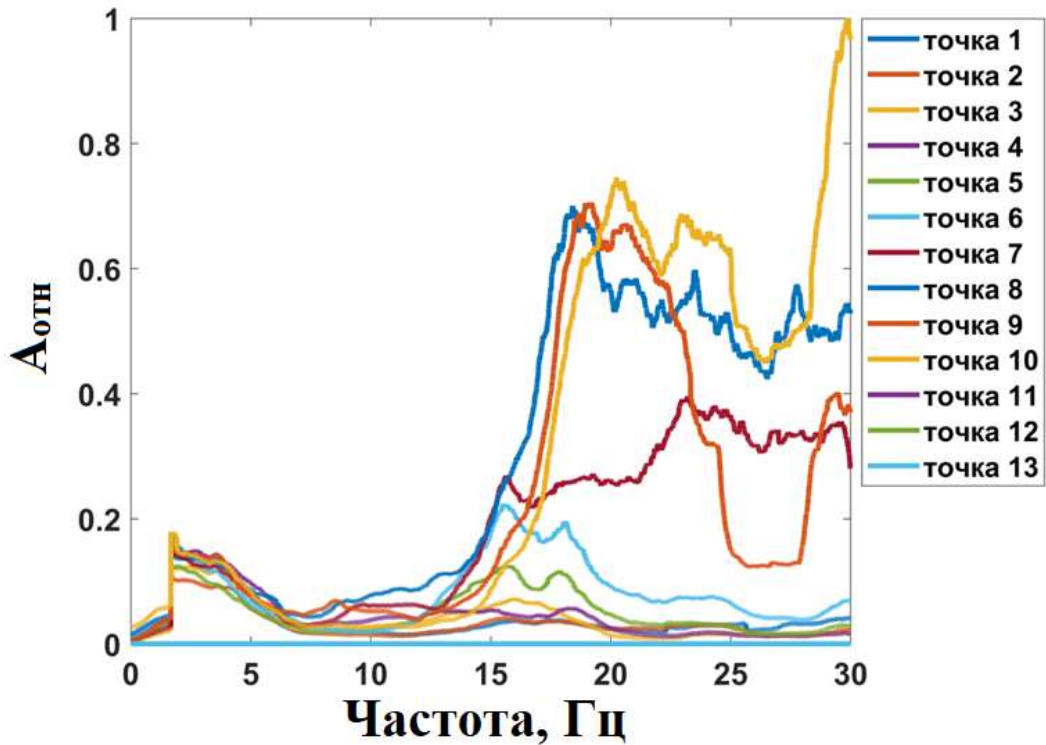
Таблица 4. Классификация источников микросейсмического шума в зависимости от частоты

Источник шума	Частоты, Гц
Естественные микросейсмы	0,1 – 0,5
Метеорологические условия	0,5 – 2

Далее были рассчитаны и построены кривые отношения спектров профиль/база для некоторых пикетов на изучаемой территории.



a)

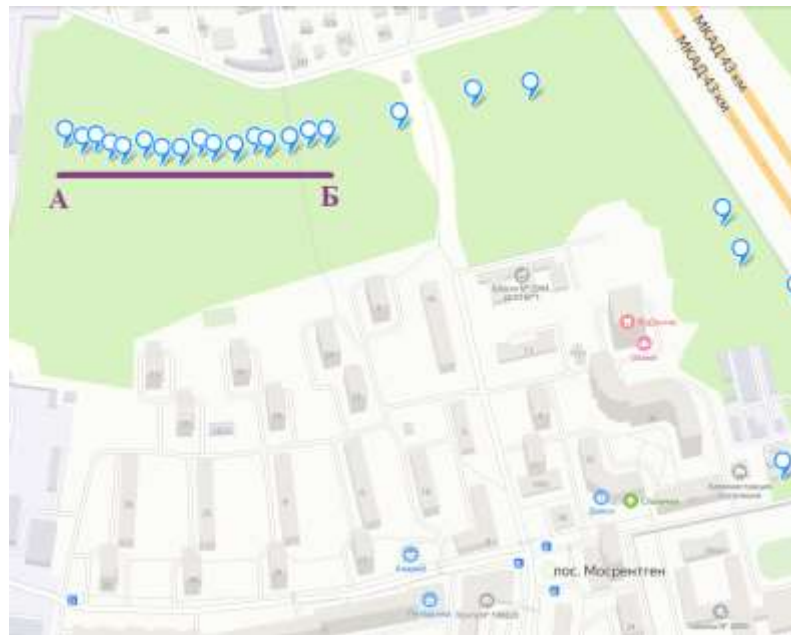


б)

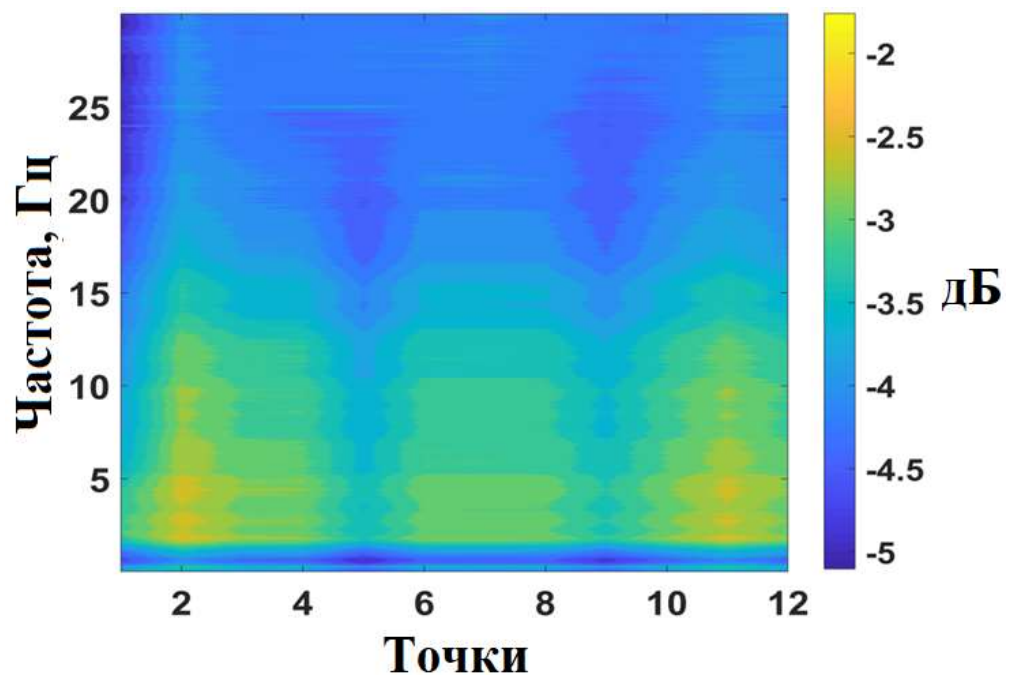
Рис. 26. Усреднённое отношение спектров на некоторых пунктах наблюдений: а) точки профиля на исследуемой территории, для которых были рассчитаны отношения спектров (отмечены красным цветом); б) усреднённое отношение спектров

Как видно из полученных данных, интенсивность сейсмического шума, наиболее сильно отличающаяся от такого же параметра на базовом пункте, характерна для начальных точек профиля, расположенного на лесной территории, в частотной полосе 15 – 30 Гц.

Затем были рассчитаны и построены картины распределения отношения спектральных амплитуд на измерительных пунктах и опорной станции для участка исследуемой территории.

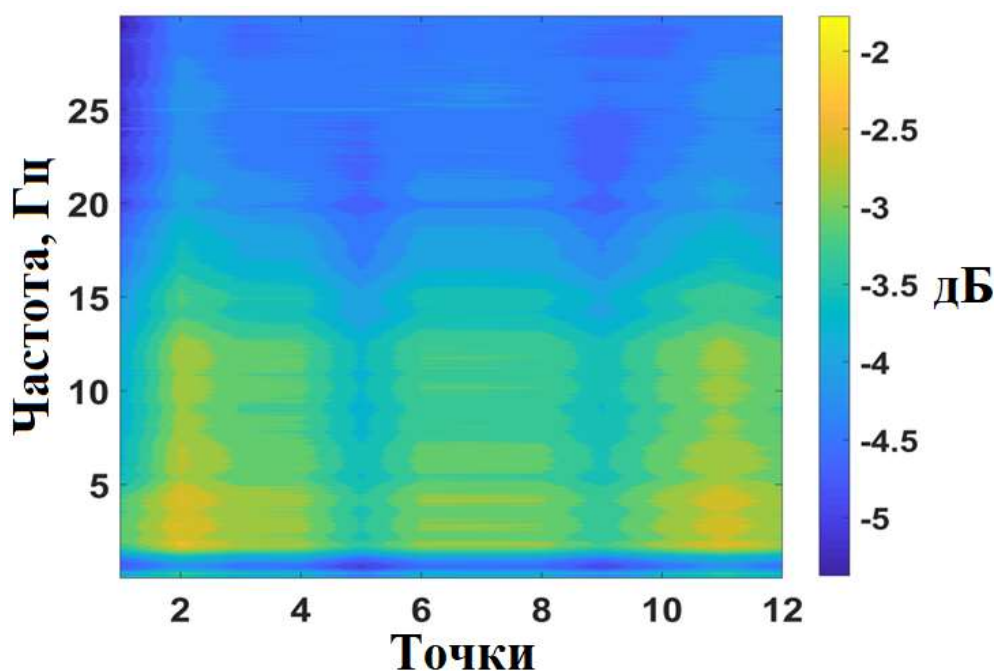


а)



б)





в)

Рис. 27. Распределение отношения спектральных амплитуд сигналов на измерительных пунктах и опорной станции на участке изучаемой территории (профиль А – Б): а) профиль для которого рассчитывались отношения спектральных амплитуд; б) отношения спектральных амплитуд за 12.07.2019 с 13:00 по 15:00; в) отношения спектральных амплитуд за 13.07.2019 с 01:00 по 03:00

Цветовая шкала характеризует относительную интенсивность сейсмических шумов в измерительных пикетах вдоль профиля А – Б относительно опорного пункта наблюдений в дБ.

Полученные распределения отношения спектральных амплитуд в дневное и ночное время суток практически неотличимы. Можно предположить, что наиболее интенсивным является микросейсмический шум, распространяющийся вблизи автодороги, регистрируемый на частотах 15 Гц и выше. Это объясняется интенсивным движением транспортных средств по участку автострады МКАД-ЮГ. Естественно прослеживается тенденция снижения амплитуд микросейсм по

мере отдаления от автомагистрали. Помимо автомобилей и строительной техники, определённый вклад в сейсмическое поле исследуемой территории вносит и воздушный транспорт – вертолёты и самолёты. В диапазоне частот 10 – 15 Гц последствия антропогенного воздействия не столь значительны, а колебания частотой ниже 10 Гц являются фоновыми. Стоит отметить, что в некоторых измерительных пунктах, на частоте около 2 Гц прослеживаются повышенные значения амплитуды сейсмоакустических шумов, что, наиболее вероятно, связано с изменением погодных условий (усилением ветра).

## 5.2. Построение карт распределения сейсмического загрязнения исследуемой территории

Используя карты распределения относительных интенсивностей, представленных в главе 3 (рис. 9), а именно – коэффициентов отображенных на них, полученных из соотношения передвижная/опорная точка, представляется возможным осуществлять оценку вибромикросейсмического загрязнения исследуемой территории в абсолютных значениях, в режиме реального времени. Таким образом, в качестве основного результата проведённого исследования, были получены карты распределения колебательной скорости вибросейсмического загрязнения пос. Мосрентген, Новая Москва, выраженной в децибелах.

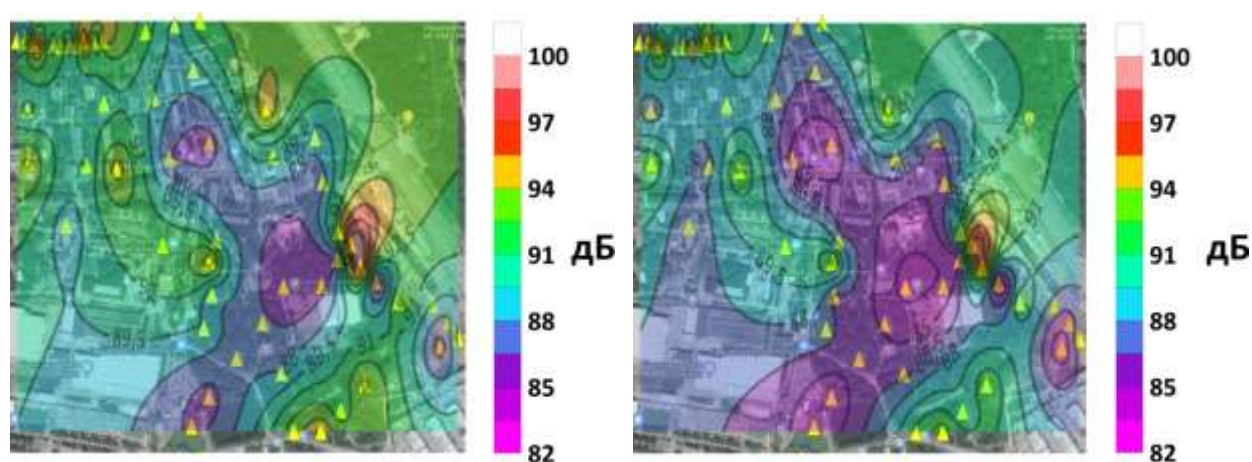


Рис. 28. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 0,1 Гц: слева – день, справа – ночь



Уровень вибростатистического фона в дневное время суток приблизительно на 3 дБ выше, чем в ночное. Наиболее шумными являются точка в районе автострады МКАД-ЮГ, а также несколько точек в лесопарковой зоне, расположенной в северной части исследуемой территории. Наиболее «тихими» являются область парка развлечений и отдыха, а также зона у пруда, рядом с Проектируемым проездом № 139.

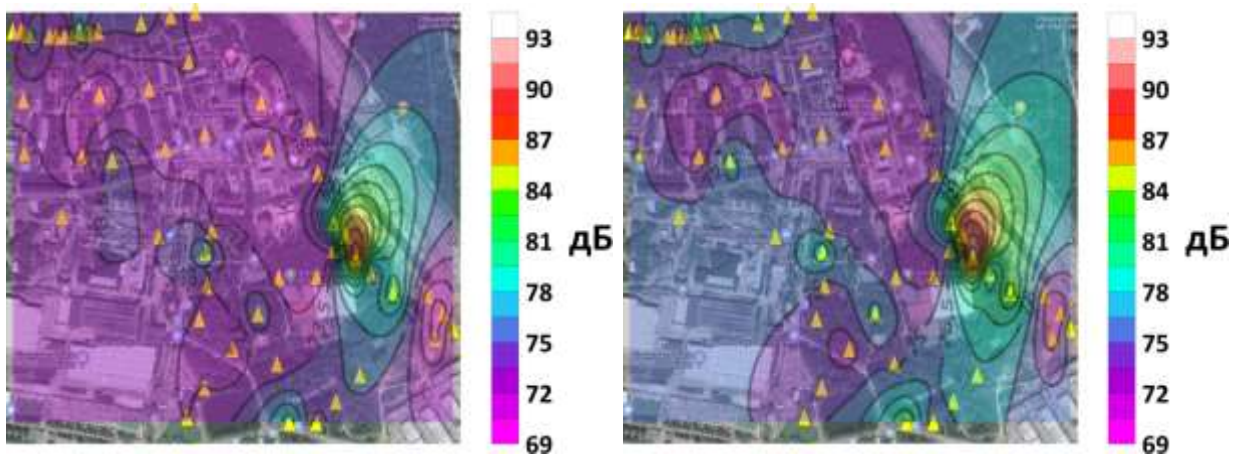


Рис. 29. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 0,5 Гц: слева – день, справа – ночь

В целом, распределение вибростатистического шума практически равномерно по всей площади исследования, за исключением области в районе участка автострады МКАД-ЮГ, где наблюдается повышенное значение вибрационного фона, соответствующее приблизительно 88 дБ. Уровень вибростатистического фона в ночное время суток примерно на 3 дБ выше, чем в дневное.

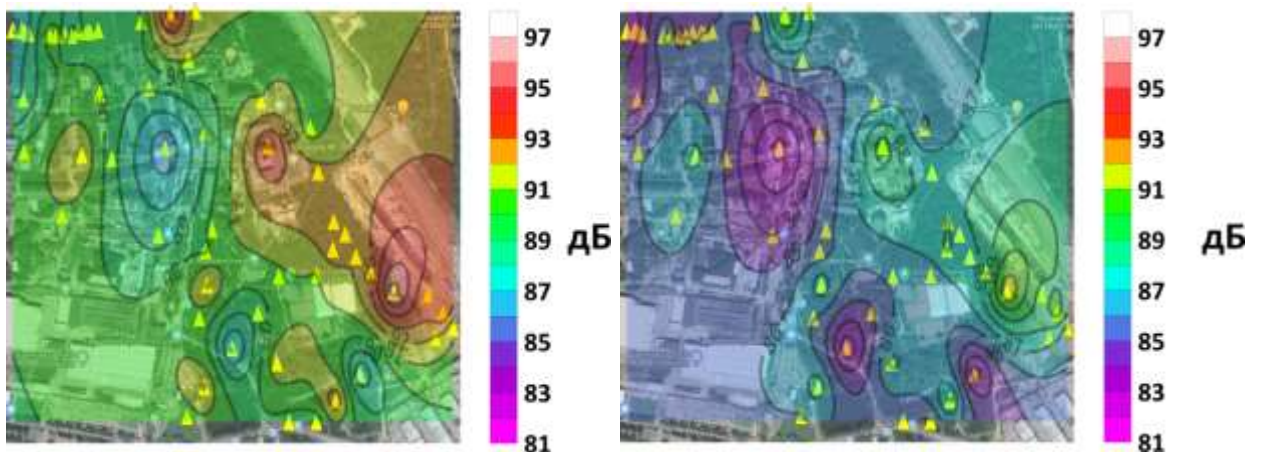


Рис. 30. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 5 Гц: слева – день, справа – ночь

Для данной частоты уровень вибросейсмического фона в дневное время суток примерно на 5 дБ превышает сейсмический фон в ночное время. Наиболее шумными на карте являются области также в районе участка автострады МКАД-ЮГ, в одной из точек в лесопарковой зоне, расположенной в северной части исследуемой территории, а также у центральной площади пос. Мосрентген, что объясняется обилием людей, а также большим количеством проезжающего общественного и личного транспорта. Уровень вибросейсмического фона в выше указанных областях составляет приблизительно 93 дБ.

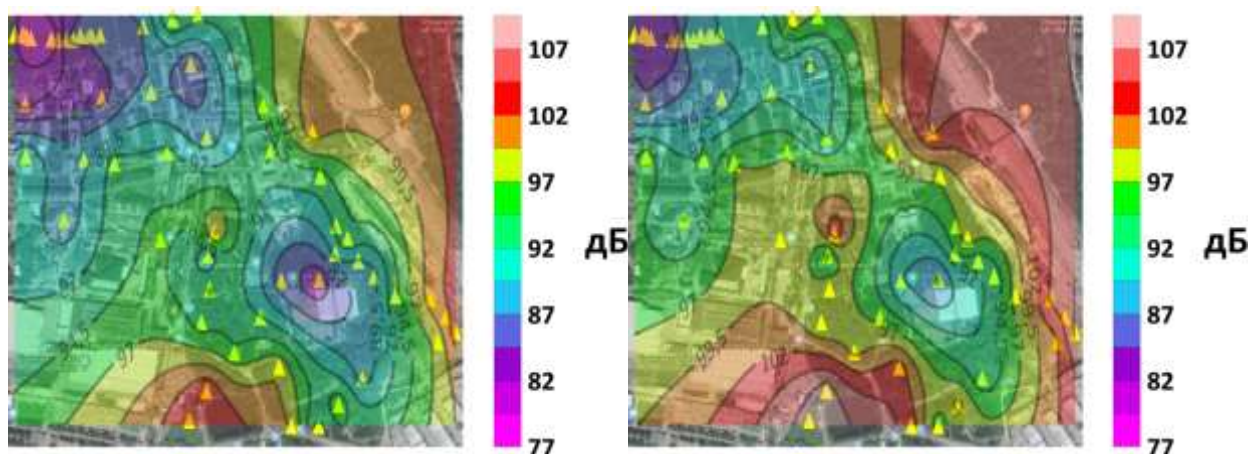


Рис. 31. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 10 Гц: слева – день, справа – ночь

Уровень шума в ночное время суток выше, чем в дневное примерно на 3-5 дБ. Наиболее высокий уровень вибромикросейсмического загрязнения зафиксирован вблизи участка автострады МКАД-ЮГ, а также рядом с водоёмом у Проектируемого проезда № 139 и составляет около 99-102 дБ в дневное время суток и 102-105 дБ в ночное. Наиболее слабый уровень вибрационного фона наблюдается в лесопарковой зоне, в северной части площади исследования и составляет 80-82 дБ.



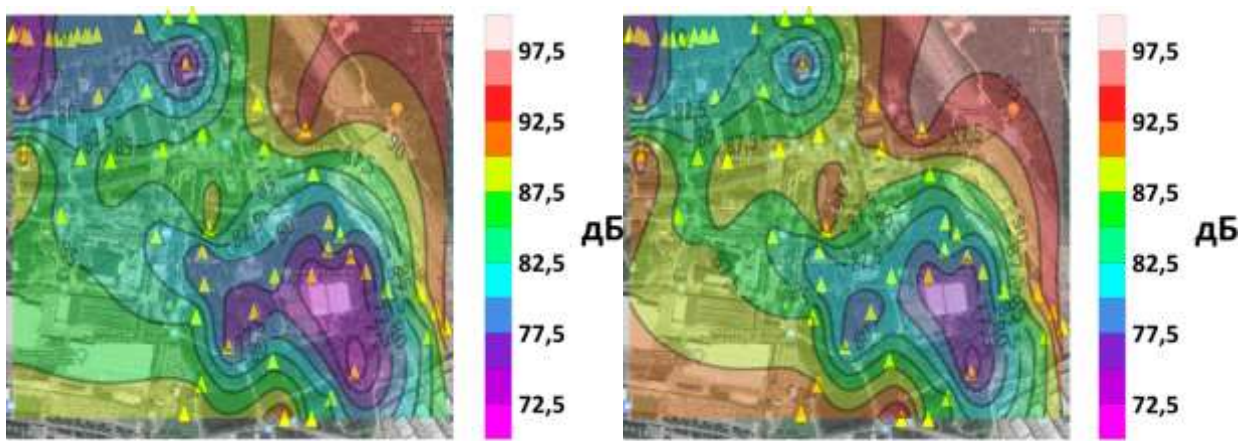


Рис. 32. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 15 Гц: слева – день, справа – ночь

В ночное время суток уровень виброесейсмического фона на 2,5 дБ выше, чем днём. Наиболее шумной, как и во многих предыдущих случаях, является область вблизи автострады МКАД-ЮГ, уровень фона в которой составляет 90 - 92 дБ днём и 92,5 – 95 дБ ночью.

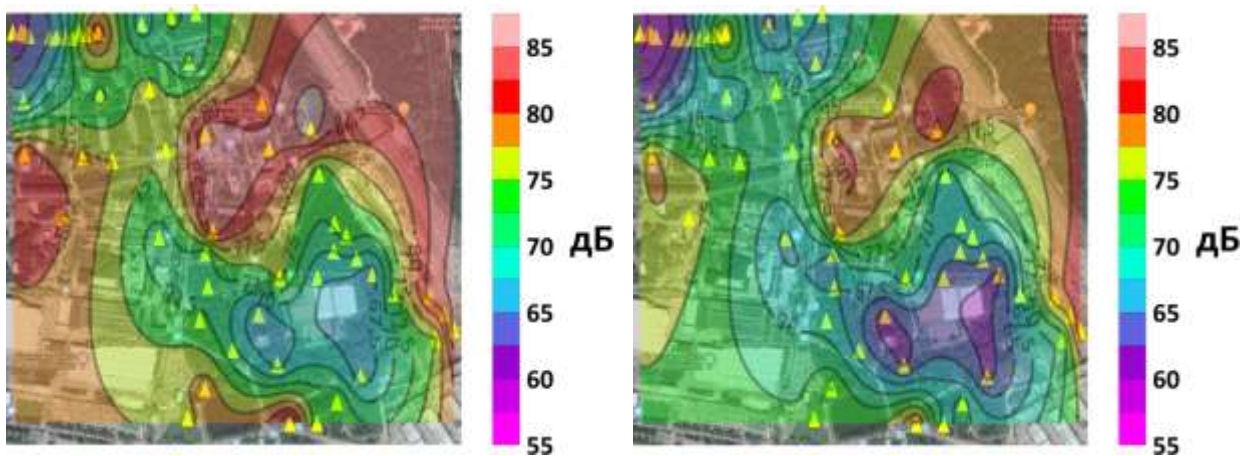


Рис. 33. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 20 Гц: слева – день, справа – ночь

В данном случае, наиболее высокий уровень виброесейсмического загрязнения составляет 82,5 – 85 дБ в дневное время суток и 80 дБ в ночное, и охватывает область вдоль всего участка автострады МКАД-ЮГ, а также КПЦ ИФЗ РАН и жилые дворы, вплоть до центральной площади пос. Мосрентген. Также высокий уровень вибрационного фона наблюдается в нескольких жилых

дворах в западной части исследуемой территории и составляет приблизительно 80 дБ. Наиболее слабый уровень вибросейсмических шумов наблюдается в парке отдыха и развлечений, вблизи спортивно-оздоровительного комплекса и составляет около 67,5 дБ в дневное и 57 – 65 дБ в ночное время суток.

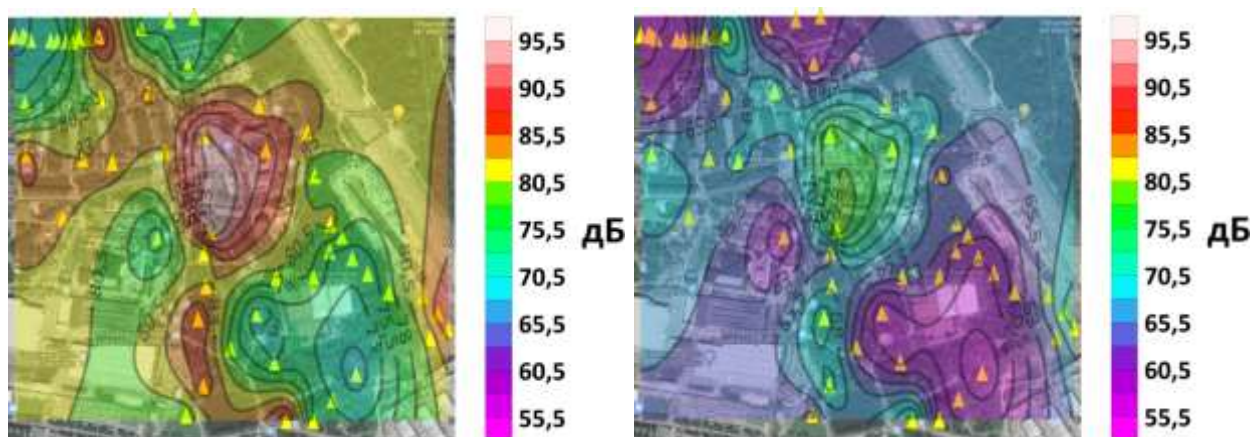


Рис. 34. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 25 Гц: слева – день, справа – ночь

Для данной частоты характерно наиболее сильное различие уровней вибросейсмического фона в дневное и ночное время суток, которое составляет 15 дБ. Наиболее высокий уровень вибрационного загрязнения характерен для центральной площади пос. Мосрентген и составляет 90 - 93 дБ. Также он охватывает близлежащие жилые дворы относительно центральной площади и наблюдается в одной из точек в лесопарковой зоне, расположенной в северной части площади исследования, и в одном из жилых дворов, находящемся в западной её части и варьируется от 82,5 до 90 дБ. Помимо упомянутого, высокий уровень шума зафиксирован в нескольких точках в южной части территории – в парке развлечений и отдыха, рядом со скейт-парком и рядом с водоёмом, вблизи Проектируемого проезда № 139 и составляет 85 дБ. Наиболее низкие значения вибромикросейсмического загрязнения характерны для практически всего парка развлечений и отдыха – 73 – 78 дБ днём и 58 – 63 дБ ночью, и для лесопарковой зоны, расположенной в северной части пос. Мосрентген – 75 – 77 дБ днём и 57 – 60 дБ ночью.

Далее будут рассмотрены карты распределения вибромикросейсмического загрязнения по исследуемой площади для среднегеометрических частот октавных полос.

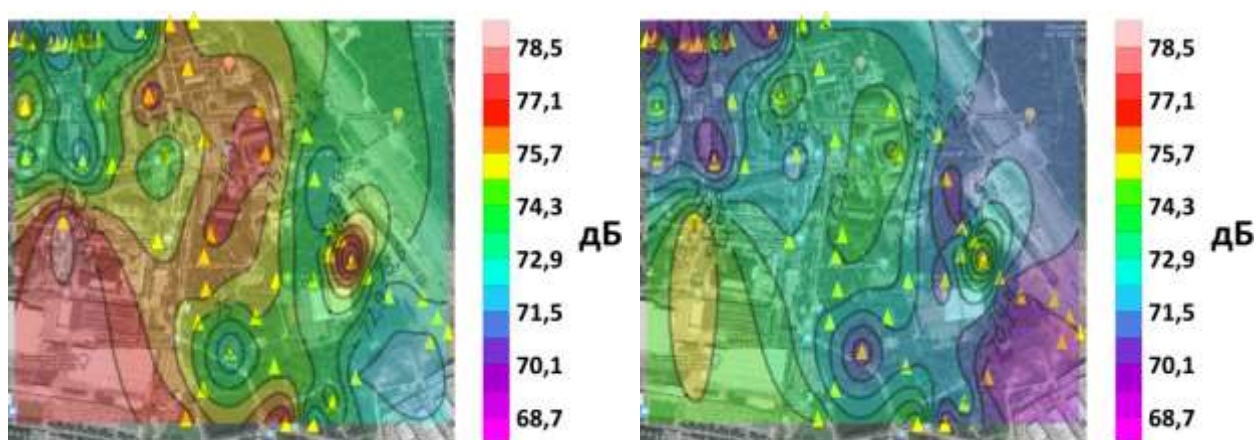


Рис. 35. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 1 Гц: слева – день, справа – ночь

Как видно из полученных данных, уровень сейсмического фона в дневное время суток приблизительно на 3 дБ превышает аналогичный показатель за ночной период. Наиболее «сильными» с точки зрения вибромикросейсмического загрязнения являются центральная площадь, а также некоторые близлежащие жилые зоны – 75 – 76 дБ днём и 73 дБ ночью, точка вблизи участка МКАД – 78 дБ днём и 75 дБ ночью, а также в одном из жилых дворов, расположенном в западной части пос. Мосрентген – 76 – 79 дБ днём и 73 – 75 дБ ночью. Наиболее «слабыми» с точки зрения вибромикросейсмического загрязнения являются область вблизи строительного рынка «Славянский мир» - 73 дБ днём и 70 дБ ночью, а также в лесопарковой зоне в северной части территории – 72 – 73 дБ днём и 68 – 70 дБ ночью. Стоит отметить, что для рассматриваемой частоты существует допустимый уровень вибрационного воздействия для жилых помещений, установленный специализированными нормативно-правовыми актами, составляющий 76 дБ [61]. Таким образом, превышение допустимого значения наблюдается лишь в дневное время суток в центральной области пос. Мосрентген, а также в западной его части в одном из жилых дворов. В ночное



время превышений допустимого уровня вибрационного воздействия не наблюдается.

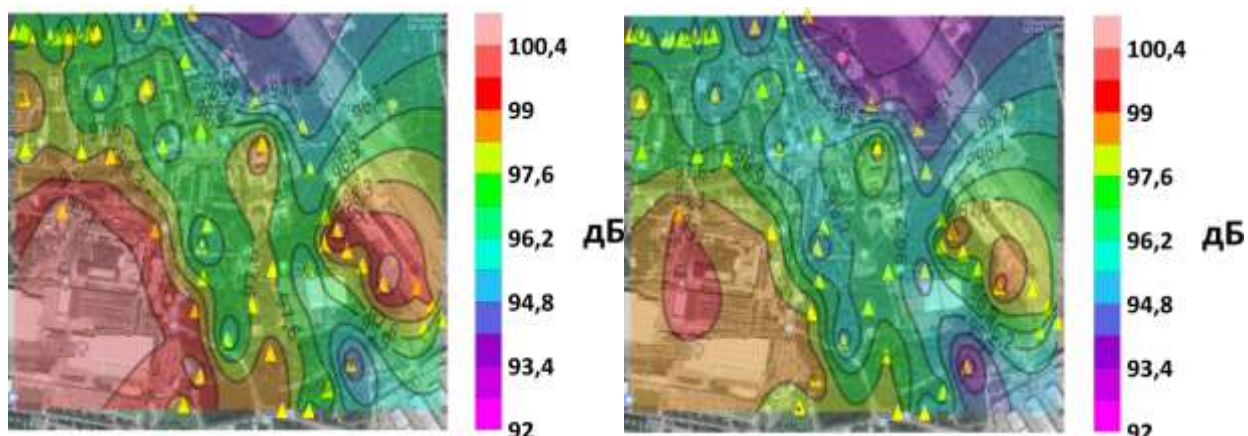


Рис. 36. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 2 Гц: слева – день, справа – ночь

Уровень вибромикросейсмического загрязнения в дневное время суток превышает аналогичный параметр за ночной период примерно на 1 дБ. Наиболее высокий уровень вибрационного фона наблюдается в западной, юго-западной части исследуемой площади – 99 дБ днём и 98 – 99 дБ ночью, а также вблизи участка автострады МКАД-ЮГ – 98 – 99 дБ днём и 97 – 98 дБ ночью. Наиболее низкий уровень вибромикросейсмического загрязнения зафиксирован в северной части пос. Мосрентген в лесопарковой зоне в районе участка автострады МКАД-ЮГ – 93 – 94 дБ днём и 92 – 93 дБ ночью. Допустимый уровень вибрационного воздействия для рассматриваемой частоты, установленный нормативно-правовыми актами, составляет 76 дБ [61]. Соответственно, в данном случае наблюдается повсеместное превышение допустимого значения, как в дневное, так и в ночное время суток. Наименьшее превышение составляет 18 дБ в дневной и 17 дБ в ночной периоды, наибольшее – 24 дБ днём и 23 дБ ночью.

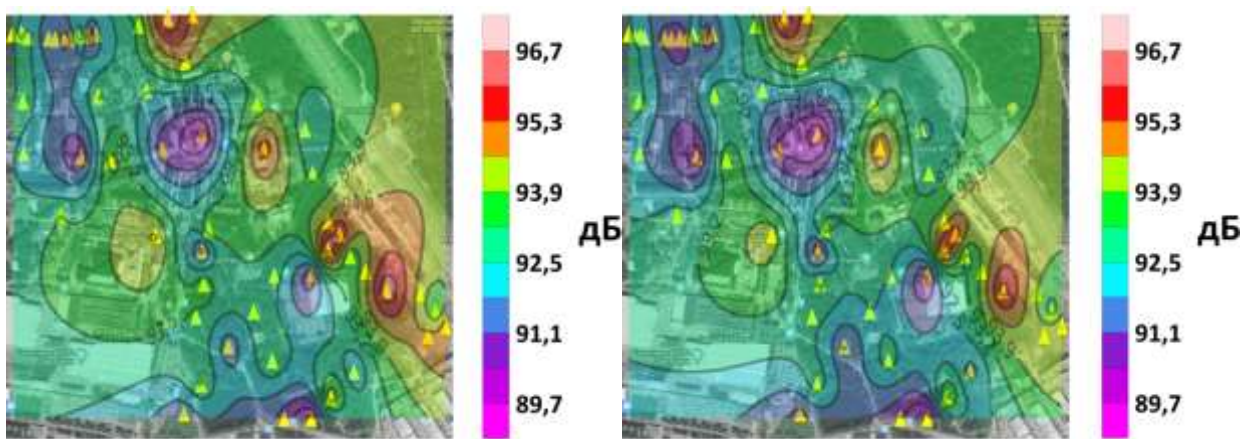


Рис. 37. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 4 Гц: слева – день, справа – ночь

Для рассматриваемой частоты разницы в уровнях вибросейсмического фона в дневное и ночное время суток практически не наблюдается. Наиболее «сильными» с точки зрения шумового загрязнения являются небольшой участок в лесопарковой зоне в северной части – 95 – 96 дБ, в одном из жилых дворов в районе центральной площади – 94 дБ и вблизи участка автострады МКАД-ЮГ – 94 – 95 дБ. Наиболее «слабыми» с точки зрения вибромикросейсмического загрязнения являются также один из жилых дворов в центральной части территории – 89 – 91 дБ, в северо-западной части территории, включая лесопарковую зону и жилые дворы – 89 – 91 дБ и в южной части исследуемой площади, вблизи водоёмов – 89 – 90 дБ. Допустимый уровень вибрационного фона для данной частот составляет 71 дБ [61]. Соответственно, в данном случае, как и в предыдущем, наблюдаются превышения допустимого уровня по всей площади исследования. Наименьшее значение превышения – 18 дБ, наибольшее – 25,5 дБ.

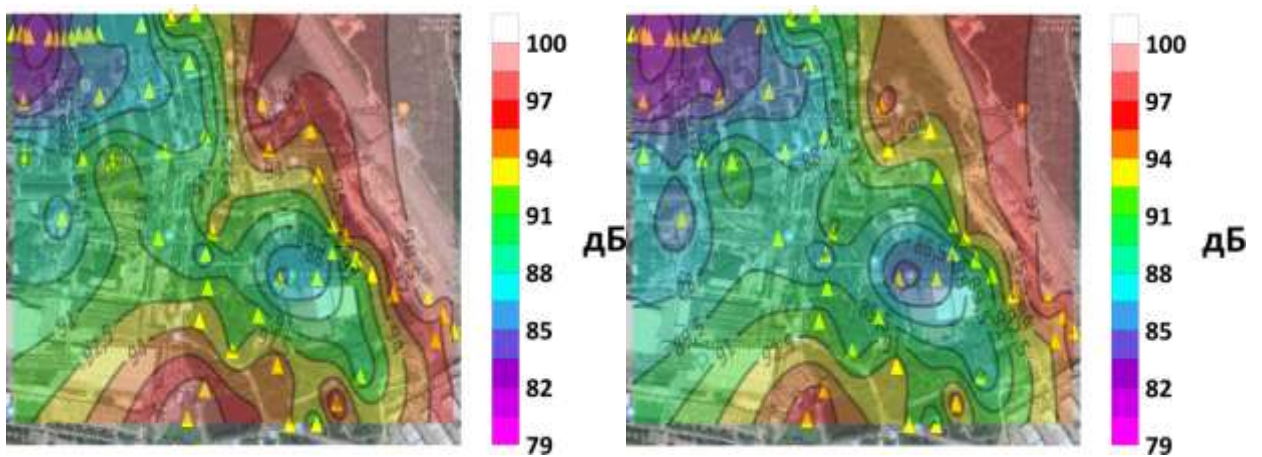


Рис. 38. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 8 Гц: слева – день, справа – ночь

Уровень вибрационного фона для данной частоты в дневное время суток выше, чем в ночное примерно на 1 – 2 дБ. Наиболее шумными являются область, охватывающая весь участок автострады МКАД-ЮГ – 95,5 – 98 дБ днём и 94 – 97 дБ ночью, а также южная часть пос. Мосрентген вблизи водоёмов и Проектируемого проезда № 139 – 94 – 97 дБ днём и 92,5 – 96 дБ ночью. Наименее шумными являются зона парка развлечений и отдыха – 88 дБ днём и 86,5 дБ ночью, а также лесопарковая зона в северо-западной части исследуемой территории – 82 – 83,5 дБ днём и 82 дБ ночью. Согласно специализированным нормативно-правовым документам, допустимый уровень вибрационного шума для рассматриваемой частоты составляет 67 дБ [61]. Следовательно, наблюдается повсеместное превышение допустимого уровня, при этом наименьшее превышение составляет 14 дБ днём и 12 дБ ночью, наибольшее – 23 дБ днём и 21 дБ ночью.



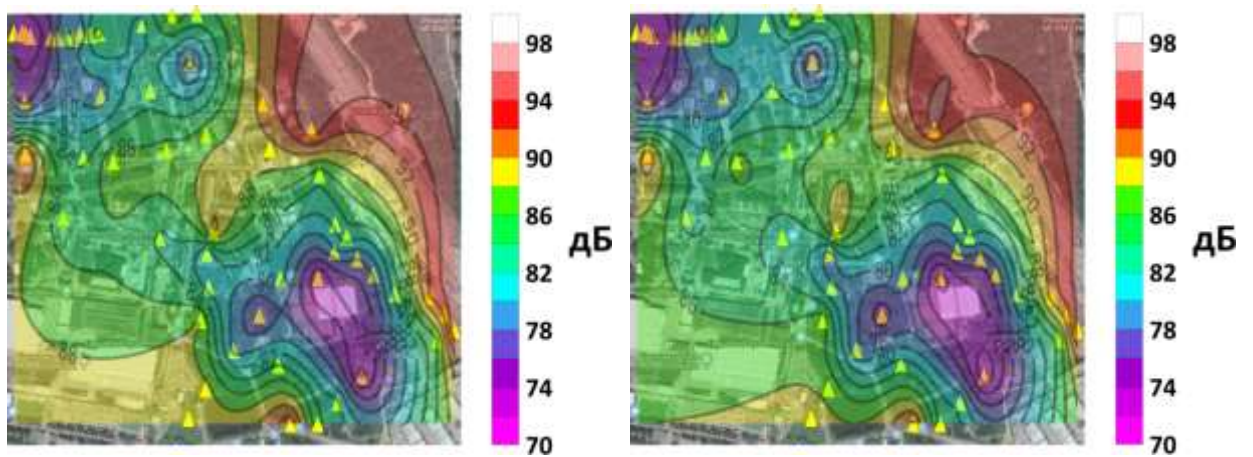


Рис. 39. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 16 Гц: слева – день, справа – ночь

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что для рассматриваемой частоты уровень вибромикросейсмического загрязнения днём примерно на 2 дБ выше, чем ночью. Наиболее высокие значения вибрационного фона наблюдаются в области, охватывающей весь участок автострады МКАД-ЮГ – 92 – 96 дБ днём и 90 – 94 дБ ночью, а также в точке, расположенной в западной части исследуемой площади в одном из жилых дворов – примерно 90 дБ днём и 88 дБ ночью. Самые низкие значения виброрейсмического фона наблюдаются в парке развлечений и отдыха – 72 – 74 дБ, а также в северо-западной части исследуемой территории в лесопарковой зоне – 70 – 72 дБ. Допустимый уровень вибрационного воздействия, согласно санитарным нормам, для данной частоты составляет 67 дБ [61]. Соответственно для рассматриваемого случая наблюдается повсеместное превышение допустимого значения. Наименьшее превышение составляет 4,5 дБ днём и 3,5 дБ ночью, наибольшее – 21 дБ днём и 20 дБ ночью.

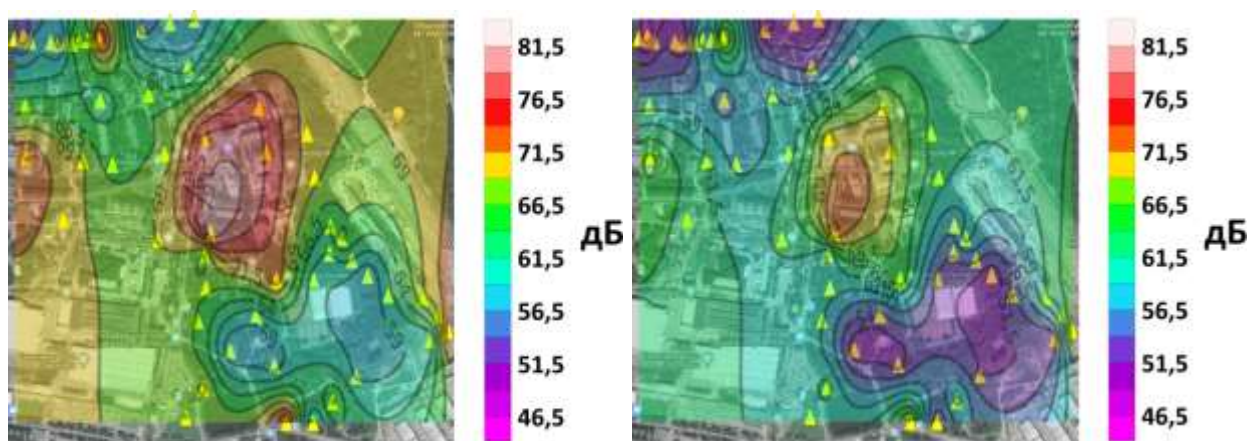


Рис. 40. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 31,5 Гц: слева – день, справа – ночь

Для рассматриваемой частоты уровень вибросейсмического фона в дневное время суток превышает аналогичный параметр за ночной период примерно на 8 дБ. Наиболее шумной является область, охватывающая центральную площадь пос. Мосрентген и близлежащие дворы – 71,5 – 79 дБ днём и 66,5 – 69 дБ ночью. Также относительно шумной является жилая зона, расположенная в западной части площади исследования – 71,5 дБ днём и 64 дБ ночью. Наименее шумными являются зона парка развлечений и отдыха – 56,5 – 59 дБ днём и 51,5 – 54 дБ ночью, а также лесопарковая зона в северной части пос. Мосрентген – 51,5 – 57 дБ днём и 47 – 50 дБ ночью. Согласно санитарным нормам, допустимый уровень вибрационного фона для рассматриваемой частоты составляет 67 дБ. Следовательно, в данном случае, днём превышения наблюдаются в центральной и западной частях исследуемой территории, минимальное превышение составляет 2 дБ, максимальное – 12 дБ. Ночью превышения наблюдаются лишь в центральной части пос. Мосрентген и составляют 2 – 4,5 дБ.

Проанализировав все полученные результаты, можно сделать вывод о том, что наиболее высокий уровень вибромикросейсмического загрязнения характерен для частоты 10 Гц, наиболее низкие уровни сейсмического фона зафиксированы на частоте 31,5 Гц. Наиболее широкий диапазон значений уровней вибросейсмического шума наблюдается на частоте 25 Гц – от 53 до 96 дБ (43 дБ).

Довольно часто упоминалось, что наиболее сильно зашумлённым местом исследуемой территории является область, охватывающая участок автомагистрали МКАД-ЮГ. Наиболее сильно это проявляется в диапазоне частот от 5 до 25 Гц. Это объясняется тем, что автомобильные транспортные средства, движущиеся по данной автодороге, генерируют вибрационные шумы именно в рассматриваемом диапазоне частот. Минимальное превышение допустимого уровня вибрационного шума, установленного специализированными нормативно-правовыми актами СНиП и СанПиН [61] зафиксировано на частоте 31,5 Гц и составляет 2 дБ. Максимальное превышение допустимого уровня вибрационного шума зафиксировано на частоте 4 Гц и составляет 25,5 дБ.

### **5.3. Измерение акустических шумов на территории пос. Мосрентген, Новая Москва**

Помимо основных измерений вибромикросейсмического загрязнения, была проведена серия измерений уровня акустического загрязнения на территории пос. Мосрентген, г. Москва в дневное и ночное время суток. В настоящей работе, под акустическим загрязнением подразумевается шум инфразвукового и звукового диапазонов, распространяющийся в воздухе и превышающий допустимые нормативные значения. Измерения проводились при помощи акустического шумомера компании ОКТАВА «ЭКОФИЗИКА 110-А», к которому были подключены микрофонные капсулы с предусилителями. Длительность записи в каждой точке составляла 3 минуты.



Рис. 41. Акустический шумомер ОКТАВА «ЭКОФИЗИКА 110-А»: слева – измерительный блок, справа – микрофонный капсюль с предусилителем и ветрозащитой на треножном штативе

Далее приведены характеристики шумомера.

Таблица 5. Характеристики акустического шумомера ОКТАВА «ЭКОФИЗИКА 110-А»

Параметр	Величина
Измерение инфразвука	1 – 20 Гц
Измерения звука	20 – 12500 Гц
Измерения ультразвука	12500 – 40000 Гц
Измерения общей вибрации одновременно по трём осям (X, Y, Z)	0,8 – 160 Гц
Измерения локальной вибрации одновременно по трём осям (X, Y, Z)	6,3 – 1250 Гц

В результате проведённых измерений были построены карты распределения уровней акустического шума на исследуемой территории для среднегеометрических частот октавных полос.

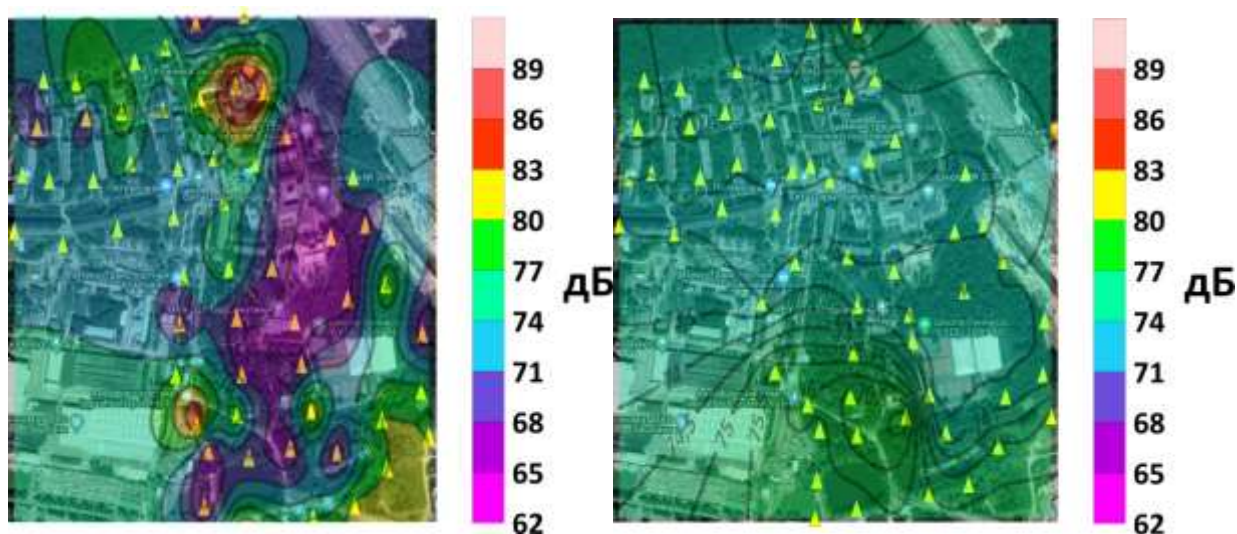


Рис. 42. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 1 Гц: слева – день, справа – ночь

В ночное время суток распределение акустического шума по исследуемой площади равномерное и его уровень практически не изменяется, и варьируется в диапазоне от 73 до 76,5 дБ. Днём наблюдается более сильное изменение уровня акустического фона. Наиболее высокие значения зафиксированы в одном из жилых дворов в северной части территории – 86 дБ и в точке, расположенной в южной части пос. Мосрентген вблизи промышленной зоны – 83 дБ. При этом область с наименьшими значениями охватывает большую территорию – КПЦ ИФЗ РАН, а также близлежащие жилые дворы, парк развлечений и отдыха и южная часть пос. Мосрентген вблизи водоёмов. Уровень шума в указанных зонах варьируется от 62 до 68 дБ.



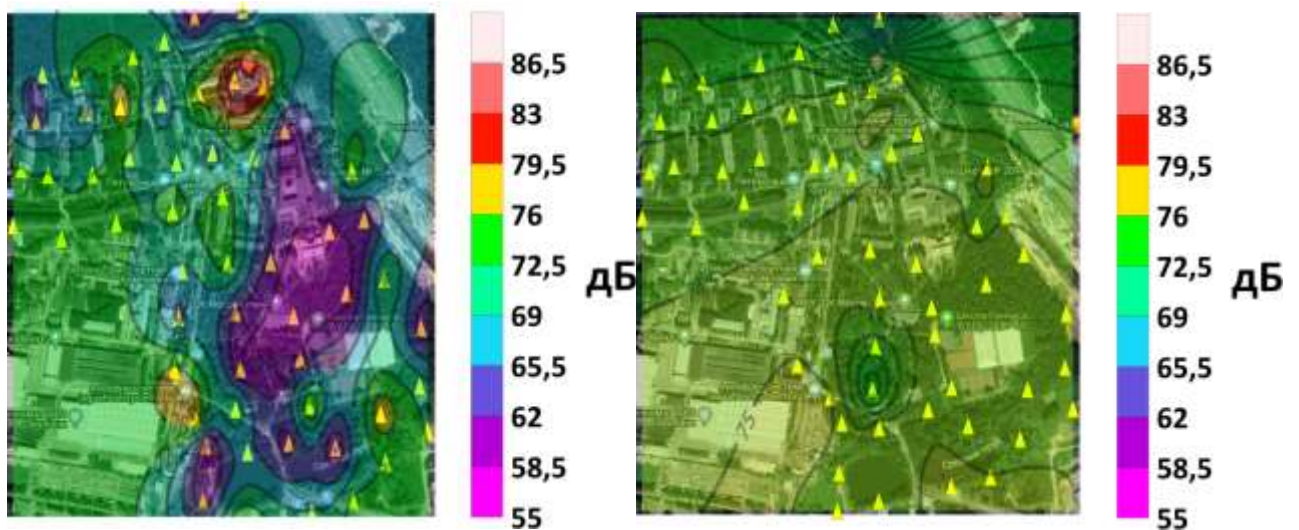


Рис. 43. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 2 Гц: слева – день, справа – ночь

Для данной частоты картина во многом идентична предыдущему случаю. В ночное время суток наблюдается равномерное распределение акустического шума по всей исследуемой территории и его значения варьируются от 67 до 75 дБ, увеличиваясь от севера к югу. В дневное время суток так же, как и в предыдущем случае наблюдаются две точки с повышенными значениями акустического фона – в одном из жилых дворов в северной части территории – 83 дБ и в южной части вблизи промышленной зоны – 76 дБ. Наименьшие значения шума так же охватывают область КПЦ ИФЗ РАН, а также близлежащие дворы, парк развлечений и отдыха и зону рядом с водоёмами в южной части пос. Мосрентген. Согласно специализированным нормативно-правовым актам СН 2.2.4/2.1.8.583-96 и СН 2.2.4/2.1.8.583-96, допустимый уровень акустического шума для рассматриваемой частоты составляет 75 дБ [62, 63]. Таким образом, превышения допустимого уровня акустического фона в дневное время суток наблюдается в одном из жилых дворов неподалёку от КПЦ ИФЗ РАН – превышение составляет 8 дБ, в одном из жилых дворов в северной части исследуемой территории – 1 дБ, в южной части территории вблизи промышленного предприятия 1 дБ, а также в лесной зоне неподалёку от участка автомагистрали МКАД-ЮГ – 1 дБ. В ночное время

суток превышение допустимого уровня акустического фона наблюдается в южной части исследуемой территории.

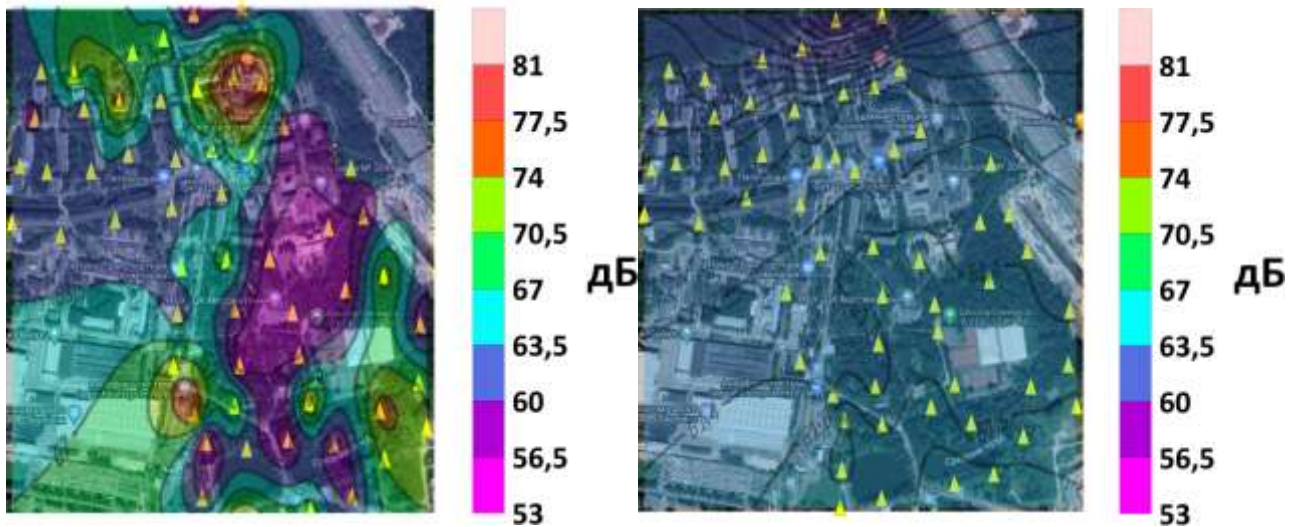


Рис. 44. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 4 Гц: слева – день, справа – ночь

Для рассматриваемой частоты картина во многом идентична предыдущим случаям. В ночной период наблюдается практически равномерное распределение акустического шума по всей площади исследования, значения которого варьируются от 59 до 62 дБ. Уровень шума увеличивается от севера к югу. В дневное время суток высокие значения акустического фона зафиксированы в одном из жилых дворов вблизи КПЦ ИФЗ РАН – 77,5 дБ, в одном из жилых дворов в северной части пос. Мосрентген – 74 дБ, в южной части территории вблизи промышленного предприятия – 74 дБ и лесной зоне, неподалёку от участка автострады МКАД-ЮГ – 74 дБ. Также в данных точках зафиксированы превышения допустимого уровня акустического шума для рассматриваемой частоты, установленного специализированными нормативно-правовыми актами и составляющего 70 дБ [62, 63] на 7,5 дБ в жилом дворе близ КПЦ ИФЗ РАН и на 4 дБ во всех остальных точках. Наиболее низкие значения акустического фона характерны для области, охватывающей КПЦ ИФЗ РАН, а также близлежащие к нему дворы, парк развлечений и отдыха, южную часть исследуемой территории

вблизи водоёмов и несколько жилых дворов в западной части пос. Мосрентген. Значения шума для указанных областей варьируются от 53 до 60 дБ.

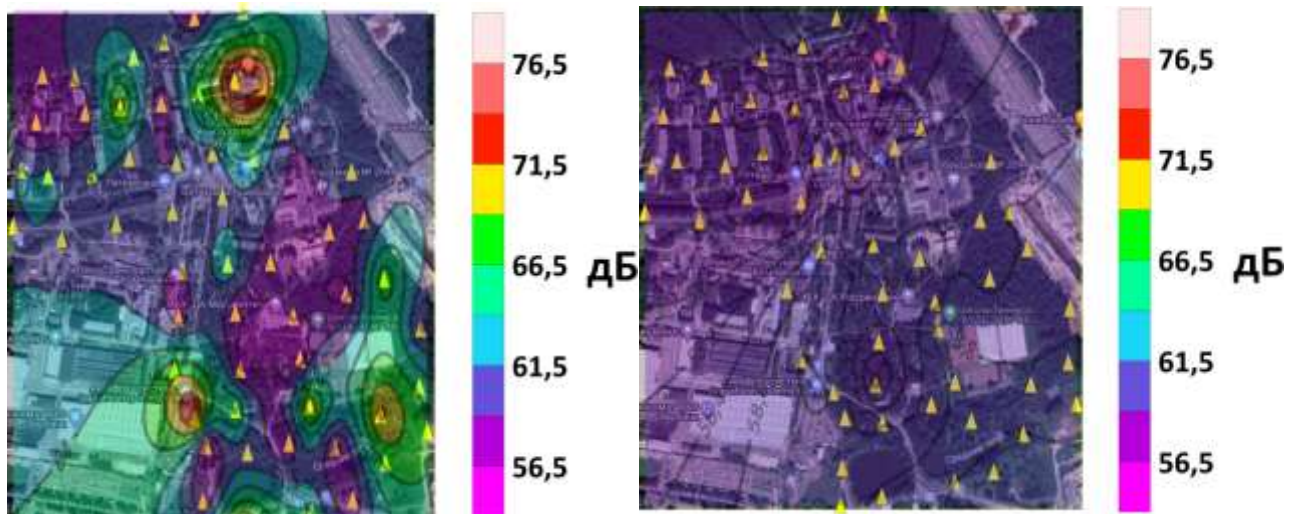


Рис. 45. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 8 Гц: слева – день, справа – ночь

В данном случае, в ночное время суток наблюдается практически равномерное распределение акустического шума по всей площади исследования, уровень которого увеличивается от севера к югу и варьируется от 57,5 до 59 дБ. В дневной период, как и в некоторых предыдущих случаях, наиболее шумными точками являются жилой двор неподалёку от КПЦ ИФЗ РАН – 76,5 дБ, в южной части территории вблизи промышленной зоны – 71,5 дБ и в лесной зоне неподалёку от участка автострады МКАД-ЮГ – 69 дБ. Также в этих точках наблюдается превышение допустимого уровня акустического шума, составляющего 65 дБ [62, 63], на 10,5, 6,5 и 4 дБ соответственно. Наиболее низкие значения акустического фона характерны для области, охватывающей КПЦ ИФЗ РАН и близлежащие к нему жилые дворы, парк развлечений и отдыха, южную часть пос. Мосрентген и жилые дворы, расположенные в северо-западной части исследуемой территории. Уровень шума в указанных областях варьируется от 56,5 до 61,5 дБ.



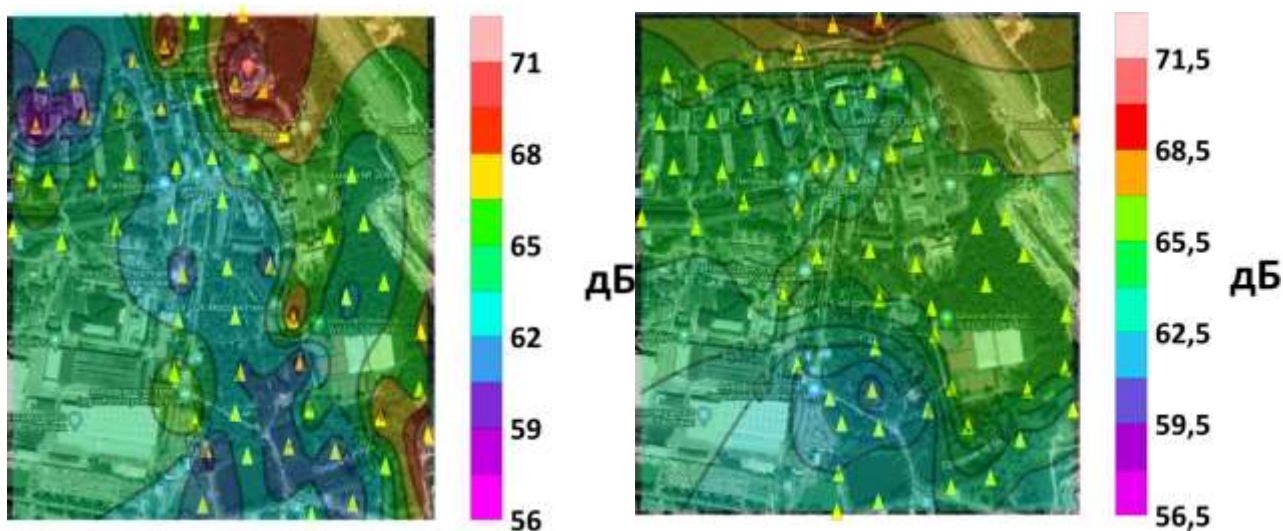


Рис. 46. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 16 Гц: слева – день, справа – ночь

Для рассматриваемой частоты наиболее высокие значения акустического загрязнения в дневное время суток наблюдаются в одном из жилых дворов в северной части исследуемой территории – 69,5 дБ, также в ещё одном из жилых дворов, расположенном на границе с лесопарковой зоной в северной части пос. Мосрентген – 68 дБ, в одной из точек в парке развлечений и отдыха – 68 дБ и в юго-восточной части территории, неподалёку от строительного рынка «Славянский мир» - 69,5 дБ. Наиболее низкие значения акустического фона наблюдаются в нескольких жилых дворах в северо-западной части исследуемой территории – 56 – 58,5 дБ. В ночное время суток наиболее высокие значения акустического шума характерны для лесной зоны вблизи участка автомагистрали МКАД-ЮГ в северной части пос. Мосрентген – 68,5 дБ. Уровень шума снижается по направлению от севера к югу исследуемой территории. Наиболее низкие его значения характерны для области, охватывающей часть парка развлечений и отдыха, а также несколько точек вблизи водоёма в южной части – 61 – 62,3 дБ. Согласно нормативным актам [62, 63] допустимый уровень акустического фона для рассматриваемой частоты составляет 60 дБ. Следовательно, в ночное время суток наблюдается повсеместное превышение допустимого уровня акустического фона. Минимальное превышение составляет 1 дБ, максимальное – 8,5 дБ. В

дневной период превышения допустимого уровня не наблюдаются лишь в нескольких жилых дворах в северо-западной части пос. Мосрентген. Во всех остальных областях исследуемой территории зафиксированы превышения, минимальное значение которого составляет 2 дБ, максимальное – 9,5 дБ.

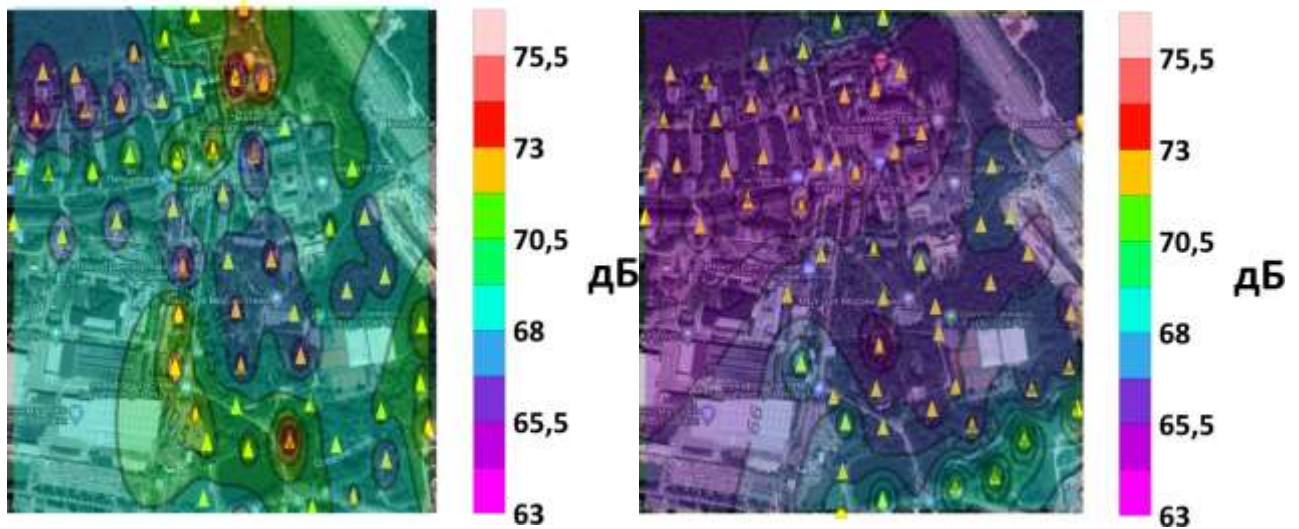


Рис. 47. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 31,5 Гц: слева – день, справа – ночь

Для рассматриваемой частоты повышенные значения акустического фона в дневное время суток наблюдаются в одном из жилых дворов в северной части площади исследования – 73 – 74,25 дБ и в одной из точек в лесопарковой зоне – 73 дБ. Наиболее низкие значения акустического загрязнения зафиксированы в нескольких жилых дворах в северо-западной части исследуемой территории – 64,25 – 65,5 дБ. В ночной период, в целом, наблюдается низкий уровень акустического фона – 63 – 66 дБ, в южной части площади исследования уровень шума немного выше – 67 – 70,5 дБ. Согласно нормативно-правовым актам, допустимый уровень акустического фона для рассматриваемой частоты составляет 73 дБ [62, 63]. Следовательно, ни в дневное, ни в ночное время суток не наблюдается превышений допустимого уровня.

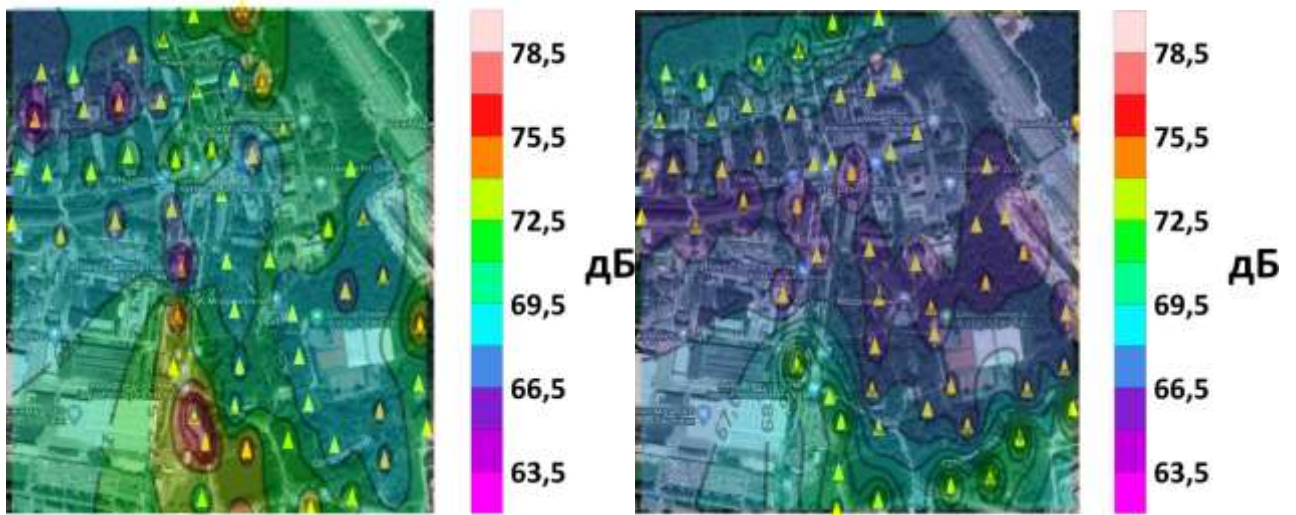


Рис. 48. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 63 Гц: слева – день, справа – ночь

В данном случае повышенные значения акустического шума в дневное время суток зафиксированы в южной части исследуемой территории вблизи промышленной зоны и у водоёма – 75,5 – 76,75 дБ. Наиболее низкие значения акустического фона наблюдаются в нескольких жилых дворах в северо-западной части пос. Мосрентген – 63 – 66 дБ. В ночное время суток наиболее высокие значения акустического шума наблюдаются в жилых дворах и вблизи лесопарковой зоны в северной части пос. Мосрентген – 69,5 – 72,5 дБ и вблизи промышленного предприятия и вблизи водоёмов в южной части – также 69,5 – 72,5 дБ. Область с наиболее низкими значениями акустического фона охватывает центральную территорию площади исследования – 63,5 – 66,5 дБ. Допустимый уровень акустического шума для рассматриваемой частоты согласно специализированным нормативно-правовым актам составляет 63 дБ [62, 63]. Следовательно, в дневной период наблюдается практически повсеместное превышение допустимого уровня, за исключением нескольких жилых дворов в северо-западной части исследуемой территории. Минимальное превышение составляет 1 дБ, максимальное – 9,5 дБ. В ночное время суток наблюдается повсеместное превышение акустического фона, минимальное превышение составляет 0,5 дБ, максимальное – 13,75 дБ.



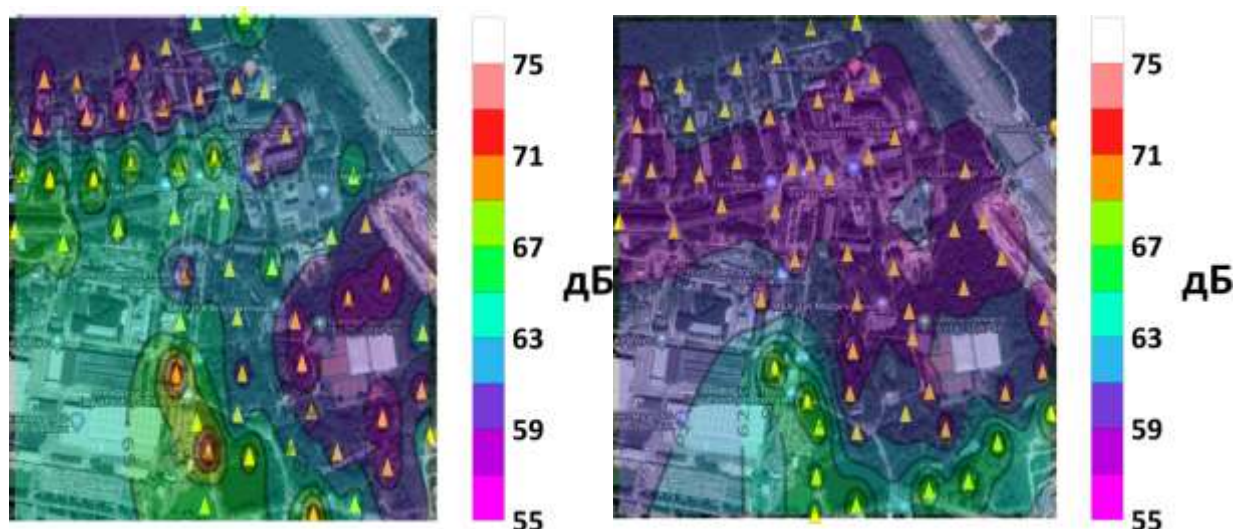


Рис. 49. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 125 Гц: слева – день, справа – ночь

В данном случае наиболее высокие значения акустического загрязнения в дневное время суток зафиксированы в южной части исследуемой территории – у промышленного предприятия – 69 – 71 дБ и вблизи водоёма – 71 – 73 дБ. Наиболее низкие значения шума наблюдаются в жилых дворах и вблизи лесопарковой зоны в северной – северо-западной части пос. Мосрентген – 57 – 59 дБ, а также в области, охватывающей юго-восточную часть исследуемой территории – часть парка развлечений и отдыха и лесную зону вблизи участка автострады МКАД-ЮГ – 57 – 59 дБ. В ночное время суток наибольшие значения акустического фона характерны для южной части площади исследования – вблизи промышленного предприятия и вблизи водоёмов – 64 – 66 дБ. На всей остальной части исследуемой территории значения шума варьируются от 57 до 61 дБ, увеличиваясь по направлению от севера к югу. Допустимый уровень акустического фона для рассматриваемой частоты, установленный специализированными нормативно-правовыми актами [62, 63] составляет 52 дБ. Следовательно, исходя из полученных результатов, наблюдается превышение допустимого уровня по всей площади исследования. Минимальное превышение в дневной период составляет 5 дБ, максимальное – 21 дБ. В ночное время суток минимальное превышение составляет 5 дБ, максимальное – 14 дБ.

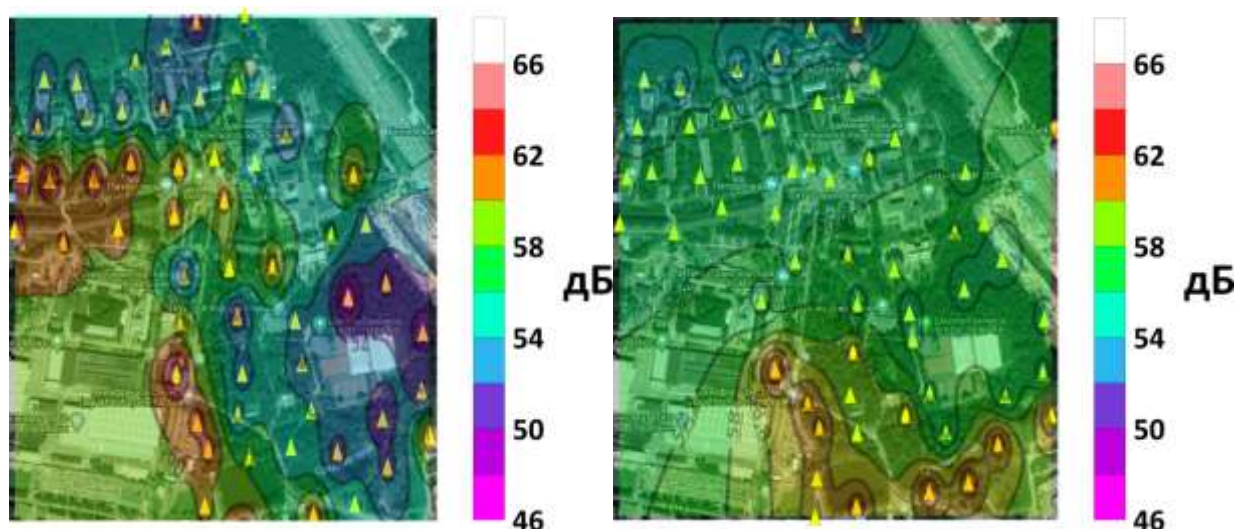


Рис. 50. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 250 Гц: слева – день, справа – ночь

Для рассматриваемой частоты наиболее высокие значения акустического загрязнения в дневной период наблюдаются в нескольких жилых дворах в западной части исследуемой территории – 62 – 64 дБ, а также в южной части территории, вблизи промышленной зоны и водоёмов – 62 дБ. Наиболее низкие значения акустического шума, как и в предыдущем случае характерны для области, охватывающей юго-восточную часть исследуемой территории – часть парка развлечений и отдыха и лесную зону вблизи участка автомагистрали МКАД-ЮГ – 48 – 52 дБ. Наиболее высокие значения акустического фона в ночное время суток характерны для южной части пос. Мосрентген – вблизи промышленного предприятия, а также вблизи водоёмов – 58 – 62 дБ. На всей остальной части площади исследования уровень шума варьируется от 50 до 57 дБ, увеличиваясь по направлению от севера к югу. Согласно специализированным нормативно-правовым актам, допустимый уровень акустического фона для рассматриваемой частоты составляет 45 дБ [62, 63]. Следовательно, исходя из полученных результатов, зафиксировано превышение допустимого уровня шумового загрязнения на всей исследуемой территории. В дневное время суток минимальное превышение составляет 3 дБ, максимальное – 19 дБ. В ночной

период минимальное превышение допустимого уровня составляет 5 дБ, максимальное – 17 дБ.

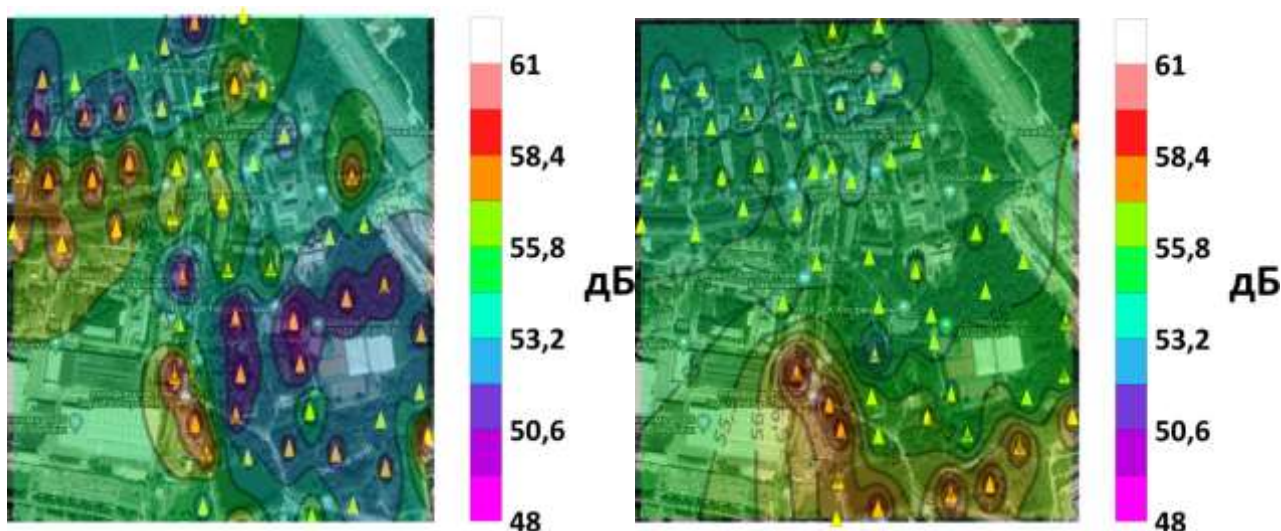


Рис. 51. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 500 Гц: слева – день, справа – ночь

Для рассматриваемой частоты картина во многом идентична нескольким предыдущим полученным результатам. Наиболее высокие уровни акустического шума в дневное время суток наблюдаются в нескольких жилых дворах в западной части пос. Мосрентген и в южной части территории, вблизи промышленной зоны и водоёмов – 57,1 – 58,4 дБ, в одной из точек вблизи КПЦ ИФЗ РАН и в одной из точек в юго-восточной части площади исследования, вблизи строительного рынка «Славянский мир» - 57,1 дБ. Наиболее низкие значения акустического загрязнения зафиксированы в парке развлечений и отдыха – 48 – 50,6 дБ, а также в нескольких жилых дворах в северо-западной части исследуемой территории – 49,3 – 51,9 дБ. В ночной период наиболее высокий уровень акустического фона зафиксирован в южной части пос. Мосрентген, вблизи промышленного предприятия и водоёмов – 57,1 – 58,4 дБ. На всей остальной части площади исследования уровень шума варьируется от 51,9 до 56,5 дБ, увеличиваясь по направлению от севера к югу. Согласно специализированным нормативно-правовым актам, допустимый уровень акустического фона для рассматриваемой



частоты составляет 39 дБ [62, 63]. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что в данном случае наблюдается превышение допустимого уровня шума на всей площади исследования. В дневное время суток минимальное значение превышения составляет 9 дБ, максимальное – 19,4 дБ. В ночной период минимальное превышение допустимого уровня шума составляет 12,9 дБ, максимальное – 19,4 дБ.

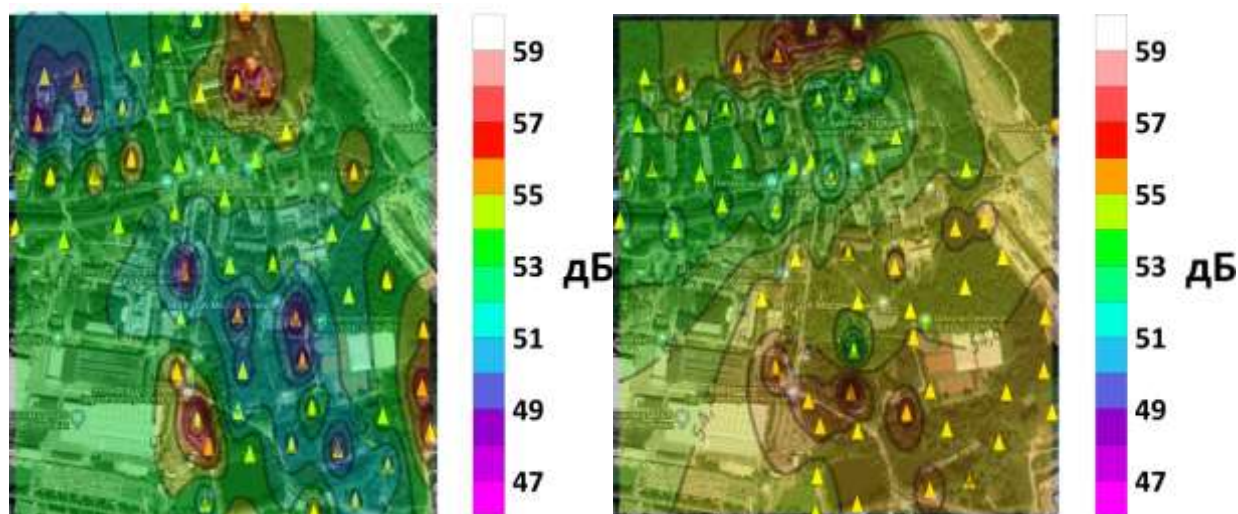


Рис. 52. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 1000 Гц: слева – день, справа – ночь

Для данной частоты наибольший уровень акустического загрязнения в дневной период зафиксирован в одном из жилых дворов, а также у лесной зоны, вблизи участка автострады МКАД-ЮГ, в северной части исследуемой территории – 58 дБ, в южной части территории, вблизи промышленной зоны и водоёма – 56 – 58 дБ, а также в юго-восточной части территории, в лесной зоне, вблизи участка автострады МКАД-ЮГ и строительного рынка «Славянский мир» - 56 дБ. Наименьшие значения акустического шума наблюдаются в нескольких жилых дворах в северо-западной части пос. Мосрентген – 48 – 50 дБ, а также в нескольких точках в парке развлечений и отдыха – 46,5 – 50 дБ. В ночное время суток наибольшие значения акустического фона зафиксированы вблизи лесной зоны в северной части исследуемой территории – 57 – 58 дБ, а также в южной

части территории вблизи промышленной зоны, вблизи водоёмов и в одной из точек парка развлечений и отдыха – 55 – 58 дБ. Наименьшие значения акустического загрязнения зафиксированы в нескольких жилых дворах в западной части площади исследования, в районе центральной площади и вблизи КПП ИФЗ РАН – 52 – 54,4 дБ. Согласно специализированным санитарным нормам и правилам, допустимый уровень акустического фона для рассматриваемой частоты составляет 35 дБ [62, 63]. Следовательно, в данном случае наблюдается превышение допустимого уровня по всей площади исследования. В дневное время суток минимальное значение превышения составляет 11,5 дБ, максимальное – 23 дБ. В ночной период минимальное превышение допустимого уровня шума составляет 18 дБ, максимальное – 23 дБ.

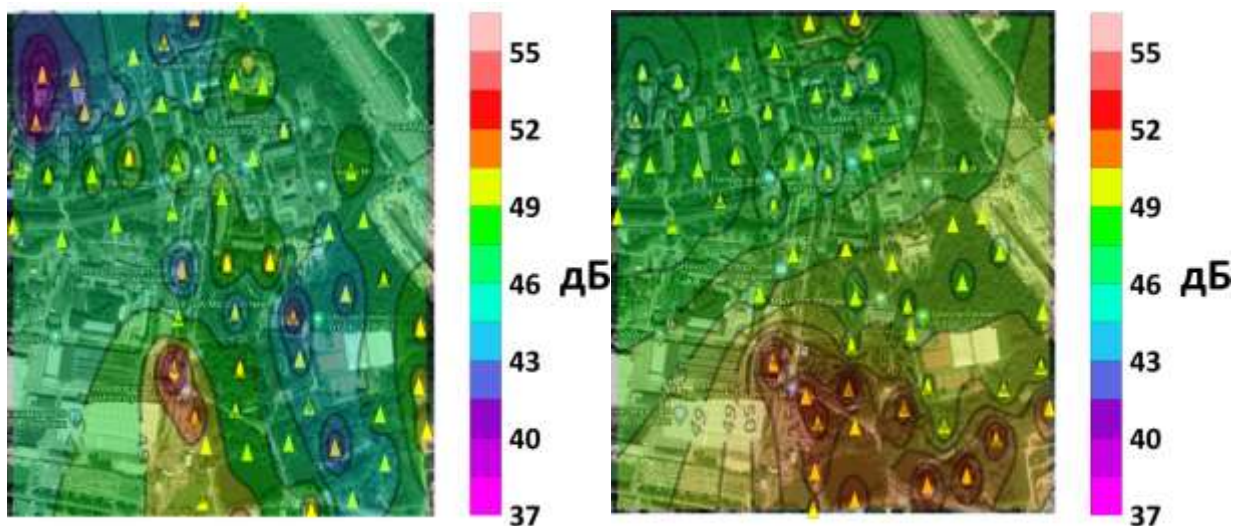


Рис. 53. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 2000 Гц: слева – день, справа – ночь

В данном случае наиболее высокие уровни акустического загрязнения в дневной период зафиксированы в южной части исследуемой территории вблизи промышленного предприятия – 50,5 – 53,5 дБ. Наименьшие значения шума наблюдаются в нескольких жилых дворах в северо-западной части пос. Мосрентген – 38,5 – 43 дБ. В ночное время суток наибольшие значения акустического фона наблюдаются в области, охватывающей южную часть



территории – вблизи промышленной зоны и водоёмов, а также в некоторых точках парка развлечений и отдыха – 50 – 55 дБ. На всей остальной части площади исследования уровень шума варьируется от 43 до 49 дБ, увеличиваясь по направлению от севера к югу. Согласно специализированным нормативно-правовым актам, допустимый уровень акустического фона для рассматриваемой частоты составляет 32 дБ [62, 63]. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что в данном случае наблюдается превышение допустимого уровня шума на всей площади исследования. В дневное время суток минимальное значение превышения составляет 6,5 дБ, максимальное – 21,5 дБ. В ночной период минимальное превышение допустимого уровня шума составляет 11 дБ, максимальное – 23 дБ.

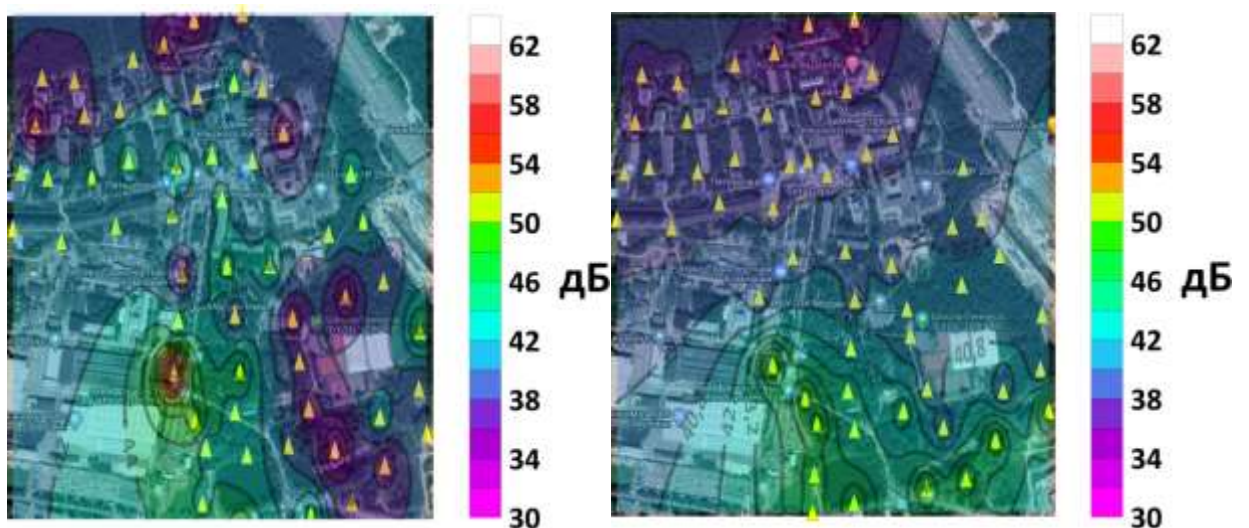


Рис. 54. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 4000 Гц: слева – день, справа – ночь

Для рассматриваемой частоты в дневное время суток повышенное значение акустического фона наблюдается лишь в одной точке, расположенной вблизи промышленной зоны в южной части территории – 56 – 58 дБ. В остальной части исследуемой территории наблюдаются довольно низкие значения акустического загрязнения, которые варьируются от 30 до 54 дБ. В ночное время суток наибольшие значения акустического шума характерны для южной части

исследуемой территории – 46 – 50 дБ. На всей остальной части площади исследования уровень шума варьируется от 30 до 45 дБ, увеличиваясь по направлению от севера к югу. Согласно специализированным нормативно-правовым актам, допустимый уровень акустического фона для рассматриваемой частоты составляет 30 дБ [62, 63]. Следовательно, в дневной период превышения допустимого уровня присутствуют практически везде, за исключением нескольких жилых дворов в северной и северо-западной части пос. Мосрентген и в нескольких точках на территории парка развлечений и отдыха. Минимальное превышение составляет 1 дБ, максимальное – 28 дБ. В ночной период превышения допустимого уровня акустического фона наблюдаются также практически повсеместно, за исключением нескольких точек вблизи лесной зоны в северной части территории. Минимальное превышение составляет 1 дБ, максимальное – 20 дБ.

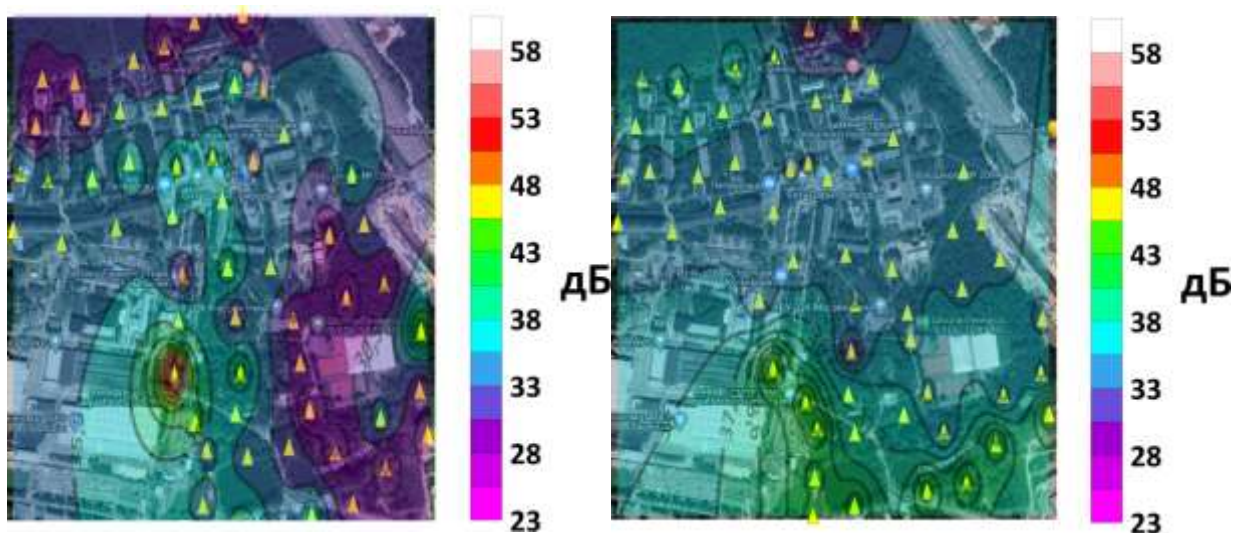


Рис. 55. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 8000 Гц: слева – день, справа – ночь

Распределение акустического загрязнения для рассматриваемой частоты практически полностью идентично предыдущему случаю (Рис. 43). Наибольшее значение шума в дневной период наблюдается в точке, расположенной вблизи промышленной зоны в южной части территории – 50,5 – 53 дБ. В остальной части

исследуемой территории наблюдаются довольно низкие значения акустического загрязнения, которые варьируются от 23 до 38 дБ. В ночное время суток наибольшие значения акустического шума характерны для южной части исследуемой территории – 38 – 43 дБ. На всей остальной части площади исследования уровень шума варьируется от 23 до 38 дБ, увеличиваясь по направлению от севера к югу. Согласно специализированным санитарным нормам и правилам, допустимый уровень акустического фона для рассматриваемой частоты составляет 28 дБ [62, 63]. Следовательно, превышения допустимого уровня в дневное время суток наблюдаются практически везде, за исключением некоторых точек в северной и северо-западной части исследуемой территории и некоторых точек в лесопарковой зоне и в юго-восточной части пос. Мосрентген. Минимальное превышение составляет 1 дБ, максимальное – 25 дБ. В ночное время суток превышения допустимого уровня акустического фона наблюдаются также практически повсеместно, за исключением нескольких точек вблизи лесной зоны в северной части территории. Минимальное превышение составляет 1 дБ, максимальное – 15 дБ.

Анализируя все полученные результаты, можно сделать вывод о том, что наиболее высокие значения акустического фона соответствуют частоте 1 Гц, наиболее низкие – частоте 8000 Гц. Наиболее широкий диапазон значений уровней акустического шума наблюдается на частоте 8000 Гц – от 23 до 58 дБ (35 дБ). Также, для большинства полученных результатов характерны повышенные значения акустического загрязнения в ночное время суток в южной части исследуемой территории. Это обусловлено тем, что измерения в данных точках проводились в последнюю очередь, ближе к ранним утренним часам, которым характерно начало трудовой деятельности населения, а также увеличение транспортных потоков. Минимальное значение превышения допустимого уровня акустического фона, установленного специализированными нормативно-правовыми актами СНиП и СанПиН [62, 63] зафиксировано на многих частотах и

составляет 1 дБ. Максимальное значение превышения допустимого уровня шума зафиксировано на частоте 4000 Гц и составляет 28 дБ.

Также, при анализе полученных данных, было проведено сопоставление карт закономерностей распределения вибромикросейсмического и акустического загрязнения исследуемой территории.

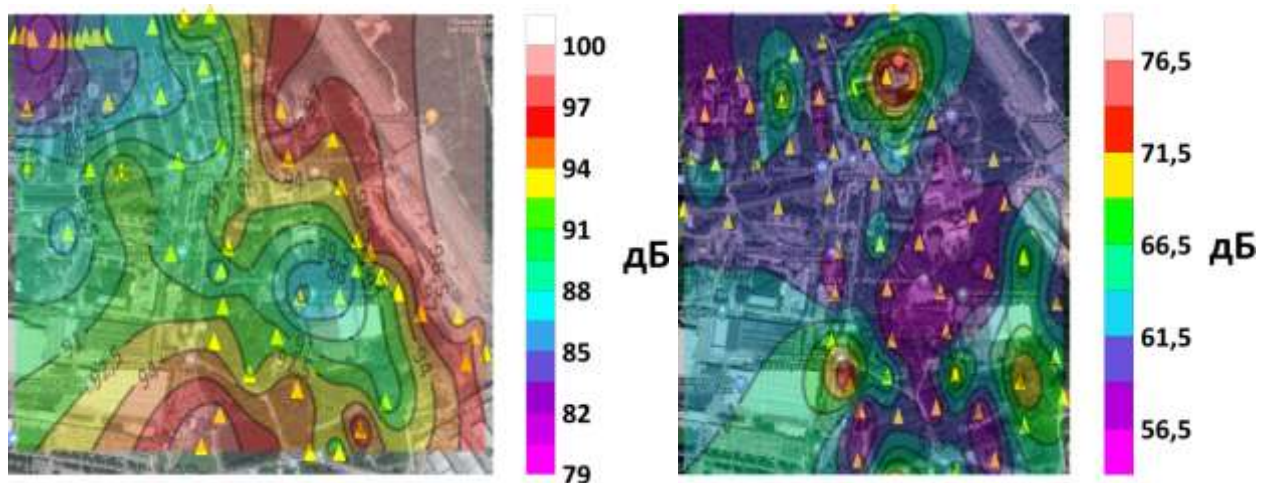


Рис. 56. Сопоставление карт распределения вибромикросейсмического (слева) и акустического (справа) загрязнения пос. Мосрентген, г. Москва

Как видно, закономерность распределения вибрационного фона по площади исследования никоим образом не коррелирует с закономерностью распределения акустического шума. Соответственно, располагая информацией о сейсмическом поле, нельзя судить об акустической обстановке исследуемой территории и наоборот.

#### **5.4. Верификация предложенной методики мониторинга вибрационного загрязнения мегаполиса**

Для проверки корректности предложенной в настоящей работе методики мониторинга вибромикросейсмического загрязнения исследуемой площади, на территории пос. Мосрентген были проведены повторные измерения в нескольких точках.



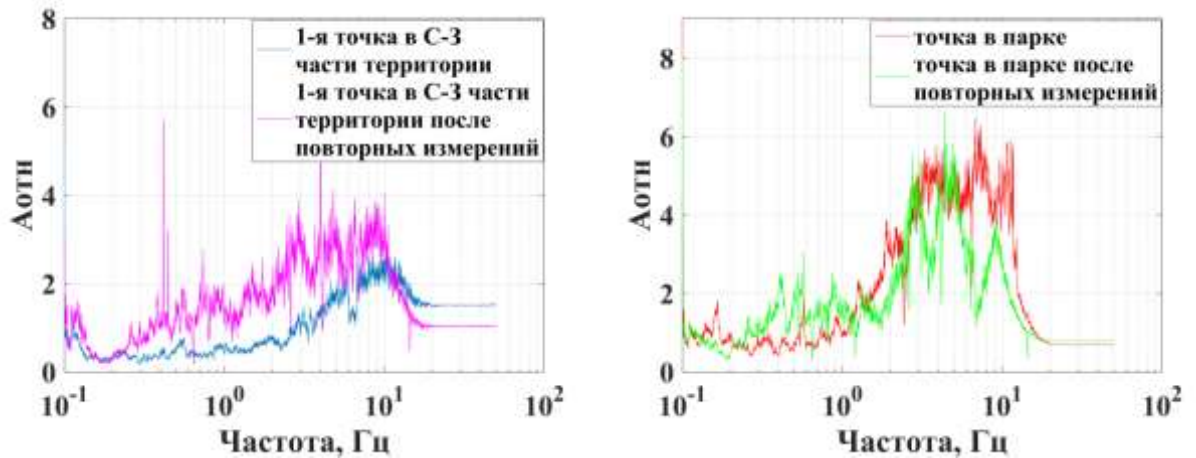


Рис. 57. Отношения спектральных амплитуд измерительный/опорный пункт: слева – в самой первой точке в лесопарковой зоне, вблизи промышленного предприятия (синяя кривая – первичные измерения, фиолетовая – повторные измерения), справа – в одной из точек в парке развлечений и отдыха (красная кривая – первичные измерения, зелёная – повторные измерения)

Как видно из полученных данных, коэффициенты, рассчитанные по отношению спектральных амплитуд для первой точки лесопарковой зоны вблизи промышленного предприятия, наиболее точно совпадают в области низких частот – до 0,2 Гц, а также в полосе частот от 10 до 15 Гц. В диапазоне от 0,2 до 10 Гц наблюдается разброс данных, полученных по первичным и повторным измерениям. Коэффициенты отношения спектральных амплитуд, рассчитанные для точки, расположенной в парке развлечений и отдыха, наиболее точно совпадают в диапазоне до 0,2 Гц и от 1 до 6 Гц. В целом, данные по повторным измерениям совпадают лучше с первичными измерениями в точке парка развлечений и отдыха, чем в лесопарковой зоне.

Подводя итог, стоит отметить, что, в целом, картина сопоставления данных первичных и повторных измерений гораздо стабильнее для точки, расположенной в парке развлечений и отдыха. Кривые отношений спектров гораздо лучше совпадают в области микросейсмического частотного диапазона, а также в диапазоне до 10 Гц, которые представляют наибольшее значение для проводимых

в рамках настоящей работы исследований. Для точки в лесопарковой зоне разброс значений сильнее, однако, в области микросейсмического частотного диапазона кривые отношений спектральных амплитуд совпадают. Следовательно, можно сделать вывод о том, что представленная в настоящей работе методика мониторинга вибромикросейсмического загрязнения населённого пункта корректна и её можно использовать на практике.

### 5.5. 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. 58. 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. Оборудование было установлено в углу коридора.

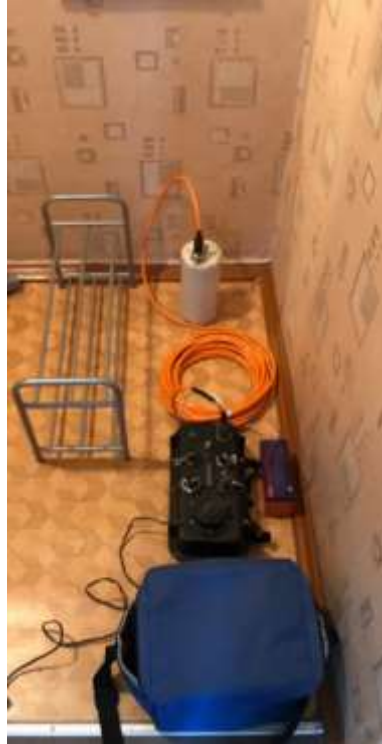


Рис. 59. Трёхкомпонентный сейсмометр СМЕ-4211-ВН15 (белый), подключенный к цифровому регистратору REFTEK (чёрный)

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. Далее будут

приведены примеры полученных записей во временной области.

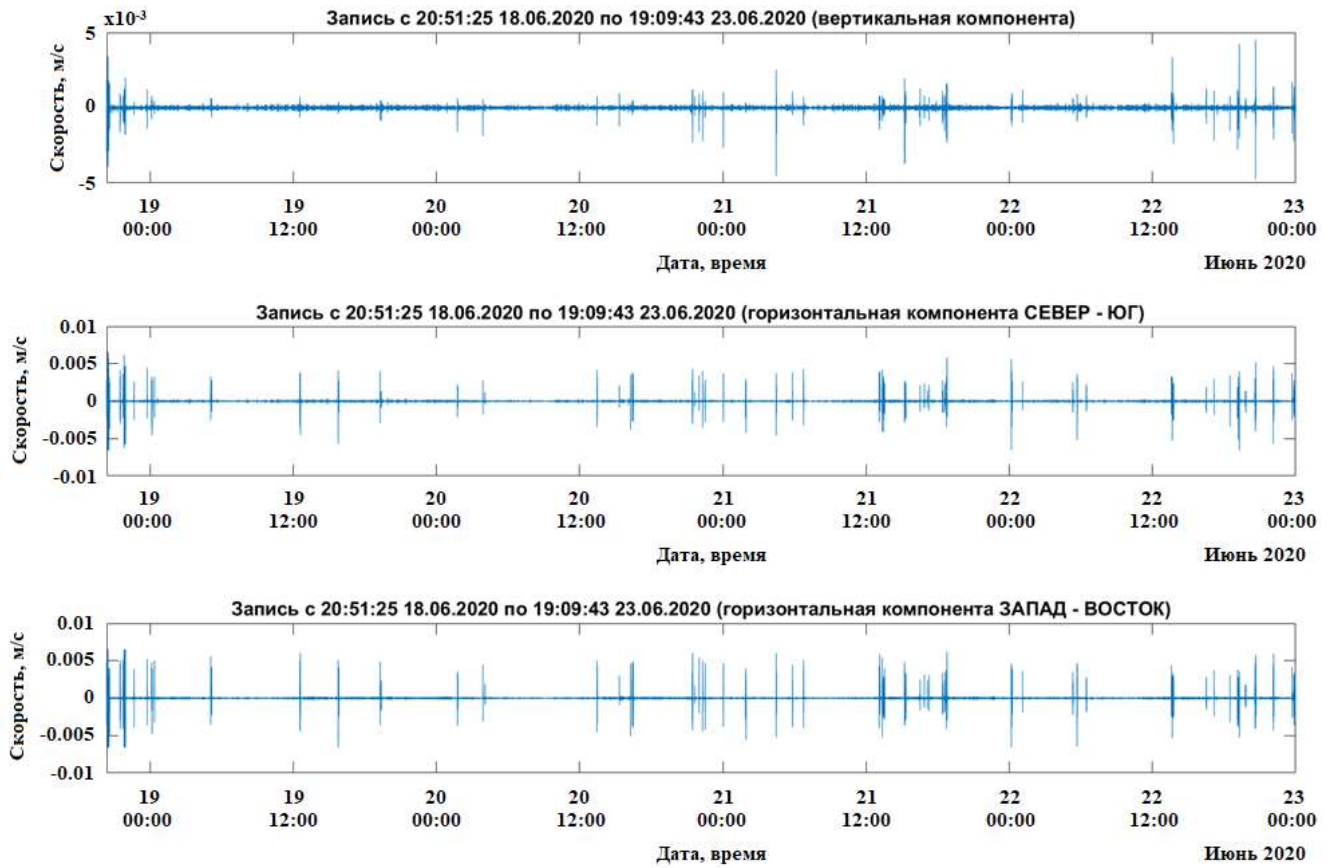


Рис. 60. Первое измерение скорости колебательного процесса, выраженного тремя компонентами

Далее приведены спектры полученных записей.



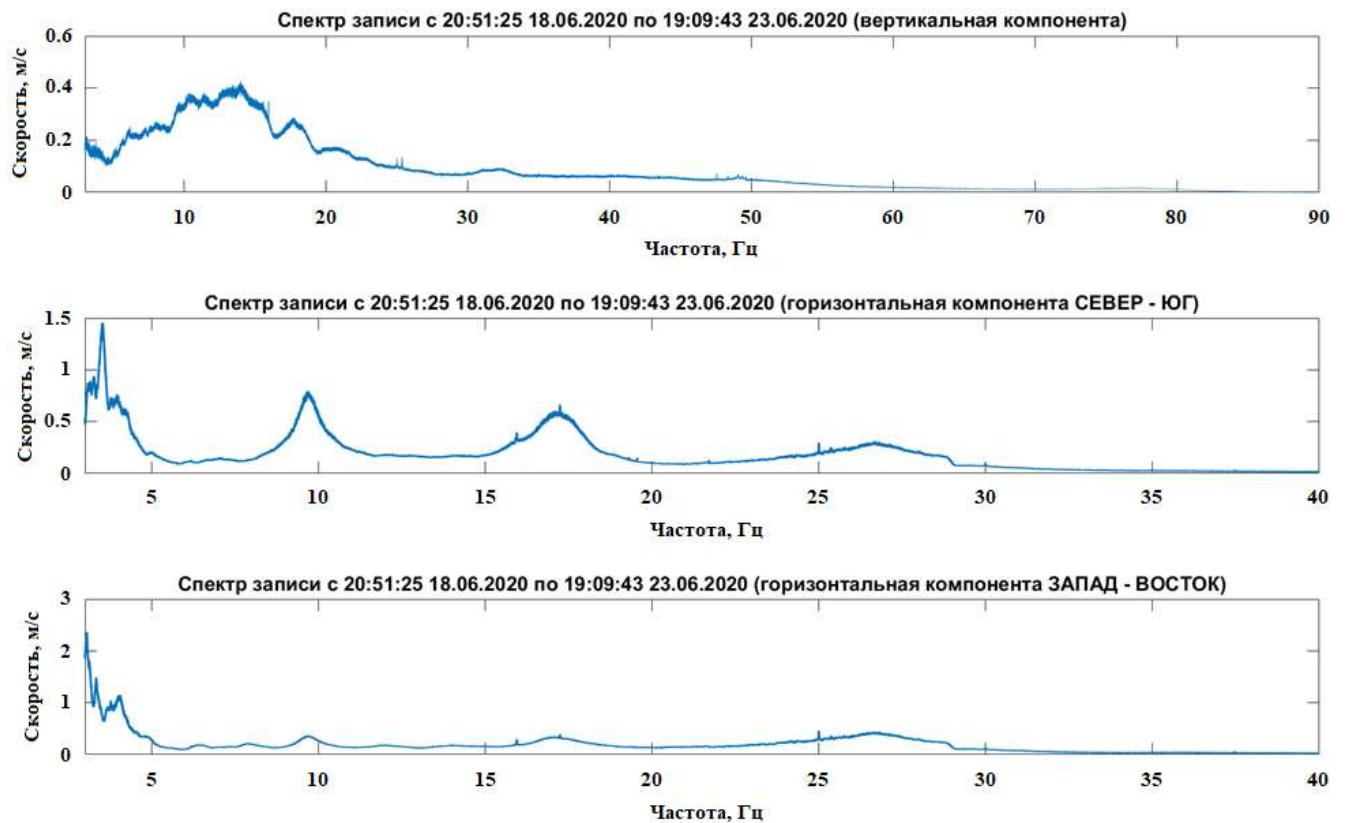


Рис. 61. Спектры полученных скоростей

Анализируя Рис. 2, 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 и были получены следующие данные.

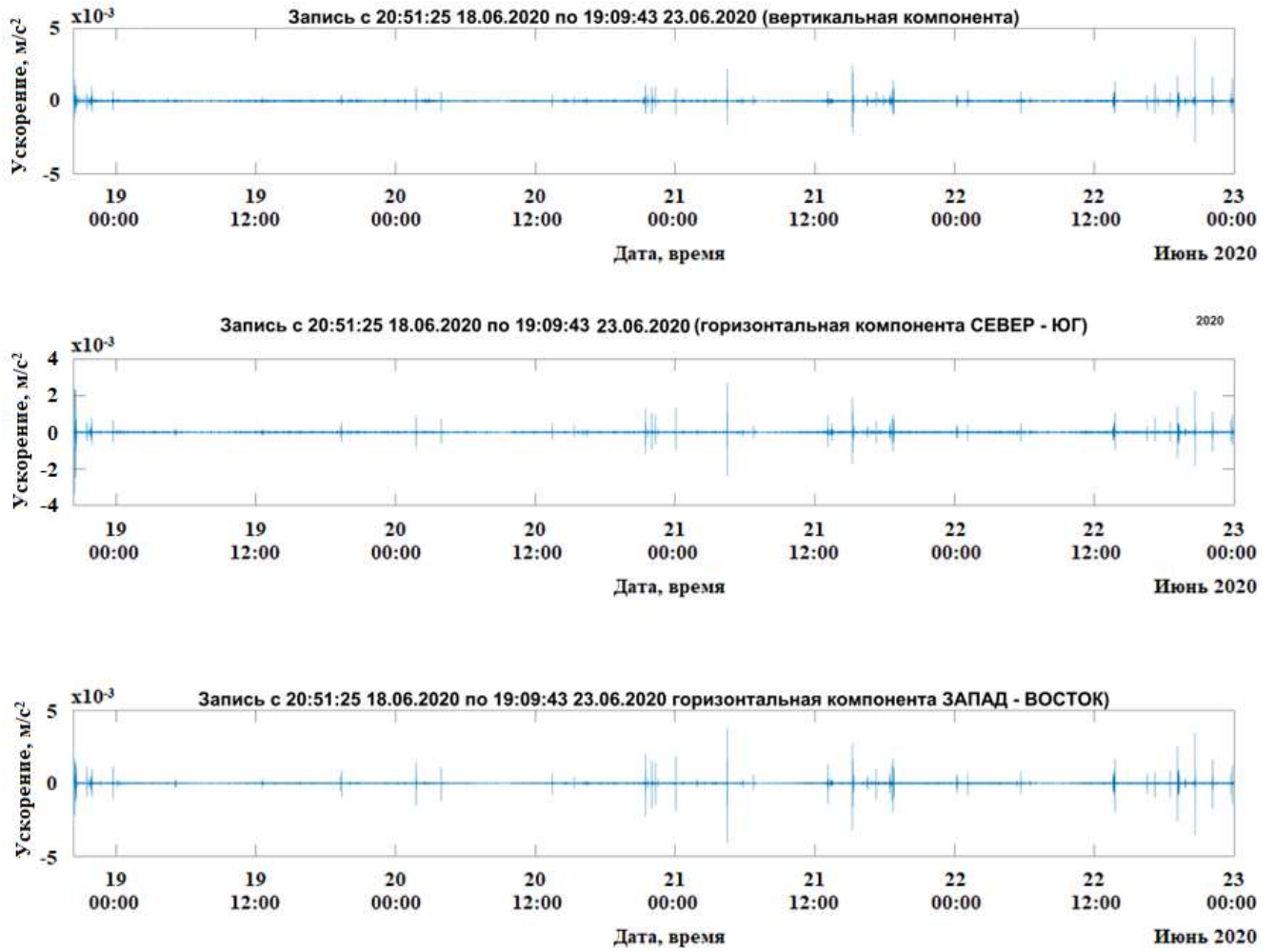


Рис. 62. Примеры записей ускорения колебательного процесса, выраженного тремя компонентами

Далее приведены спектры полученных данных.

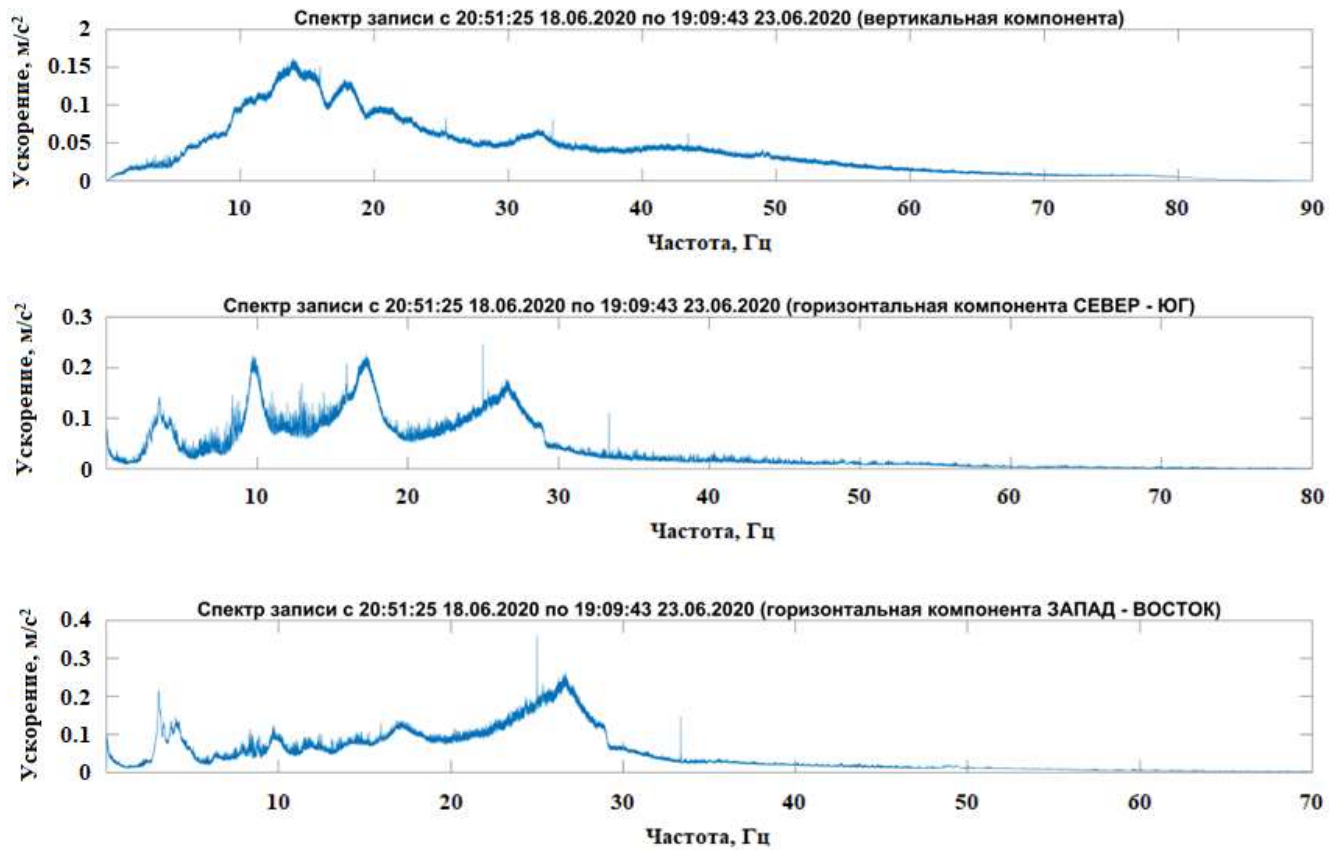
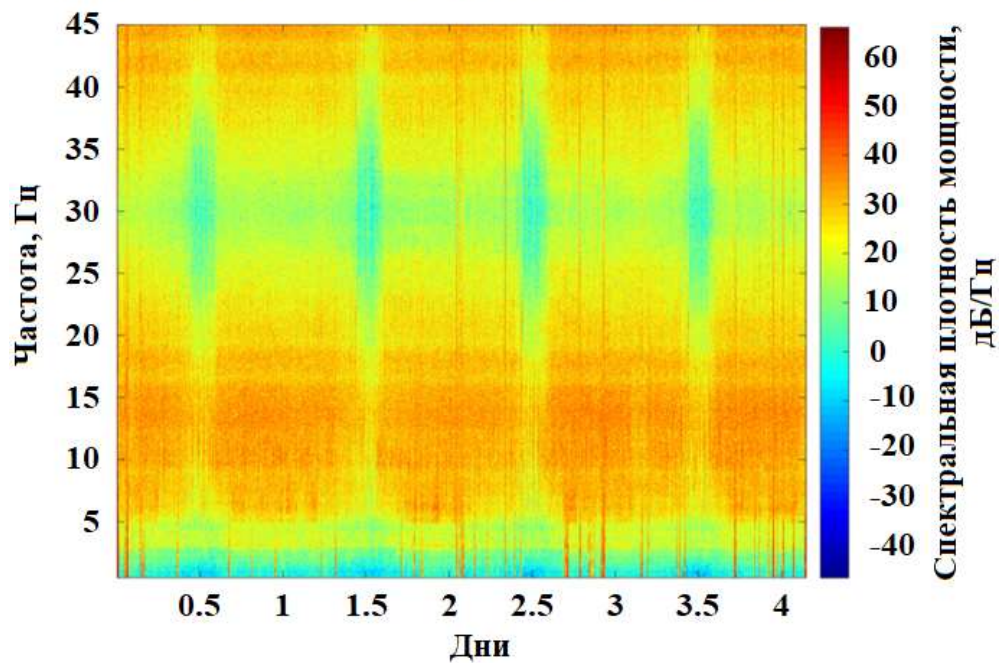


Рис. 63. Спектры полученных ускорений

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что спектры ускорения и скорости вертикальных компонент колебательного процесса, 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.

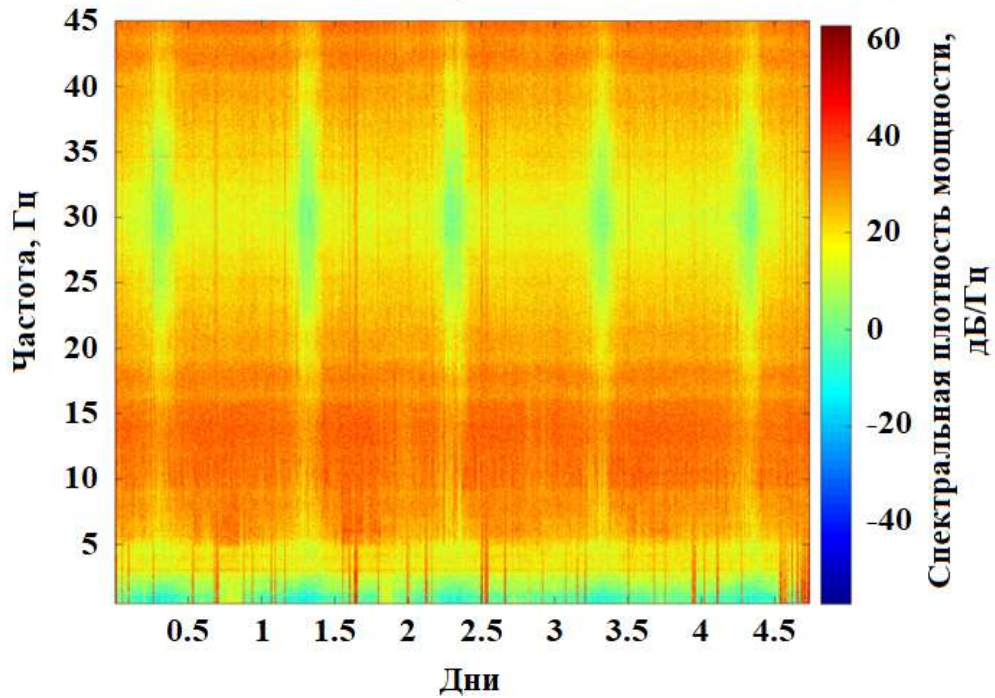
Затем были построены спектрограммы вертикальных компонент колебательной скорости за два периода измерений.

Спектрограмма записи с 20:51:25 18.06.2020 по 19:09:43 23.06.2020 (вертикальная компонента)



а)

Спектрограмма записи с 20:00:00 23.06.2020 по 13:56:56 28.06.2020 (вертикальная компонента)



б)

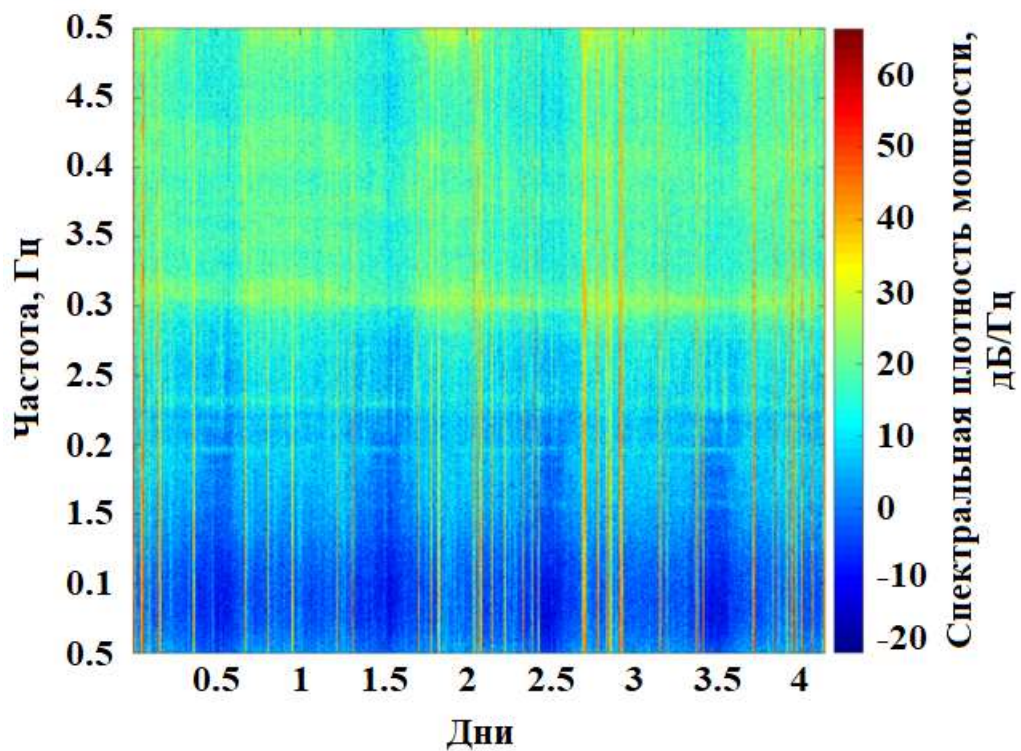
Рис. 64. Спектрограммы вертикальных компонент колебательной скорости: а) за период с 18.06.2020 по 23.06.2020; б) за период с 23.06.2020 по 28.06.2020



Из полученных графиков 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.

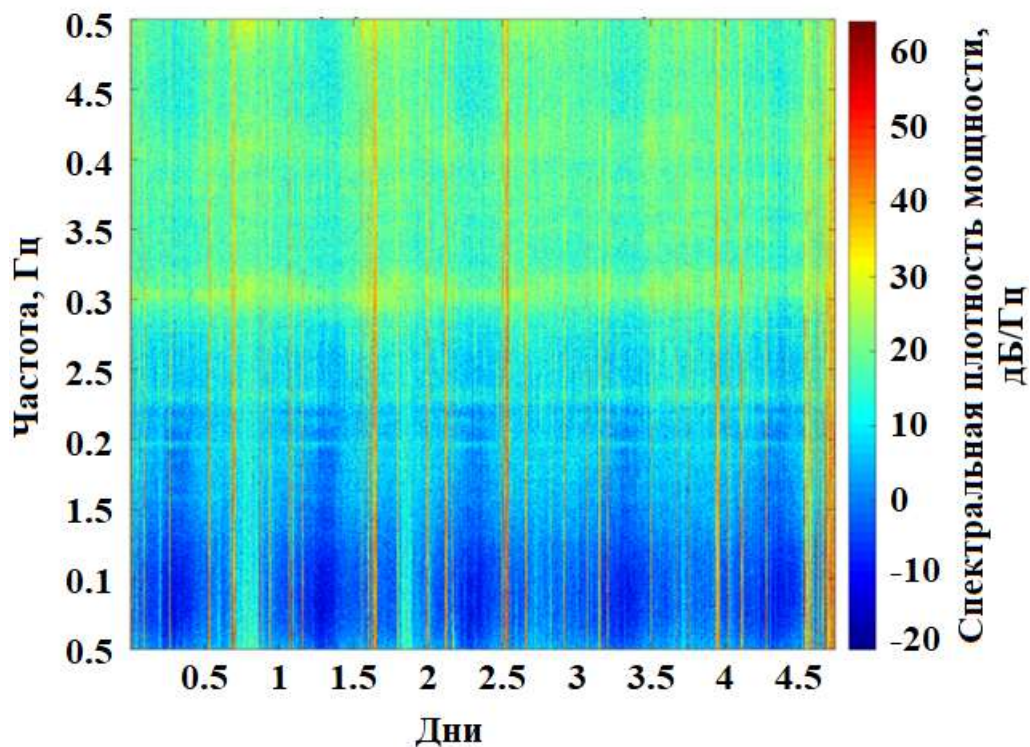
Далее были построены спектрограммы двух измерений для более детального изучения низкого диапазона частот.

**Спектрограмма записи с 20:51:25 18.06.2020 по 19:09:43 23.06.2020 (вертикальная компонента)**



а)

**Спектрограмма записи с 20:00:00 23.06.2020 по  
13:56:56 28.06.2020 (вертикальная компонента)**



б)

Рис. 65. Спектрограммы вертикальных компонент колебательной скорости в интервале 0 – 5 Гц: а) за период с 18.06.2020 по 23.06.2020; б) за период с 23.06.2020 по 28.06.2020

На обеих спектрограммах отчётливо прослеживается гармоника частотой 3 Гц соответствующая приблизительно 27-30 дБ. Также заметны гармоники на частотах около 1.6 2, 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», рассмотренного ранее, в параграфе 5.3., настоящей главы. Установка измерительных микрофонов осуществлялась аналогичным образом, в различных

местах квартиры – в коридоре, на кухне, в зале и на балконе Далее будут приведены спектрограммы полученных данных.

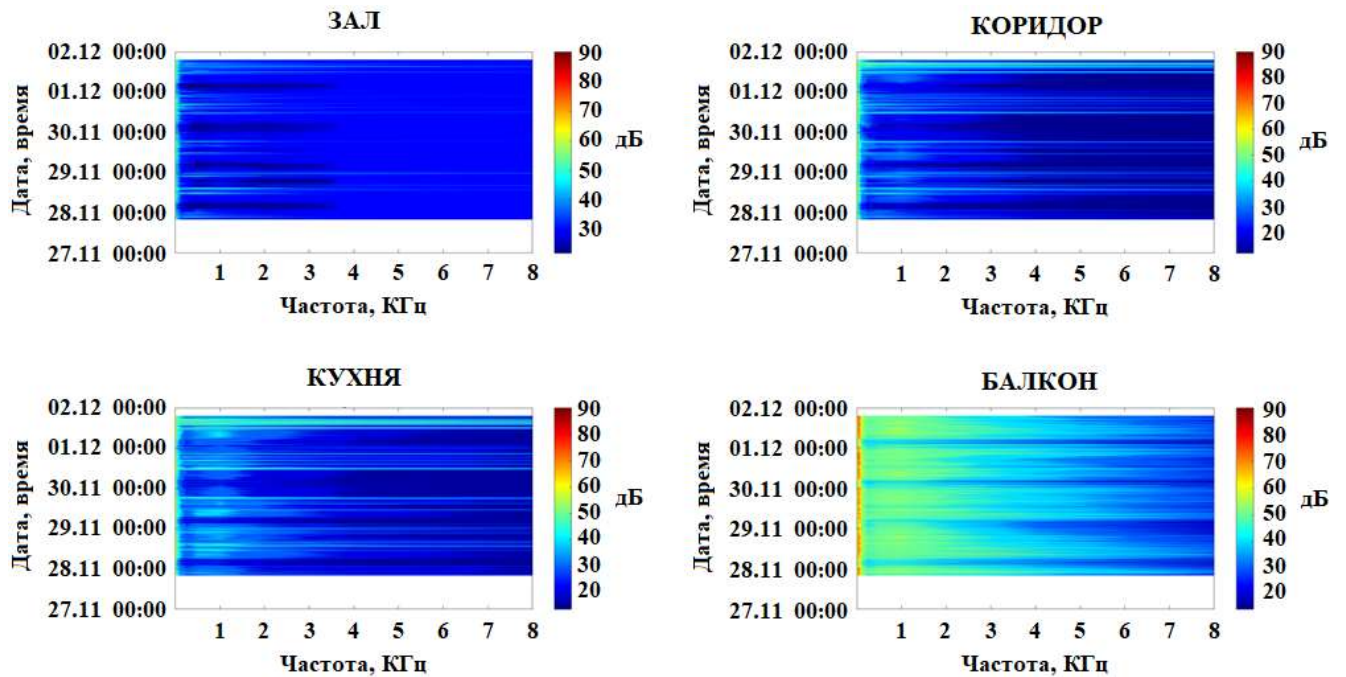


Рис. 66. Спектрограммы шумов, зарегистрированных в разных местах квартиры

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.

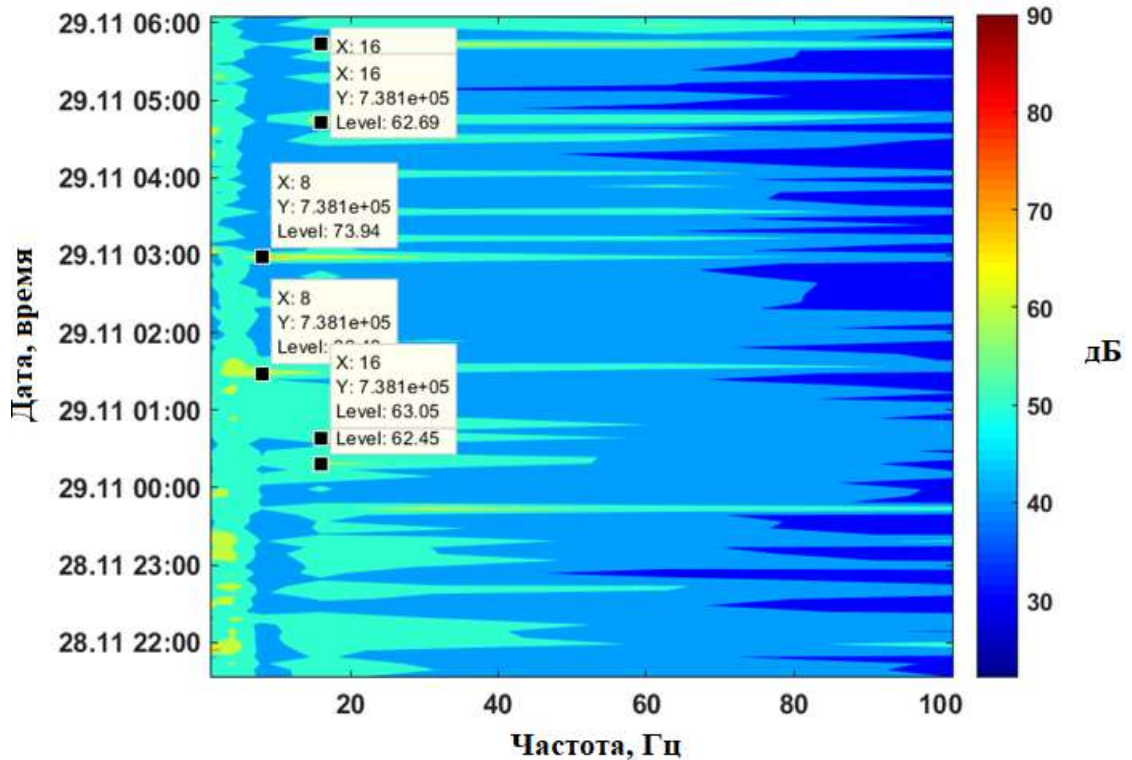


Рис. 67. Спектрограмма шума, зарегистрированного в зале с 22:00 28.11.2020 до 06:00 29.11.2020

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.



## КОРИДОР

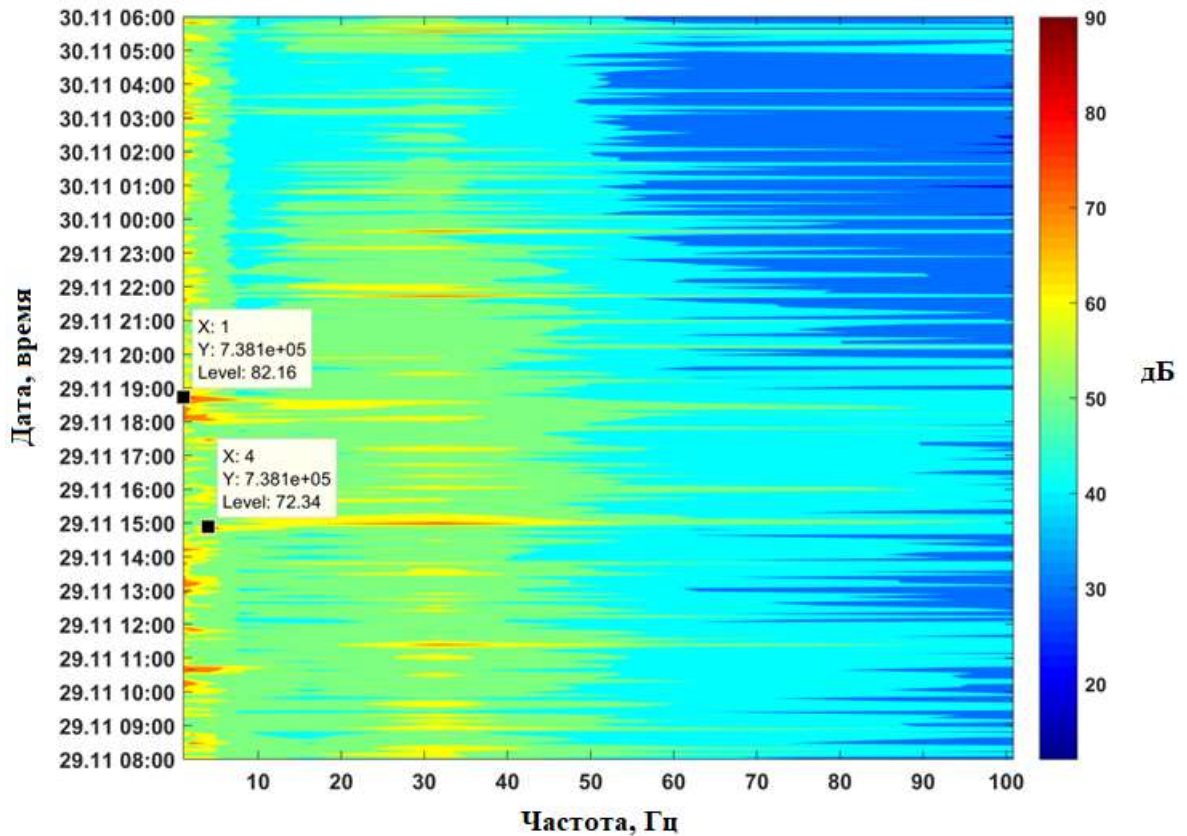


Рис. 68. Спектрограмма шума, зарегистрированного в коридоре с 08:00 29.11.2020 до 06:00 30.11.2020

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.

## КУХНЯ

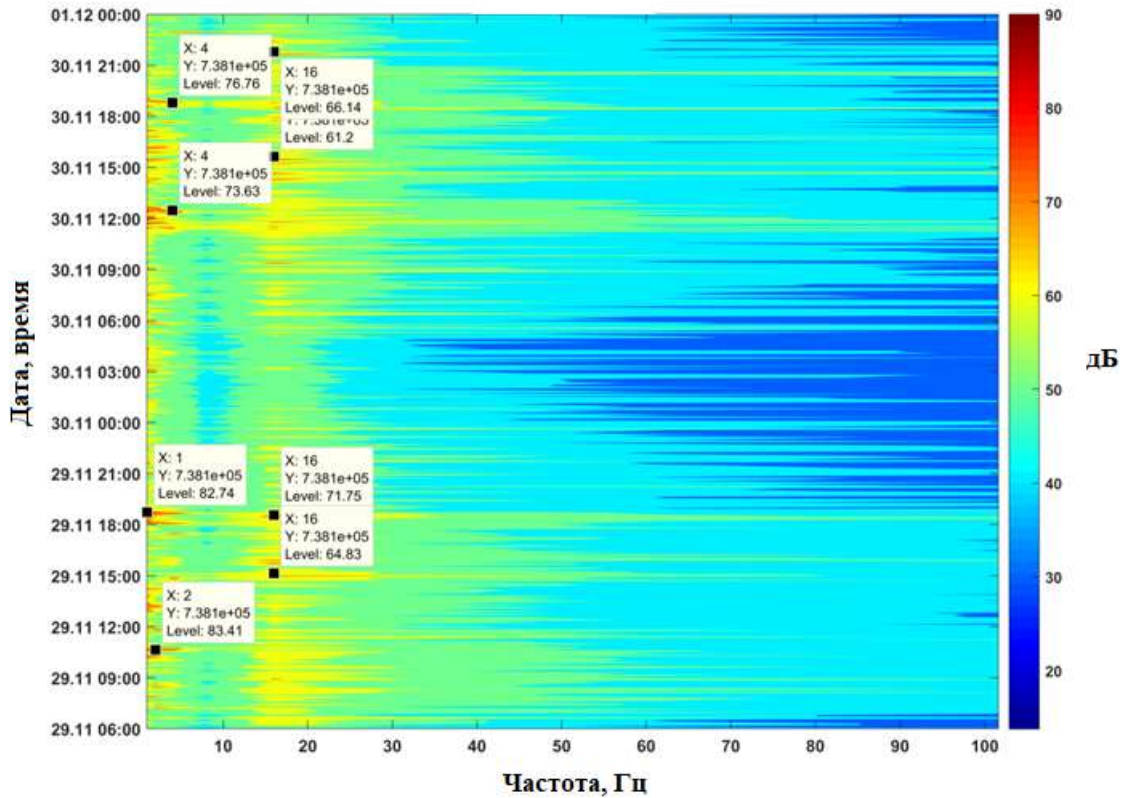


Рис. 69. Спектрограмма шума, зарегистрированного на кухне с 06:00 29.11.2020 до 00:00 01.12.2020

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.

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 5.**

Представлены результаты обработки полученных в ходе натурного полевого эксперимента данных. В качестве первичных результатов приведены примеры волновых форм, полученных с переносного и опорного датчиков, а также их амплитудные спектры. Выявлен вклад работы водоснабжающей системы, расположенной в подвальном помещении КПЦ ИФЗ РАН в спектральный состав сейсмического поля, регистрируемого опорным пунктом наблюдений.

Представлена спектрограмма с опорного пункта наблюдений. При анализе спектрограммы было выявлено, что, как и предполагалось, наиболее сильный вклад в сейсмическое поле вблизи опорного пункта вносит автомобильный транспорт, курсирующий по участку автострады МКАД-ЮГ.

Приведено усреднённое отношение спектров измерительный пункт/опорный пункт для участка исследуемой территории, расположенного в лесопарковой зоне, в северной части пос. Мосрентген. Наиболее высокие значения рассматриваемых отношений спектров характерны для пунктов, расположенных на границе лесопарковой зоны и промышленного предприятия.

В качестве главного результата всего проведённого исследования были получены карты распределения вибромикросейсмического загрязнения пос. Мосрентген, г. Москва в абсолютных величинах для различных частотных диапазонов. В ходе анализа полученных результатов были выявлены многочисленные превышения допустимых уровней вибрационного фона, установленных специализированными нормативно-правовыми актами для различных диапазонов частот. Наиболее высокие значения превышений характерны для частоты 4 Гц.

Помимо основного эксперимента по оценке вибромикросейсмического загрязнения пос. Мосрентген, г. Москва, в рамках настоящей работы была проведена серия измерений акустического загрязнения исследуемой территории. В качестве результата проведённых работ, были получены карты распределения акустического загрязнения пос. Мосрентген, г. Москва для октавных частотных диапазонов. Стоит отметить, что максимальные значения акустического фона характерны для частоты 1 Гц. Также зафиксированы многочисленные превышения допустимых уровней акустического фона, установленных специализированными нормативно-правовыми актами. Наибольшие значения превышений характерны для частоты 4000 Гц. Также приведено сопоставление данных о вибромикросейсмическом и акустическом загрязнении пос. Мосрентген для частоты 8 Гц. На основании этого сделан вывод о том, что закономерности распределения рассматриваемых полей абсолютно разные и нельзя по информации о вибрационной обстановке судить об акустическом загрязнении исследуемой территории и наоборот. Для этого требуются независимые измерения.

Также в рамках работы была проведена верификация предложенной методики мониторинга вибрационного загрязнения мегаполиса для проверки её корректности и правомерности использования. Отношения спектральных амплитуд измерительный/опорный пункт при первичных и повторных измерениях совпадают в наиболее интересующем нас низкочастотном диапазоне, из чего был сделан вывод, что предложенная методика мониторинга корректна и её использование вполне правомерно.

Помимо измерений вибросейсмического и акустического фона на территории пос. Мосрентген, г. Москва, ввиду поступившего в ИФЗ РАН сообщения от жительницы района Сокольники, г. Москва с жалобой на сильное физическое недомогание, вызванное воздействием вибрационных шумов, были проведены измерения вибрационных и акустических шумов на территории её жилой площади. При анализе результатов проведённых замеров, были выявлены

многочисленные превышения допустимых уровней вибрационного и акустического фона в различных диапазонах. Однако локализовать и установить характер источника, приносящего столь сильный дискомфорт жительнице жилплощади, 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.

## 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.

Приведены примеры численного моделирования микросейсмического шума в блочно-иерархических неоднородных средах. Информация, полученная при рассматриваемом численном моделировании, позволяет понять закономерности деформирования исследуемого массива, даёт возможность провести оценку

напряжённого состояния массива горных пород, что способствует решению различных технологических задач.

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 сейсмостанции. 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 вибромикросейсмического и акустического шума и их последующую обработку. Для сбора натуральных полевых данных использовался гео-гидроакустический измерительный буй на базе молекулярно-электронного преобразователя, подробное описание которого представлено в главе 4. Обработка и дальнейший анализ накопленных натуральных данных осуществлялись в программном комплексе MATLAB.

Выполнены экстенсивные натурные измерения вибромикросейсмического и акустического фона на территории пос. Мосрентген, Троицкого и Новомосковского административных округов г. Москва. Установлено, что в ряде исследуемых точек имеет место превышение допустимых уровней вибрационного фона, установленного специализированными нормативно-правовыми актами (СНиП и СанПиН). Минимальное значение превышения зафиксировано на частоте 31,5 Гц и составляет 2 дБ, максимальное значение превышения зафиксировано на частоте 4 Гц и составляет 25,5 дБ. Также были зафиксированы

неоднократные превышения допустимых значений акустического фона на исследуемой территории. Минимальное превышение зафиксировано для многих октавных частотных диапазонов и составляет 1 дБ. Максимальное превышение допустимого значения акустического фона зафиксировано на частоте 4000 Гц и составляет 28 дБ.

С использованием разработанного в рамках лаборатории 703 ИФЗ РАН программно-аппаратного комплекса произведены обработка и анализ вибросейсмического и акустического фона исследуемой территории. В результате были рассчитаны и отображены спектрограммы вариаций микросейсмического фона в зависимости от времени суток и дней недели, а также карты распределения относительных интенсивностей сейсмического поля исследуемой территории.

В качестве основного результата проведённого исследования, по аналогии с методом сейсмического микрорайонирования, на основании ранее упомянутых карт распределения относительных интенсивностей сейсмического поля, были рассчитаны и построены в программном комплексе Surfer компании Golden Software разномасштабные карты вибромикросейсмического и акустического загрязнения пос. Мосрентген, Троицкого и Новомосковского административных округов г. Москвы в дневное и ночное время суток, в абсолютных величинах. Проанализировав полученные данные, было выявлено, что для частотного диапазона 5 – 25 Гц наиболее сильно зашумлённой является часть исследуемой территории, расположенная вблизи участка автострады МКАД-ЮГ, что объясняется непрерывным интенсивным движением по нему автомобильных транспортных средств. Минимальный уровень вибрационного шума для рассматриваемой области составляет 80 дБ для частоты 20 Гц, максимальный – 98,5 дБ для частоты 8 Гц. Допустимый уровень вибрационного фона согласно нормативным документам для частот 8 и 16 Гц составляет 67 дБ. Соответственно, минимальное превышение допустимого уровня вибрационного шума для рассматриваемой области исследуемой территории наблюдается на частоте 16 Гц и составляет 27 дБ. Максимальное превышение характерно для частоты 8 Гц и



составляет 31,5 дБ. Также было установлено, что для некоторых частотных диапазонов сильно зашумлённой является область, охватывающая центральную часть пос. Мосрентген, что объясняется обилием людей, торговых площадок, а также наличием большого количества общественного и частного автомобильного транспорта. Минимальное значение вибросейсмического фона для центральной части пос. Мосрентген наблюдается на частоте 1 Гц и составляет 76,4 дБ, максимальное значение зафиксировано на частоте 2 Гц и составляет 98,3 дБ. Минимальное значение превышения допустимого уровня вибрационного фона зафиксировано на частоте 1 Гц (76 дБ) и составляет 0,4 дБ. Однако максимальное превышение допустимого уровня шума для рассматриваемой области наблюдается на частоте 8 Гц (67 дБ) и составляет 27 дБ. Также довольно шумным для некоторых частотных диапазонов является область вблизи промышленного предприятия, охватывающего западную и юго-западную части исследуемой территории. Минимальное значение вибросейсмического фона в данной области пос. Мосрентген наблюдается на частоте 31,5 Гц и составляет 66,5 дБ. Максимальное значение наблюдается на частоте 2 Гц и составляет 99 дБ. Минимальное превышение допустимого уровня вибрационного воздействия, установленного нормативными актами, наблюдается на частоте 1 Гц (76 дБ) и составляет 0,4 дБ. Максимальное значение превышения для заданной области зафиксировано на частоте 8 Гц (67 дБ) и составляет 28,5 дБ.

Помимо анализа вибромикросейсмического загрязнения, были построены карты распределения акустического загрязнения на территории пос. Мосрентген, г. Москва. Закономерность распределения шумов для различных частот довольно нестабильная, но стоит отметить, что для октавных частотных диапазонов ниже 125 Гц характерны повышенные значения акустического фона для небольшой области, охватывающей жилой двор, расположенный вблизи КПЦ ИФЗ РАН. Уровень шума в указанной области варьируется от 69,5 до 86 дБ. Также повышенные значения акустического загрязнения наблюдаются на частотах 250 и 500 Гц в области, охватывающей несколько жилых дворов в западной части

исследуемой территории. Уровень шума в рассматриваемой области варьируется от 55,8 до 62 дБ. Помимо этого, было проведено сопоставление данных и вибрационном и акустическом загрязнении, исходя из чего, был сделан вывод о том, что рассматриваемые данные никак не коррелируют и, по распределению одного типа поля, нельзя судить о распределении другого – требуются независимые измерения.

Проведена верификация, заключающаяся в сопоставлении отношений спектральных амплитуд измерительный/опорный пункт при первичных и повторных измерениях в нескольких точках исследуемой территории. Было выявлено, что кривые отношений спектральных амплитуд первоначальных и повторных измерений наиболее точно совпадают в области низких частот, которая представляет для нас наибольший интерес. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что предложенная в настоящей работе методика мониторинга вибромикросейсмического загрязнения исследуемой территории корректна и вполне применима на практике.

Также в работе отражены результаты исследований вибрационного и акустического фона на примере жилого объекта в районе Сокольники, г Москва. Зафиксированы неоднократные превышения сейсмоакустического фона допустимых значений, установленных специализированными нормативными актами, что подтверждается наличием болезненного ощущения у одной из жительниц жилого дома.

Таким образом, представлен принципиально новый подход к оценке сейсмической обстановки современных мегаполисов в режиме реального времени, заключающийся в определении интенсивности сейсмических шумов и их пространственного распределения в любой момент времени при условии, что опорная станция осуществляет регистрацию в непрерывном режиме.

**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. Горбатиков 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. Горбатиков, М. Ю. Степанова, Г. Е. Кораблёв // Физика Земли/2008. – № 7. – С. 66-84.
11. Цуканов А. А., Горбатиков А. В. Метод микросейсмического зондирования: влияние аномальных значений коэффициента Пуассона и оценка величины нелинейных искажений / А. А. Цуканов, А. В. Горбатиков // 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., Сеницын В. И., Чебров В. Н. Мониторинг параметров высокочастотного сейсмического шума в рамках проблемы прогноза землетрясений / В. А. Салтыков, Ю. А. Кугаенко, В. И. Сеницын, 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., Neeshpara A. V., Shabalina A. S., Electrochemical Seismometers of Linear and Angular Motion / V. M. Agafonov, A. V. Neeshpara, 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. – Т. 99, №. 5. – P. 2985-3002.
53. Broadbent D. E. Effects of noises of high and low frequency on behavior / D. E. Broadbent // Ergonomics. – 1957. – Т. 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. – Т. 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. – Т. 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. – Т. 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. – Т. 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. 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. СанПиН 2.1.2.2645-10 Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях
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. Сычѳв К. И. Научное содержание и основы направления геоэкологии / К. И. Сычѳв // 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. Bhave N., Rao P. Vehicle engine sound analysis applied to traffic congestion estimation / N. Bhave, 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. – Т. 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. – Т. 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. – Т. 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. – Т. 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. – Т. 81. – №. 4. – P. 881-887.

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

124. Черемных А. В., Черемных А. С., Бобров А. А. Морфоструктурные и структурно-парагенетические особенности разломных зон Прибайкалья (на примере Бугульдейского дизъюнктивного узла) / А. В. Черемных, А. С. Черемных, А. А. Бобров // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – №. 9. – С. 1372-1383.

## СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ

1. Модель угольного пласта и вмещающих горных пород.
2. Шаблон конечно-разностной схемы второго порядка на сдвинутых сетках.
3. Схематичное изображение углов, определяющих сдвиг.
4. Напряжения, приложенные к элементарному объёму.
5. Мгновенный снимок волнового поля вблизи шумящего пласта.
6. Работы по методу микросейсмического зондирования в ледовых условиях оз. Байкал.
7. Расположения профиля ММЗ в ледовых условиях оз. Байкал, вблизи пос. Бугульдейка (отмечен белой линией).
8. Глубинный разрез, полученный по профилю метода микросейсмического зондирования на оз. Байкал.
9. Координационно-прогностический центр ИФЗ РАН (КПЦ ИФЗ РАН), расположенный на территории пос. Мосрентген, г. Москва.
10. Схема расположения измерительных точек на территории пос. Мосрентген, г. Москва.
11. Измерительное оборудование: слева – переносная сейсмостанция, используемая в различных точках исследуемой территории, справа – сейсмостанция, расположенная на опорном пункте – на постаменте подвального помещения КПЦ ИФЗ РАН.
12. Карты распределения относительных интенсивностей сейсмического поля на территории пос. Мосрентген для нескольких частот: а) 1 Гц; б) 2 Гц; в) 4 Гц; г) 8 Гц; д) 16 Гц; е) 31,5 Гц.
13. 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.
14. Молекулярно-электронный преобразователь: 1 – диэлектрическая трубка (корпус преобразователя); 2,4 – установочные элементы; 3 – электролит; 5,6 – электроды.
  15. Внутреннее строение и описание гео-гидроакустического измерительного модуля.
  16. Верхняя крышка корпуса гео-гидроакустического модуля: 1 – внешняя антенна Wi-fi/GPS, 2 – герметичный разъем типа PC-10, 3 – светоиндикаторная заглушка.
  17. Главное окно программы NDAS\_app.
  18. Сравнение спектров двадцатиминутной синхронной записи двумя сейсмометрами СМЗ-ОС (чёрная и красная кривые) и двумя молекулярно-электронными сейсмометрами (синяя и зелёная кривые).
  19. Амплитудно-частотная (АЧХ) ( $I'$ – $3'$ ) и фазо-частотная (ФЧХ) ( $I'$ – $3'$ ) характеристики приборов Streckeisen ( $1, 1'$ ), Guralp ( $2, 2'$ ) и СМЕ ( $3, 3'$ ).
  20. Сопоставление записей, полученных приборами Streckeisen, Guralp и СМЕ в частотном диапазоне 0.03–10 Гц, землетрясения магнитудой 8.1, произошедшего в Мексике 08.09.2017 г. в 04:49 по всемирному времени.
  21. Алгоритм обработки данных, полученных в ходе натурного эксперимента.
  22. Пример записи волновой формы для профильного пикета за 05.07.2019.
  23. Пример записи волновой формы для базовой станции для 05.07.2019.
  24. Амплитудные спектры записей на профильном и опорном пунктах за 05.07.2019.
  25. Спектрограмма сигнала с опорного пункта в период с 12.07.2019 по 17.07.2019.
  26. Усреднённое отношение спектров на некоторых пунктах наблюдений: а) точки профиля на исследуемой территории, для которых были рассчитаны

отношения спектров (отмечены красным цветом); б) усреднённое отношение спектров.

27. Распределение отношения спектральных амплитуд сигналов на измерительных пунктах и опорной станции на участке изучаемой территории (профиль А – Б): а) профиль для которого рассчитывались отношения спектральных амплитуд; б) отношения спектральных амплитуд за 12.07.2019 с 13:00 по 15:00; в) отношения спектральных амплитуд за 13.07.2019 с 01:00 по 03:00.
28. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 0,1 Гц: слева – день, справа – ночь.
29. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 0,5 Гц: слева – день, справа – ночь.
30. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 5 Гц: слева – день, справа – ночь.
31. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 10 Гц: слева – день, справа – ночь.
32. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 15 Гц: слева – день, справа – ночь.
33. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 20 Гц: слева – день, справа – ночь.
34. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 25 Гц: слева – день, справа – ночь.
35. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 1 Гц: слева – день, справа – ночь.
36. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 2 Гц: слева – день, справа – ночь.

37. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 4 Гц: слева – день, справа – ночь.
38. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 8 Гц: слева – день, справа – ночь.
39. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 16 Гц: слева – день, справа – ночь.
40. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 31,5 Гц: слева – день, справа – ночь.
41. Акустический шумомер ОКТАВА «ЭКОФИЗИКА 110-А»: слева – измерительный блок, справа – микрофонный капсюль с предусилителем и ветрозащитой на треножном штативе.
42. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 1 Гц: слева – день, справа – ночь
43. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 2 Гц: слева – день, справа – ночь.
44. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 4 Гц: слева – день, справа – ночь.
45. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 8 Гц: слева – день, справа – ночь.
46. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 16 Гц: слева – день, справа – ночь.
47. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 31,5 Гц: слева – день, справа – ночь.
48. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 63 Гц: слева – день, справа – ночь.
49. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 125 Гц: слева – день, справа – ночь.



50. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 250 Гц: слева – день, справа – ночь.
51. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 500 Гц: слева – день, справа – ночь.
52. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 1000 Гц: слева – день, справа – ночь.
53. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 2000 Гц: слева – день, справа – ночь.
54. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 4000 Гц: слева – день, справа – ночь.
55. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 8000 Гц: слева – день, справа – ночь.
56. Сопоставление карт распределения вибромикросейсмического (слева) и акустического (справа) загрязнения пос. Мосрентген, г. Москва.
57. Отношения спектральных амплитуд измерительный/опорный пункт: слева – в самой первой точке в лесопарковой зоне, вблизи промышленного предприятия (синяя кривая – первичные измерения, фиолетовая – повторные измерения), справа – в одной из точек в парке развлечений и отдыха (красная кривая – первичные измерения, зелёная – повторные измерения).
58. Расположение дома на карте.
59. Трёхкомпонентный сейсмометр СМЕ-4211-ВН15 (белый), подключенный к цифровому регистратору РЕФТЕК (чёрный).
60. Первое измерение скорости колебательного процесса, выраженного тремя компонентами.
61. Спектры полученных скоростей.
62. Примеры записей ускорения колебательного процесса, выраженного тремя компонентами.
63. Спектры полученных ускорений.

64. Спектрограммы вертикальных компонент колебательной скорости: а) за период с 18.06.2020 по 23.06.2020; б) за период с 23.06.2020 по 28.06.2020.
65. Спектрограммы вертикальных компонент колебательной скорости в интервале 0 – 5 Гц: а) за период с 18.06.2020 по 23.06.2020; б) за период с 23.06.2020 по 28.06.2020.
66. Спектрограммы шумов, зарегистрированных в разных местах квартиры.
67. Спектрограмма шума, зарегистрированного в зале с 22:00 28.11.2020 до 06:00 29.11.2020.
68. Спектрограмма шума, зарегистрированного в коридоре с 08:00 29.11.2020 до 06:00 30.11.2020.
69. Спектрограмма шума, зарегистрированного на кухне с 06:00 29.11.2020 до 00:00 01.12.2020.

## СПИСОК ТЕРМИНОВ

1. Микросейсмический шум – колебания земной поверхности малой амплитуды, вызываемые прохождением циклонов и другими атмосферными процессами, а также, имеющие и техногенное происхождение, период которых варьируется от 2-3 до 6-10 секунд (0,1 – 0,5 Гц).
2. Вибромикросейсмическое загрязнение – превышение допустимых параметров вибрационного шума, вызванного как антропогенными воздействиями, так и естественным микросейсмическим фоном.
3. Акустическое загрязнение – шум инфразвукового и звукового диапазонов, распространяющийся в воздухе и превышающий допустимые нормативные значения.
4. Микротремор – низкочастотные малоамплитудные землетрясения.
5. Спрединг – геодинамический процесс раздвигания жёстких литосферных плит под действием нагнетаемого снизу магматического расплава в области рифтов срединно-океанических хребтов.
6. Зона субдукции – линейно протяжённая зона, вдоль которой происходит погружение одних блоков земной коры под другие.
7. Шкала Меркалли – шкала, применяемая для определения интенсивности землетрясения по внешним признакам, на основе данных о разрушениях.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

ММЗ – метод микросейсмического зондирования.

СНиП – строительные нормы и правила.

СанПиН – санитарные правила и нормы.

Горизонтальное и вертикальное спектральное отношение (HVSR) – спектральное отношение горизонтальной и вертикальной компонент волнового процесса.