

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 и в Лаборатории функциональных материалов и систем фотоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения 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:**

Ковалевский Валерий Викторович

Доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией геофизической информатики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук;

Шабалина Анна Сергеевна

Кандидат физико-математических наук, доцент Центра образовательных программ Физтех-школы Радиотехники и Компьютерных Технологий (ФРКТ) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

**Ведущая
организация:**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева
Российской академии наук (ИГЭ РАН), г. Москва**

Защита диссертации состоится **19 февраля 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета 24.1.132.01, созданного 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.gisnauka.ru и на сайте ИФЗ РАН www.ifz.ru.

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

Автореферат разослан «___» января 2026 г.

Учёный секретарь диссертационного совета:
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, характеризуемых 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 заграждения, 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., 2016].

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

1. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:
2. Разработка методических основ – создание алгоритма операций реализации методики мониторинга вибросейсмического и акустического загрязнения жилых районов городских агломераций.
3. Осуществление сбора натурных данных по вибросейсмическим и акустическим полям на территории плотной городской застройки;
4. Создание специального программного обеспечения, позволяющего осуществлять обработку полученных в результате эксперимента натурных данных;
5. Проведение анализа полученных в ходе обработки натурных 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. Синхронная регистрация микросейсмического шума на опорном пункте и разнесённых пунктах измерений позволяет оценивать площадное распределение уровней шумов в любой момент времени с ограниченным числом точек измерения.

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

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в возможности осуществления мониторинга вибросейсмической обстановки, а также построения карт вибросейсмического загрязнения крупных городских агломераций по аналогии с методами микросейсмического зондирования и микросейсмического районирования на основании данных, регистрируемых всего одной сейсмостанцией, в режиме реального времени.

Методология и методы исследования. Методические основы работы в значительной степени базируются на функционале пассивного способа сейсморазведки (ММЗ). Путём сравнительного анализа амплитудных спектров, полученных на опорном пункте и разнесённых по исследуемой территории точках наблюдения, представляется возможной оценка пространственного распределения интенсивности микросейсмических колебаний в произвольный момент времени [Цуканов, 2015].

Процедура построения карт низкочастотного шумового загрязнения в определённом смысле близка к сейсмическому микрорайонированию [Цуканов, 2015], 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. Широкополосный молекулярно-электронный сейсмометр СМЕ-4211 в сочетании с цифровой системой сбора данных обладает достаточными чувствительностью и динамическим диапазоном, что позволяет проводить измерения вибросейсмических шумов в диапазоне среднегеометрических октавных частот, нормируемых специализированными нормативными актами СНиП.

2. Созданные технология эксплуатации сейсмических датчиков и методика обработки экспериментальных данных, основанная на анализе их спектральных отношений, позволяют осуществлять оперативный мониторинг

вибросейсмических шумов в пределах 2 км относительно опорного измерительного пункта.

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

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах создания диссертационной работы. Автором лично выполнены: обширный анализ отечественных и зарубежных литературных данных, связанных с темой настоящего диссертационного исследования, сбор данных о вибросейсмической обстановке исследуемой территории в ходе полевого натурного эксперимента на территории пос. Мосрентген, Троицкого и Новомосковского административных округов г. Москвы при помощи специализированных гео-гидроакустических модулей. Выполнена обработка полученных в ходе натурного эксперимента данных по специальному алгоритму в программном комплексе Matlab. В том же комплексе рассчитаны и построены разномасштабные карты распределения относительных интенсивностей сейсмического поля исследуемой территории, а также карты вибросейсмического загрязнения исследуемой территории в абсолютных величинах в диапазоне среднегеометрических октавных частот 3,8-31,6 Гц. Также автором был проведён дополнительный эксперимент на территории пос. Мосрентген по сбору данных об акустическом загрязнении исследуемой территории. В результате были рассчитаны и построены карты акустического загрязнения исследуемой территории в диапазоне среднегеометрических октавных частот 31,6-500 Гц. Также автором были проведены измерения вибрационных и акустических шумов на территории жилой застройки в районе Сокольники, г. Москва, по результатам которых были выявлены многочисленные превышения допустимых норм в различных частотных диапазонах.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается достаточным количеством наблюдений, современными методами исследования, которые соответствуют цели работы и поставленным задачам. Сформулированные в тексте диссертации научные положения, выводы и практические рекомендации основаны на фактических данных, продемонстрированных в приведённых 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, 5-й и 10-й Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Акустика среды обитания», Москва, научной школе-конференции «Рельеф Новой Москвы: ресурсы и риски природопользования», 10-й международной конференции аспирантов и молодых учёных «Молодёжь 21-го века: образование, наука, инновации», 15-я школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса – 2024», 35-й Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления: физика и применения» им.

проф. А. П. Сухорукова, Конференции молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН 2022 и 2024 гг.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 11 работ, 3 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 и списка литературы. Диссертация включает 135 страниц текста, 67 рисунков, 9 таблиц. Список литературы насчитывает 124 наименования.

Благодарности. Работа подготовлена при участии в проекте Минобрнауки России № 075-15-2024-642.

Автор выражает огромнейшую благодарность своему научному руководителю – доктору физико-математических наук, члену-корреспонденту РАН, главному научному сотруднику, заведующему лабораторией № 703 ИФЗ РАН Собисевичу Алексею Леонидовичу за всестороннюю помощь и поддержку, чуткое руководство, наставления и ценные советы на всех этапах выполнения работы. Автор выражает искреннюю признательность и огромную благодарность своим дорогим коллегам и товарищам, сотрудникам лаборатории № 703 ИФЗ РАН – к.ф.-м.н. Преснову Дмитрию Александровичу, к.ф.-м.н. Жосткову Руслану Александровичу, к.ф.-м.н. Лиходееву Дмитрию Владимировичу за всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах диссертационного исследования, за ценные советы и пожелания к работе, за важные и плодотворные дискуссии. Отдельную благодарность автор выражает доктору технических наук, профессору Собисевичу Леониду Евгеньевичу за предложенную научную идею, которая легла в основу настоящего диссертационного исследования, за ценные замечания и напутствия. Также автор благодарен и признателен сотрудникам Лаборатории сейсмологических методов исследования литосферы ИДГ РАН – д.ф.-м.н. Саниной Ирине Альфатовне за плодотворные дискуссии, конструктивные советы и критику и огромную помощь в структурировании рукописи работы и Волосову Сергею Георгиевичу за бесценный опыт участия в полевых сейсмологических исследованиях.

Также автор выражает самую искреннюю любовь и благодарность самым дорогим и близким людям в своей жизни: отцу – Котову Николаю Михайловичу, маме – Котовой Алевтине Георгиевне и старшему брату – Котову Алексею Николаевичу за неиссякаемые заботу, любовь, теплоту и поддержку на каждом шаге своего жизненного пути.

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 вибросейсмического 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 [Bonnefoy-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, предваряющих 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 микроразрешения 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 разработка методов использования информации об окружающих сейсмических шумах для получений 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 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 [Beben 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 1.5 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 1.6 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].

В разделе 1.7 приведены результаты серии измерений вибрационных и акустических шумов на территории жилой застройки в районе Сокольники, г. Москва. По полученным данным установлено, что наиболее шумным является частотный диапазон 5-20 Гц, выявлены суточные вариации вибрационного шума. Также выявлены неоднократные превышения допустимых норм вибрационного шума в нескольких октавных частотных диапазонах.

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. После обращения в ИФЗ РАН жительницы района Сокольники о физическом недомогании вследствие воздействия вибрации, на территории её жилплощади были проведены соответствующие измерения, по результатам которых были выявлены неоднократные превышения допустимых норм.

Глава 2. Аппаратурно-измерительный комплекс, необходимый для получения натурных 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 2.1 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).

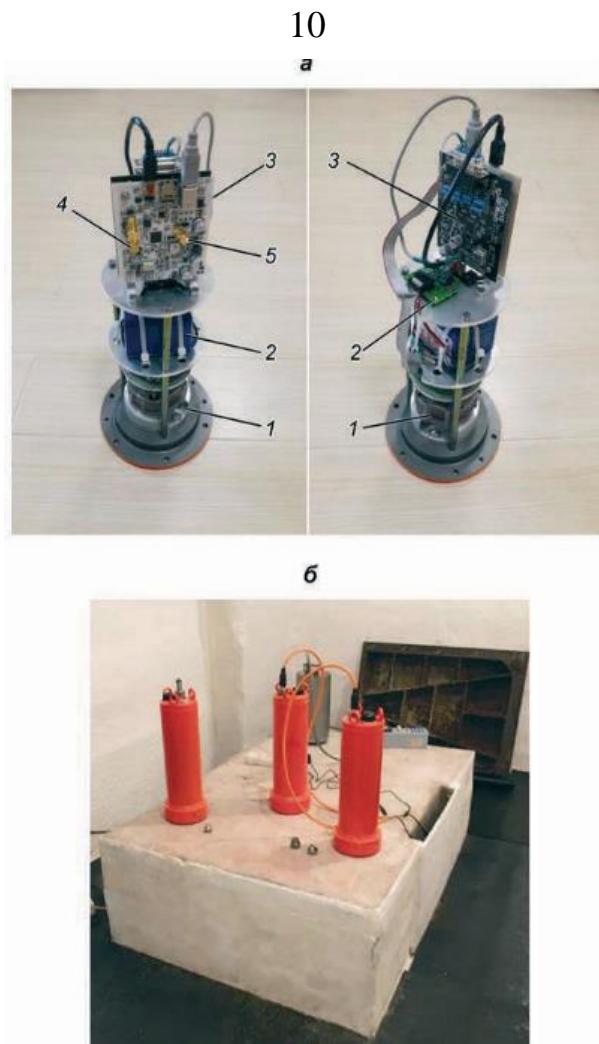


Рис. 1. Конструкция гео-гидроакустического модуля (а) и внешний вид размещения гео-гидроакустических буёв на постаменте в г. Обнинск 30.08.2017 г. (б): 1 – аналоговый молекулярно-электронный вертикальный сейсмический датчик; 2 – литий-ионная батарея с платой согласования; 3 – 24-разрядный регистратор 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). Чувствительный элемент представляет собой четырёхэлектродную электрохимическую ячейку, помещённую перпендикулярно каналу с гибкими мембранными 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 2.2 описано программное обеспечение, необходимое для работы с измерительным оборудованием.

В разделе 2.3 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

проводены сравнительные испытания проводились на геофизическом постаменте КПЦ ИФЗ РАН.

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 2.4 описаны обсерваторские исследования основных характеристик широкополосных сенсоров в составе буев ледового класса в заглубленных боксах на измерительных постаментах 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 (ОВН); кроме того, были проанализированы данные с велосиметра Guralp CMG-3ESP [Горбенко и др., 2016]. На рисунке 2 представлено сопоставление частотных характеристик, заявленных изготовителями приборов, с частотными характеристиками гео-гидроакустического буя с установленным датчиком СМЕ.

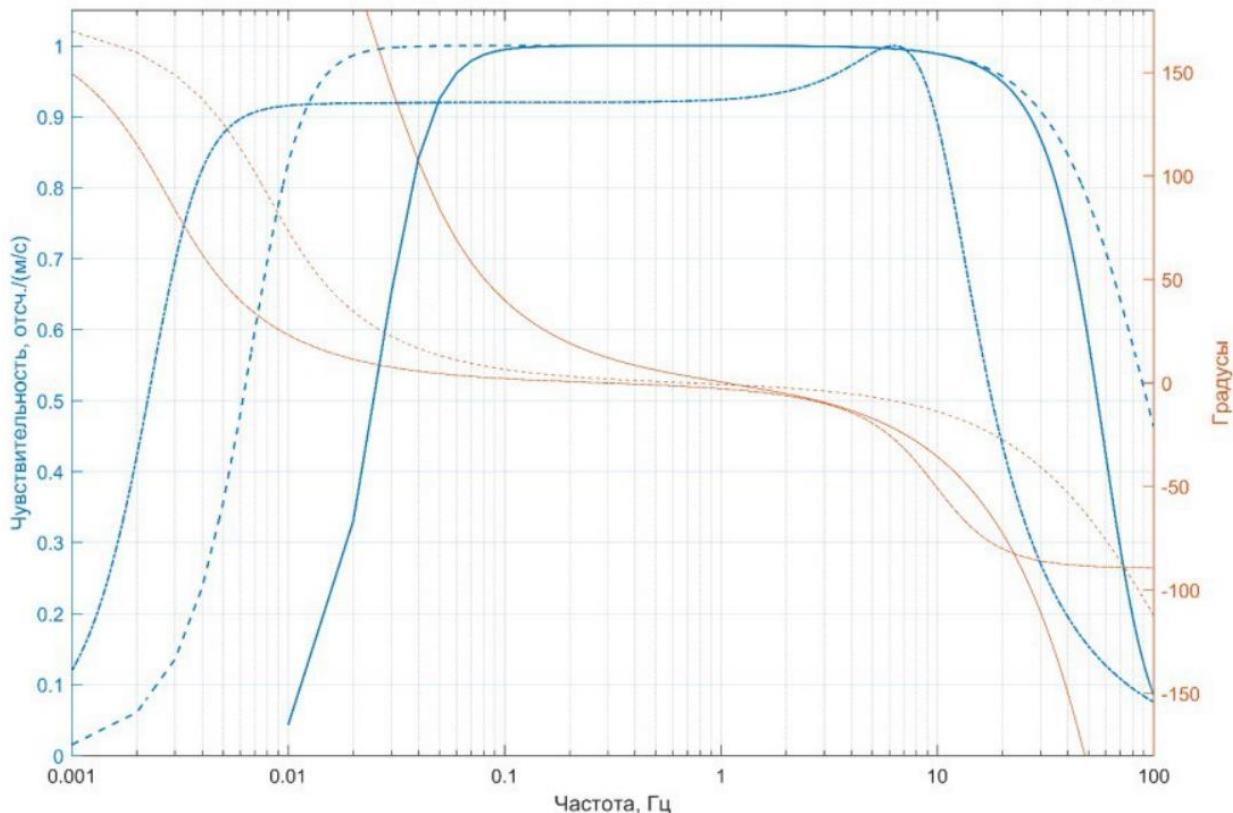


Рис. 2. Амплитудно-частотная (АЧХ) (голубой цвет) и фазо-частотная (ФЧХ) (оранжевый цвет) характеристики приборов Streckeisen (штрихпунктирная линия), Guralp (штриховая линия) и СМЕ (сплошная линия)

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 зашкленными.

В разделе 2.5 описаны результаты испытаний гео-гидроакустического измерительного модуля в рамках эксперимента по изучению сейсмоакустических шумовых полей, создаваемых ветроэнергетическими установками (ВЭУ). Выявлены характерные особенности в спектральном составе зарегистрированных волновых полей, связанные с вращением лопастей ВЭУ, в виде основной низкочастотной квазигармонической составляющей, а также её более высокочастотных кратных составляющих. Разработанный измерительный комплекс позволяет осуществлять мониторинг шумового загрязнения в частотных диапазонах, нормируемых специализированными нормативными актами.

Выводы к главе 2. 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 сейморазведке на суше, под водой, а также проходят первые испытания в ледовых условиях. Проведённые натурные испытания в различных условиях подтверждают первое защищаемое положение – разработанный широкополосный молекулярно-электронный сейсмометр с цифровой системой регистрации данных обладает всеми необходимыми характеристиками для проведения измерений вибросейсмических шумов в соответствии с санитарными нормами.

Глава 3. Разработка нового подхода к мониторингу вибросейсмического загрязнения населённого пункта.

В данной главе представлено описание методики мониторинга вибросейсмического шумового 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 3.1 приведено краткое описание сути и реализации метода микросейсмического зондирования. Это пассивный способ сейморазведки, 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:

$$H(f) = k \times \lambda(f) = k \times V_r(f)/f \quad (1)$$

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

k – коэффициент глубинной привязки, определяемый по результатам моделирования;

λ – длина волны;

V_r – скорость Рэлеевских волн

В настоящей работе не проводится 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 3.2 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 3.3 приведено теоретическое описание методики предлагаемой в работе методики мониторинга вибросейсмического шумового 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 пространственного распределения вибросейсмического шумового фона исследуемой территории в абсолютных значениях, которые будут приведены в главе 4.

Выводы к главе 3. Описанная в главе технология эксплуатации разработанных широкополосных молекулярно-электронных сейсмических датчиков, а также созданная, основанная на оценке спектральных отношений специальная методика обработки экспериментальных данных, позволяют осуществлять оперативный мониторинг вибросейсмического шумового загрязнения контролируемой территории, что подтверждает второе положение, выносимое на защиту.

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. 3).

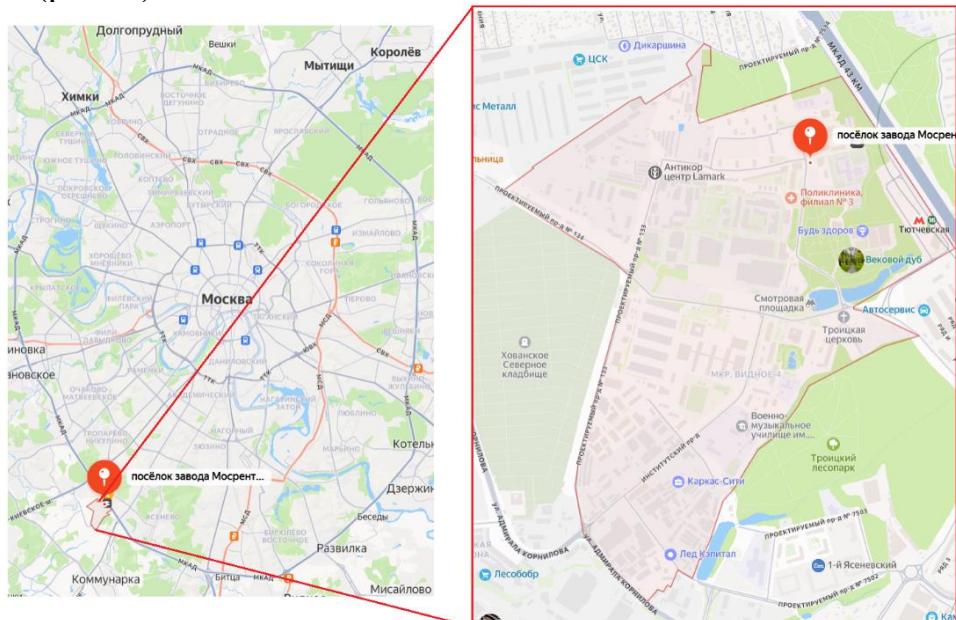


Рис. 3. Расположение посёлка Мосрентген на карте Москвы

В первую очередь, выбор данного населённого пункта обусловлен тем, что именно на его территории расположен Координационно-прогностический центр ИФЗ РАН (КПЦ ИФЗ РАН). Также пос. Мосрентген является густонаселённым районом с развитой инфраструктурой, с численностью населения более 16 тыс. человек, на территории которого функционирует станция «Тючевская» 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 4 показана схема расположения измерительных точек на исследуемой территории и положение опорной станции. Измерения проводились в 58-и точках.

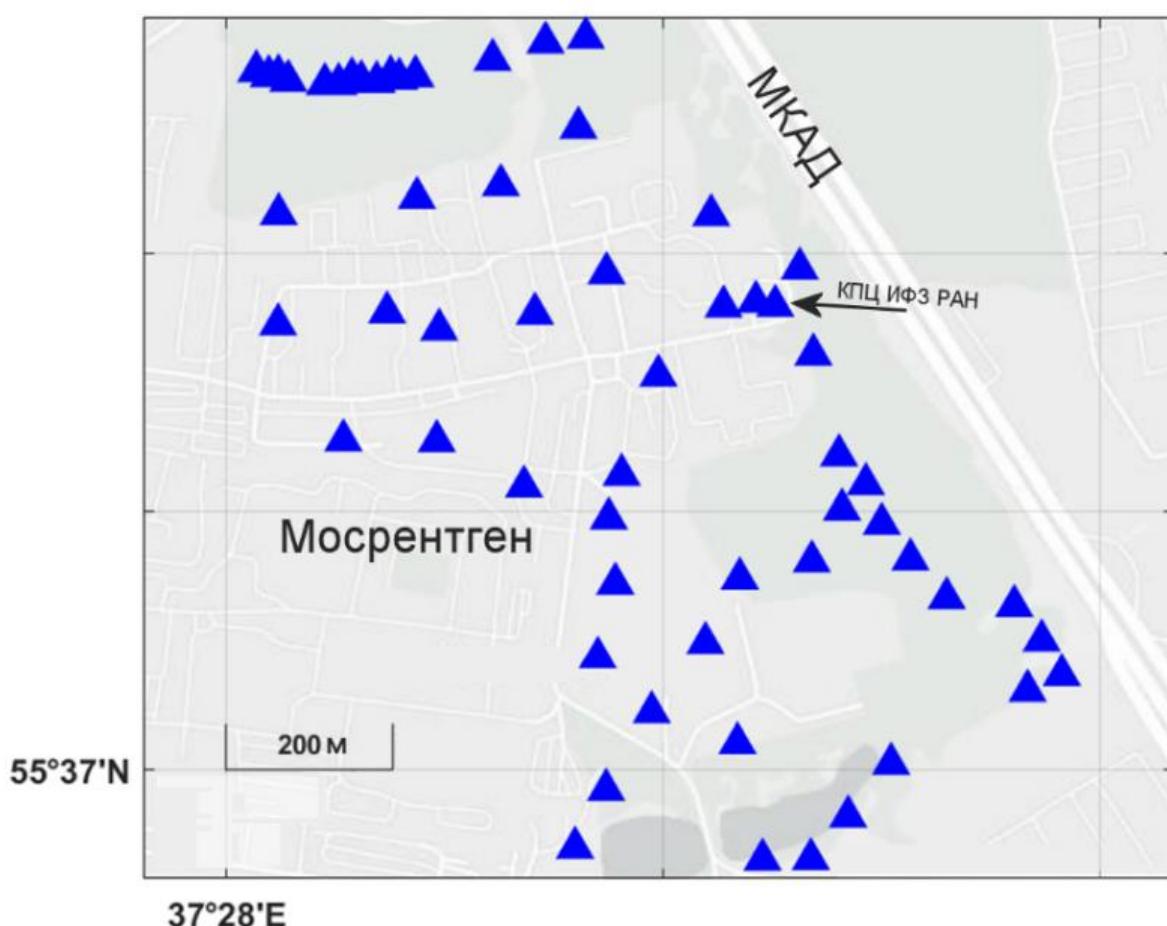


Рис. 4. Схема пространственного расположения измерительных точек вибросейсмического шумового поля

В разделе 4.2 представлены результаты исследования спектральных характеристик зарегистрированных волновых полей. Выявлено, что шум, регистрируемый на постаменте КПЦ, является более стабильным и его уровень, в целом, немного ниже, чем в измерительных точках.

На рисунке 5 представлена спектральная функция плотности вероятности вибросейсмического шума с опорного пункта в период с ноября 2024 по март 2025 года.

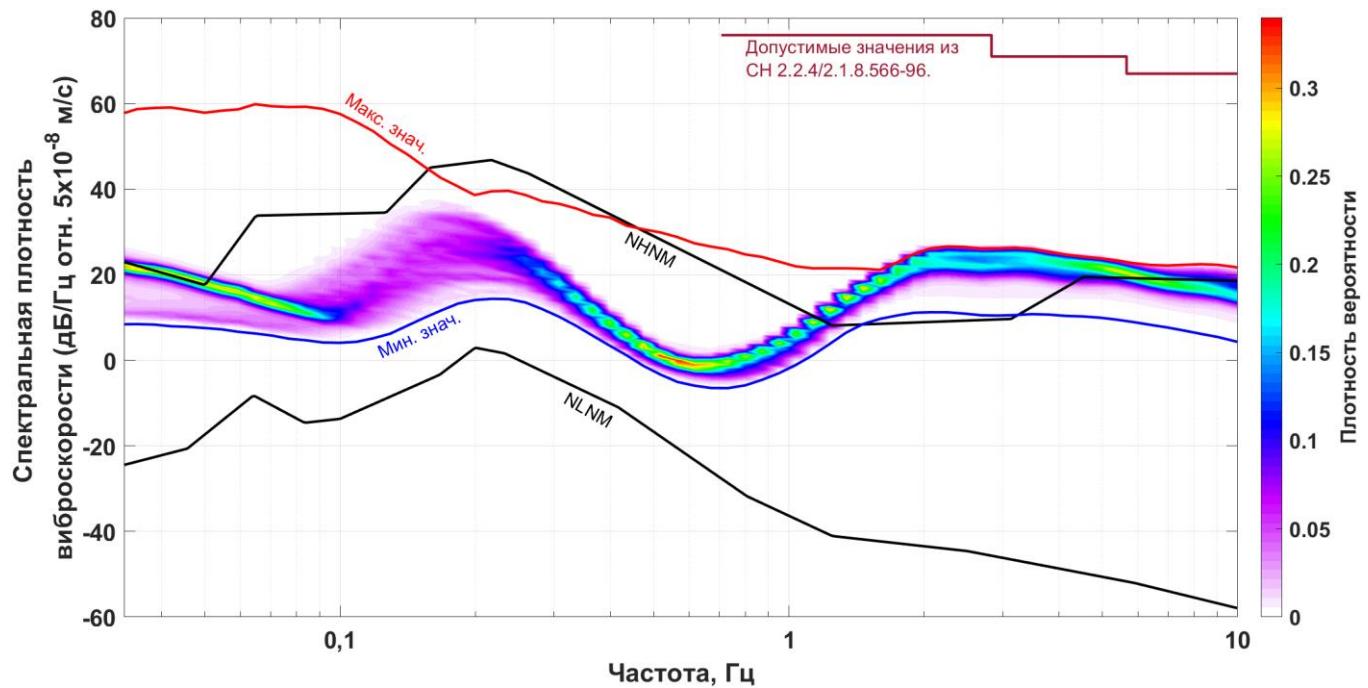


Рис. 5. Спектральная функция плотности вероятности вибросейсмического шума, зарегистрированного на постаменте КПЦ ИФЗ РАН в период с ноября 2024 по март 2025 года

В основу построения рассматриваемого вероятностного спектра лёг расчёт значений функции плотности вероятности по логарифмическим уровням спектральных значений колебательной скорости 13-минутных фрагментов записи вибросейсмического шума с постамента КПЦ за указанный период времени [McNamara, Buland, 2004]. Спектральные значения интервалов записи получены на основе оценки спектральной плотности мощности методом Уэлча по следующему алгоритму процедур:

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

Переход от абсолютных спектральных значений колебательной скорости к логарифмическим осуществлялся по следующей формуле:

$$L_v = 20 \lg \left(\frac{v}{v_{\text{оп}}} \right) \quad (2)$$

где v – измеренное значение виброскорости, а $v_{\text{оп}}$ – опорное значение виброскорости, установленное нормативными актами, составляющее 5×10^{-8} м/с.

В разделе 4.3 представлены карты пространственного распределения значений вибросейсмического шума (рис. 6).

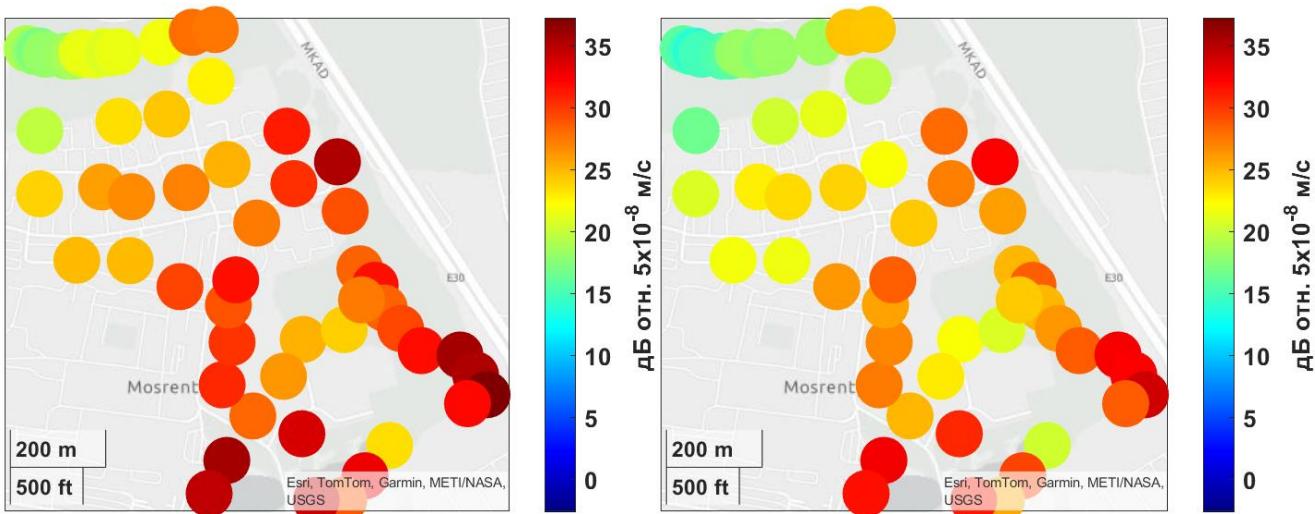


Рис. 6. Карты распределения вибросейсмического шумового фона на территории посёлка Мосрентген в дневное (слева) и ночные (справа) время суток для среднегеометрической октавной частоты 7,9 Гц

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 ночные 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 не выявлено.

В разделе 4.4 представлены результаты оценки свойств стационарности спектральных коэффициентов относительной интенсивности вибросейсмического шума. Выявлено, что разработанная в ходе исследования методика позволяет довольно надёжно, с малой погрешностью прогнозировать поведение шумовых полей в диапазоне среднегеометрических октавных частот от 3,9 до 15,8 Гц, как в относительно тихих, так и довольно зашумлённых зонах контролируемой территории. На частоте 31,6 Гц такой прогноз несколько менее надёжен.

В разделе 4.5 представлены результаты оценки пространственной стабильности вибросейсмических шумовых полей, на основе анализа функции взаимной корреляции сигналов, зарегистрированных на разном расстоянии вдоль линейного профиля относительно опорного пункта. Выявлено, что разработанная методика мониторинга вибросейсмического шумового загрязнения способна корректно функционировать и надёжно покрывать территорию в радиусе 2 км относительно опорного измерительного пункта.

Выводы к главе 4. Проведён анализ спектрального состава шумовых полей на территории посёлка Мосрентген. Выявлены спектральные пики в высокочастотной области, связанные с работой специальной техники при строительстве метро, а после его открытия на спектрограмме сигнала с опорной станции появились широкополосные линии, связанные с движением поездов. Однако, в целом, на уровень фонового вибросейсмического шума открытие станции метрополитена сильно не повлияло. Построены частотно-зависимые карты пространственного распределения значений вибросейсмического шума. Однако

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

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

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

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

Глава 5. Изучение шумовой обстановки на территории ГФО «Михнево» и сравнение с основным объектом исследований.

В данной главе приводится описание малоапертурной сейсмической антенны (МСА), расположенной на территории геофизической обсерватории «Михнево» (ГФО «Михнево») ИДГ РАН, а также сравнение характеристик шумовых полей на территории ГФО и в пос. Мосрентген. На рисунке 7 представлена пространственная конфигурация антенны.

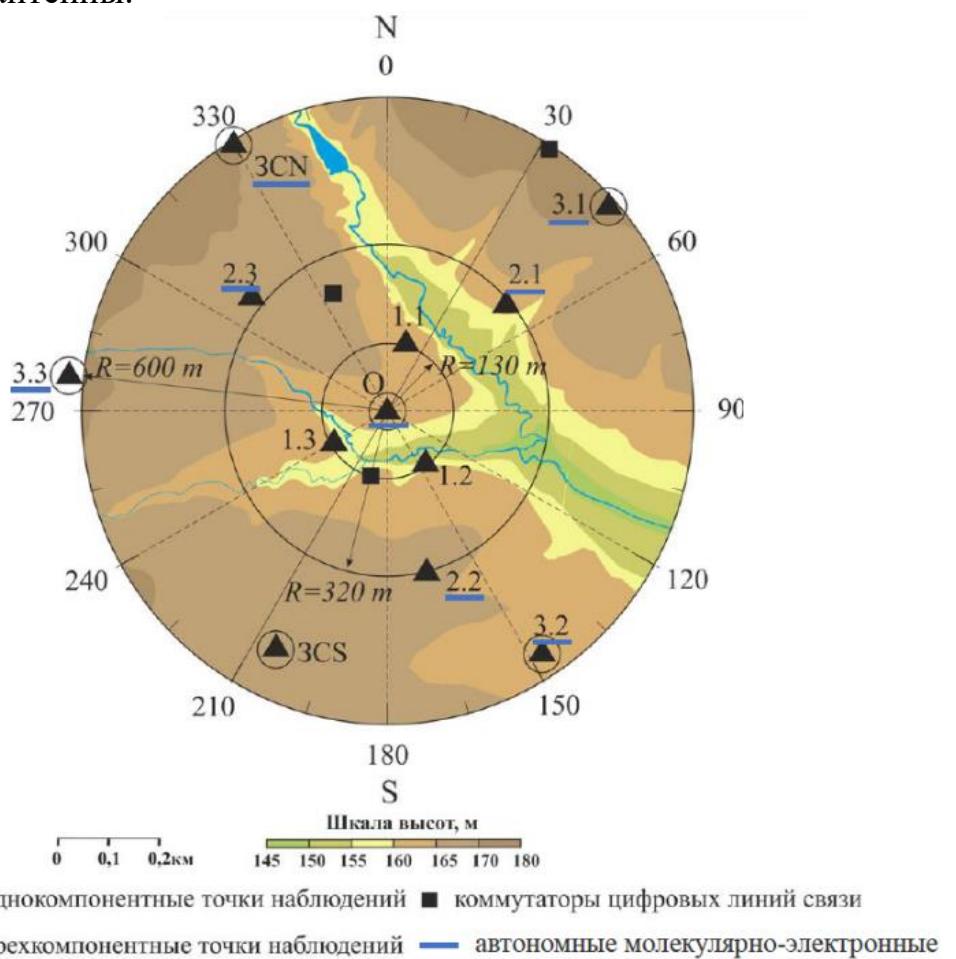


Рис. 7. Пространственная конфигурация измерительных каналов МСА «Михнево»

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

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 3.

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 антenna 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 SME-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 7 горизонтальными синими линиями.

На рисунке 8 изображены спектры мощности вибросейсмического шума на территории МСА «Михнево» и посёлка Мосрентген.

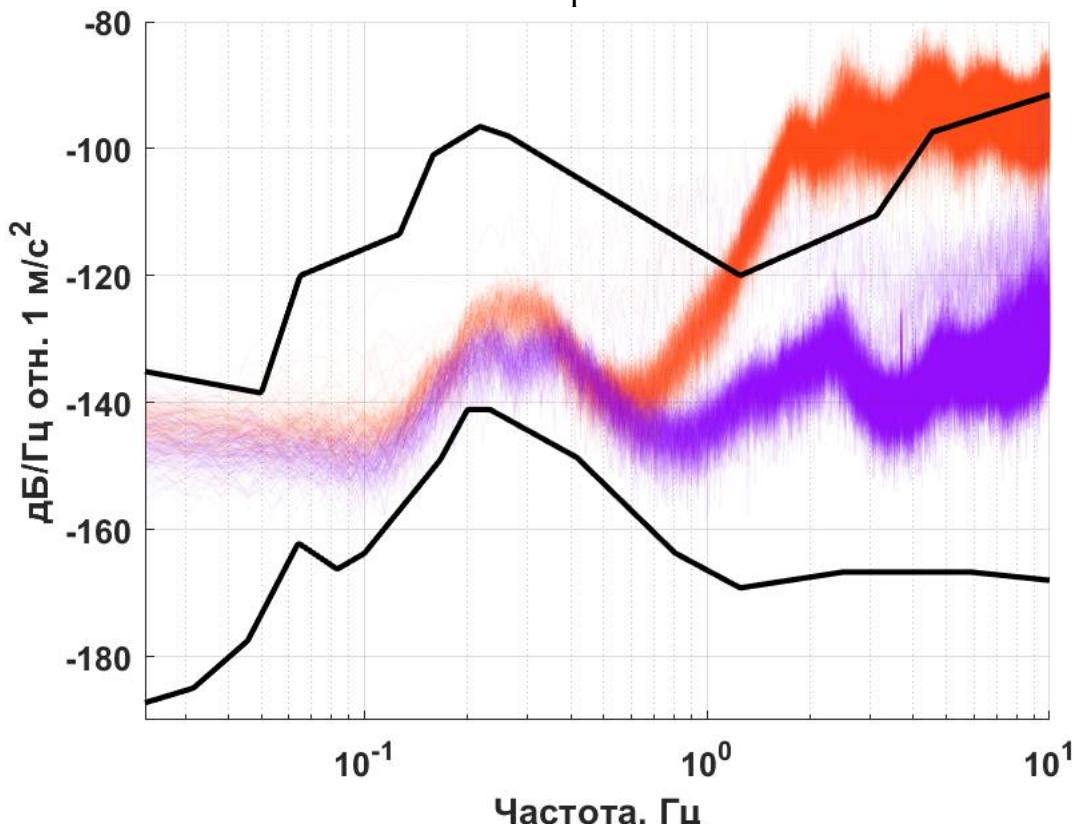


Рис. 8. Спектры мощности сигналов: оранжевый цвет – с постамента КПЦ ИФЗ РАН, фиолетовый цвет – с постамента ГФО «Михнево»

Очевиден высокий уровень высокочастотного техногенного сейсмического шума (более 1 Гц), источником которого является ежедневный интенсивный дорожный трафик на участке МКАД, расположенным в непосредственной близости от КПЦ, значительно превышающий уровень шума в аналогичном диапазоне частот, зафиксированный в ГФО «Михнево». Уровни шума в высокочастотной области отличаются примерно на 40 дБ – почти в 50 раз!

Выводы к главе 5. Малоапертурная сейсмическая антenna «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 в высокочастотной области спектра ниже, чем в Мосрентгене почти в 50 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа литературных данных вскрыта актуальная проблема влияния сейсмоакустических шумов антропогенного происхождения (транспортная и промышленная инфраструктура современных мегаполисов). Методами численного моделирования изучены динамические характеристики микросейсмических шумов в блочно-иерархических неоднородных средах. По аналогии с известным методом микросейсмического зондирования (ММЗ), в рамках настоящего исследования разработана методика, позволяющая осуществлять непрерывный мониторинг вибрационного загрязнения современных мегаполисов, реализуемая в натурном эксперименте посредством одной сейсмостанции. Аналогия с ММЗ заключается в определении отношения амплитудных спектров сигналов, зарегистрированных переносным датчиком в отдельных пикетах профилей в пределах 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 опорной станции. Данный параметр позволяет динамически оценивать уровень шумовых микросейсм в различных зонах исследуемой площади. Разработан программно-аппаратурный комплекс, реализующий авторскую методику.

Проведены длительные натурные измерения вибросейсмического и акустического шумовых полей на территории пос. Мосрентген, Новомосковского административного округа г. Москва с последующим анализом в рамках предлагаемого подхода. Превышений допустимых значений вибрационного шума, установленных санитарными нормами на исследуемой территории не выявлено. Построены частотно зависимые карты распределения значений вибросейсмических шумов с целью изучения механизмов их формирования в пределах контролируемой территории. В ряде точек отмечены существенные превышения допустимых норм в акустическом диапазоне частот практически во всех нормируемых октавных полосах.

На геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН проведены натурные эксперименты с использованием малоапертурной сейсмической антенны с целью определения возможностей и показателей эффективности данного инструмента для мониторинга вибросейсмического шумового загрязнения современных мегаполисов.

Проведена оценка свойств стационарности, определяемых в ходе реализации разработанной методики спектральных коэффициентов относительной интенсивности вибросейсмического шума, определены условия стабильности спектральных коэффициентов для различных среднегеометрических частот. Показано, что разработанная методика обладает достаточным потенциалом внедрения для решения практически значимых задач контроля низкочастотного шумового загрязнения среды обитания в условиях крупных городских агломераций.

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.

Свидетельства о регистрации прав на ПО:

1. 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.**
2. 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.**
3. 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.**
4. 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.**

Подписано в печать 3 декабря 2025 г.
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