

На правах рукописи



Котов Андрей Николаевич

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

Специальность 1.6.9

«Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук.

**Научный
руководитель:**

Собисевич Алексей Леонидович
Доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, заведующий Лабораторией фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии (№ 703) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН;

**Официальные
оппоненты:**

**Ведущая
организация:**

Защита диссертации состоится _____ на заседании диссертационного совета Д 002.001.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещён на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации www.vak.minobrnauki.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10., стр. 1., ИФЗ РАН, учёному секретарю диссертационного совета Жосткову Руслану Александровичу.

Автореферат разослан _____.

Учёный секретарь диссертационного совет:
кандидат физико-математических наук

Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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, оказывающие негативное влияние как на техническое состояние зданий и сооружений, так и на качество жизни населения. 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 (Балькин, 2013). В работе (Зинкин, 2012) 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 (Broner, 1978; Broadbent, 1957). Однако, вопросы пространственно-временной изменчивости сейсмоакустической обстановки густонаселённых районов крупных городов до сих пор не получили должного внимания (Berglund et al., 117).

Целью диссертационного исследования является разработка технологии мониторинга вибромикросейсмического и акустического загрязнения жилых районов современных мегаполисов.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать теоретические основы – создать алгоритм операций реализации методики мониторинга вибромикросейсмического и акустического загрязнения жилых районов городских агломераций.
2. Осуществить сбор натуральных данных по вибросейсмическим и акустическим полям на территории плотной городской;
3. Создать специальное программное обеспечение, позволяющее осуществлять обработку полученных в результате эксперимента натуральных данных;
4. Провести анализ полученных в ходе обработки натуральных данных результатов с целью определения области применимости описываемой в работе методики.

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 допустимых значениях, установленных нормативными документами в области труда и медицины (СНиП, СанПиН и т.д.), а также позволяет осуществлять мониторинг сейсмической обстановки в режиме реального времени.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в возможности осуществления мониторинга вибросейсмической обстановки, а также построения карт 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 сейсморазведки (ММЗ). Путём сравнительного анализа амплитудных спектров, полученных на опорном пункте и разнесённых по исследуемой территории точках наблюдения, представляется возможной оценка пространственного распределения интенсивности микросейсмических колебаний в произвольный момент времени (Цуканов, 2015).

Процедура построения карт низкочастотного шумового загрязнения в определённом смысле близка к сейсмическому микрорайонированию (Заалишвили, 2014), 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.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Созданный на основе отечественного первичного преобразователя программно-аппаратурный комплекс сейсмоакустического мониторинга позволяет оперативно выявлять на исследуемой территории нарушения установленных для условий городской застройки специализированными нормативно-правовыми актами СНиП и СанПиН уровней шумов и вибраций в диапазоне среднегеометрических октавных частот от 3,8 до 31,6 Гц, а также акустических шумов в диапазоне среднегеометрических октавных частот от 63 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 сейсмоакустического загрязнения исследуемой территории на основе данных однократных площадных измерений с последующей регистрацией микросейсмических шумов на единственном опорном пункте.

3. Разномасштабные карты сейсмоакустического загрязнения окружающей среды современного мегаполиса в диапазоне среднегеометрических частот от 3,8 до 31,6 Гц, а также карты акустического шумового загрязнения исследуемой территории в диапазоне среднегеометрических октавных частот от 63 до 8000 Гц позволяют выявлять и контролировать зоны геоэкологического дискомфорта, снижающие качество жизни в пределах крупной городской агломерации.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах создания диссертационной работы. Автором лично выполнены: обширный анализ отечественных и зарубежных литературных данных, связанных с темой настоящего диссертационного исследования, сбор данных о вибросейсмической обстановке исследуемой территории в ходе полевого натурного эксперимента на территории пос. Мосрентген, Троицкого и Новомосковского административных округов г. Москвы при помощи специализированных гео-гидроакустических модулей. Выполнена обработка полученных в ходе натурного эксперимента данных по специальному алгоритму в соответствии с разработанной методикой, а также построены карты пространственного распределения значений вибросейсмического и акустического шумовых полей в пределах исследуемой территории в программном комплексе Matlab. В том же комплексе рассчитаны и построены разномасштабные карты пространственного распределения значений вибросейсмического загрязнения исследуемой территории в диапазоне среднегеометрических октавных частот от 4 до 31,5 Гц, нормируемых нормативными документами. Также автором был проведён дополнительный эксперимент на территории пос. Мосрентген по сбору данных об акустическом (звуковом) загрязнении исследуемой территории. В результате были рассчитаны и построены аналогичные вибрационным карты распределения акустического шумового фона в диапазоне среднегеометрических частот от 31,5 до 500 Гц.

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

Апробация работы. Результаты работы представлены на: 7-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 11 работ, 4 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований. Также имеются 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка терминов и списка сокращений. Диссертация включает 124 страниц текста, 52 рисунков, 7 таблиц. Список литературы насчитывает 123 наименования.

Благодарности. Автор выражает огромнейшую благодарность своему научному руководителю – доктору физико-математических наук, члену-корреспонденту РАН, главному научному сотруднику, заведующему лаборатории 703 ИФЗ РАН Собисевичу Алексею Леонидовичу и всем сотрудникам лаборатории 703 за всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах проведения работ, за важные дискуссии, наставления и советы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-35-90036 «Натурное изучение временных вариаций низкочастотных сейсмических шумов мегаполиса».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, а также отражена практическая значимость работы.

Глава 1. Анализ современного состояния мониторинга акустического и вибромикросейсмического загрязнения. В рассматриваемой главе представлен обзор литературных источников о природе естественного микросейсмического шума, о причинах возникновения шумов техногенного характера, включая шумы от автомобильного транспорта, о негативном характере их воздействия на жизнедеятельность людей, а также на состояние жилых, общественных и промышленных строительных сооружений. Приведены примеры численного моделирования микросейсмического шума (Азаров, 2015). Также в данной главе рассмотрены возможности защиты строительных сооружений от низкочастотных вибросейсмических шумов.

В разделе 1.1 описана природа возникновения естественного микросейсмического фона Земли. История исследований микросейсм началась в XIX веке, одновременно с развитием инструментальной сейсмологии (Bonney-Claudet, 2006; Монахов, 1997). Было выдвинуто несколько гипотез, касающихся возникновения естественного микросейсмического фона Земли, наиболее достоверной из которых является гипотеза немецкого физика Эмиля Вихерта, позднее поддержанная сейсмологом Бено Гутенбергом, заключающаяся в том, что микросейсмический шум вызван ударами океанических волн о скалы берегов (Liptai, 2017).

В разделе 1.2 рассмотрены возможности применения информации о волновых формах микросейсмического шума, а также о закономерностях их распространения в земной толще для решения ряда научных и прикладных задач. Одной из наиболее важных прикладных задач является оперативный прогноз землетрясений. Волновые формы микросейсмических воздействий являются наглядной моделью процессов, предвещающих землетрясения (Беляков, 2008).

В разделе 1.3 рассмотрены 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 (Жигалин и др., 2004). Также 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 (Уразов, 2013). Широкополосные сейсмометры приносят большую практическую пользу при

осуществлении регистрации сейсмических воздействий, генерируемых передвигающимися транспортными средствами по проспектам и автомагистралям.

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.

В разделе 1.4 описано численное моделирование микросейсмического шума. 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. Для рассматриваемого численного моделирования микросейсмического шума в блочно-иерархических неоднородных средах используется параллельная программная реализация конечно-разностной схемы решения уравнений упругости на сдвинутых сетках (Азаров, 2015).

В разделе 1.5 рассмотрены вопросы воздействия транспортных шумов на строительные объекты и жизнедеятельность людей. 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 (Veben et al., 2017). 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 (Garg et al., 2010). 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. Помимо дорожных неровностей, нормальная шероховатость дорожного полотна также вызывает постоянные динамические нагрузки. 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.

В разделе 1.6 рассмотрены способы защиты строительных сооружений от вибрационных и акустических воздействий. 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.

В разделе 1.7 описано основное прикладное, междисциплинарное научное направление, вокруг которого построено настоящее диссертационное исследование – Геоэкология. Существует множество трактовок рассматриваемого термина с точки зрения различных фундаментальных научных дисциплин (различных научных подходов). С точки зрения геобиосферного подхода, геоэкология трактуется как 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» (Трофимов и др., 2017; Жигалин и др., 2010). С точки зрения литосферного подхода геоэкология трактуется как междисциплинарная и общепланетарная наука, изучающая в естественных и техногенно-нарушенных природных условиях закономерные изменения в литосфере, происходящие под действием внутренних сил Земли и внешним влиянием атмосферы, гидросферы, биосферы и техносферы. С точки зрения геосферного подхода, термин «Геоэкология» сформулирован как междисциплинарная наука, изучающая неживое (абиотическое) вещество геосферных оболочек Земли как компоненту окружающей среды и минеральную основу биосферы (Осипов, 1993).

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. 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. В качестве защиты населения и строительных сооружений от акустических шумов, используются специальные шумозащитные экраны.

Глава 2. Теоретическое обоснование нового подхода к мониторингу вибромикросейсмического загрязнения населённого пункта. В данной главе представлено описание методики мониторинга вибромикросейсмического загрязнения исследуемой территории, а также кратко описаны геофизические методы, которые легли в основу настоящего диссертационного исследования – метод микросейсмического зондирования и метод сейсмического микрорайонирования.

В разделе 2.1 приведено краткое описание сути и реализации метода микросейсмического зондирования. Это пассивный способ сейсморазведки, основанный на измерении вертикальной составляющей естественного сейсмического шума, который применяется преимущественно для выделения вертикальных или субвертикальных неоднородностей на глубинах 30-35 км. 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:

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

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

k – коэффициент глубинной привязки, определяемый по результатам моделирования;

Λ – длина волны;

Vr – скорость Рэлеевских волн

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 (Жостков и др., 2015).

В разделе 2.2 описан метод сейсмического микрорайонирования. Это вид общего сейсмического районирования, 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 1:500000 и крупнее (Дягилев, 2007).

В разделе 2.3 приведено теоретическое описание методики предлагаемой в работе методики мониторинга вибромикросейсмического загрязнения мегаполиса. В настоящее время такой мониторинг осуществляется при помощи размещения большого количества сейсмической аппаратуры в строительных сооружениях, в жилых зонах и на территориях промышленных предприятий, однако, это очень трудоёмкая и затратная с финансовой точки зрения задача. В связи с этим, в работе предлагается методика мониторинга вибросейсмической обстановки исследуемой территории при помощи от двух до одной сейсмических станций на разных этапах. На первом этапе требуется использование двух сейсмостанций, одна из которых необходима для измерений сейсмического поля в различных точках контролируемой территории, вторая устанавливается на некотором опорном пункте и работает стационарно и в непрерывном режиме для устранения временных вариаций. При этом данные с переносной сейсмостанции нормируются на данные с опорной станции, то есть, на данном этапе используются относительные значения интенсивности сейсмического поля. На втором этапе, 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, которые будут приведены в **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 методу микросейсмического зондирования в ледовых условиях оз. Байкал.

Глава 3. Аппаратурно-измерительный комплекс, необходимый для получения натуральных полевых данных. В данной главе подробно описаны технические характеристики и принцип работы аппаратурно-измерительного комплекса, которым является гео-гидроакустический измерительный модуль на базе молекулярно-электронного преобразователя (МЭП).

В разделе 3.1 представлено внутреннее строение гео-гидроакустического буя, а также молекулярно-электронного преобразователя, входящего в его состав. Строение данного устройства можно описать следующим образом: в его состав входят три основных модуля (рис. 1, а) – аналоговый однокомпонентный молекулярно-электронный измеритель типа СМЕ-4211V (1), источник тока, обеспечивающий функционирование всех узлов системы (2), и регистратор сейсмических сигналов типа NDAS-8224 (3)

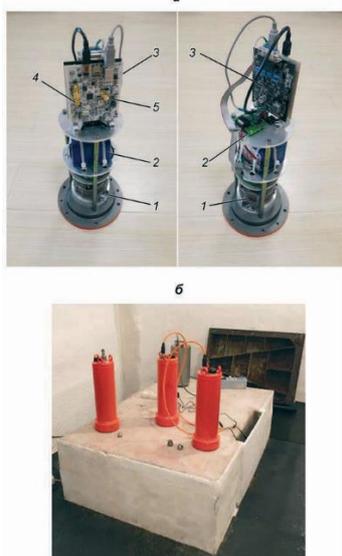


Рис. 1. Конструкция гео-гидроакустического модуля (а) и внешний вид размещения гео-гидроакустических буёв на постаменте в г. Обнинск 30.08.2017 г. (б): 1 – аналоговый молекулярно-электронный вертикальный сейсмический датчик; 2 – литий-ионная батарея с платой согласования; 3 – 24-разрядный регистратор

сейсмических сигналов; 4 – разъем подключения внешней антенны Wi-fi; 5 – разъем подключения внешней антенны GPS

Аналоговый сейсмический датчик (1) работает на основе молекулярно-электронного переноса (МЭП).

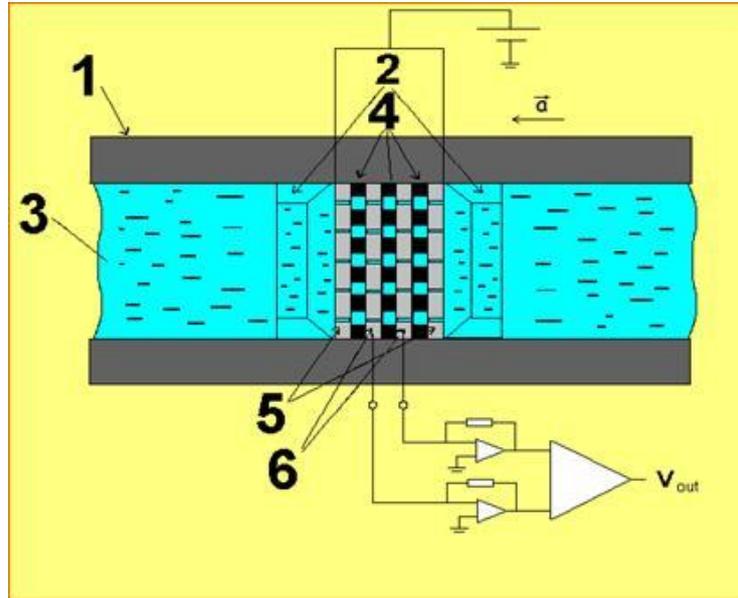


Рис. 2. Молекулярно-электронный преобразователь: 1 – диэлектрическая трубка (корпус преобразователя); 2,4 – установочные элементы; 3 – электролит; 5,6 – электроды

Чувствительный элемент представляет собой четырёхэлектродную электрохимическую ячейку, помещённую перпендикулярно каналу с гибкими мембранами на концах, заполненному низкотемпературным электролитом, выполняющим роль инерционной массы. 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 (Собисевич и др., 2018; Агафонов и др., 2013).

В разделе 3.2 приведены результаты сравнительных испытаний молекулярно-электронных гео-гидроакустических приёмников и маятниковых электродинамических сейсмометров типа СМЗ-ОС, проведённых на измерительном стенде Геофизической службы РАН. Были определены кривые чувствительности для всех используемых приёмников. С учётом полученных данных, также были проведены сравнительные испытания проводились на геофизическом постаменте КПЦ ИФЗ РАН.

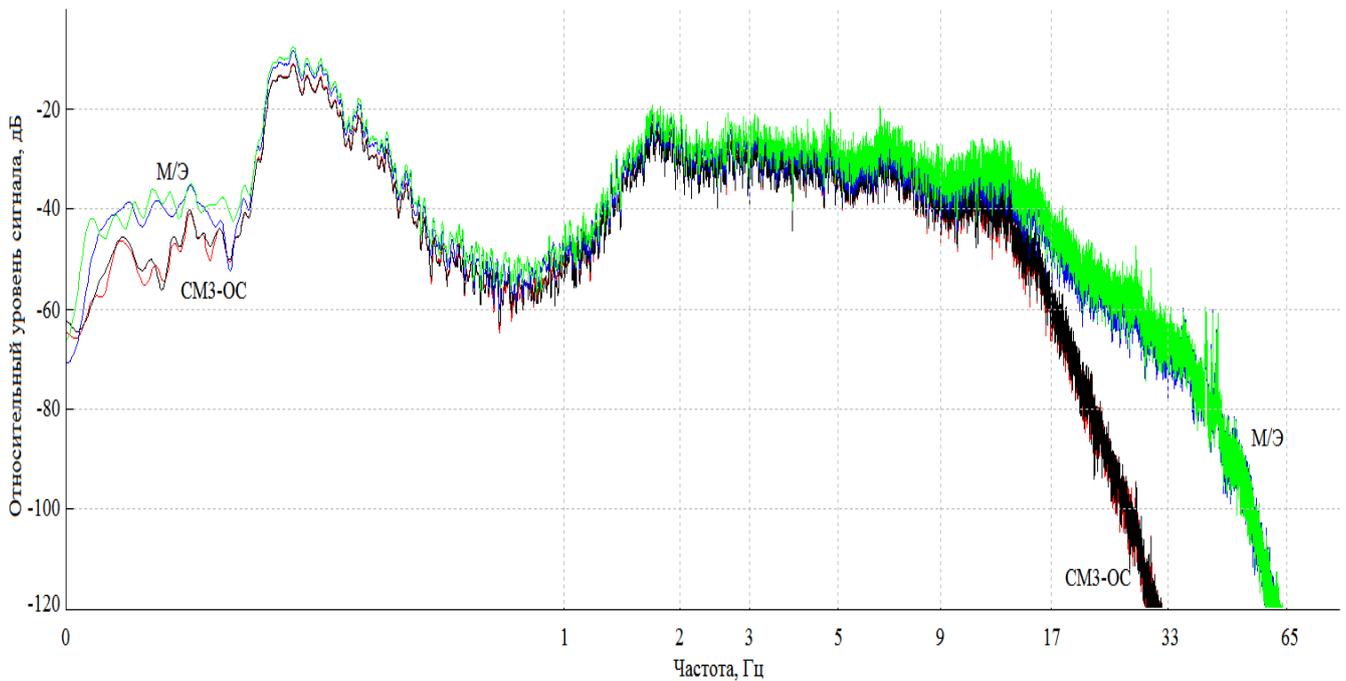


Рис. 3. Сравнение спектров двадцатиминутной синхронной записи двумя сейсмометрами СМЗ-ОС (чёрная и красная кривые) и двумя молекулярно-электронными сейсмометрами (синяя и зелёная кривые)

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.

В разделе 3.3 описаны обсерваторские исследования основных характеристик широкополосных сенсоров в составе буев ледового класса в заглубленных боксах на измерительных постах геофизического комплекса Геофизической службы РАН (г. Обнинск), которые были проведены для оценки качества функционирования измерительного модуля. Были сопоставлены 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 (ОБН); кроме того, были проанализированы данные с велосиметра Guralp CMG-3ESP (Горбенко и др., 2016). На рисунке 4 представлено сопоставление частотных характеристик, заявленных изготовителями приборов, с частотными характеристиками гео-гидроакустического буя с установленным датчиком СМЕ.

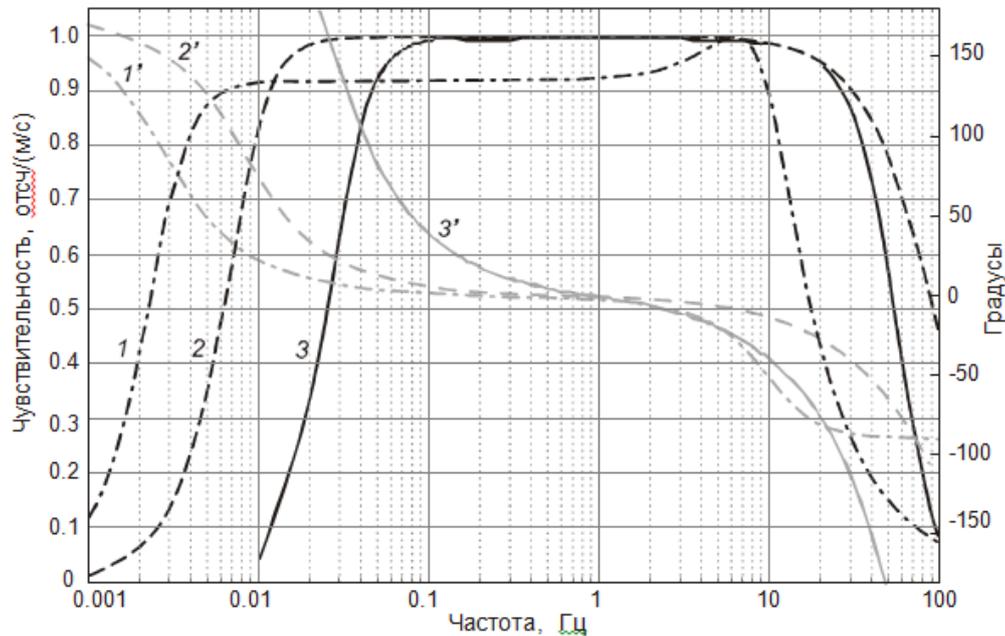


Рис. 4. Амплитудно-частотная (АЧХ) (1'–3') и фазо-частотная (ФЧХ) (1'–3') характеристики приборов Streckeisen (1, 1'), Guralp (2, 2') и СМЕ (3, 3')

Датчики 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. Также 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.

Выводы к главе 3. Основные параметры гео-гидроакустического буя ледового класса стабильны в своём рабочем частотном диапазоне – от 0.03 до 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, под водой, а также проходят первые испытания в ледовых условиях.

Глава 4. Применение разработанного подхода для оценки вибросейсмического загрязнения исследуемой территории. В данной главе приведены обоснование выбора и характеристика местности, выбранной в качестве главного объекта для апробации разработанной методики – поселения Мосрентген, расположенного на юго-западной стороне МКАД и вблизи Киевского шоссе, входящего в состав Новомосковского административного округа города Москвы. Представлены схема

расположения измерительных точек, спектральные характеристики зарегистрированных волновых полей, карты пространственного распределения значений вибросейсмического и акустического шума на территории посёлка Мосрентген, проведена оценка свойств стационарности спектральных коэффициентов вибросейсмического шума, полученных в результате обработки экспериментальных данных.

В разделе 4.1 приведено описание пос. Мосрентген, его расположение на карте Москвы (рис. 5).

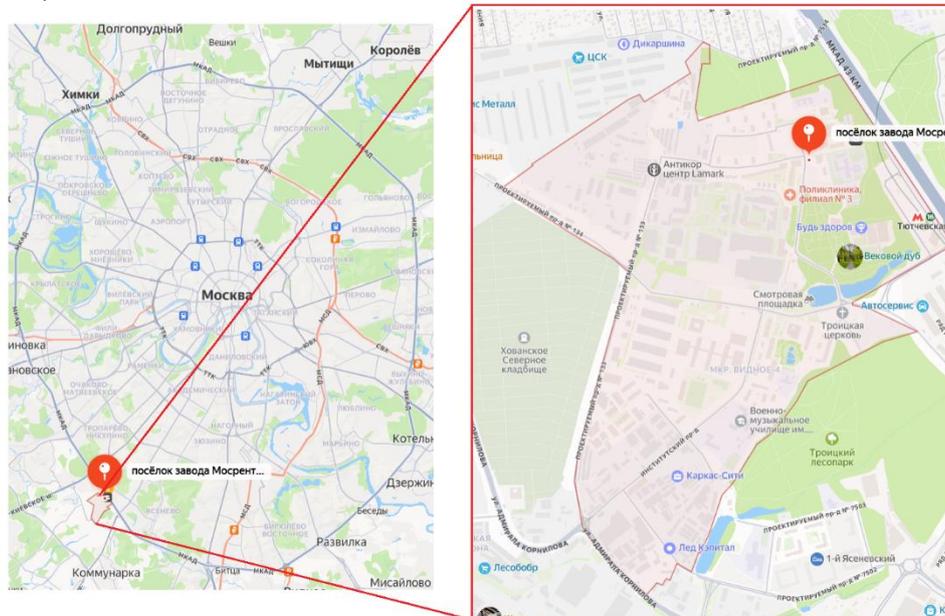


Рис. 5. Расположение посёлка Мосрентген на карте Москвы

В первую очередь, выбор данного населённого пункта обусловлен тем, что именно на его территории расположен Координационно-прогностический центр ИФЗ РАН (КПЦ ИФЗ РАН) (рис. 6).



Рис. 6. 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 функционирует станция «Тютчевская» в составе Троицкой линии

московского метрополитена. В связи с этим, предполагается, что в рассматриваемом районе будут зафиксированы значения вибросейсмического и акустического фона, превышающие допустимые показатели, установленные специализированными нормативно-правовыми актами СНиП, или близкие к таковым.

На рисунке 7 показана схема расположения измерительных точек на исследуемой территории и положение опорной станции. Измерения проводились в 58-и точках.

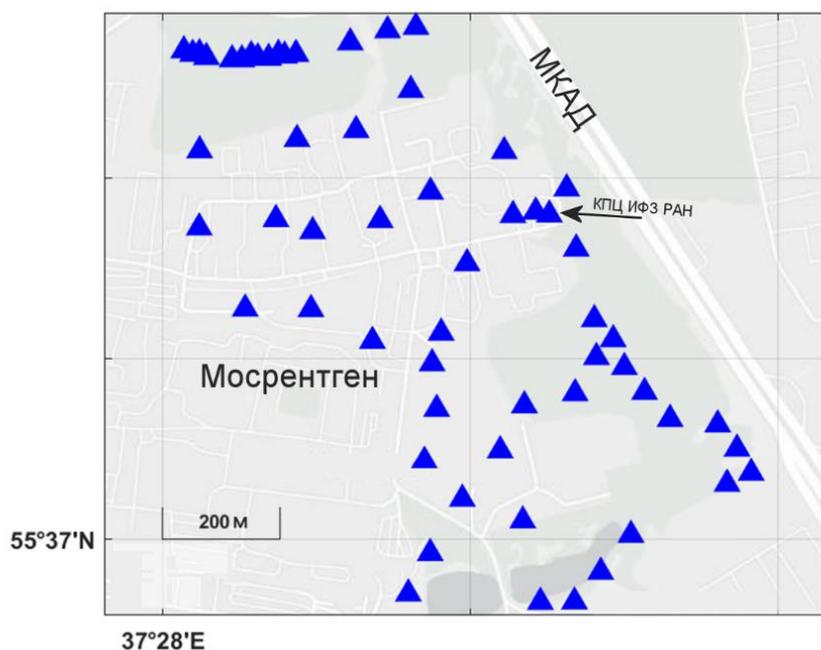


Рис. 7. Схема пространственного расположения измерительных точек вибросейсмического шумового поля

В разделе 4.2 представлены результаты исследования спектральных характеристик зарегистрированных волновых полей. Изучены особенности спектрального состава фонового шума на опорном пункте после ввода в эксплуатацию на территории посёлка станции метро «Тютчевская».

На рисунке 8 представлены записи сейсмического с переносной и опорной сейсмостанциями.

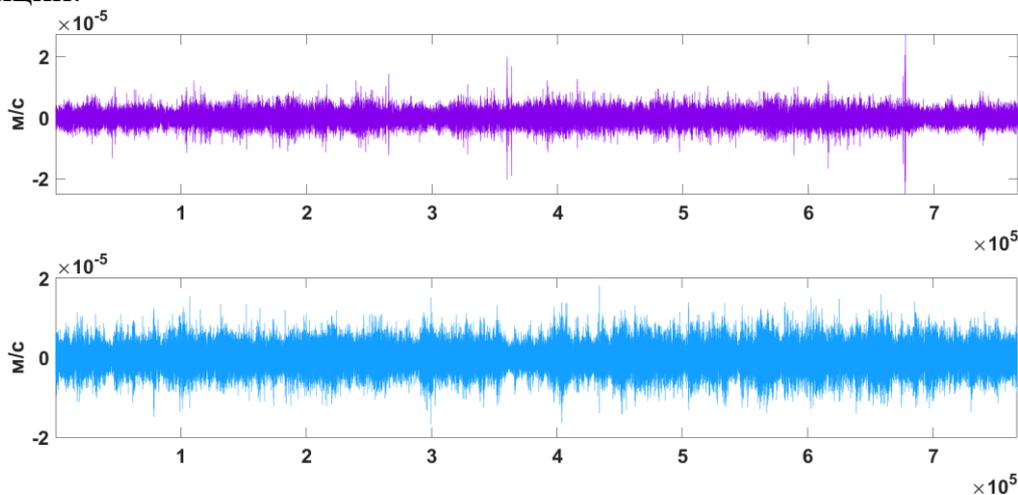


Рис. 8. Записи сейсмического шума переносной (сверху) и опорной (снизу) сейсмостанциями

Шум, регистрируемый на постаменте КПЦ, является более стабильным, с отсутствием нестационарных, локальных, импульсных помех, но, в целом, уровень шума отличается несильно. На рисунке 9 изображены спектры этих записей.

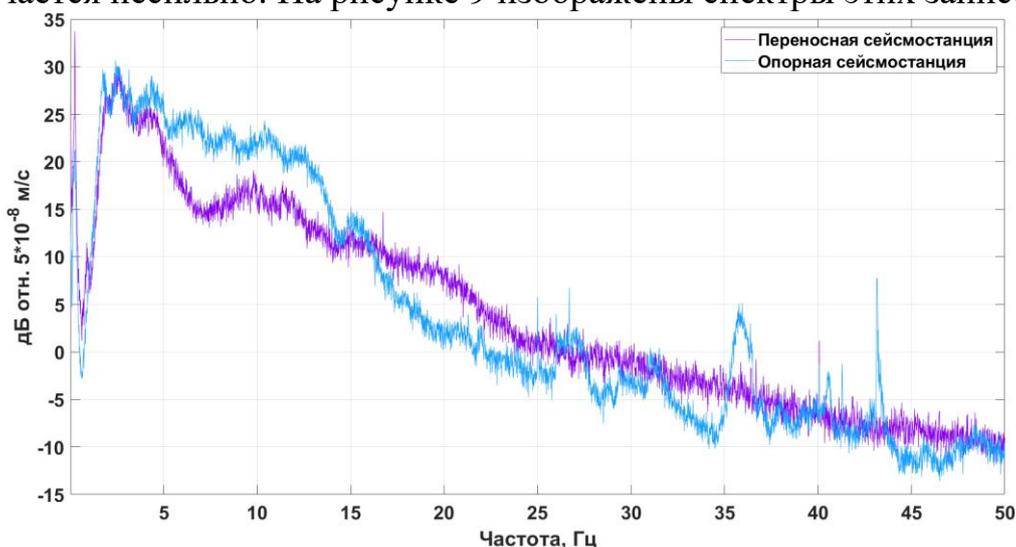


Рис. 9. Спектры записей с переносной и опорной сейсмостанций

В диапазоне примерно от 2 до 15 Гц наблюдаются более высокие спектральные значения записи с опорной сейсмостанции в сравнении с переносной ввиду более близкого её расположения к МКАД. Выше 20 Гц наблюдаются пики, вероятно, связанные с работой строительной техники во время строительства метро.

На рисунке 10 представлены спектральные значения шума с переносной и опорной станций для октавных диапазонов в сравнении с допустимыми значениями.

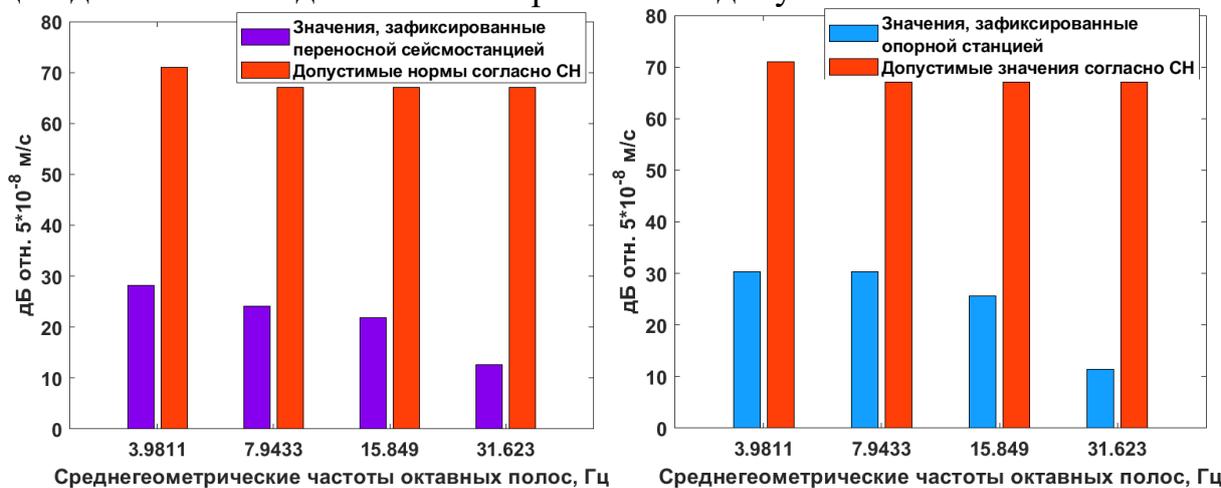


Рис. 10. Октавные спектры сигналов, зарегистрированных переносной (слева) и опорной (справа) сейсмостанциями в соответствии с допустимыми значениями из нормативно-правовых документов

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

На рисунке 11 представлена спектрограмма сейсмического шума, зарегистрированного станцией на опорном пункте после открытия станции метро «Тютчевская».

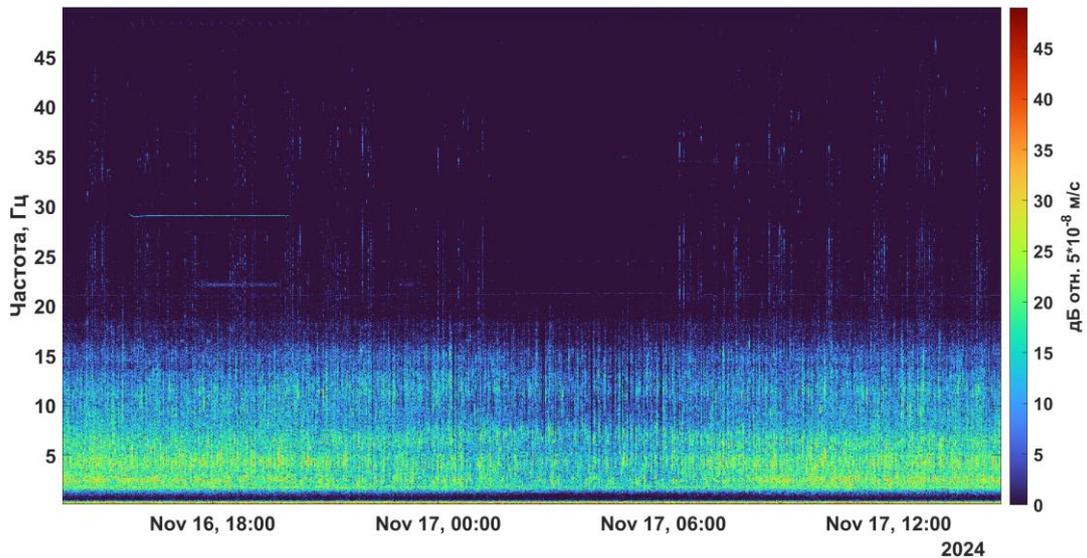


Рис. 11. Спектрограмма записи с опорной станции на постаменте КПЦ ИФЗ РАН. Наиболее высокие значения шума в диапазоне до 20 Гц соответствуют автомобильному транспорту. В более высокочастотной области наблюдается множество чередующихся полос, связанных с движением поездов в тоннеле метрополитена. В ночное время, когда метро не работает, данные полосы закономерно отсутствуют, а также менее интенсивен шум в диапазоне до 20 Гц, связанный с автомобильным транспортом. В ранние утренние и поздние вечерние часы полосы чередуются с большим интервалом, что говорит о снижении частоты движения поездов, в связи с изменением пассажиропотока в метро.

В разделе 4.3, в качестве одного из основных результатов, представлены карты пространственного распределения значений вибросейсмического шума (рис. 12-13). Помимо этого, аналогичные карты были получены по результатам прямых измерений акустического шума в рамках дополнительного эксперимента в пределах исследуемой территории (рис. 14-15).

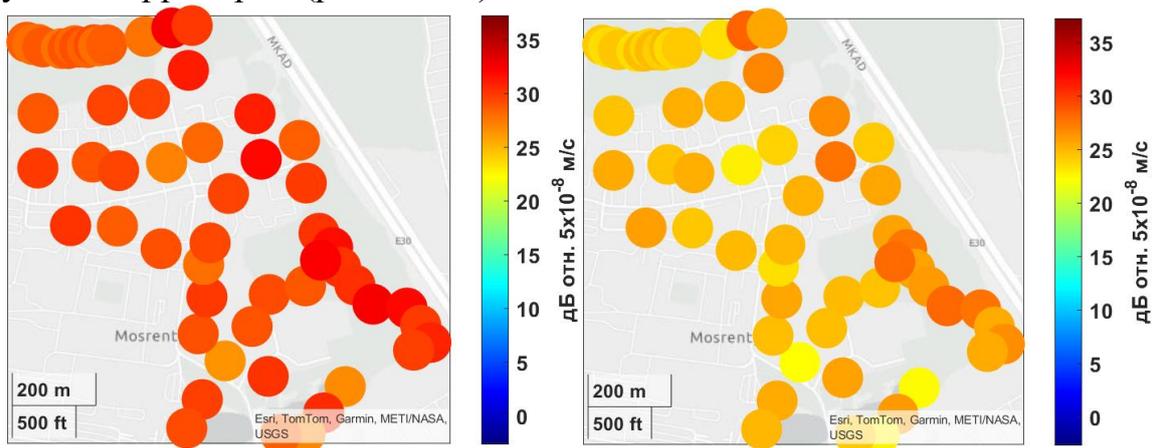


Рис. 12. Карты распределения вибросейсмического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 3,9 Гц

Для рассматриваемой частоты наблюдается практически равномерное пространственное распределение шумового фона днём и ночью, точек с пиковыми значениями, превышающими допустимые нормы не выявлено. Максимальный уровень шума днём составляет около 32,5 дБ, в ночное – 28,2 дБ.

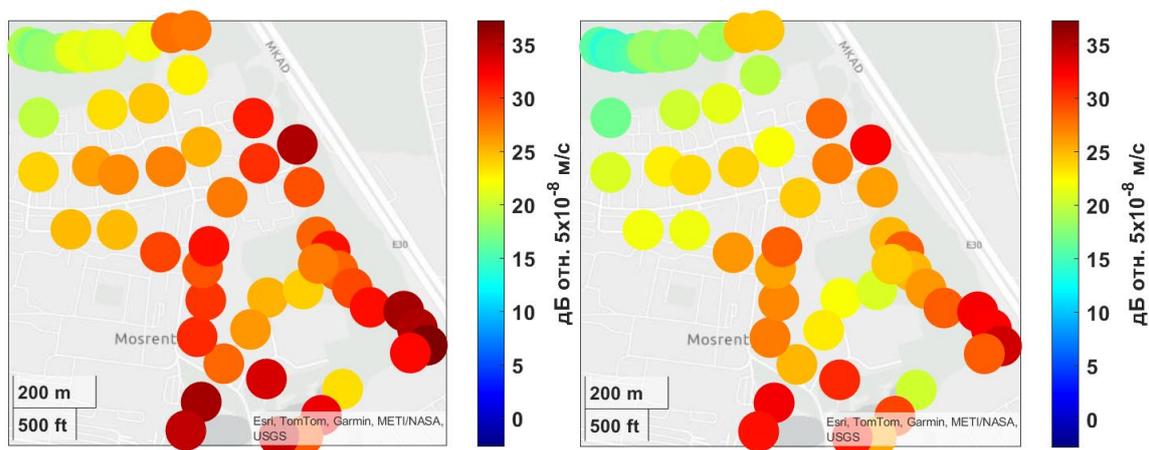


Рис. 13. Карты распределения вибросейсмического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 7,9 Гц

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

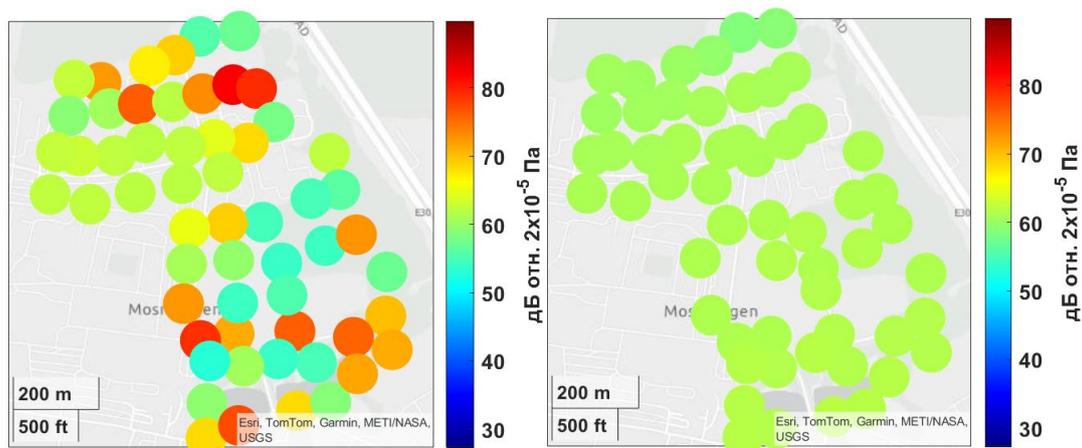


Рис. 14. Карты распределения акустического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 31,6 Гц

Днём уровень акустического шума распределён неравномерно, наиболее высокие значения зафиксированы в дворовой зоне в северной части исследуемой территории, а также в юго-восточной и южной областях, на территории парка развлечений и отдыха, что обусловлено обилием автомобильных транспортных средств, а также активностью населения в дневные часы. В ночное время шум распределён, практически, полностью равномерно по всей исследуемой территории, в связи с чем, выявление отдельных зон с пиковыми значениями не представляется возможным. Наибольшее значение звукового шума в дневное время для рассматриваемой частоты составляет 82,1 дБ, что на 3,1 дБ превышает допустимое значение, установленное санитарными нормами. В ночное время, в среднем, уровень

шума составляет 69,1 дБ и отличается от пикового значения в дневное время на 13 дБ.

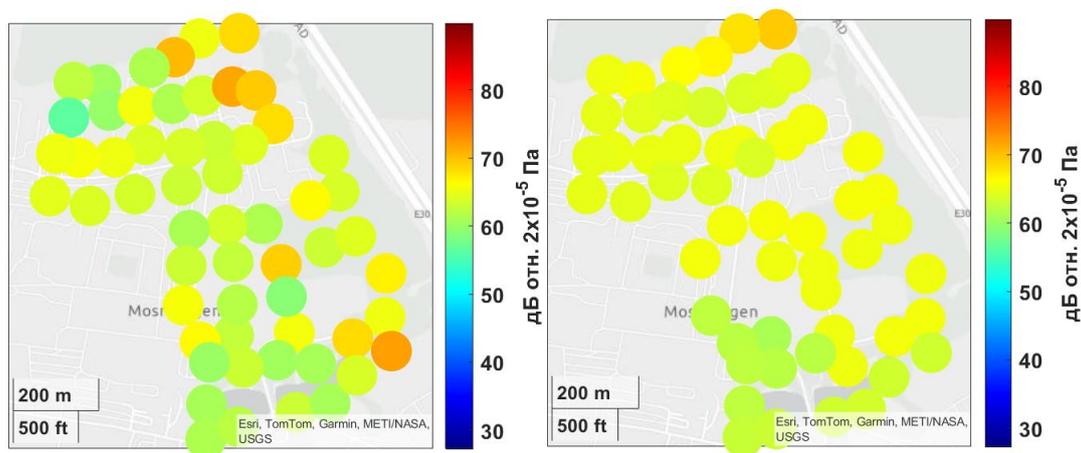


Рис. 15. Карты распределения акустического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночное (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 125 Гц

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

В разделе 4.4 представлена оценка свойств стационарности спектральных коэффициентов относительной интенсивности вибросейсмического шума. Для этого была использована т.н. «коробчатая диаграмма», представляющая собой разницу между 3-м и 1-м квартилями выборки (75-м и 25-м процентиллями).

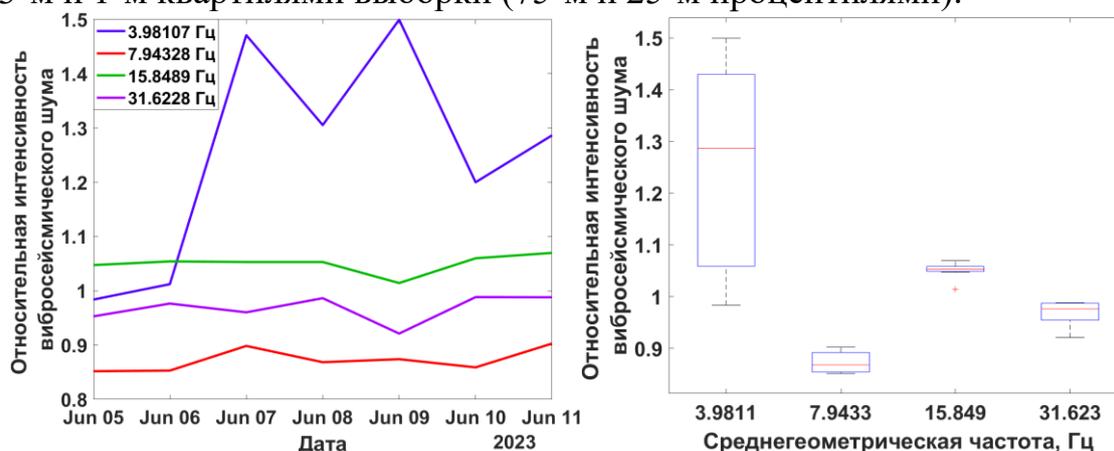


Рис. 16. Временная зависимость спектральных коэффициентов вибросейсмического шума в течение одной недели (слева) в лесной зоне и рассчитанная по ним коробчатая диаграмма для различных среднегеометрических октавных частот (справа)

Наименьшую стабильность в сравнении с остальными проявляют спектральные коэффициенты со среднегеометрической октавной частотой около 4 Гц, о чём также свидетельствует наибольшее значение межквартильного размаха на коробчатой диаграмме, составляющее около 0,37. Спектральные коэффициенты относительной интенсивности шума для остальных частот проявляют гораздо большую стабильность во времени и наименьшее значение межквартильного размаха соответствует среднегеометрической частоте около 16 Гц и составляет 0.01. Межквартильный размах на частотах около 8 и 31,6 Гц составляет около 0,038 и 0,033 соответственно.

Выводы к главе 4. По результатам изучения спектральных характеристик измеренных вибросейсмических шумовых полей, превышений допустимых норм, установленных санитарными нормами, не выявлено. После открытия станции московского метрополитена «Тютчевская», в частотно-временном представлении фонового шума с одинаковым временным интервалом появились характерные широкополосные линии, связанные с шумом вследствие движения поездов в тоннеле. При этом на количественные характеристики шумового фона открытие метро существенно не повлияло. По результатам исследования пространственного распределения вибросейсмического шума в пределах исследуемой территории для нормируемых октавных полос превышений допустимых значений из санитарных норм также не выявлено. Однако в результате оценки аналогичного распределения акустического шума в ряде точек выявлены исследуемой территории выявлены сильные превышения допустимых норм практически во всех октавных диапазонах. Представлены оценки свойств стационарности спектральных коэффициентов относительной интенсивности вибросейсмического шума. Наибольшая изменчивость характерна для среднегеометрической октавной частоты 3,9 Гц, для других частот рассматриваемые коэффициенты гораздо более стабильны. Таким образом, подтверждена работоспособность разработанного в ходе исследования подхода к оценке вибросейсмического шумового загрязнения. Показано, что с определённой небольшой погрешностью представляется возможным осуществлять мониторинг шумовой обстановки контролируемой территории при помощи измерений только лишь на опорном пункте, на основе спектральных коэффициентов, полученных в результате спектральной нормировки на опорный пункт экспериментальных данных с разных точек.

Глава 5. Изучение шумовой обстановки на территории ГФО «Михнево» и сравнение с основным объектом исследований. В данной главе приводится описание геофизической обсерватории «Михнево» (ГФО «Михнево») ИДГ РАН, а также сравнение характеристик шумовых полей на территории ГФО и в пос. Мосрентген.

В 2004 году на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево»), находящейся в относительно слабо заселённом Ступинском районе Московской области, расположенном в 70 км к югу от Москвы, установлена одноимённая малоапертурная сейсмическая антенна, направленная на мониторинг слабых сейсмических событий на локальных и региональных эпицентральных расстояниях и пространственную локализацию их источников – МСА «Михнево». В месте установки антенны залегают осадочные горные породы. Энергетический

уровень микросейсмического шума по смещению на частоте 1 Гц составляет $2 \text{ нм}^2/\text{Гц}$, а на частоте 10 Гц – $5 \times 10^{-4} \text{ нм}^2/\text{Гц}$. Корреляция шума в пределах апертуры группы составляет менее 0,2 уже на расстоянии 300 м, что создаёт хорошие условия для регистрации слабых региональных сейсмических событий, с магнитудой менее 2 (Санина и др., 2009). На рисунке 17 изображена пространственная конфигурация антенны.

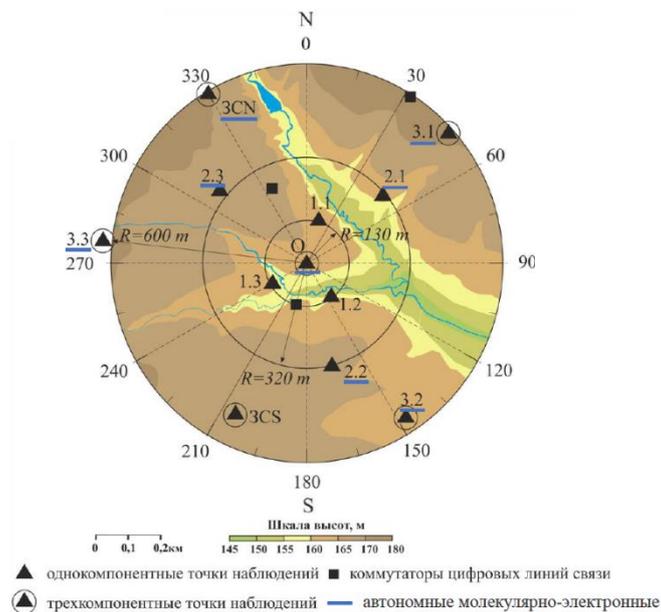


Рис. 17. Пространственная конфигурация измерительных каналов МСА «Михнево»
В состав антенны входит 12 каналов. Радиусы трёх concentрических окружностей составляют 130, 320 и 600 м соответственно.

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

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

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

В июне 2023 года сотрудниками Лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии ИФЗ РАН была предпринята попытка оценить эффективность работы трёхкомпонентных молекулярно-электронных сейсмических датчиков модели СМЕ-6111ND производства компании «R-Sensors» в

качестве единой малоапертурной сейсмической группы, аналогичной МСА «Михнево». Всего в состав группы вошло 8 датчиков, пространственное расположение которых отмечено на рисунке 17 горизонтальными синими линиями. На рисунке 18 представлены сигналы, зарегистрированные на геофизических постаментов КПЦ ИФЗ РАН и ГФО «Михнево».

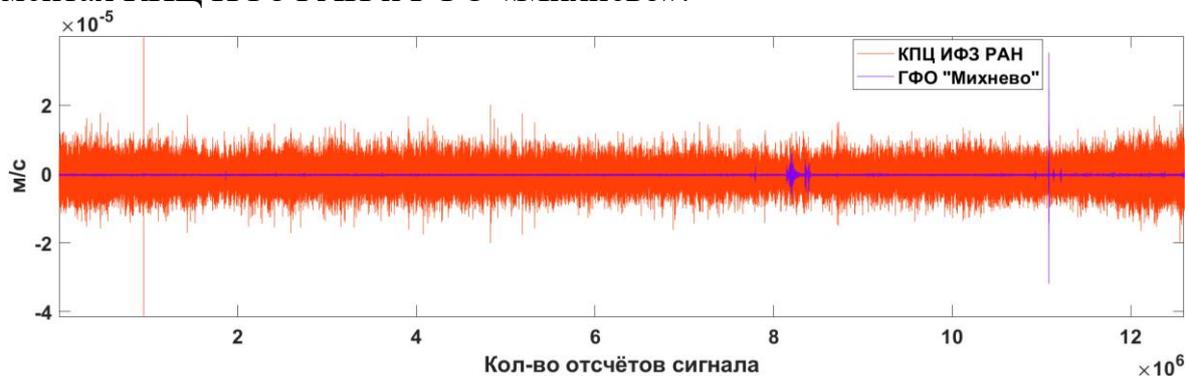


Рис. 18. Сигналы, зафиксированные на геофизических постаментах КПЦ ИФЗ РАН и ГФО «Михнево» в июне 2023 года

Крайне очевиден значительно более высокий уровень шума на территории пос. Мосрентген в сравнении с ГФО «Михнево» на всём интервале записи. На рисунке 19 изображены спектры мощности рассматриваемых сигналов.

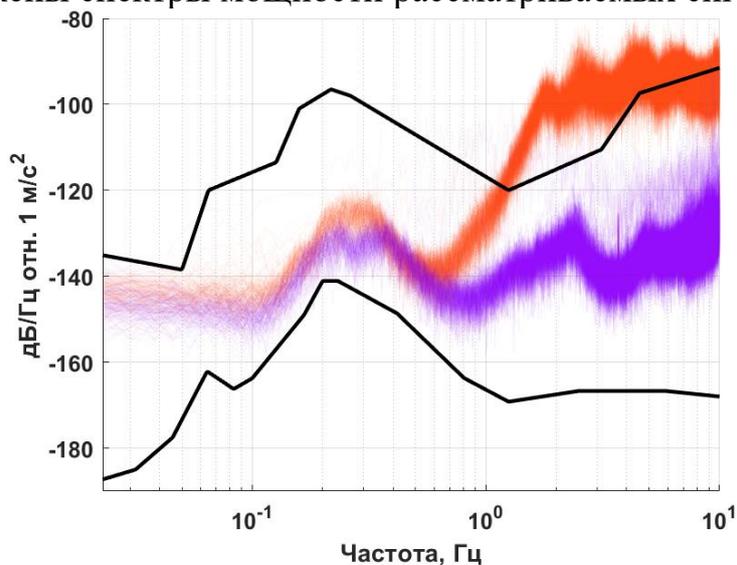


Рис. 19. Спектры мощности: оранжевый цвет – сигнала с постамента КПЦ ИФЗ РАН, фиолетовый цвет – с постамента ГФО «Михнево»

Очевиден высокий уровень высокочастотного техногенного сейсмического шума (более 1 Гц), источником которого является ежедневный интенсивный дорожный трафик на участке МКАД, расположенном в непосредственной близости от КПЦ, значительно превышающий уровень шума в аналогичном диапазоне частот, зафиксированный в ГФО «Михнево». На рисунке 20 представлены спектрограммы с постаментов КПЦ ИФЗ РАН и ГФО «Михнево».

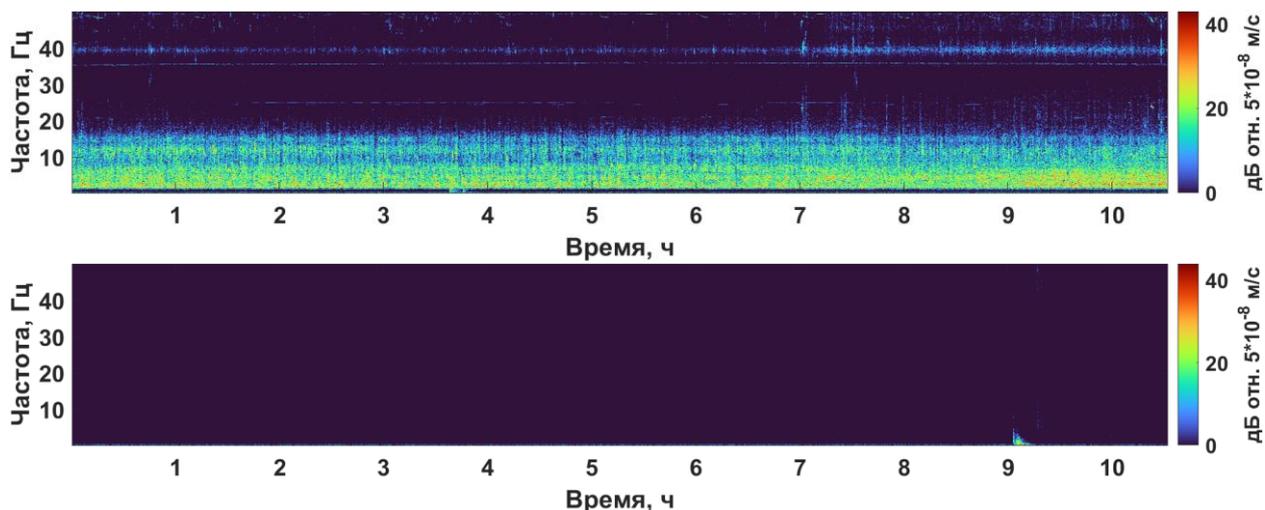


Рис. 20. Спектрограммы сигнала с постаментов КПЦ ИФЗ РАН (сверху) и с постаментов ГФО «Михнево» (снизу)

Крайне очевидно отличие уровней шума. В Михнево полностью отсутствует шум от техногенных источников.

На рисунке 21 приведены спектры шума в Михнево в вечернее и ночное время суток.

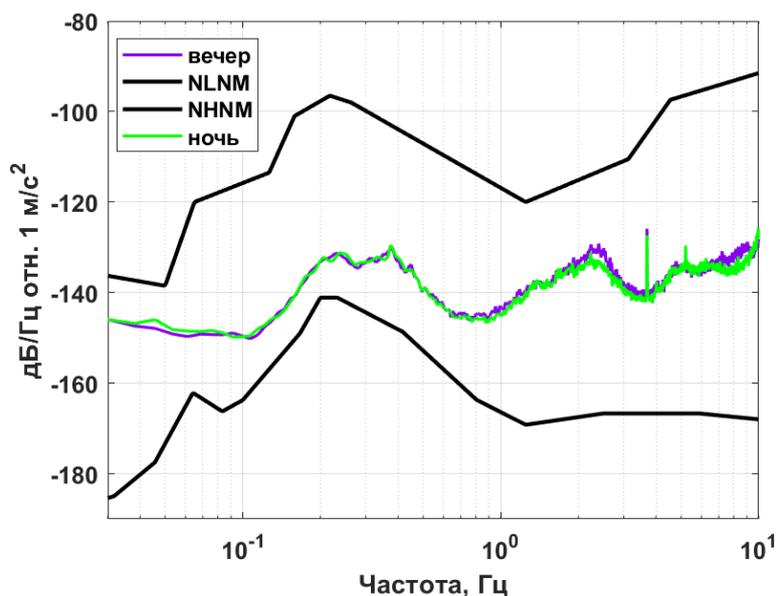


Рис. 21. Сравнение спектров записей на территории ГФО «Михнево» в вечернее и ночное время суток

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

Выводы к главе 5. Малоапертурная сейсмическая антенна «Михнево» предназначена для регистрации слабых локальных и региональных сейсмических событий, магнитудой менее 3. Также данная система, благодаря фазовой задержке сигналов на её входах, позволяет определять азимут на источник события. Таким образом, есть основания полагать, что подобная система может быть эффективна как инструмент для выделения слабых воздействий в условиях высокого уровня фонового техногенного шума на территориях мегаполисов, позволяя при этом

определять расстояние на источники таких событий. Проведено сравнение уровней шума на территории ГФО «Михнево» и посёлка Мосрентген. Шумовая картина различается кардинально – уровень фонового шума Михнево гораздо ниже, чем в Мосрентгене.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. 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.

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

Проведена оценка свойств стационарности, определяемых в ходе реализации разработанной методики спектральных коэффициентов относительной интенсивности вибросейсмического шума. Выявлено, что на самой низкой среднегеометрической частоте спектральные коэффициенты наименее стабильны во времени, однако с ростом частоты они проявляют гораздо большую стабильность. Тем самым показано, что разработанная методика вполне пригодна для корректного

определения уровней шума в различных точках контролируемой территории с небольшой погрешностью.

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

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Котов А. Н.**, А. Л. Собисевич, Д. А. Преснов, Р. А. Жостков. Натурное изучение пространственно-временных вариаций сейсмических шумов мегаполиса // Геофизика. – 2021. – №. 2. – С. 82-88.

2. Собисевич А. Л., Преснов Д. А., Тубанов Ц. А., Черемных А. В., Загорский Д. Л., **Котов А. Н.**, Нумалов А. С.. Байкальский сейсмоакустический эксперимент // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 496, №. 1. – С. 82-86.

3. **Котов А. Н.**, Агибалов А. О., Сенцов А. А. Низкочастотное шумовое загрязнение северо-восточной части пос. Мосрентген (г. Москва) // Геофизические процессы и биосфера. – 2023. – Т. 22, № 2. С. 109-121.

4. Sobisevich A. L., Steblov G. M., Sentsov A. A., Deev E. V., Eppelbaum L. V., Agibalov A. O., Aleshin I. M., Balashov G. R., Kamenev O. T., **Kotov A. N.**, Makeev V. M., Perederin V. P., Perederin F. V., Rosenberg N. K., Kholodkov K. I. Identification of Potential Earthquake Foci Locations Zones in the Altai-Sayan Mountain Region: A New Approach Using Morphometric Terrain Analysis and Geodynamic Modeling // Natural Hazards, 2025, pp. 1-25

5. Свидетельство № 2022667831 «Программа для расчёта относительной интенсивности сейсмического шума», заявка № 2022666558, 17.09.2022. Зарегистрировано в Государственном Реестре программ для ЭВМ: 27.07.2022, Автор: **Котов А. Н.**

6. Свидетельство № 2022667831 «Программа для оценки уровней акустического шума», заявка № 2022683889, 05.12.2022. Зарегистрировано в Государственном Реестре программ для ЭВМ: 08.12.2022, Автор: **Котов А. Н.**

7. Свидетельство № 2023688156 «Программа для оценки свойств стационарности относительных уровней микросейсмического шума и корреляционных свойств шумов в пределах контролируемой территории», заявка № 2023687425, 12.12.2023. Зарегистрировано в Государственном Реестре программ для ЭВМ: 20.12.2023, Автор: **Котов А. Н.**

8. Свидетельство № 2023688085 «Программа для построения карт микросейсмического загрязнения для различных частотных диапазонов», заявка № 2023687435, 12.12.2023. Зарегистрировано в Государственном Реестре программ для ЭВМ: 20.12.2023, Автор: **Котов А. Н.**

Публикации, не входящие в список ВАК:

1. В. В. Гравиров, К. В. Кислов, Д. В. Лиходеев, **Котов А. Н.** Аппаратурный комплекс для измерения глубины промерзания грунта // Научное приборостроение. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 98-102.

2. Б. И. Гончаренко, В. Ю. Кузьменков, **Котов А. Н.** Экспериментальное исследование особенностей формирования спектра шумов беспилотного летательного аппарата // NOISE Theory and Practice. – 2020. – Т. 6, № 4 (22). – С. 49-59.

3. Гравиров В. В., Жостков Р. А., **Котов А. Н.**, Тощов С. А. Применение искусственных нейронных LSTM-сетей для оперативного анализа акустических, магнитных и вибрационных полей // Наука и технологические разработки. – 2023. – Т. 102, № 1. – С. 40-64.

Подписано в печать _____
Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.

Тираж 100 шт. Заказ №__

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН

123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

Тел./факс: (499) 254 90 88