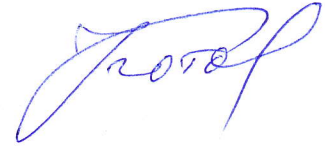


На правах рукописи



Котов Андрей Николаевич

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

Специальность 25.00.10

Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2022

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 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН;

**Официальные
оппоненты:**

Еманов Александр Федорович

Доктор технических наук, директор Алтае-Саянского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»;

Шабалина Анна Сергеевна

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник кафедры вакуумной электроники 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 **22 сентября 2022 г., в 10:00 часов** 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 Камзолкину Владимиру Анатольевичу.

Автореферат разослан « ____ » «августа» 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

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

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

Методология и методы исследования. Методические основы работы в значительной степени базируются на функционале пассивного способа 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-аппаратный комплекс вибросейсмического мониторинга позволяет оперативно выявлять на исследуемой территории нарушения установленных для условий городской застройки специализированными нормативно-правовыми актами СНиП и СанПиН уровней шумов в частотном диапазоне от 0,1 до 31,5 Гц, а также акустических шумов в частотном диапазоне от 1 до 8000 Гц.

2. Адаптация подхода, реализуемого в методе микросейсмического зондирования на основе анализа отношений компонент амплитудных спектров микросейсм в передвижных пунктах к таковым на опорном измерительном пункте,

позволяет определять уровень вибромикросейсмического загрязнения исследуемой территории на основе данных однократных площадных измерений с последующей регистрацией микросейсмических шумов на единственном опорном пункте.

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

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. Рассчитаны и построены в программном комплексе SURFER компании GOLDEN SOFTWARE разномасштабные карты распределения относительных интенсивностей сейсмического поля исследуемой территории, а также карты вибромикросейсмического загрязнения исследуемой территории в абсолютных величинах в частотном диапазоне 0,1 – 31,5 Гц. Также автором был проведён дополнительный эксперимент на территории пос. Мосрентген по сбору данных об акустическом загрязнении исследуемой территории. В результате были рассчитаны и построены карты акустического загрязнения исследуемой территории в диапазоне частот 1 Гц – 8 КГц. Также автором были проведены измерения вибрационных и акустических шумов на территории жилой застройки в районе Сокольники, г. Москва, по результатам которых были выявлены многочисленные превышения допустимых норм в различных частотных диапазонах.

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

Публикации: по теме диссертации опубликовано 4 работы, 3 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка иллюстраций, списка терминов и списка сокращений. Диссертация включает 158 страниц текста, 69 рисунков, 5 таблиц. Список литературы насчитывает 123 наименования.

Благодарности. Автор выражает огромнейшую благодарность своему научному руководителю – доктору физико-математических наук, члену-

корреспонденту РАН, главному научному сотруднику, заведующему лаборатории 703 ИФЗ РАН Собишевичу 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 (Bonnefooy-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 **Главе 5**. Также в разделе описано опробование автором метода микросейсмического зондирования в ледовых условиях оз. Байкал.

Выводы к главе 2. Таким образом, представлена методика оценки низкочастотного вибромикросейсмического загрязнения исследуемой территории, реализуемая по аналогии с ММЗ при помощи всего двух сейсмостанций, одна из которых является переносной и служит для получения натуральных данных в различных точках исследуемой площади, вторая располагается на опорном пункте и работает одновременно с переносным оборудованием в непрерывном режиме. Также описаны работы по методу микросейсмического зондирования в ледовых условиях оз. Байкал.

Глава 3. Применение разработанного подхода для оценки инфразвукового и вибромикросейсмического загрязнения пос. Мосрентген. В данной главе приведено применение разработанной методики инфразвукового и вибромикросейсмического загрязнения на примере пос. Мосрентген. Обоснован выбор местности опробования методики, а также представлены схема расположения измерительных точек и карты распределения относительных интенсивностей вибросейсмического поля на исследуемой территории для различных частот.

В разделе 3.1. приведено описание пос. Мосрентген, выбранного в качестве объекта исследований. В первую очередь, выбор данного населённого пункта обусловлен тем, что именно на его территории расположен Координационно-прогностический центр ИФЗ РАН (КПЦ ИФЗ РАН).



Рис. 1. Координационно-прогностический центр ИФЗ РАН (КПЦ ИФЗ РАН), расположенный на территории пос. Мосрентген, г. Москва

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

которого ведётся строительство станции Московского метрополитена «Тютчевская» и вблизи которого расположен оживлённый участок автострады МКАД-ЮГ. В связи с этим, предполагается, что в рассматриваемом районе будут зафиксированы значения виброрейсмического и инфразвукового фона, превышающие допустимые показатели, установленные специализированными нормативно-правовыми актами СНиП и СанПиН.

На рис.4 показана схема расположения профилей и пикетов на исследуемой территории. Измерения проводились в 69 точках.

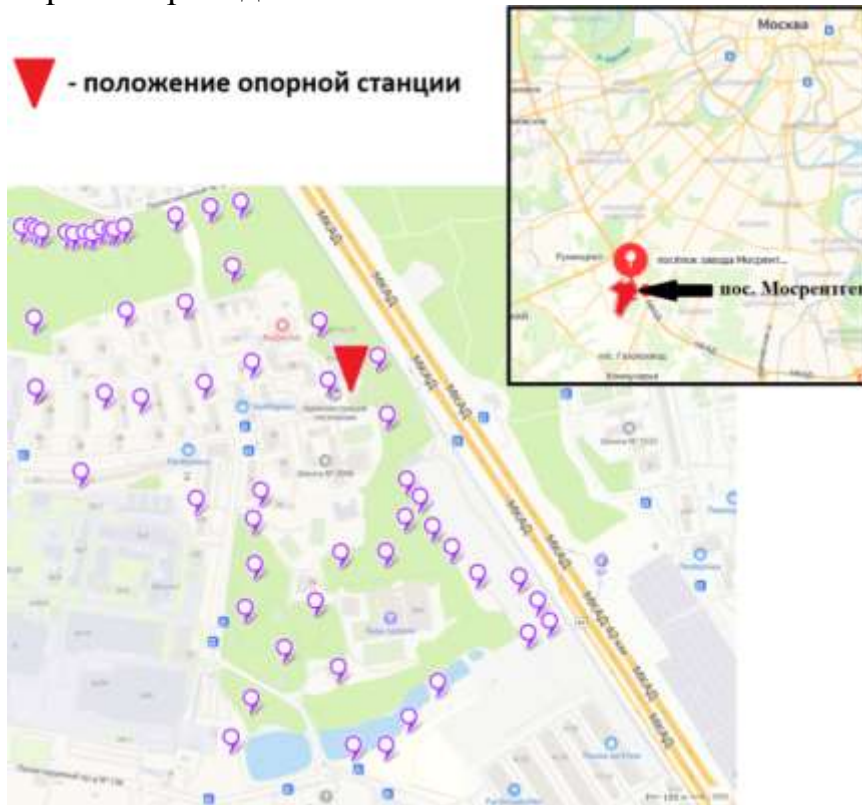


Рис.2. Схема расположения измерительных точек на территории пос. Мосрентген, г. Москва

В разделе 3.2. представлены карты распределения относительной интенсивности сейсмического поля на территории пос. Мосрентген.

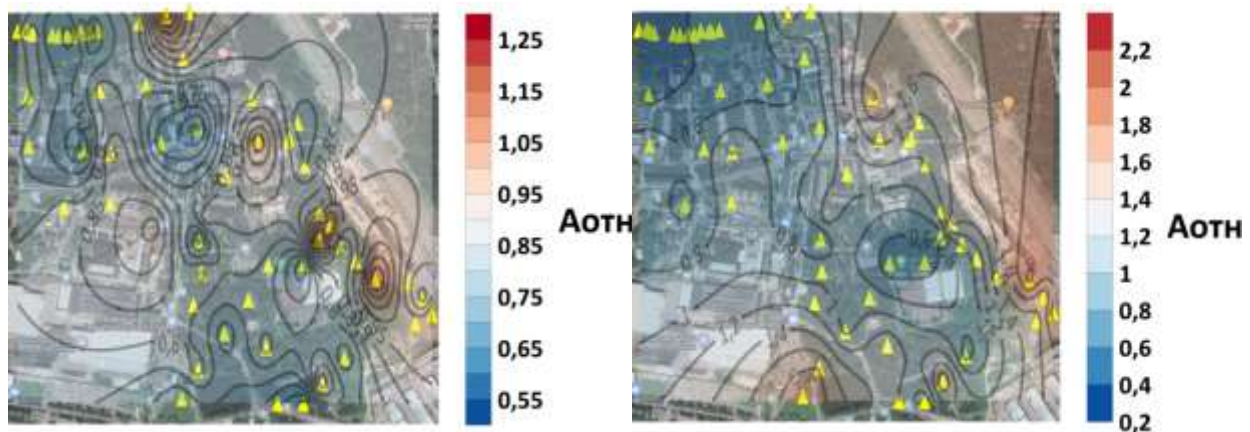


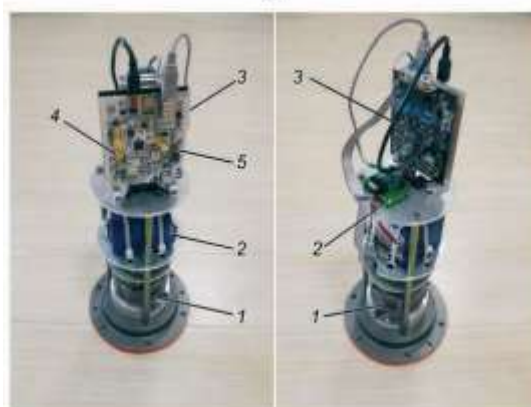
Рис. 3. Карты распределения относительных интенсивностей сейсмического поля на территории пос. Мосрентген для нескольких частот: слева – для частоты 4 Гц, справа – для частоты 8 Гц

На частоте 4 Гц интенсивность сейсмоакустических шумов на всей площади исследования практически не превышает сейсмический фон, зафиксированный на опорном пункте. На частоте 8 Гц уровень вибросейсмического фона в районе участка автострады МКАД-ЮГ, а также вблизи строительного рынка «Славянский мир» примерно в 2 раза превышает фон, зафиксированный опорной сейсмической станцией, расположенной в КПЦ ИФЗ РАН.

Выводы к главе 3. Таким образом, представлено описание и обоснован выбор территории, являющейся объектом проведения оценки вибромикросейсмического загрязнения. Представлены карты распределения относительных интенсивностей сейсмического поля по площади исследования для определённого диапазона частот.

Глава 4. 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 4.1. 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. 6, 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)



б



Рис. 4. 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).

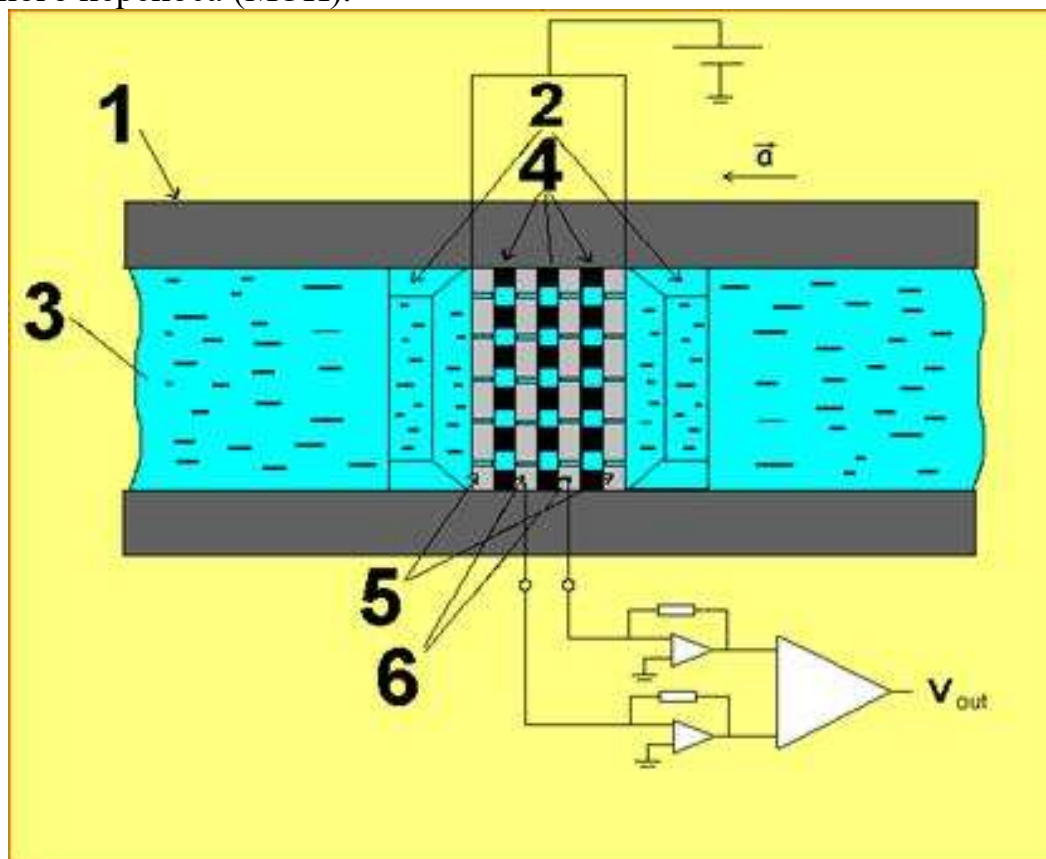


Рис. 5. Молекулярно-электронный преобразователь: 1 – диэлектрическая трубка (корпус преобразователя); 2,4 – установочные элементы; 3 – электролит; 5,6 – электроды

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 4.2. описано программное обеспечение под названием NDAS_app, разработанное для гео-гидроакустического измерительного буя, позволяющее осуществлять получение, накопление и передачу данных на удалённый пункт сбора по проводному и беспроводному интерфейсу.

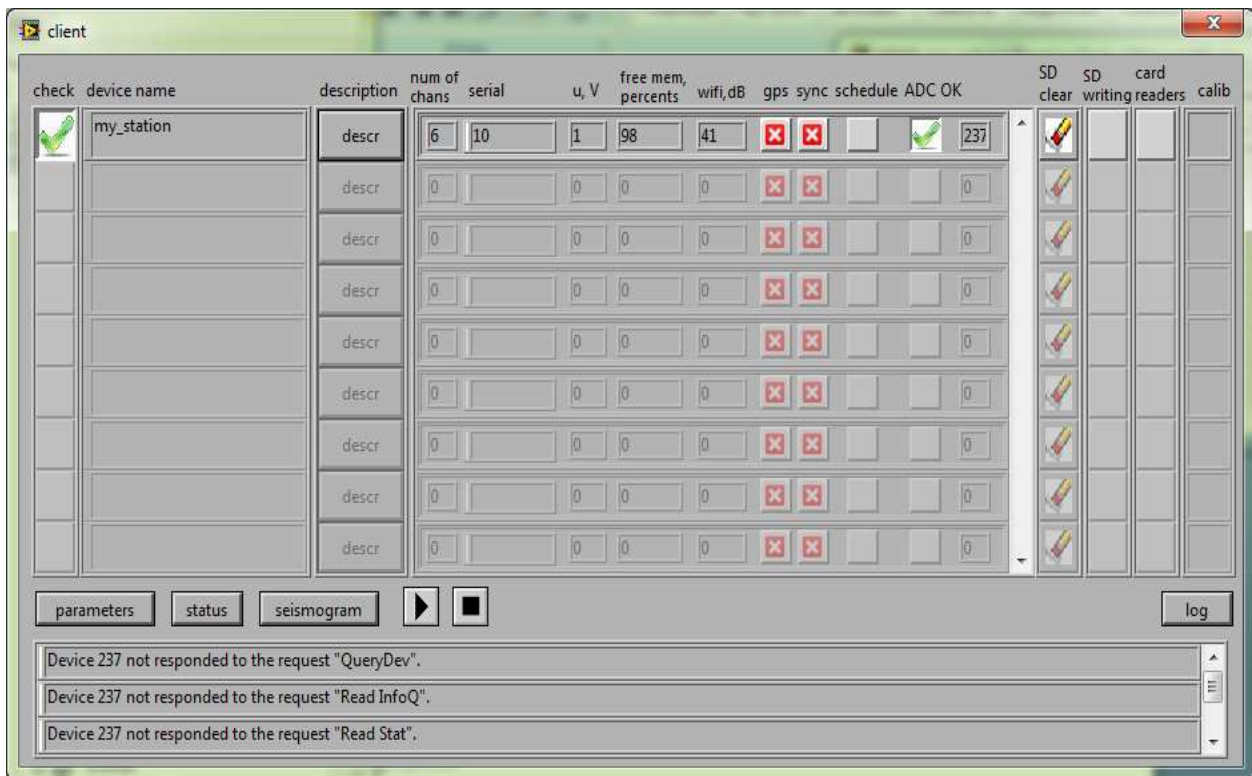


Рис. 6. Главное окно программы NDAS_app

В разделе 4.3. 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 проведены сравнительные испытания проводились на геофизическом постаменте КПЦ ИФЗ РАН.

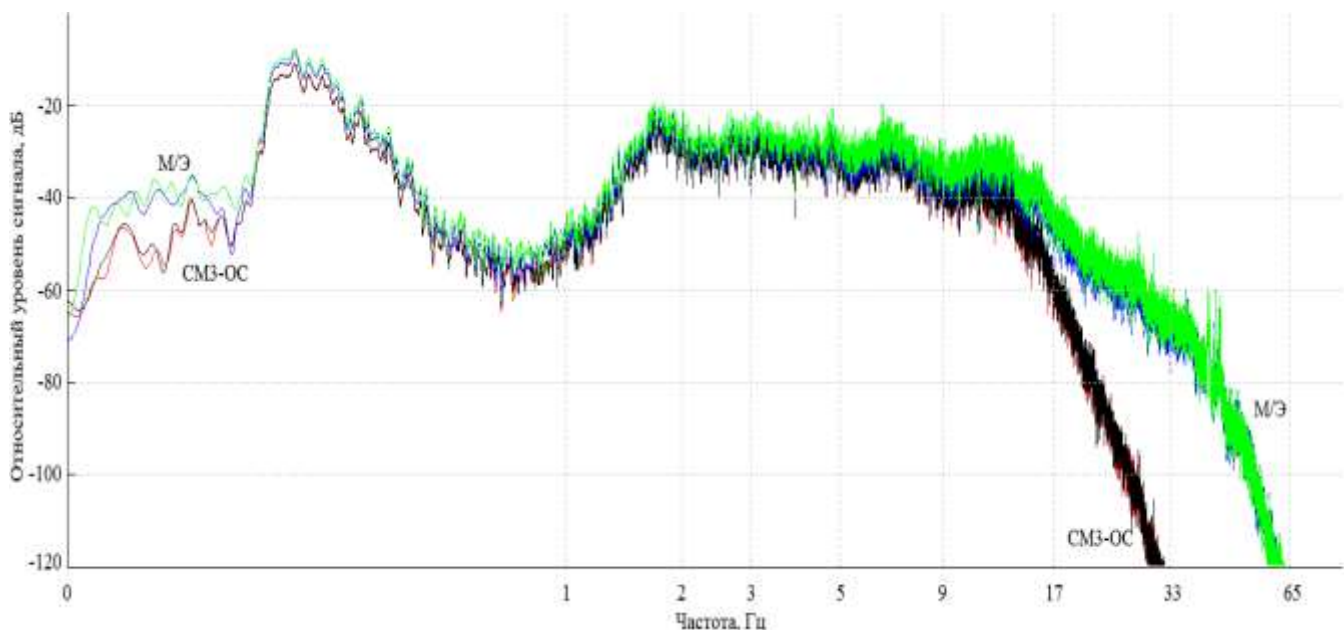


Рис. 7. Сравнение спектров двадцатиминутной синхронной записи двумя сейсмометрами СМЗ-ОС (чёрная и красная кривые) и двумя молекулярно-электронными сейсмометрами (синяя и зелёная кривые)

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 4.4. 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 рис. 19 представлено сопоставление частотных характеристик, заявленных изготовителями приборов, с частотными характеристиками гео-гидроакустического буя с установленным датчиком СМЕ.

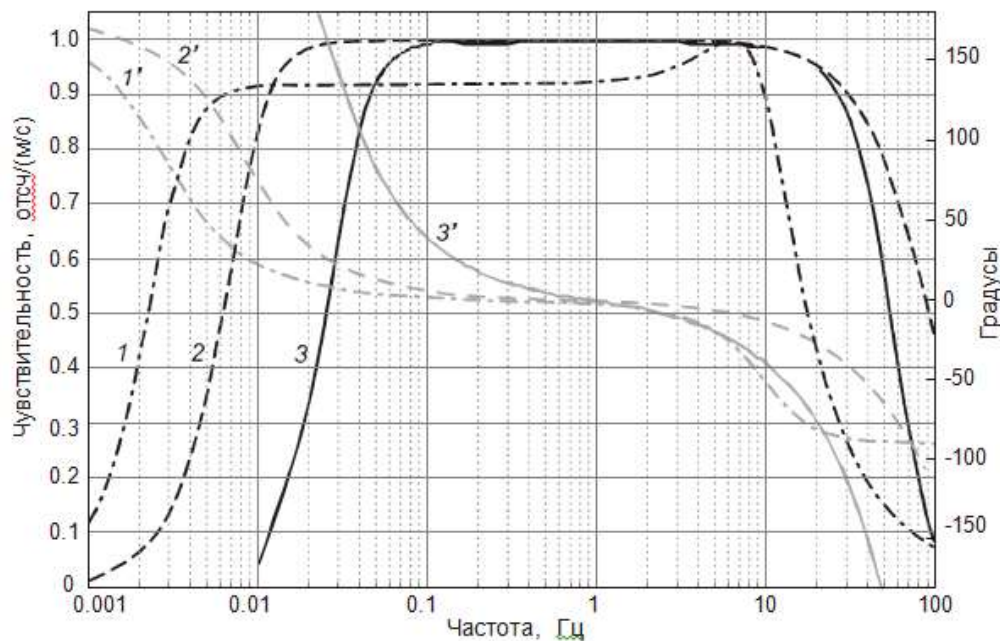


Рис. 8. Амплитудно-частотная (АЧХ) (1'–3') и фазо-частотная (ФЧХ) (1'–3') характеристики приборов Streckeisen (1, 1'), Guralp (2, 2') и СМЕ (3, 3')

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 4. 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 5. Обработка и анализ натуральных данных, полученных в ходе полевого эксперимента на территории пос. Мосрентген, Новая Москва. В данной главе представлены результаты обработки данных, полученных в ходе полевого натурального эксперимента по изучению вибросейсмической обстановки исследуемой территории. Отражены результаты дополнительного эксперимента на территории пос. Мосрентген по изучению закономерностей распределения акустического фона. Также приведены результаты измерений вибрационных и акустических шумов в жилой застройке района Сокольники, г. Москва.

В разделе 5.1. представлены волновые формы, зафиксированные переносной и базовой сейсмостанцией, их спектры, а также спектрограмма за пятисуточный период в июле 2019 г.

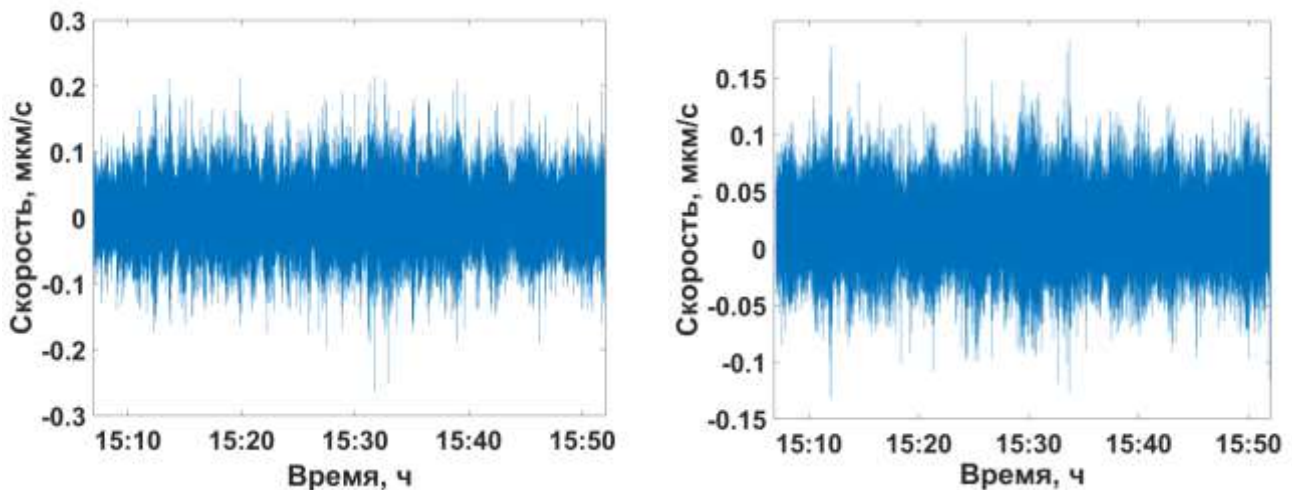


Рис. 9. Примеры записей волновых форм с переносной (слева) и базовой (справа) сейсмостанций

Амплитуда рассматриваемых сигналов отличается незначительно.

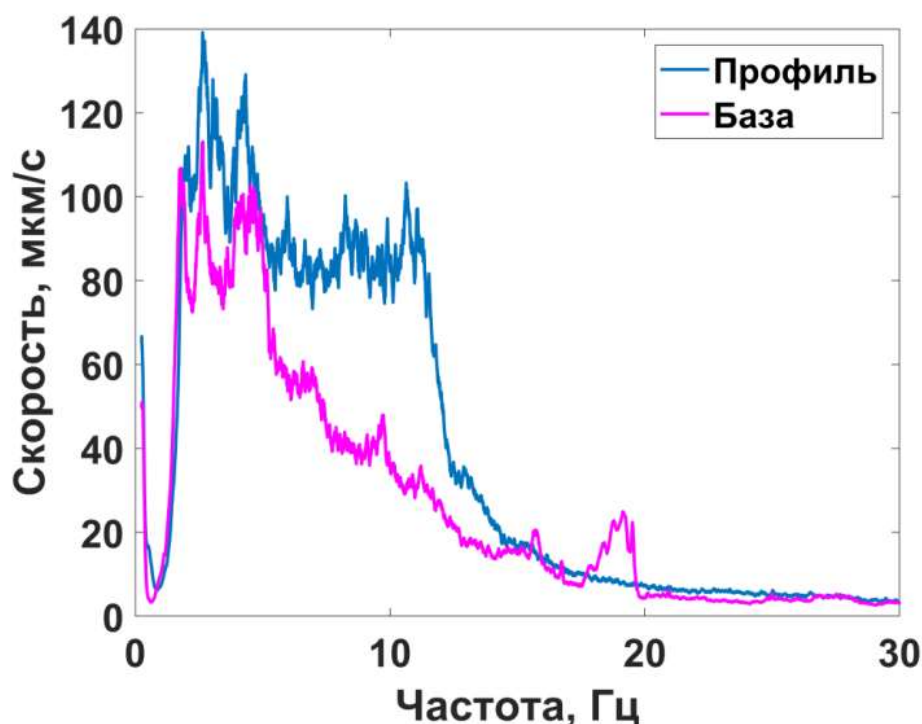


Рис. 10. Спектры записей с переносной и базовой станций

Спектры рассматриваемых сигналов различаются в диапазоне 6 – 14 Гц, также наблюдается гармоника в спектре сигнала с базовой станции, связанная с работой водоснабжающей системы КПЦ ИФЗ РАН.

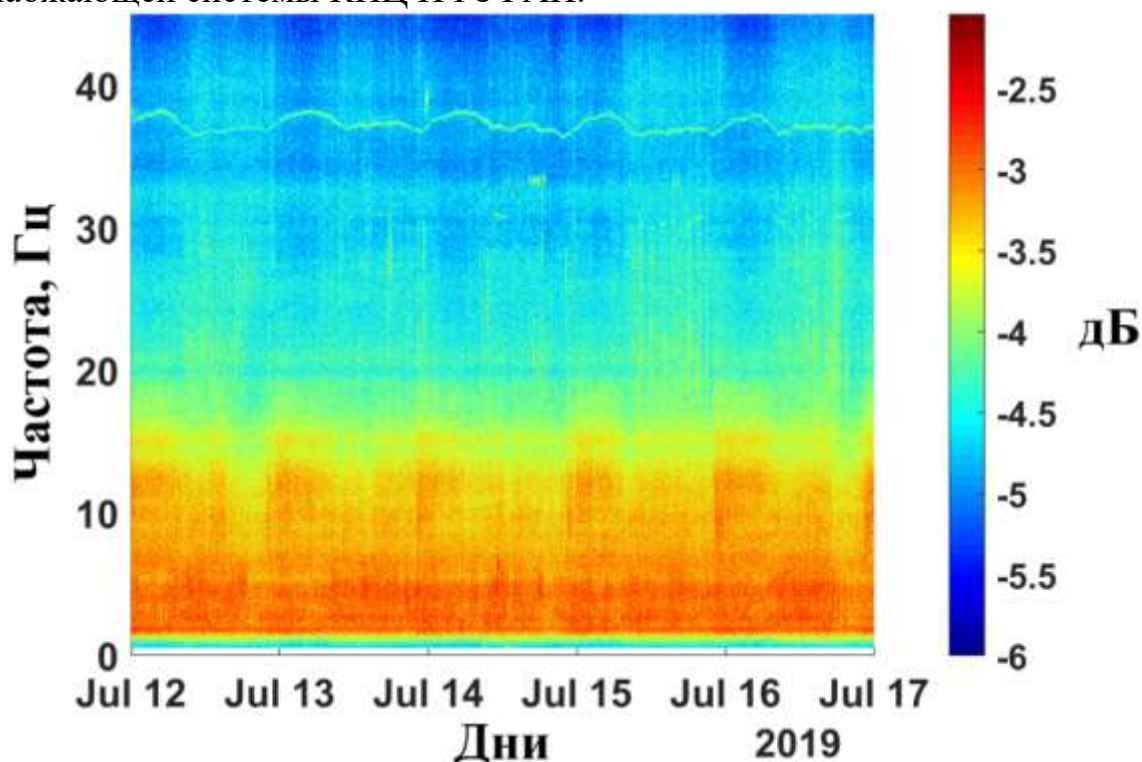


Рис. 11 Спектрограмма сигнала с опорного пункта в период с 12.07.2019 по 17.07.2019

Наиболее существенный вклад в сейсмическое поле вносят колебания в диапазоне частот 2 – 13,5 Гц по большей части, создаваемые автомобильными транспортными

средствами. Также наблюдается снижение сейсмической активности в ночное время суток.

В разделе 5.2. представлен основной результат настоящего диссертационного исследования – карты распределения вибромикросейсмического загрязнения исследуемой территории в дневное и ночное время суток для различных частот в абсолютных величинах. Абсолютной величиной является скорость колебательного процесса.

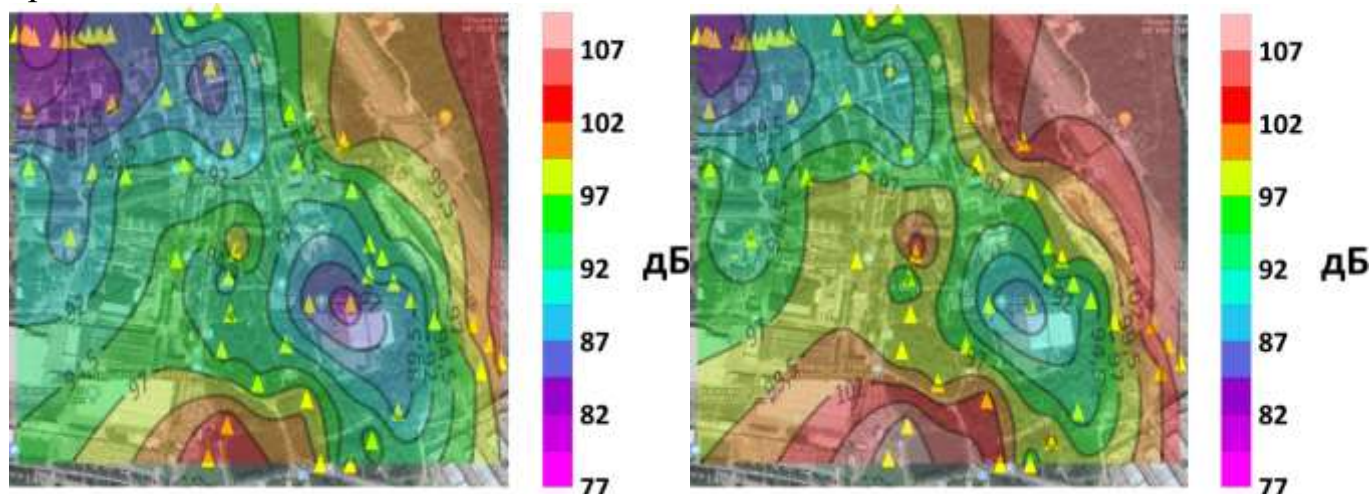


Рис. 12. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 10 Гц: слева – день, справа – ночь. Уровень шума в ночное время суток выше, чем в дневное примерно на 3-5 дБ. Наиболее высокий уровень вибромикросейсмического загрязнения зафиксирован вблизи участка автострады МКАД-ЮГ, а также рядом с водоёмом у Проектируемого проезда № 139 и составляет около 99-102 дБ в дневное время суток и 102-105 дБ в ночное.

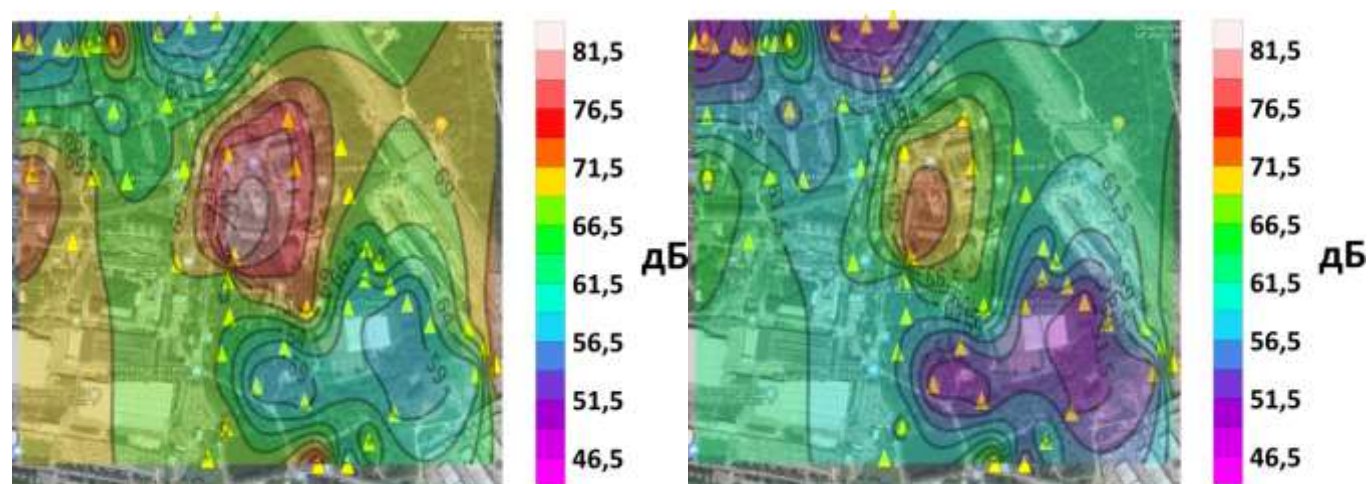


Рис. 13. Карты распределения вибромикросейсмического загрязнения на территории пос. Мосрентген для частоты 31,5 Гц: слева – день, справа – ночь. Уровень вибросейсмического фона в дневное время суток превышает аналогичный параметр за ночной период примерно на 8 дБ. Наиболее шумной является область, охватывающая центральную площадь пос. Мосрентген и близлежащие дворы – 71,5 – 79 дБ днём и 66,5 – 69 дБ ночью. Также относительно шумной является жилая

зона, расположенная в западной части площади исследования – 71,5 дБ днём и 64 дБ ночью.

В разделе 5.3. приведены результаты измерений акустического фона исследуемой территории, которыми являются карты распределения акустического загрязнения на исследуемой территории.

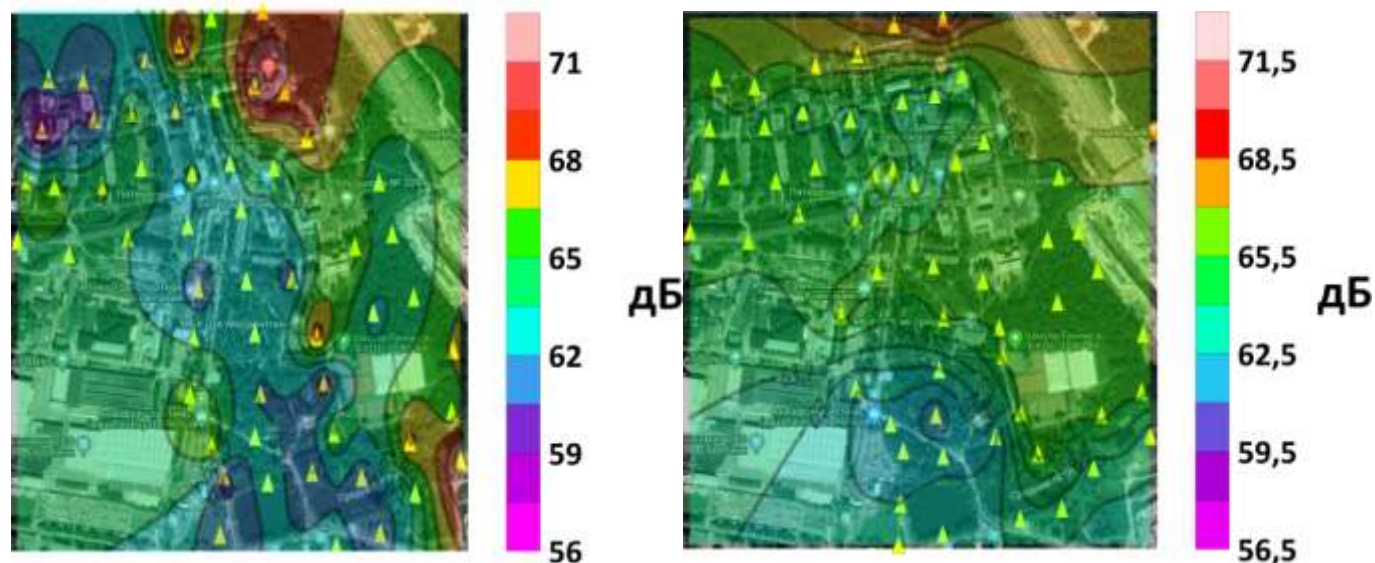


Рис. 14. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 16 Гц: слева – день, справа – ночь

Для рассматриваемой частоты наиболее высокие значения акустического загрязнения в дневное время суток наблюдаются в одном из жилых дворов в северной части исследуемой территории – 69,5 дБ, также в ещё одном из жилых дворов, расположенном на границе с лесопарковой зоной в северной части пос. Мосрентген – 68 дБ, в одной из точек в парке развлечений и отдыха – 68 дБ и в юго-восточной части территории, неподалёку от строительного рынка «Славянский мир» – 69,5 дБ.

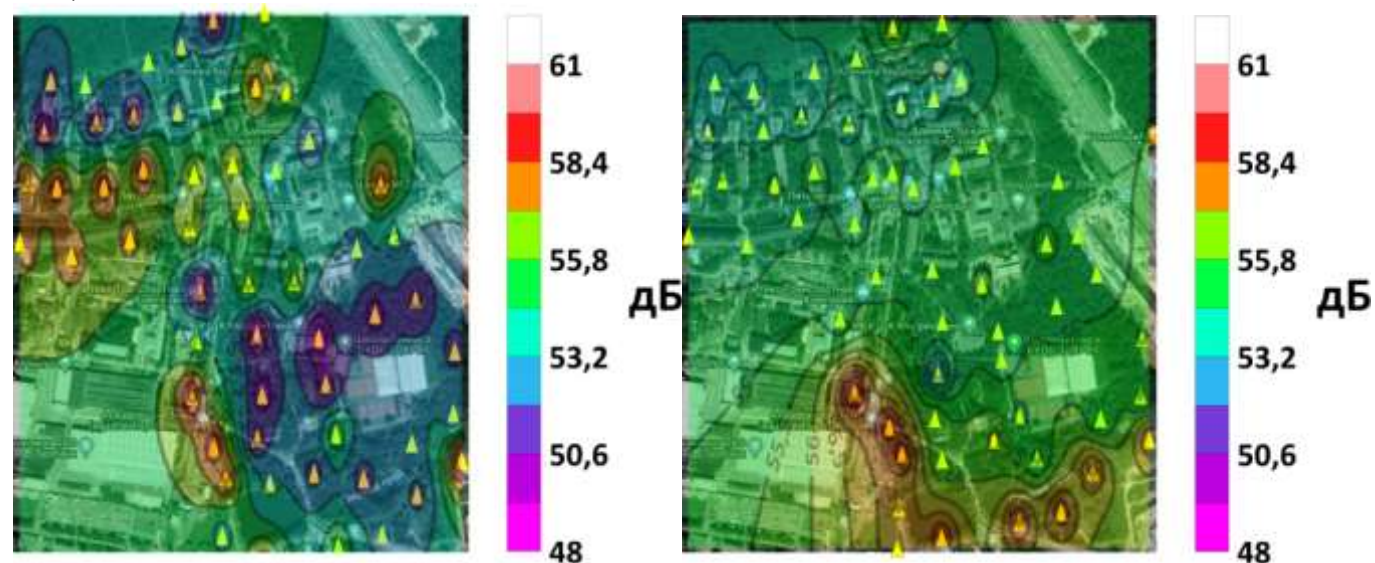


Рис. 15. Карты распределения уровней акустического шума на территории пос. Мосрентген для частоты 500 Гц: слева – день, справа – ночь

Наиболее высокие уровни акустического шума в дневное время суток наблюдаются в нескольких жилых дворах в западной части пос. Мосрентген и в южной части территории, вблизи промышленной зоны и водоёмов – 57,1 – 58,4 дБ, в одной из

точек вблизи КПП ИФЗ РАН и в одной из точек в юго-восточной части площади исследования, вблизи строительного рынка «Славянский мир» - 57,1 дБ.

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

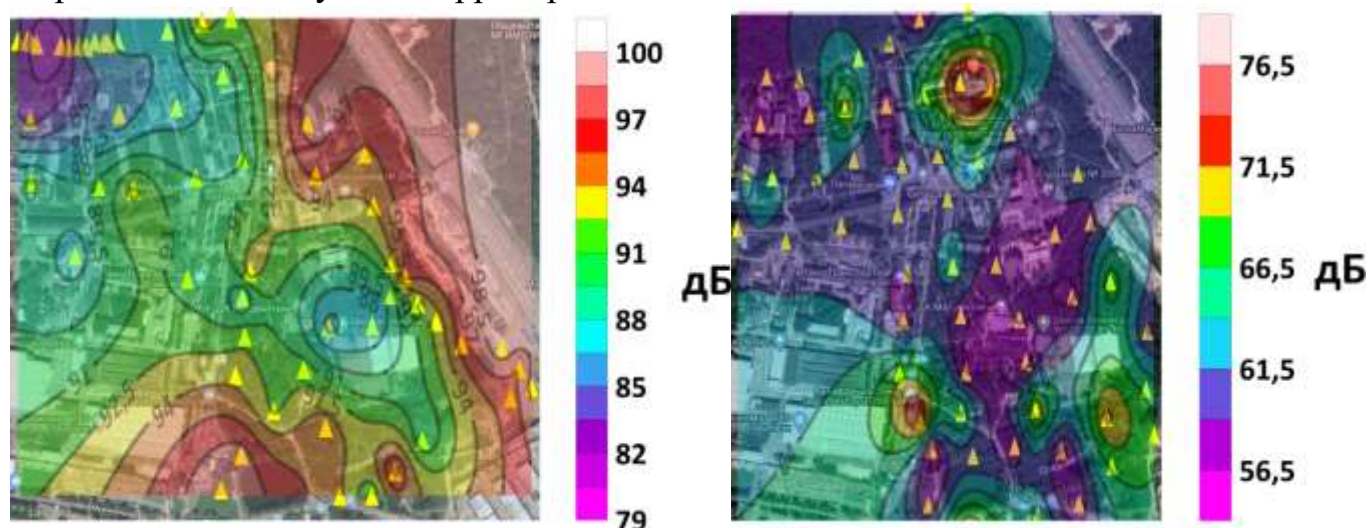


Рис. 16. Сопоставление карт распределения вибромикросейсмического (слева) и акустического (справа) загрязнения пос. Мосрентген, г. Москва

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

В разделе 5.4. описаны результаты верификации предложенной в работе методики мониторинга вибрационного загрязнения мегаполиса. Для проверки корректности предложенной в настоящей работе методики мониторинга вибромикросейсмического загрязнения исследуемой площади, на территории пос. Мосрентген были проведены повторные измерения в нескольких точках.

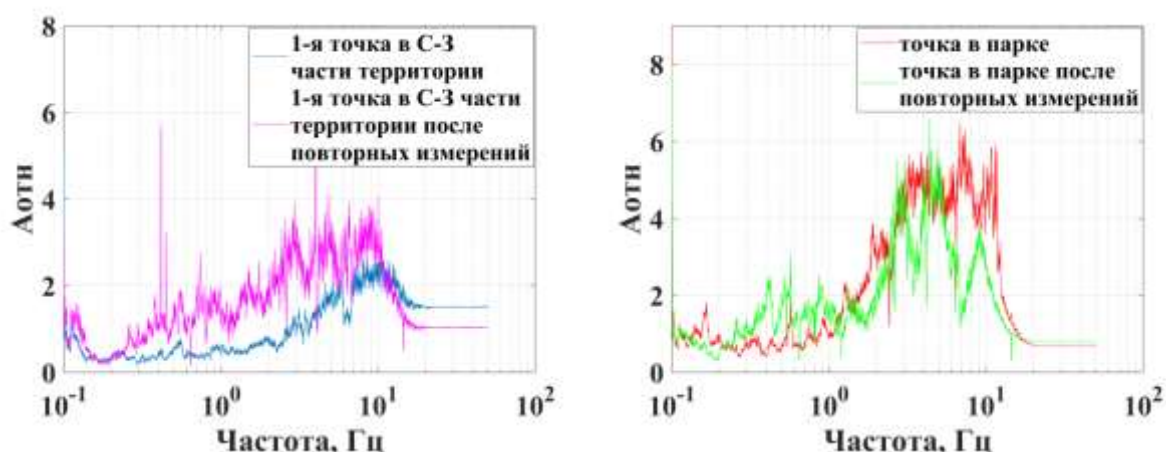


Рис. 17. Отношения спектральных амплитуд измерительный/опорный пункт: слева – в самой первой точке в лесопарковой зоне, вблизи промышленного предприятия (синяя кривая – первичные измерения, фиолетовая – повторные измерения), справа – в одной из точек в парке развлечений и отдыха (красная кривая – первичные измерения, зелёная – повторные измерения)

В целом, картина сопоставления данных первичных и повторных измерений гораздо стабильнее для точки, расположенной в парке развлечений и отдыха. Кривые отношений спектров гораздо лучше совпадают в области микросейсмического частотного диапазона, а также в диапазоне до 10 Гц, которые представляют наибольшее значение для проводимых в рамках настоящей работы исследований. Для точки в лесопарковой зоне разброс значений сильнее, однако, в области микросейсмического частотного диапазона кривые отношений спектральных амплитуд совпадают. Следовательно, можно сделать вывод о том, что представленная в настоящей работе методика мониторинга вибромикросейсмического загрязнения населённого пункта корректна и её можно использовать на практике.

В разделе 5.5. приведены результаты серии измерений вибрационных и акустических шумов на территории жилой застройки в районе Сокольники, г. Москва.

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

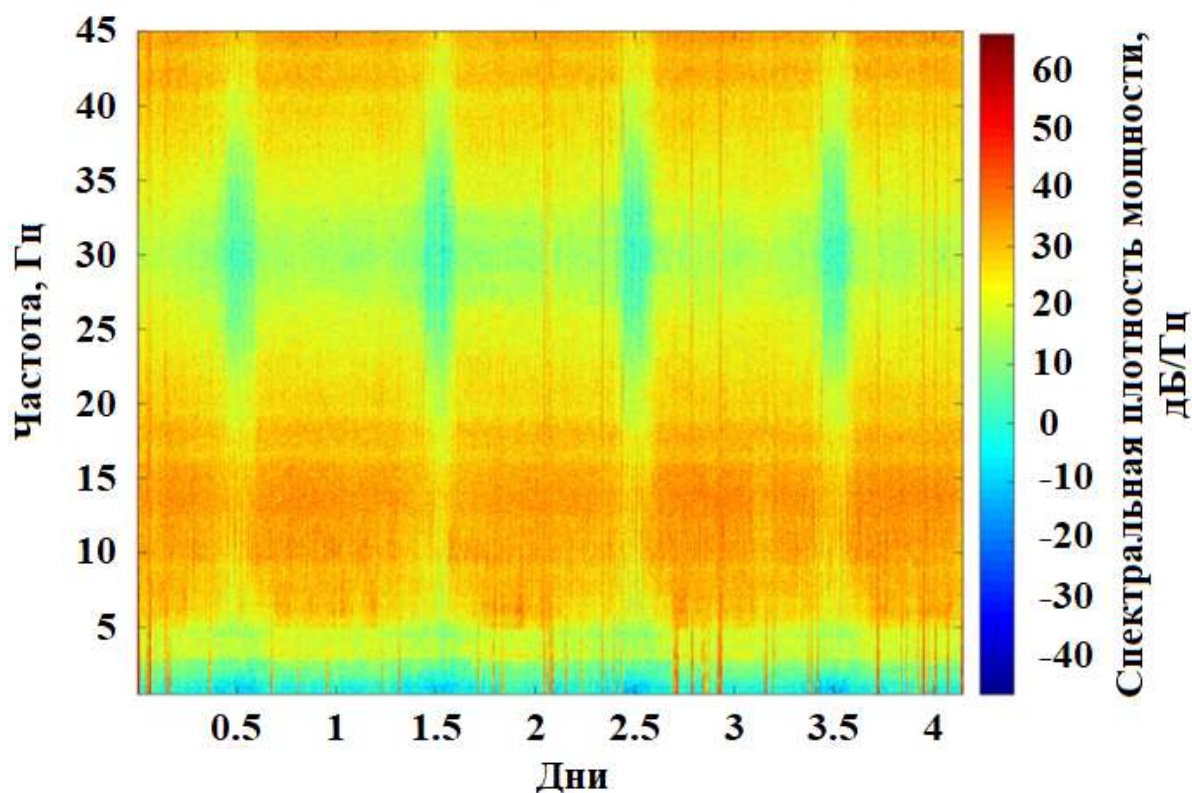


Рис. 18. Спектрограмма вертикальной компоненты колебательной скорости

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

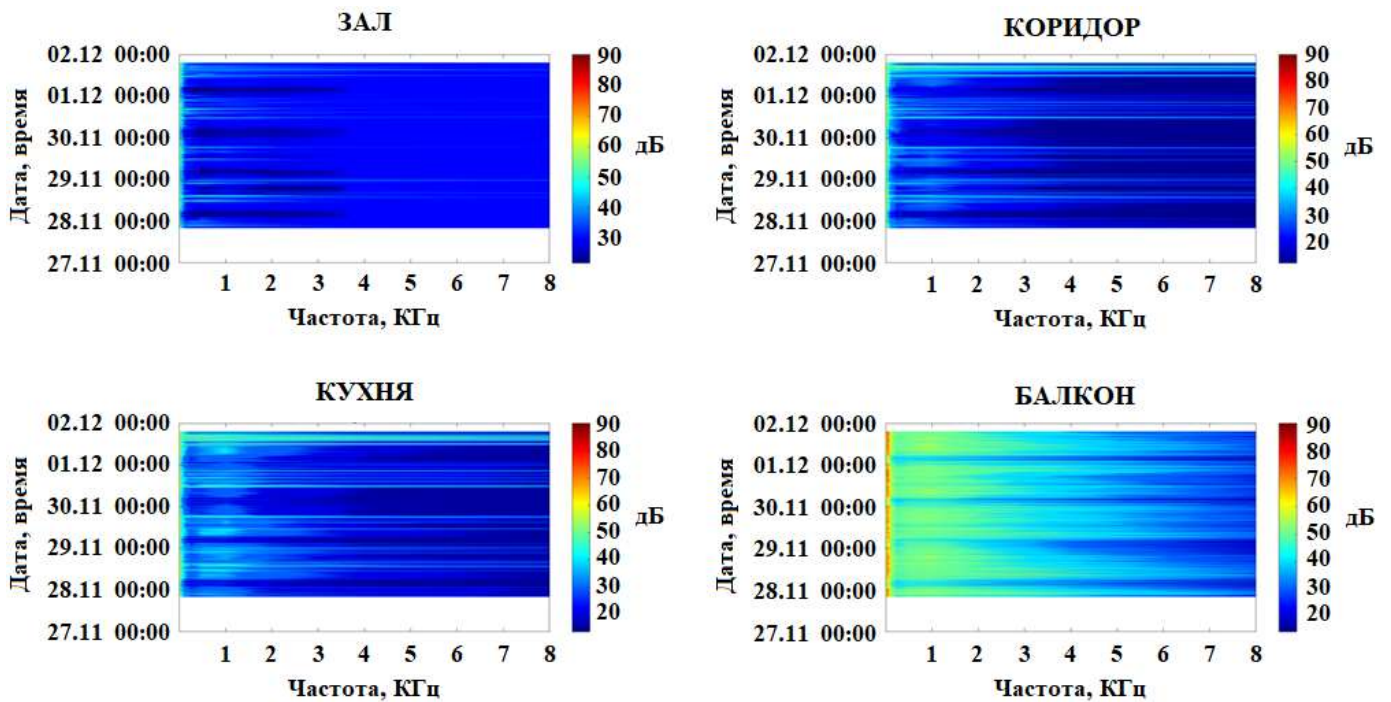


Рис. 19. Спектрограммы шумов, зарегистрированных в разных местах квартиры
 В первую очередь заметен высокий уровень шумов до 4 КГц, зафиксированный микрофоном, установленным на балконе. При этом наиболее низкий уровень шумов относительно других мест зафиксирован микрофоном, установленным в зале.

Выводы к главе 5. Представлены результаты обработки полученных в ходе натурального полевого эксперимента данных. В качестве первичных результатов приведены примеры волновых форм, полученных с переносного и опорного датчиков, а также их амплитудные спектры. Представлена спектрограмма с опорного пункта наблюдений. В качестве главного результата всего описанного в работе исследования были получены карты распределения вибромикросейсмического загрязнения пос. Мосрентген, г. Москва в абсолютных величинах для различных частотных диапазонов. В качестве главного результата всего проведённого исследования были получены карты распределения вибромикросейсмического загрязнения пос. Мосрентген, г. Москва в абсолютных величинах для различных частот. Помимо основного результата были получены карты распределения акустического загрязнения пос. Мосрентген, г. Москва для октавных частотных диапазонов. Также в рамках работы была проведена верификация предложенной методики мониторинга вибрационного загрязнения мегаполиса, что подтвердило её корректность. Приведены спектрограммы по результатам измерений вибрационных и акустических шумов на территории жилой застройки в районе Сокольники, г. Москва.

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 вибромикросейсмического и акустического фона на территории пос. Мосрентген, Троицкого и Новомосковского административных округов г. Москва. Установлено, что в ряде исследуемых точек имеет место превышение допустимых уровней вибрационного фона, установленного специализированными нормативно-правовыми актами (СНиП и СанПиН). Также были зафиксированы неоднократные превышения допустимых значений акустического фона на исследуемой территории.

С использованием разработанного в рамках лаборатории 703 ИФЗ РАН программно-аппаратного комплекса произведены обработка и анализ вибросейсмического и акустического фона исследуемой территории.

Проведена верификация, заключающаяся в сопоставлении отношений спектральных амплитуд измерительный/опорный пункт при первичных и повторных измерениях в нескольких точках исследуемой территории, подтвердившая правомерность использования разработанной методики.

Отражены результаты исследований вибрационного и акустического фона на примере жилого объекта в районе Сокольники, г Москва.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:**

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

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

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

Публикации, не входящие в список ВАК:

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

Подписано в печать «___» августа 2022 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