



КОРОЛЬ Светлана Александровна

**ВАРИАЦИИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ БАЙКАЛЬСКОГО
РЕГИОНА В СВЯЗИ С ПРИРОДНЫМИ И ТЕХНОГЕННЫМИ ФАКТОРАМИ**

1.6.9. – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук,
Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова Сибирского
отделения Российской академии наук

- Научный руководитель:** **Добрынина Анна Александровна**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск
- Официальные оппоненты:** **Хайретдинов Марат Саматович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО АРН, г. Новосибирск
Пупатенко Виктор Викторович, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе, Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск
- Ведущая организация:** Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (г. Обнинск)

Защита состоится «16» декабря 2026 года в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.1.062.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук
Адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗК СО РАН и на сайте
https://crust.ru/newsfull_258.html

Автореферат разослан «15» октября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



Б.С. Данилов

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования данной работы является поле микросейсмических шумов Байкальского региона и его временные вариации в зависимости от природных и техногенных факторов.

Актуальность проблемы. Микросейсмические шумы несут информацию о состоянии недр Земли, ее строении, процессах подготовки сильных землетрясений, а также отражают внешние (экзогенные) воздействия на поверхность Земли. Микросейсмический шум (или микросейсмы) регистрируется в любой точке земной поверхности и складывается из природных и техногенных шумов. В зависимости от положения и условий частотный состав и амплитуды микросейсмических шумов в разных точках могут очень сильно различаться, что делает их индикатором текущего состояния среды в конкретном месте. Актуальность изучения микросейсмических шумов и их вариаций в связи с воздействием источников различной природы обусловлена, во-первых, задачей очистки записей землетрясений и промышленных взрывов от помех при проведении сейсмического мониторинга, во-вторых, ростом техногенной нагрузки в городских агломерациях и сопутствующим ему ростом шумового и вибрационного воздействия, повышающим уровень дискомфорта, в-третьих, необходимостью учета помех различной природы при проведении мониторинга микросейсмических шумов, направленного на изучение вариаций состояния среды перед, во время и после подготовки и реализации опасных геологических процессов (таких, как сильные землетрясения, сходы селевых потоков, паводки и пр.). Байкальский регион и окружающие его территории отличаются многообразием природных и техногенных факторов, влияющих на амплитудно-частотный состав микросейсмических шумов: здесь развита островная мерзлота, присутствуют резкие колебания зимних и летних температур, большое промерзание верхнего слоя в холодные периоды, а также – крупные водоемы, включая оз. Байкал, долины крупных рек и пр. В регионе очень большая техногенная нагрузка: железнодорожные и автомобильные магистрали, искусственные водоемы (Иркутское и Братское водохранилища), плотины гидроэлектростанций и др. В 1998–2003 гг. в Байкальском и Бурятском филиалах Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (БФ ФИЦ ЕГС РАН и БуФ ФИЦ ЕГС РАН соответственно) реализовался переход на непрерывную цифровую регистрацию сейсмических событий. Благодаря цифровой регистрирующей аппаратуре, которой оснащены сейсмостанции региона, стало возможным провести детальный анализ микросейсмических шумов в регионе, изучить амплитудно-частотный состав микросейсмических шумов и его временные вариации в связи с изменениями природных и техногенных условий.

Цель работы: выявить закономерности вариаций микросейсмических шумов в Байкальском регионе в зависимости от природных и техногенных факторов.

Задача исследования заключается в определении амплитудно-частотных и поляризационных характеристик микросейсмических шумов для Байкальского региона, установлении зависимости их вариаций от различных природных и техногенных проявлений.

Этапы выполнения:

1. Определение фоновых амплитудно-частотных характеристик микросейсмических шумов в Байкальском регионе, их возможных сезонных вариаций и связи этих вариаций с источниками разной природы.

2. Оценка влияния техногенных факторов на микросейсмический фон на примере гг. Иркутск и Байкальск.

3. Изучение сейсмических эффектов паводковых процессов на примере р. Кынгарга (Тункинская долина).

Фактический материал и методы исследований: в работе использовались непрерывные цифровые сейсмические записи, получены сетями сейсмических станций Байкальского и Бурятского филиалов Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (БФ и БуФ ФИЦ ЕГС РАН соответственно) и локальными сетями Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН), а также данные метеостанции и уровнемера, установленных в районе р. Кынгарга Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук (ИГ СО РАН), информация об уровне воды в Иркутском водохранилище и объеме сброса воды на Иркутской гидроэлектростанции по данным ПАО «РусГидро» и информация о метеопараметрах в регионе по архивным данным сайта GisMeteo (<https://www.gismeteo.ru/>). В работе использовался ряд стандартных методов: метод спектральных отношений Накамуры [Nakamura, 1980], методы спектрального и спектрально-временного анализа, методы поляризационного анализа, реализованные в программах SESAME и Geopsy.

Защищаемые положения:

1. Амплитудно-частотные характеристики микросейсмических шумов в Байкальском регионе не являются стационарными и зависят от локальных условий в месте измерения. Сезонные вариации амплитудно-частотного состава микросейсмических колебаний в диапазоне частот от 0.5 до 50 Гц связаны с промерзанием и оттаиванием грунтов, сокращением стока и/или перемерзанием горных рек, антропогенной активностью.

2. Периоды паводковой активности сопровождаются резким увеличением уровня микросейсмического шума в частотном диапазоне 2–40 Гц с максимумом в области частот 20–30 Гц, связанным с увеличением турбулентности водного потока. Сопоставление амплитудно-частотных и поляризационных свойств микросейсмических шумов при спокойном течении реки, во время паводков и селевых потоков позволило выделить характерные особенности каждого процесса и предложить на их основе принципиальную схему системы мониторинга и экстренного оповещения о сходе селевого потока.

3. Городская агломерация характеризуется большим количеством источников микросейсмических шумов, наиболее интенсивными из них являются железнодорожный и автотранспорт, которые проявляются в частотном диапазоне 2–45 и 4–15 Гц соответственно, выбросы отработанного пара на ТЭЦ (частотный диапазон 6–18 Гц, расчетная интенсивность звука – до 110 дБ). Отчетливо фиксируется суточный цикл вариаций микросейсмических шумов в пределах городской агломерации, связанный с периодами активности человеческой деятельности.

Научная новизна. Впервые выполнен детальный анализ микросейсмических шумов в Байкальском регионе и их временных вариаций в частотном диапазоне от 0.5 до 50 Гц в связи с различными природными и техногенными факторами на основе непрерывных цифровых сейсмических записей. Методом спектральных отношений горизонтальных и вертикальных компонент получены амплитудно-частотные характеристики среды под сейсмическими станциями региональной и локальных сетей сейсмических станций и их сезонные вариации. Впервые проанализированы сейсмические записи, зарегистрированные во время прохождения паводков на реке Кынгарга (Тункинская долина), полученные данные сопоставлялись с результатами

изучения сейсмических записей селевых потоков на р. Кынгарга. Впервые изучены вариации микросейсмического фона в пределах гг. Иркутск и Байкальск в связи с техногенной нагрузкой.

Личный вклад автора. Автором подобран материал и проведены расчеты фоновых режимов и временных вариаций микросейсмических шумов на сейсмических станциях БФ и БуФ ФИЦ ЕГС РАН, ИЗК СО РАН, проанализировано влияние техногенных шумов и уровня воды в р. Кынгарга на уровень и характеристики микросейсмического фона, выполнен анализ и интерпретация полученных данных.

Научная и практическая значимость работы определяется результатами оценки временных вариаций микросейсмического шума, показывающими зависимость H/V -отношений от внешних факторов (климатические условия, антропогенные воздействия, влияние эндогенных факторов), при существующем предположении о стабильности H/V -кривой на коротких временах. Полученные сезонные кривые H/V -отношений могут использоваться для внесения корректировок в спектр при обработке очаговых параметров землетрясений. На основе оценки влияния техногенных источников на уровень микросейсмических шумов могут быть приняты рекомендации о размещении сейсмических станций в пределах городских и сельских поселений. Также, оценки уровня микросейсмического шума, вибрационных воздействий и шумового загрязнения могут использоваться при геоэкологическом районировании городских агломераций. Характеристики амплитудно-частотного состава и ориентации колебаний частиц в микросейсмических волнах при подъеме воды и во время прохождения селевых потоков могут быть использованы для создания системы мониторинга и срочного оповещения о чрезвычайной ситуации в горных селеопасных районах.

Соответствие паспорту специальности. Основные результаты диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 1.6.9. «Геофизика» в следующих пунктах: *п. 16. Методы обработки и интерпретации результатов измерений геофизических полей.* В диссертационной работе изучаются микросейсмические шумы Байкальского региона. *п. 27. Применение геофизических методов при решении экологических задач и мониторинге состояния окружающей среды, включая многолетнемерзлые породы.* В диссертационной работе выполнен анализ вибрационных и шумовых воздействий в пределах гг. Иркутск и Байкальск, предложены физические основы для создания системы мониторинга и экстренного оповещения о сходе селевого потока.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждается успешным применением апробированных методов и подходов для изучения свойств микросейсмического шума, большим набором исходных данных, хорошим соответствием результатов, полученных соискателем и предшественниками, а также их апробацией на всероссийских и международных конференциях и в опубликованных работах автора.

Апробация работ. Основные положения и результаты работ были представлены на следующих научных совещаниях и конференциях: VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов» (26 сентября – 2 октября 2021 г., г. Петропавловск-Камчатский, Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН); XXIX Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» (11–16 мая 2021 г., г. Иркутск, Институт земной коры СО РАН), Всероссийское совещание, посвященное памяти профессора С. И. Шермана «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ» (26–30 апреля 2021 г., г. Иркутск, Институт земной коры СО РАН),

Байкальский молодежный научный семинар «Современные проблемы в вопросах геологии, петрологии и геофизики» (2022 г., пос. Листвянка, Институт земной коры СО РАН), V Международная научная конференция «Ресурсы, окружающая среда и региональное устойчивое развитие в Северо-Восточной Азии» (23–26 августа 2022 г., г. Иркутск, Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН), Всероссийская научная конференция «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса от океана к континенту» (2022, 2023, 2024, 2025 гг., г. Иркутск, Институт земной коры СО РАН), Всероссийская научная конференция «Ляпуновские чтения» (2022, 2024, 2025 гг., г. Иркутск, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН), Всероссийская научная конференция с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (29 августа – 3 сентября 2022 г., г. Петропавловск-Камчатский, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2022), Международная конференция «Environmental Hazards in Asia» (2024, 2026 гг., Улан-Батор, Монголия), Международная конференция «International Conference on the 120th Anniversary of the Bulnay Earthquake: Advances in Astronomy and Geophysics» (11–17 августа, 2025 г., г. Улан-Батор, Монголия).

Публикации. По теме диссертации самостоятельно и в соавторстве опубликовано 23 работы, из них 5 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК (Геодинамика и тектонофизика, Доклады академии наук, Геология и геофизика).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из 6 глав, введения и заключения. Общий объем работы составляет 121 страницу, включает 11 таблиц, 50 рисунков, список библиографии из 161 наименования.

Благодарности. Автор благодарит своего научного руководителя к.ф.-м.н. А.А. Добрынину за постановку задачи и участие во всех исследованиях, к.г.-м.н. В.А. Санькова за конструктивные замечания и советы, начальника Центра комплексного мониторинга ИЗК СО РАН А.В. Санькова за обеспечение и проведение полевых работ, материалы которых легли в основу диссертации, к.г.-м.н. А.А. Рыбченко за помощь в создании принципиальной схемы системы мониторинга и оповещения о сходе селевого потока, руководство Института земной коры СО РАН за возможность участия в работе проекта «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», Байкальский и Бурятский филиалы ФИЦ ЕГС РАН и лично к.г.-м.н. В.В. Чечельницкого, к.г.-м.н. Ц.А. Тубанова и к.г.-м.н. П.А. Предеина за предоставленные записи стационарных сейсмических станций, к.г.-м.н. Е.В. Брыжака за предоставленные записи локальной сети сейсмических станций в г. Иркутск, д.г.-м.н. В.В. Мордвинову и к.т.н. М.А. Хритову за предоставленные записи сейсмической станции в пос. Кырен, к.г.н. Н.В. Кичигину за предоставленные данные гидрологического и метеорологического постов на р. Кынгарга, к.г.-м.н. Н.А. Радзиминович, к.т.н. В.И. Германа, А.Н. Шагуна, д.г.-м.н. О.В. Лунину, д.г.-м.н., профессора А.В. Поспеева, д.г.-м.н., профессора А.Г. Вахромеева, к.ф.-м.н. Е.А. Кобелеву за замечания и предложения, способствовавшие улучшению качества работы.

Исследование выполнено с использованием данных, полученных на УНУ СИЗК МАК (уникальная научная установка «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира») и УНУ ЮБИК («Южно-Байкальский инструментальный комплекс»), входящего в состав Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе «Природа микросейсмического шума» кратко рассматриваются природы и основные источники микросейсмического шума (МСШ), факторы, влияющие на него, а также история исследования микросейсмических шумов в Байкальском регионе.

Основные выводы по Главе 1:

Микросейсмические шумы используются для решения множества задач геофизики – от микросейсмического районирования до изучения строения геологических структур и от анализа сейсмических эффектов различных экзогенных процессов до поиска предвестников землетрясений. МСШ и их вариации, несмотря на достаточно большое количество работ, посвященных их изучению, остаются малоизученными в Байкальском регионе. Оснащение сейсмических станций региона цифровой высокоточной записывающей аппаратурой, работающей в непрерывном режиме, позволяет провести детальный анализ МСШ и вариаций их амплитудно-частотного состава в связи с влиянием разнообразных природных и техногенных факторов. Установленное влияние шумовой нагрузки сейсмического сигнала на количество регистрируемых землетрясений обуславливает необходимость проведения исследований, направленных на выявление основных факторов, влияющих на качество сейсмической записи.

Во второй главе «Регион исследования, материалы и методы» в разделе «Исследуемый регион» рассмотрены геолого-геофизические характеристики исследуемого региона, включая тектонику, сейсмичность, селевую опасность, климат и криолитозону. В разделе «Материалы и методы» приведено описание используемых материалов (записи цифровых сейсмических станций Байкальского и Бурятского филиалов Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (БФ и БуФ ФИЦ ЕГС РАН) и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН), а также используемые методы и подходы: методы спектрального и спектрально-временного анализа, метод поляризационного анализа, метод спектральных отношений N/V -компонент (метод Накамуры [1989]), оценка среднего уровня фона.

Рабочая полоса частот большинства сейсмических станций Байкальского региона ограничена полосой 0.5–20 Гц. Однако, МСШ охватывают более широкий спектр частот – от 0.001 до 300 Гц и более. В частности, изучаемый в настоящей работе сейсмический шум техногенной природы характеризуется средними (до 10 Гц) и высокими (10–300 Гц) частотами. Для проверки возможности региональных сейсмических станций регистрировать высокочастотные шумы без значимых искажений амплитуд был выполнен анализ МСШ, записанного короткопериодной (рабочая полоса частот 0.5–20 Гц) и широкополосной аппаратурой, установленной БФ ФИЦ ЕГС РАН на станциях IRK и TRG. На станции IRK анализировались записи цифровых сейсмических станций «Байкал-11» и CMG-3ESPCD (рабочая полоса частот 0.017–60 Гц), на станции TRG – «Байкал-11» и Trillium Compact 120s (рабочий диапазон от 120 секунд до 108 Гц). Для анализа были выбраны записи, осложненные

случайными помехами, рассчитывались отношения спектральных амплитуд горизонтальных и вертикальных компонент МСШ (Н/V-отношения) и отношения спектров помех и спокойного фона. Полученные результаты показывают, что искажение в высокочастотной части спектра, вносимое ограничением регистрирующей аппаратуры, незначительно: для станции IRK отклонений в кривых Н/V не наблюдается, разница в спектральных отношениях «помеха – фон» для разных компонент не превышает 1.4 (рис. 1). Для станции TRG отклонения Н/V-отношений, рассчитанных по данным короткопериодной и широкополосной аппаратуры, находятся в пределах стандартных отклонений. Для отношений «помеха – фон» максимальные отклонения наблюдаются на частотах выше 40 Гц, но они также не превышают величины 1.65 (рис. 1). Таким образом, полученные отклонения отношений спектральных амплитуд для короткопериодной и широкополосной аппаратуры хорошо согласуются между собой во всем частотном диапазоне, их отклонения не превышают стандартных ошибок.

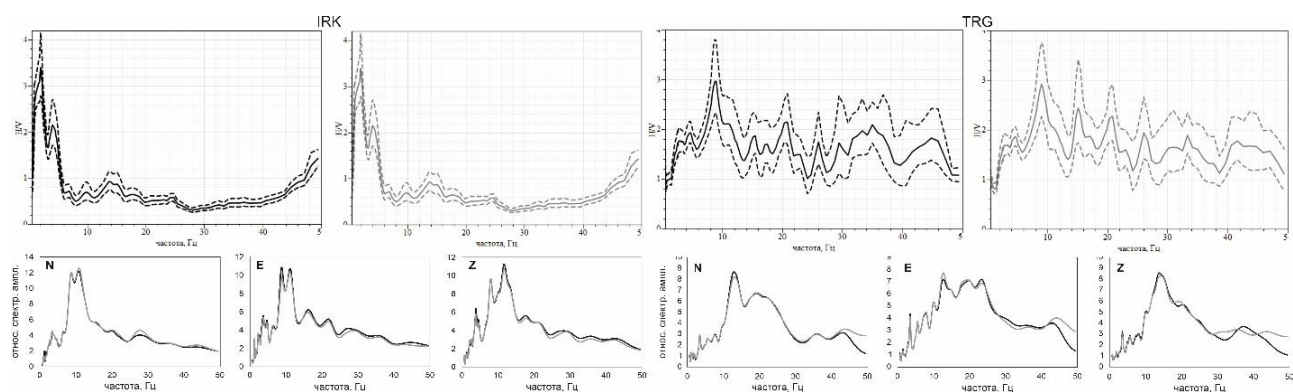


Рисунок 1 – Сравнение характеристик записей МСШ, полученных короткопериодной (показана серым) и широкополосной (показана черным) аппаратурой на станциях IRK (слева) и TRG (справа). Вверху показаны Н/V-отношения (пунктиром показано стандартное отклонение); внизу – отношения спектральных амплитуд помех и фоновых шумов для компонент N, E и Z.

Основные выводы по Главе 2:

Байкальский регион и окружающие его территории отличаются многообразием факторов, влияющих на амплитудно-частотный состав МСШ: здесь развита сплошная и островная мерзлота, присутствуют резкие колебания зимних и летних температур, промерзание верхнего слоя в холодные периоды, а также крупные водоемы, включая оз. Байкал, долины крупных рек и пр. Также в регионе очень большая техногенная нагрузка: железнодорожные и автомобильные магистрали, искусственные водоемы (Иркутское и Братское водохранилища) и др. Анализ спектров записей, полученных короткопериодной и широкополосной аппаратурой, показал, что отношения спектральных амплитуд МСШ хорошо согласуются между собой во всем частотном диапазоне. Таким образом, короткопериодная аппаратура региональных сейсмических станций Байкальского региона может использоваться для оценок отношений спектральных амплитуд колебаний МСШ в области частот от 0.5 до 50 Гц. Среди методов изучения и оценки вариаций МСШ можно выбрать несколько, которые наилучшим образом подходят к условиям сейсмической регистрации, существующим в рассматриваемом регионе: а) метод спектральных отношений Накамуры для определения амплитудно-частотных характеристик верхней части разреза под сейсмическими станциями и их сезонных вариаций; б) методы спектрального и спектрально-временного анализа, позволяющие разложить сейсмограмму на отдельные составляющие и количественно охарактеризовать

явления, отраженные на ней; в) метод поляризационного анализа, позволяющий оценить направления колебаний частиц в сейсмической волне и тем самым определить природу сейсмической волны и ее наиболее вероятный источник.

В третьей главе «Сезонные вариации микросейсмических шумов» приведены результаты оценки сезонных вариаций МСШ в Байкальском регионе методами спектрального анализа и H/V-отношений.

Для оценки сезонных вариаций МСШ рассматривались данные непрерывной регистрации за сутки, в разные дни недели (будни, выходные) и в разные климатические периоды (теплый период (ТП) – июль, август, сентябрь; холодный период (ХП) – январь, февраль, март). Выбор месяцев обусловлен приуроченностью средних, минимальных и максимальных температур теплого периода к положительному диапазону, холодного – к отрицательному. Чтобы избежать случайных ошибок (землетрясения, погодные условия, транспорт, взрывы, техногенные помехи и др.) и ветрового воздействия, выбирались отрезки записи по длительности не менее 1 часа в спокойную погоду. Чтобы получить устойчивую во времени характеристику МСШ, для каждой станции в каждый период выбиралось не менее 15 часовых отрезков. Необходимо отметить, что несмотря на ручной и автоматический контроль выбора окон для анализа, ряд помех (таких как влияние стока рек, работы ГЭС, движение по отдаленным автомагистралям и т.п.) не мог быть исключен при анализе, т.к. эти шумы представляют собой продолжительные по времени источники, которые не могут быть визуально выделены на сейсмограмме. Соответствующие значения стандартных отклонений и финальные кривые H/V-отношений получались осреднением индивидуальных H/V-отношений для всех окон. Стандартные отклонения кривых H/V рассчитывались из средних арифметических логарифмов всех индивидуальных кривых H/V. Для проверки достоверности выделения пиков кривой H/V применялись критерии, разработанные в рамках проекта SESAME [SESAME..., 2003].

В результате для 40 сейсмических станций получены кривые H/V, характеризующие амплитудно-частотный состав фоновых МСШ в теплый и холодных периоды (рис. 2), а также спектры амплитуд колебаний компонент N, E и Z. Полученные результаты хорошо согласуются с оценками H/V-отношений по записям землетрясений [Дреннов и др., 2010], а также амплитудно-частотными характеристиками фонового МСШ в частотном диапазоне от 0.5 до 20 Гц для сейсмических станций БФ ФИЦ ЕГС РАН [Добрынина и др., 2018].

Для всех станций отмечается относительное увеличение уровня МСШ в теплый период, что может быть объясняться сезонным оттаиванием и промерзанием грунтов [Дреннов и др., 2010] (рис. 2д). Для части станций, расположенных вблизи рек, наблюдаются пики в теплый период в области средних и высоких частот – 6–15 и 20–45 Гц (станции ARS – р. Кынгарга, BGT – р. Голоустная, HRMR – р. Гильбира, KPC – р. Хапчеранга, KYD – небольшая река на расстоянии 157 м от сейсмической станции, MXMB – р. Максимиха, OGRR – р. Риты, TLY – р. Талая на расстоянии 65 м от сейсмической станции, YLYR – р. Улгана (приток р. Баргузин), ZRNB – р. Большая Сухая) (рис. 2г, вкладка). Для других станций пики на указанных частотах также присутствуют и в холодный и в теплый периоды (BOD – р. Витим, CIT – р. Ингода, LSTR, IRK – р. Ангара, IVK – горная река на расстоянии 153 м от сейсмической станции, KEL – р. Кика, KMO – р. Котера, р. Верхняя Ангара, NIZ – р. Верхняя Ангара, NLYR – р. Витим, STDB – р. Селенга, SYVR – р. Суво (приток р. Баргузин), TRNR – р. Иркут, TUP – р. Бугарикта, Тунгир, UUDB – р. Уда, Селенга, ZAK – р. Джида). Появление пиков на высоких частотах может быть следствием возмущений, вызываемых взаимодействием водных потоков и дна и бортов русел рек.

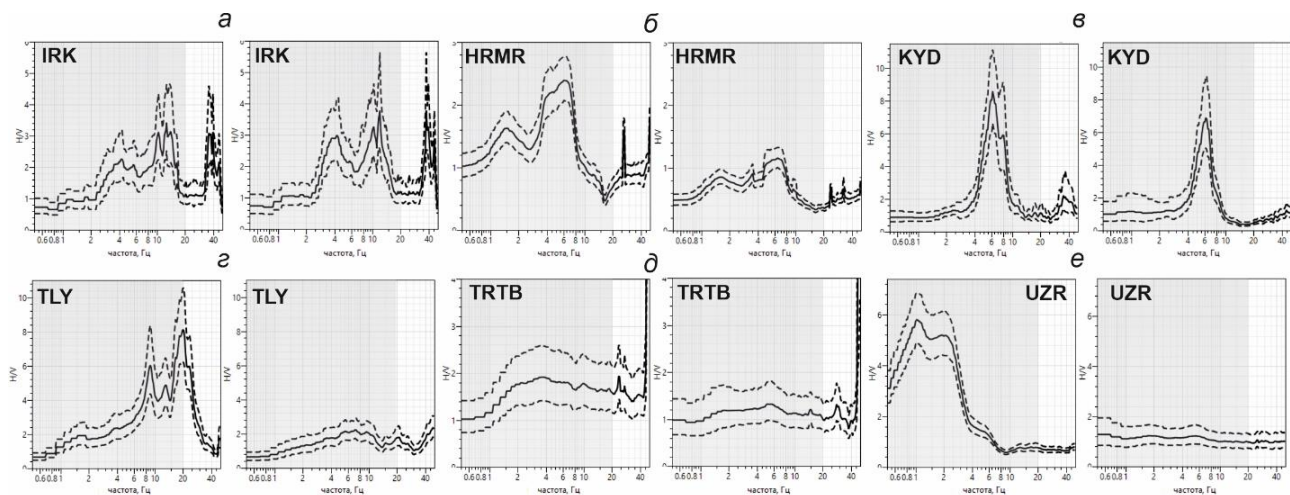


Рисунок 2 – Примеры Н/В-отношений: *а* – увеличение МСШ в крупных городах в холодный период; *б* – увеличение МСШ в туристических местах в теплый период; *в* – пик, связанный с зоной разлома; *г* – сток вод в русле реки (перемерзает в холодный период); *д* – вариации МСШ, связанные с сезонным промерзанием/оттаиванием грунтов; *е* – озерные микросейсмы. Серым показана частотная область 0.5–20 Гц, сплошной линией – кривая Н/В-отношений, пунктиром – стандартное отклонение, слева показаны кривые Н/В в теплый период, справа – в холодный.

Часть небольших рек в холодный период полностью или частично перемерзает, что приводит или к исчезновению пиков в области высоких частот или их значительному понижению, в то время как для крупных полноводных рек высокочастотные пики сохраняются во все сезоны. Для крупных городов (Иркутск, Улан-Удэ, Чита, Закаменск) в холодный период в области средних и высоких частот (> 4 Гц) наблюдается увеличение амплитуд МСШ, связанное с ростом транспортной нагрузки и жизнеобеспечением городов (рис. 2а). Для сейсмических станций, расположенных в популярных туристических местах и по дороге к ним (Тункинская долина, берега оз. Байкал) наблюдается рост МСШ в теплый период в частотном диапазоне от 4 до 18 Гц (станции ARS, BGT, FFNB, HRMR, IVK, LSTR, NIZ, OGRR, SYVR, TLY, TRNR, TRTB, UADB, VBR, ZMU), что хорошо согласуется с частотами, генерируемыми при движении автомобильного транспорта (рис. 2б). Озерные микросейсмы хорошо фиксируются на о. Ольхон (рис. 2е). Увеличение амплитуд МСШ наблюдается в теплый период (в сентябре – в сезон штормов на оз. Байкал) в диапазоне от 0.5 до 4 Гц, что достаточно хорошо согласуется с результатами, полученными в работе [Беседина и др., 2024]. Озерные микросейсмы также наблюдаются для станций BGT (пиковая частота 2 Гц), FFNB (2–3 Гц), KAB (1.7 Гц), KEL (2.3 Гц), MXMB (1.3 Гц), OGRR (2.1 Гц), TRTB (2 Гц), ZRNB (от 2.3 Гц и ниже). Для станции HRMB фиксируются микросейсмы с пиковой частотой 1.7, вероятнее всего связанные с волнениями на оз. Гусиное. Для ряда станций наблюдается увеличение в области низких частот, возможно, связанное с океаническими микросейсмами (например, KRN). Также наблюдаются относительно большие вариации МСШ для сейсмических станций, расположенных на песках, гравийно-галечных отложениях, по сравнению со станциями, размещенными на коренных породах. Согласно информации [Кобелева и др., 2025], сейсмическая станция BOD расположена на гранитах, в то время как полученная для нее кривая Н/В-отношений более типична для аллювиальных отложений, что согласуется с положением этой станции на террасе р. Витим. Помимо этого, Н/В-кривая осложняется пиками, связанными с работой плотины Мамаканской ГЭС (расстояние ~ 1.9 км). В отдельных случаях на кривых Н/В-отношений фиксируются пики, которые сложно связать с

какими-либо из перечисленных факторов (озерные микросейсмы, антропогенная нагрузка, влияние реки). Их появление может объясняться пропущенными в процессе обработки случайными помехами или особенностями строения верхней части разреза [Сейсмоионосферные..., 2012; Блинова и др., 2020; Саньков и др., 2016, 2018, 2021; Добрынина и др., 2015а, 2015б].

По типу полученных кривых H/V -отношений в диапазоне частот от 0.5 до 20 Гц сейсмические станции региона можно разделить на две группы. Первая группа – это сейсмические станции с устойчивыми амплитудно-частотными характеристиками $MCШ$, независимыми от климатического периода (станции ARS, BGT, BOD, CIT, CRS, GORB, IRK, IVK, KELR, KMO, KYD, MOY, NLYR, ORL, TRG, TUP, UKT, YLYR). Для этих станций отмечается повышение уровня микросейсмического фона в теплый период, при этом, форма кривых H/V -отношений в частотном диапазоне 0.5–20 Гц остается постоянной, а повышение общего уровня остается в пределах стандартного отклонения. Результирующие H/V -кривые первой группы представляют собой кривую с незначительными экстремумами (станции ARS, GORB, TRG), иногда уровень кривых повышается в области средних и/или высоких частот (станции ORL, YLYR). Такой тип кривой отмечается для тех станций, которые расположены на выходах коренных пород фундамента. Теоретически, для таких станций H/V -кривые должны представлять собой прямую с амплитудой, приблизительно равной 1. Полученные кривые H/V -отношений, в целом, удовлетворяют этому условию. Станции, размещенные на территории городов (BOD – поселок Мамакан, рядом расположена плотина Мамаканской ГЭС, в 10 км расположен г. Бодайбо, IRK – г. Иркутск, CIT – г. Чита), показывают сложную форму кривых H/V -отношений, т.к. естественный микросейсмический фон на территории городов значительно искажается влиянием антропогенного фактора (авто- и железнодорожный транспорт, плотины ГЭС, ТЭЦ и пр.). Для некоторых станций отмечаются достаточно широкие плавные пики на низких (CRS, KELR, KMO, MOY, NLYR, TUP) и средних частотах (BGT, KYD, UKT), сохраняющиеся вне зависимости от климатического периода. В первом случае все указанные станции размещены на песках, что может давать усиление колебаний в области низких частот. Во втором случае усиление колебаний может быть вызвано неоднородным строением верхней части разреза под сейсмическими станциями.

Для станций второй группы станций получены кривые H/V -отношений со значимыми сезонными вариациями: FFNB, HRMR, KAB, KPC, KRN, LSTR, MXMB, NIZ, OGRR, STDB, SVKR, SYVR, TLY, TRNR, TRTB, UUDB, UZR, VBR, YOA, ZAK, ZMU, ZRHB. В этой группе часть станций можно отнести к условно стабильным: KPC, LSTR, MXMB, OGRR, SYVR, UUDB, – для них хоть и отмечается значительное увеличение $MCШ$ в разные периоды, но это увеличение приурочено к частотному диапазону от 10 Гц и выше, неперекрывающемуся с диапазоном сейсмического излучения от умеренных и сильных региональных землетрясений. Для станций FFNB, HRMR, KRN, MXMB, OGRR, SYVR, TLY, TRTB, TUP, UUDB, UZR и VBR наблюдается относительное увеличение амплитуд горизонтальных компонент $MCШ$ в теплый период, что хорошо согласуется с сезонным оттаиванием грунтов, увеличением транспортной нагрузки на популярных туристических маршрутах, повышением объема стока воды в реках и проявлением озерных микросейсм. Для станций KPC, NIZ и TRNR в холодный период отмечается относительное увеличение амплитуд колебаний вертикальной компоненты $MCШ$, для станций TUP и YOA увеличиваются амплитуды колебаний на всех компонентах на частотах 12.4 и 4.2 Гц соответственно. Для станций KAB, STDB, SVKR и ZAK наблюдается увеличение горизонтальных колебаний в холодный период, что может быть связано с ветровой

нагрузкой. На разных станциях сезонные вариации заметно отличаются. Для некоторых выделяются 1–2 узких пика на фоне общего слабовыраженного повышения уровня Н/V-кривой для теплого периода (например, SYVR). Для других станций в теплый период наблюдается почти линейный рост Н/V-отношения с частотой (KPC), иногда осложненный пиками в области средних или высоких частот (NIZ, TLY). Для станции SVKR Н/V-кривая для теплого периода во всем рассматриваемом частотном диапазоне превышает кривую для холодного периода, в целом, сохраняя форму. Помимо появления сезонных пиков, можно обратить внимание на наличие локальных пиков Н/V-отношений для некоторых станций (FFNB – 10 Гц, GORB – 20 Гц, IVK – 7 Гц, KYD – 6 Гц, LSTR – 18 Гц, MXMB – 20 Гц, TLY – 8–10 Гц, TRG – 11 Гц), которые сложно объяснить влиянием техногенных шумов или речными стоками (рис. 2в). При этом, для некоторых станций эти пики сохраняются и в холодный период, но с меньшей амплитудой. Общим фактором для этих станций является их расположение в зонах крупных активных разломов или рядом с ними. Изучение зон разломов методами микросейсмического зондирования показывает, что такие пики наблюдаются вблизи зон дробления с признаками активизации в плиоцен-четвертичное время и повышенной трещиноватости [Sankov et al., 2017]. Сезонный характер появления этих локальных пиков на кривой Н/V-отношений может объясняться тем, что в зимние периоды происходит промерзание грунтовых толщ, включая водопроводящие тектониты зоны разлома, что значительно меняет упругие свойства среды.

Метод спектральных отношений Накамуры [1989] изначально был предложен для исключения из анализа внешних источников за счет деления горизонтальных и вертикальных компонент МСШ и последующей оценки строения верхней части разреза под пунктом регистрации. Известно, что вертикальная компонента МСШ представлена волнами Рэлея (в основном) и продольным волнами, в то время как горизонтальные компоненты – волнами Лява и Рэлея. Вклад этих волн в сейсмический сигнал от источников разного рода может варьироваться в значительных пределах, что приводит к появлению на кривой Н/V-отношений пиков, не связанных с внутренним строением среды в районе сейсмической станции. Именно это наблюдается на полученных в настоящей работе кривых Н/V-отношений – в формировании пиков на кривой Н/V вносят вклад микросейсмы, речные стоки, движение автотранспорта на удаленных от пункта регистрации дорогах, сезонный рост транспортной нагрузки в больших городах. При сезонном оттаивании грунтов также наблюдается рост амплитуд горизонтальной компоненты МСШ, что приводит к общему увеличению амплитуды кривой Н/V в теплый период по сравнению с холодным. Полученные данные свидетельствуют о том, что кривые Н/V-отношений МСШ отражают не только строение среды под сейсмическими станциями, но также могут нести информацию о внешних шумах разной природы, которые необходимо учитывать при анализе Н/V-кривой и ее использовании для оценки скоростных характеристик среды, для введения поправок при расчете очаговых спектров землетрясений и пр. Можно заключить, что при относительной стабильности формы на длинных временах, кривые Н/V-отношений МСШ не являются стационарными и зависят от внутренних и внешних факторов.

Основные выводы по Главе 3:

По результатам исследования методом спектральных Н/V-отношений были получены амплитудно-частотные характеристики МСШ и их сезонные вариации в частотном диапазоне от 0.5 до 50 Гц для сейсмических станций Байкальского региона и прилегающих территорий. Согласно полученным данным, сейсмические станции Байкальского региона по вариациям Н/V-кривых делятся на две группы: стабильные и

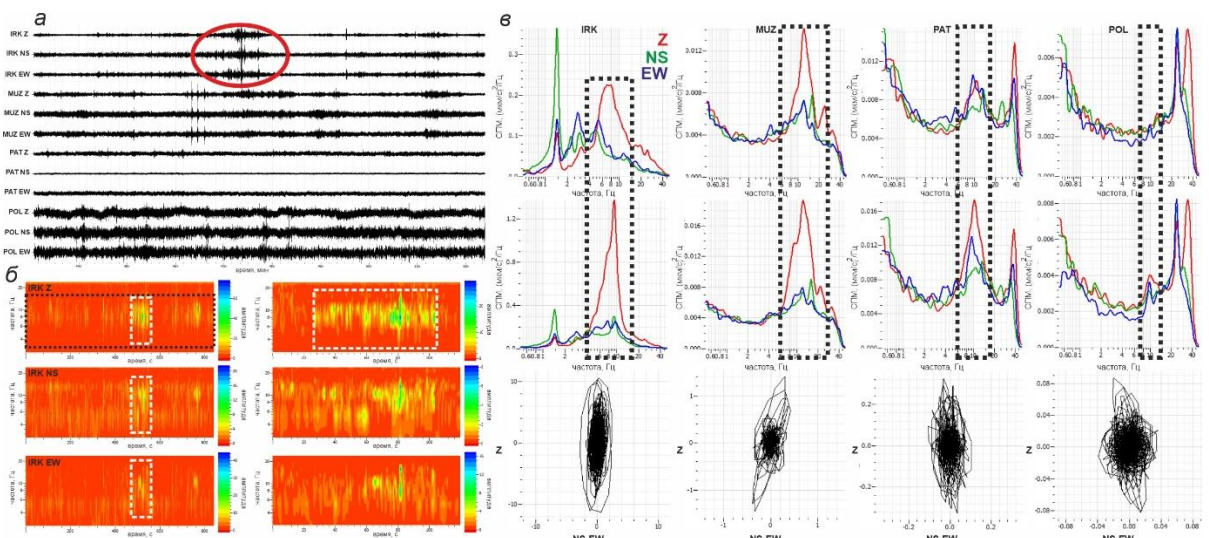


Рисунок 1 – Сейсмический сигнал от выброса пара на НИ ТЭЦ: *а* – исходная запись (красным показан сигнал на станции IRK); *б* – спектрограмма на станции IRK (сигнал выделен черным прямоугольником, справа – развертка максимума излучения); *в* – спектры фона (вверху) и сигнала НИ ТЭЦ (внизу), сигнал выделен прямоугольником, внизу показана поляризационная диаграмма.

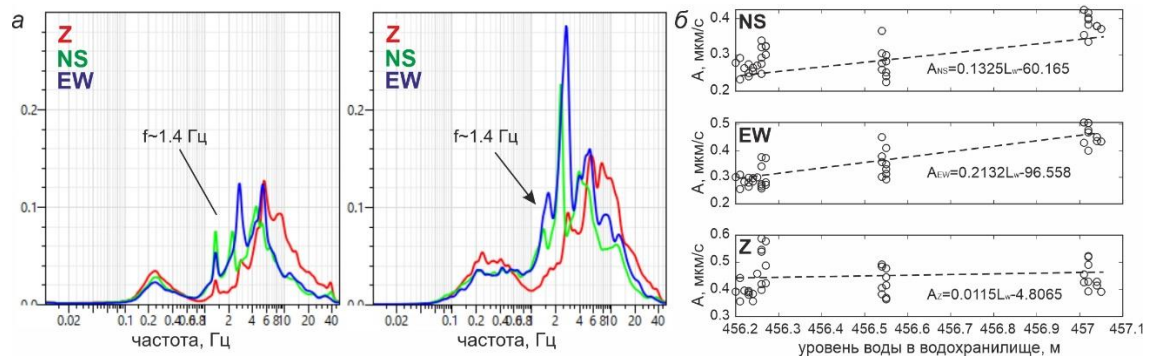


Рисунок 2 – Вариации МСШ с увеличением: *а* – сброса воды на ГЭС (слева – обычный сброс, справа – увеличенный); *б* – уровня воды в водохранилище.

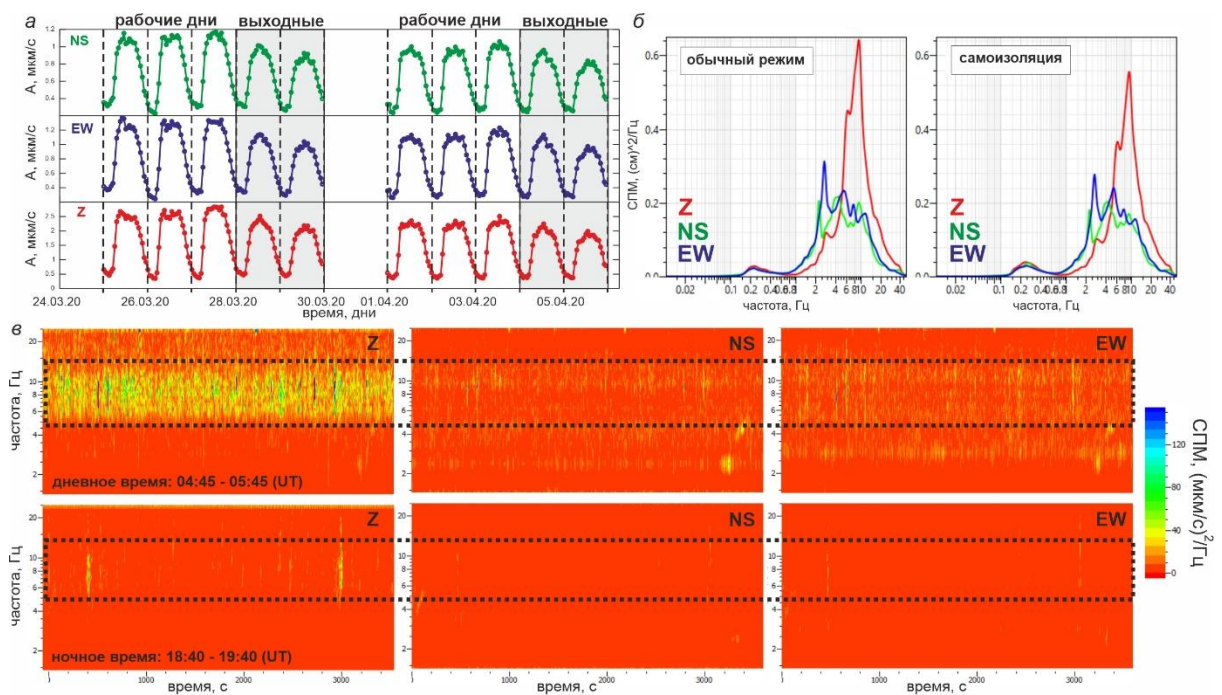


Рисунок 3 – *а* – среднечасовые амплитуды МСШ в обычном режиме и при самоизоляции; *б* – спектры МСШ в обычном режиме и при самоизоляции; *в* – спектрограммы МСШ в дневное и ночное время, прямоугольником показан диапазон МСШ, генерируемых движением транспорта.

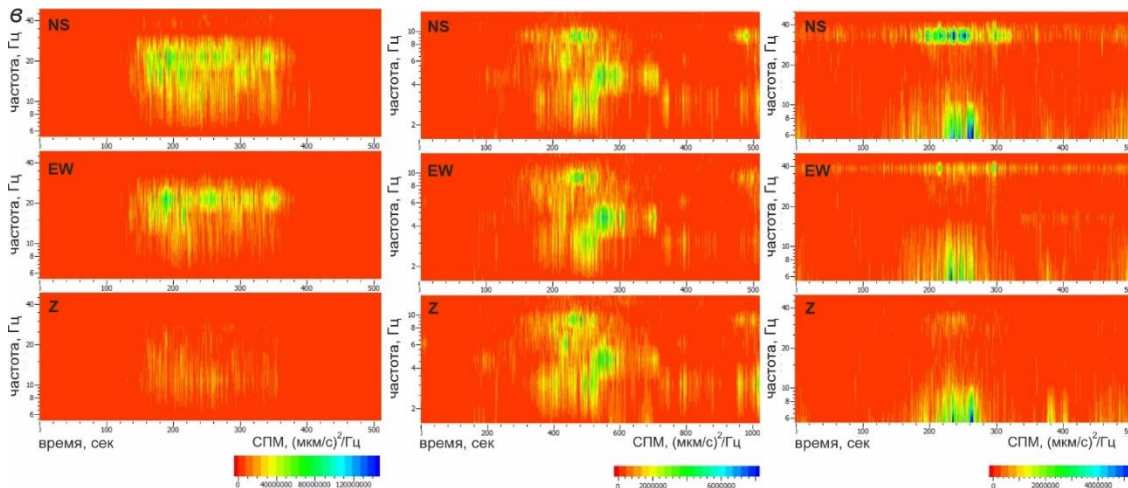


Рисунок 4 – Спектрограммы сигналов, генерируемых движением железнодорожного транспорта на станции SV (слева) и SA (в центре – в частотном диапазоне от 1 до 15 Гц, справа – от 6 до 50 Гц).

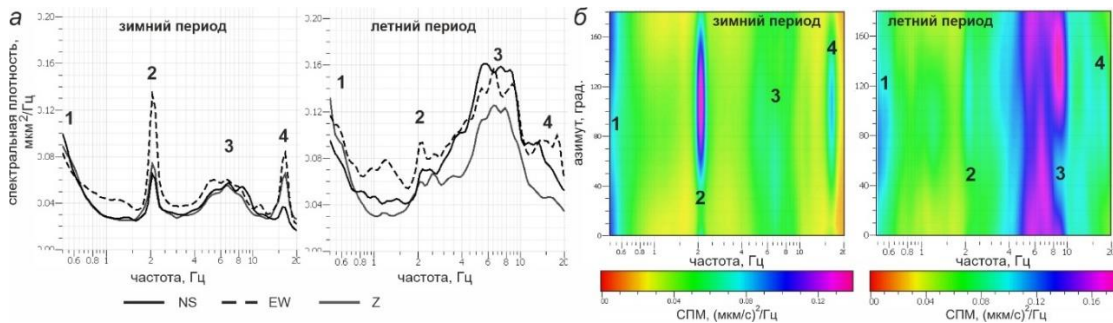
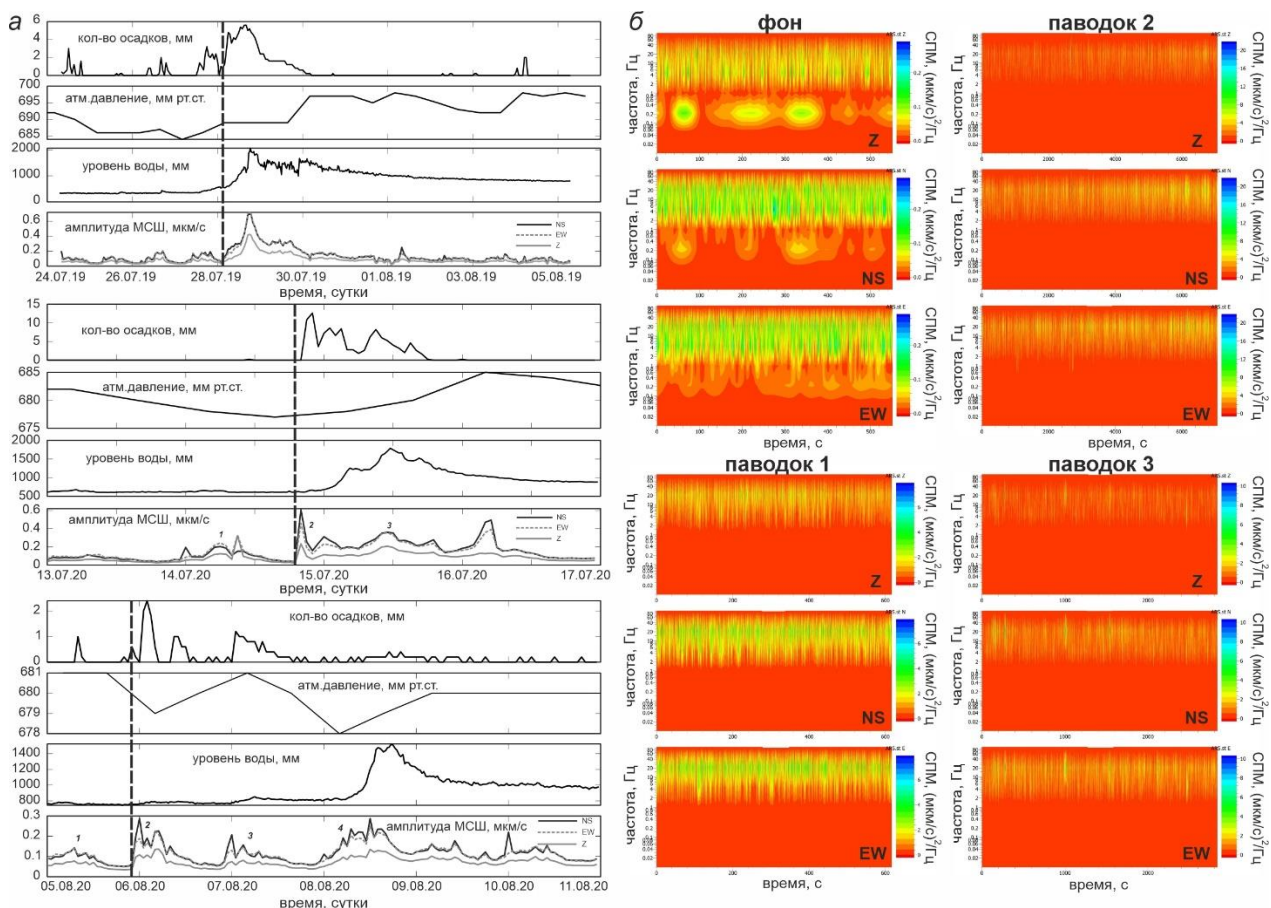


Рисунок 5 – Фоновый МСШ на сейсмической станции ARS: *а* – спектры в зимний (слева) и летний (справа) периоды; *б* – поляризационные диаграммы движения частиц в зимний (слева) и летний (справа) периоды. Цифрами показаны устойчивые пики на спектрах.



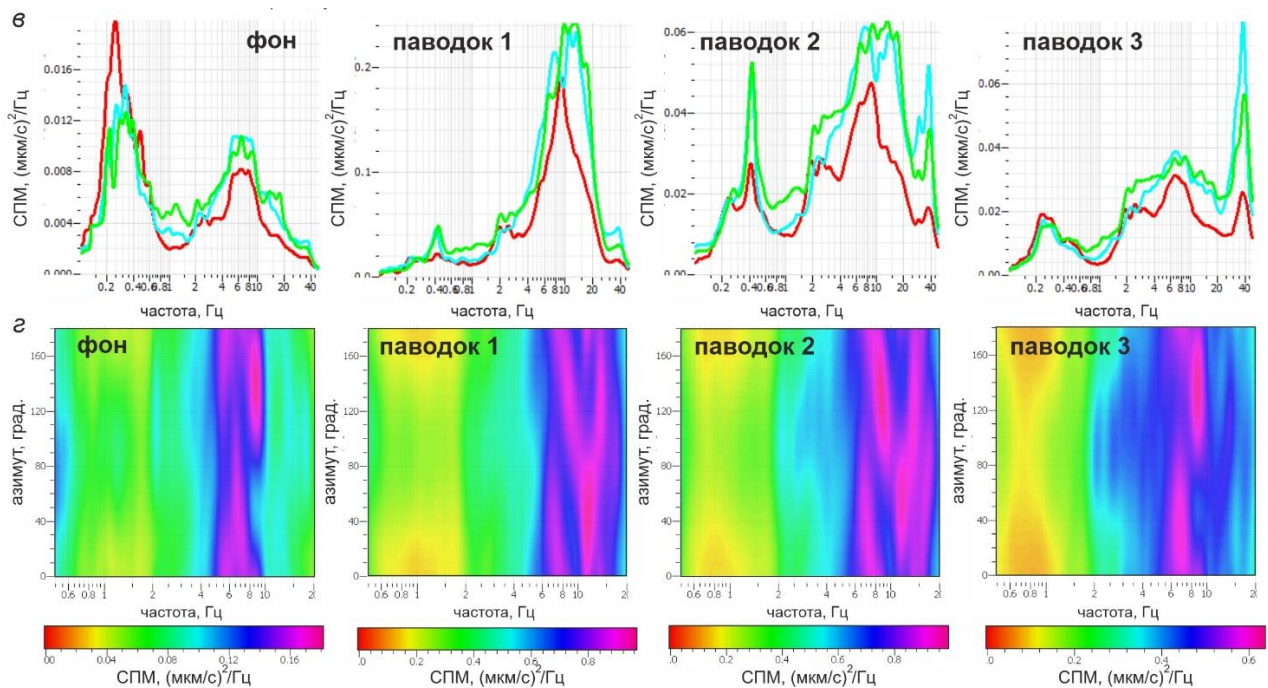


Рисунок 6 – Сейсмические сигналы, генерируемые подъемом воды в р. Кынгарга: *а* – график вариаций количества осадков, атмосферного давления, уровня воды и амплитуд скоростей МСШ для паводков №№ 1–3 (сверху вниз), пунктирной прямой показано начало роста кривых количества осадков, уровня воды и МСШ, цифрами показаны максимумы амплитуд МСШ; *б* – спектрограммы МСШ в спокойном состоянии и при подъеме воды, цветом показана амплитуда сигнала, *в* – средние спектры микросейсмического шума в спокойном состоянии и при подъеме воды, красным цветом показана Z-компонента, зеленым – NS, синим – EW; *г* – диаграммы направления движения частиц в горизонтальной плоскости (частоты 0.5–20 Гц).

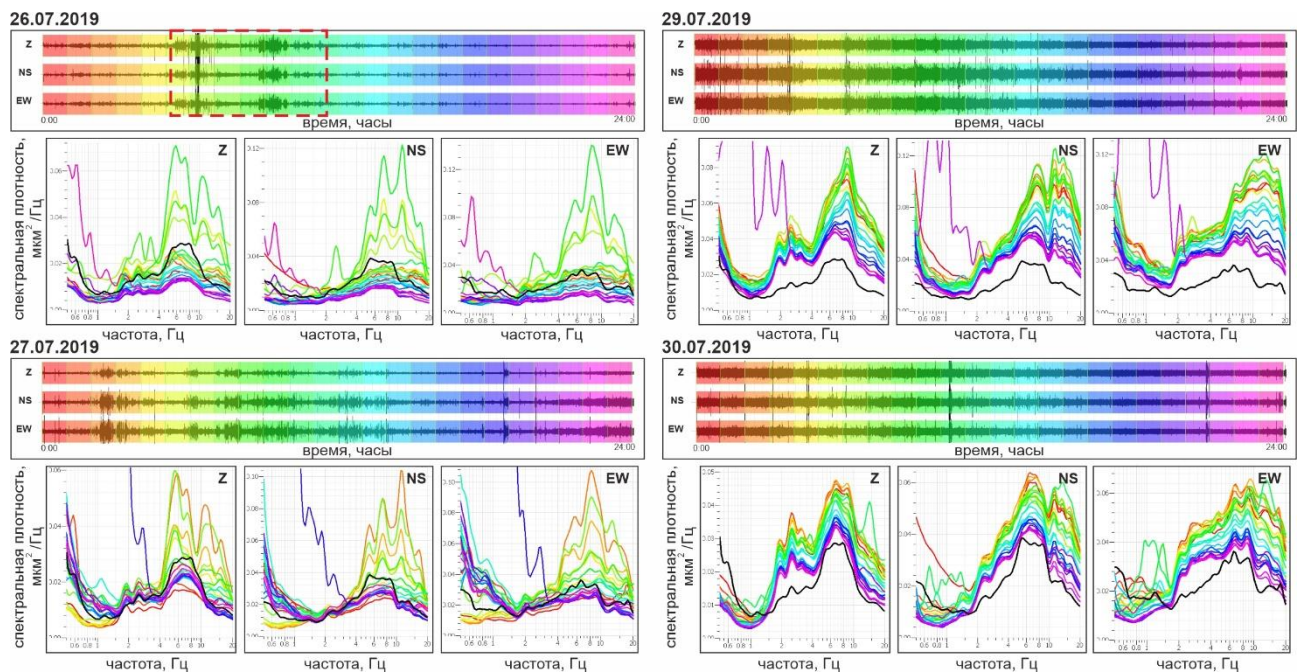


Рисунок 7 – Исходные записи и спектры МСШ часовых отрезков для паводка № 1 за период с 26 по 31 июля 2019 г., цвет спектра соответствует цвету выбранных отрезков записей, черным показан средний спектр фоновых МСШ для каждой компоненты в летний период, красным пунктиром показаны антропогенные помехи.

со значительными сезонными вариациями. Для ряда станций, которые расположены в зонах крупных активных разломов, отмечается наличие узких локальных пиков в частотном диапазоне 6–20 Гц. Для части станций эти пики наблюдаются постоянно, для остальных имеют сезонный характер, что может объясняться промерзанием и оттаиванием водопроводящих тектонитов зоны разлома. Сезонные вариации МСШ связываются промерзанием и оттаиванием грунтов, воздействием антропогенных факторов, речными стоками, а также озерными и океаническими микросейсмами. Полученные вариации амплитудно-частотных характеристик МСШ (H/V-отношения) и их зависимость от внешних факторов свидетельствуют об их нестабильности на коротких временах в рассматриваемом частотном диапазоне.

В четвертой главе «Вариации микросейсмических шумов в связи с антропогенной нагрузкой» приведены результаты оценки изменения МСШ в зависимости от техногенной нагрузки на примере городов Иркутск и Байкальск.

В г. Иркутск расположены Иркутская гидроэлектростанция (ГЭС), Ново-Иркутская теплоэлектроцентраль (НИ ТЭЦ), многочисленные автодороги, через г. Байкальск проходит Восточно-Сибирская железная дорога. Для анализа МСШ в г. Иркутск использовались записи сейсмической станции IRK (БФ ФИЦ ЕГС РАН) и 3 локальных станций ИЗК СО РАН, в г. Байкальск – 2 станции ИЗК СО РАН.

Выход пара из градирен НИ ТЭЦ сопровождается звуковыми эффектами, слышимыми на расстоянии до нескольких километров как низкочастотный гул. На рисунке 1а (вкладка) приведены исходные записи сейсмического фона, полученные во время выброса пара 11 марта 2025 г. в 23 часа 45 минут (время местное). Визуально видно увеличение фона, связанное с выбросом, только на станциях IRK и MUZ, расположенных в пределах Иркутского Академгородка (рис. 1а, вкладка). Это связано с расположением трасс «источник-приемник»: для станций, локализованных в пределах Академгородка: трасса проходит через территорию без высотной застройки, в то время как станция POL расположена в пределах района, застроенного 9-этажными зданиями, станция РАТ находится на расстоянии ~9.5 км. Для выделения сейсмического сигнала, связанного с выбросом пара на НИ ТЭЦ, проводились спектральный, спектрально-временной и поляризационный анализы сейсмограмм. На спектрограммах (IRK) максимум излучения наблюдается на вертикальной компоненте в узком частотном диапазоне от 6 до 12 Гц с отдельными пиками на частотах 4–18 Гц (рис. 1б, вкладка). Записи станций MUZ, POL и РАТ анализировались в тех же диапазонах и показали значительное увеличение амплитуд вертикальных каналов в полосе частот от 6 до 18 Гц с максимумом на частотах 10–16 Гц (рис. 1в, вкладка). Сопоставление спектров трех сейсмических компонент (N, E и Z) показывает максимальное увеличение по вертикальной компоненте для всех четырех станций (рис. 1в, вкладка). При этом, максимальное увеличение амплитуды наблюдалось на станции IRK – в 7 раз относительно фона, минимальное – на станции POL (в 1.1 раза). Согласно поляризационным диаграммам, колебания происходят преимущественно в вертикальной плоскости. Известно, что при переходе звуковой волны в почву, она преобразуется в продольную сейсмическую Р-волну, имеющую при выходе на поверхность вертикальную поляризацию, что и наблюдается на диаграммах (рис. 1в, вкладка). Это свидетельствует о том, что источником анализируемого сигнала является звуковая волна. С учетом поправок на расстояние и на потери энергии при переходе «воздух – почва» были оценены исходные значения интенсивности звука в районе НИ ТЭЦ, которые составили ~80–110 дБ, величина стандартного отклонения ~9 дБ. Подобный уровень шума [ГОСТ 12.1.003-83] относится к вредному непостоянному (крайне вредному). Полученные цифры хорошо согласуются как с данными расчетов звукового давления сброса пара из

котлоагрегатов [Реев, Гунасекара, 2024], так и с данными прямых измерений [Степанова, Захаров, 2016; Kisku, Bhargava, 2006] для других ТЭЦ.

Иркутская ГЭС расположена на р. Ангара в Свердловском районе г. Иркутск и является первой ступенью Ангарского каскада. В здании установлены 8 гидроагрегатов, оборудованных поворотно-лопастными турбинами, работающими при расчётном напоре 26 м. Между гидроагрегатами размещены 16 донных водосбросных водоводов с общей пропускной способностью 3840 м³/с. С учетом пропуска воды через гидроагрегаты максимальная пропускная способность гидроузла достигает 7040 м³/с, при этом сбросы выше 6000 м³/с не допускаются по условиям не затопления г. Иркутска. В работе анализировались МСШ, генерируемые обычным сбросом воды и во время увеличенного сброса. Были выбраны временные периоды во время обычного сброса и увеличенного сброса. На спектрах МСШ на станции IRK хорошо видны узкие высокоамплитудные пики на частоте ~1.4 Гц, соответствующей собственной частоте гидроагрегатов (рис. 2а, вкладка). При увеличенном сбросе воды наблюдается увеличение спектральной плотности мощности МСШ в частотном диапазоне от 0.1 до 40 Гц, максимум приходится на полосу высоких частот – до 20 Гц, при этом наибольшее увеличение наблюдается для горизонтальных компонент. Максимальное увеличение МСШ отмечается 12 августа 2021 г. в период максимального сброса воды – 3300 м³/с, амплитуды при этом увеличились в ~2.5 раза относительно фона на частоте 2.7 Гц. Также были проанализированы вариации сейсмических шумов в зависимости от уровня воды в водохранилище (L_w) за выбранные временные периоды. Для сравнения использовались средние суточные амплитуды МСШ, полученные по всем трем компонентам – N, E, Z. График вариаций амплитуд МСШ в зависимости от L_w показывает увеличение амплитуд с ростом уровня, при этом максимальное увеличение наблюдается для горизонтальных компонент: для компонент N и E среднесуточные амплитуды увеличиваются с ростом уровня водохранилища в 1.88 и 1.98 раз, для компоненты Z – в 1.65 раз относительно фона (рис. 2б, вкладка). Так как увеличение сброса воды напрямую зависит от уровня водохранилища, разделить влияние этих факторов на вариации МСШ достаточно сложно, но доминирующим представляется именно увеличение сброса воды за счет роста ударной нагрузки.

Оценка влияния транспортной нагрузки в пределах городской агломерации на уровень МСШ проводилась на основе анализа записей станции IRK во время режима самоизоляции при COVID-19 и в обычном режиме в дневное и ночное время. В 2020 г. во время пандемии корона вируса (COVID-19) с 20:00 (время местное) 31 марта до 5 апреля включительно Иркутская область указом Губернатора перешла на режим самоизоляции, в связи с чем транспортная нагрузка в городе значительно упала. Для анализа были выбраны записи станции IRK за периоды с 23 по 31 марта (до самоизоляции) и с 01 по 06 апреля (во время самоизоляции). Отдельно анализировались записи, полученные в рабочие дни и в выходные: суббота и воскресенье (рис. 3а, вкладка). В течение суток уровень МСШ показывает значительные вариации – по сравнению с ночными часами с минимальной транспортной нагрузкой среднечасовые амплитуды МСШ возрастают для горизонтальных каналов в ~5.4 раз, для вертикального – в 8 раз (рис. 3а, вкладка). Полученные результаты также свидетельствуют о том, что уровень МСШ стабильно снижается в выходные дни в ~1.3 раза относительно рабочих вне зависимости от режима самоизоляции (рис. 3а, вкладка). При этом, уровень МСШ в рабочие дни в обычном режиме превышает уровень МСШ в период самоизоляции в ~1.13 раз, а в выходные ~1.09 раз (рис. 3а, вкладка). Форма спектров МСШ во время режима самоизоляции и в обычные дни остается постоянной – в отличие от амплитуд.

Максимальное понижение уровня МСШ во время самоизоляции отмечается на частотах 4–15 Гц для вертикальной компоненты, для горизонтальных компонент понижение амплитуд не так заметно (рис. 3б, вкладка). Анализ спектрально-временных диаграмм в ночное и дневное время (минимальная и максимальная транспортная нагрузки соответственно) показал увеличение спектральной плотности мощности МСШ в дневное время в частотном диапазоне от 5 до 15 Гц (рис. 3в, вкладка). Этот частотный диапазон хорошо согласуется с результатами оценки увеличения МСШ при проезде автотранспорта [Копылова, Хайретдинов, 2021].

Также были проанализированы МСШ, генерируемые железнодорожными составами в городе Байкальск. Город Байкальск расположен на южном берегу Байкала, в устье рек Солзан и Харлахта, вблизи федеральной автодороги Р258 «Байкал» и Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД). Сейсмические станции в г. Байкальск были расположены на расстояниях 71 и 1193 м от трассы железной дороги. В отличие от других сейсмических помех антропогенного происхождения сейсмические записи, генерируемые проходящими поездами, легко выделяются визуально и имеют характерную узнаваемую форму. Максимальное увеличение амплитуд МСШ наблюдается для горизонтальных компонент, их значения зависят от тяжести состава и могут увеличиваться в 120 раз для пригородных поездов и в 200 раз и более для грузовых составов и поездов дальнего следования относительно уровня спокойного фона на расстоянии до 70 м. Анализ спектров и спектрально-временных диаграмм (рис. 4, вкладка) показывает увеличение амплитуд в частотной области от 5 до 30 Гц с максимумом в диапазоне 15–25 Гц для ближней станции (SV). Для дальней станции (SA) наблюдается разложение спектра на две составляющие: увеличение в диапазоне от 2 до 11 Гц с максимумом на частотах 3–6 Гц и увеличение на высоких частотах – 32–45 Гц. Анализ записей сейсмических сигналов от железнодорожного транспорта, выполненный в работе [Копылова, Хайретдинов, 2021], показал схожий преобладающий диапазон частот: 4–10 Гц для грузовых составов и 5–44 Гц для пассажирских и электропоездов. Аналогичные результаты (2–20 Гц) получены в работе [Кишкина, Сутулов, 2025].

Основные выводы по Главе 4:

Формирующаяся при сбросах пара на НИ ТЭЦ акустическая волна при переходе в земную кору преобразуется в сейсмическую волну с излучением в частотном диапазоне от 6 до 18 Гц, наблюдаемую на расстояниях до 9.5 км. Восстановленная по сейсмическим данным расчетная интенсивность звука в районе НИ ТЭЦ составляет 80–110 дБ. При повышении уровня воды в Иркутской водохранилище отмечается увеличение среднесуточных амплитуд МСШ. Увеличение сброса воды приводит к росту МСШ в частотном диапазоне от 0.1 до 40 Гц, максимум приходится на полосу высоких частот – от 1 до 20 Гц. Так как увеличение уровня водохранилища и повышение сброса воды являются связанными процессами, отследить влияние конкретного фактора на МСШ на данном этапе не удалось. Можно заключить, что на уровень вибраций от ГЭС как источника влияет работа гидроагрегатов и количество водосброса. Влияние уровня заполнения водохранилища на амплитуды МСШ должно изучаться отдельно. Анализ суточной антропогенной нагрузки в пределах г. Иркутска показал увеличение уровня МСШ в рабочие дни в 1.3 раза относительно выходных. Спад активности во время самоизоляции (COVID-19) привел к уменьшению уровня МСШ в 1.13 раз в рабочие дни и в 1.09 – в выходные в полосе частот 4–15 Гц. Автотранспортная активность в районе Академгородка в поле МСШ проявляется в диапазоне 5–15 Гц, среднечасовые амплитуды шума в дневное время возрастают в ~5.4 раза для горизонтальных компонент и в ~8 раз для вертикальной. При прохождении железнодорожных составов в г. Байкальск в ближней зоне (несколько

десятков метров) генерируются сейсмические волны с излучением в области 5–30 Гц, с увеличением расстояния (до километра и более) наблюдается разложение спектра колебаний на две составляющие: увеличение в диапазоне от 2 до 11 Гц с максимумом на частотах 3–6 Гц и увеличение на высоких частотах – 32–45 Гц.

В пятой главе «Оценка влияния прохождения паводков на уровень микросейсмических шумов» приведены результаты изучения сейсмических эффектов, вызываемых подъемом воды на р. Кынгарга.

В работе использовались данные сейсмической станции ARS, расположенной на расстоянии 250 м от русла реки, данные измерений уровня воды в р. Кынгарга и атмосферных осадков на Пике Любви, проводимых Институтом географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. Для анализа выбрано 3 паводковых события – в июле 2019 г. (№ 1), в июле (№ 2) и в августе (№ 3) 2020 г. Для оценки изменений МСШ во время прохождения паводков в первую очередь были оценены характеристики фонового МСШ. По спектрам в зимний период всех трех компонентах выделяются четыре основных пика колебаний: широкий пик (№ 1) на низких частотах (0.5–1 Гц), относительно узкий пик (№ 2) с центральной частотой 2 Гц, широкий пик (№ 3) в частотном диапазоне от 4 до 10 Гц и узкий пик (№ 4) с центральной частотой 16 Гц (рис. 5а, вкладка). Низкочастотный пик связан с первичными и вторичными океаническими и озерными микросейсмами [Беседина и др., 2024]. Пики №№ 2–4 в летний период сохраняются, при этом амплитуда пика № 3 значительно увеличивается (примерно в 2.6 раз и выше) и пики № 3 и № 4 частично объединяются в один (рис. 5а, вкладка). Пик № 2 может быть связан со строением верхней части разреза вблизи сейсмической станции, в то время как пик № 3 имеет явное сезонное происхождение. Анализ поляризационных диаграмм движения частиц в среде при прохождении сейсмических волн в частотном диапазоне 4–10 Гц показывает отсутствие выраженной ориентации колебаний в горизонтальной плоскости (рис. 5б, вкладка). Можно заключить, что спектральный пик на частотах 4–10 Гц представляет собой излучение сейсмических волн в теплый период, генерируемых проходом водного потока по руслу реки Кынгарга.

Для анализа вариаций МСШ при подъеме воды выбирались временные интервалы, включающие время максимального подъема, а также несколько суток до и после него. Визуальный анализ сейсмограмм показал увеличение амплитуд фоновых МСШ в периоды выпадения обильных жидких атмосферных осадков и увеличения уровня воды в реке Кынгарга. Временные графики вариаций количества осадков, атмосферного давления, уровня воды и амплитуд МСШ для трех паводков показывают, что вариации атмосферного давления не оказывают влияния на уровень МСШ, в то время как при выпадении большого количества жидких атмосферных осадков и повышении уровня воды в реке Кынгарга наблюдается увеличение амплитуд МСШ по всем трем компонентам (рис. 6а, вкладка). При этом амплитуды колебаний в горизонтальных плоскостях заметно превышают амплитуды в вертикальной плоскости (рис. 6б, вкладка). При паводках высокочастотная составляющая МСШ значительно увеличивается, пик на низких частотах (до 1 Гц) также сохраняется, но его амплитуда, хоть и увеличивается, но становится значительно меньше амплитуды высокочастотного пика (рис. 6в, вкладка). Усиление колебаний при прохождении паводка представляет собой широкую полосу от 2 до 40 Гц с максимумом на горизонтальных компонентах (рис. 6б, вкладка). В отличие от фонового излучения, представляющего собой достаточно стабильные колебания в широком частотном диапазоне, при паводках наблюдаются временные вариации как амплитуд излучения, так и его частотного состава. Это связано с нестабильностью водного потока при подъеме воды, а также включением помех различного

происхождения. Максимум излучения для фоновых колебаний находится в области 10 Гц, в то время как для излучения в период подъема воды он сдвигается в область высоких частот – до 20–30 Гц (рис. 6г, вкладка). На рисунке 7 (вкладка) приведены исходные записи и спектры МСШ часовых отрезков за периоды с 26 по 31 июля 2019 г. (паводок № 1). Такое представление позволяет оценить в динамике вариации МСШ до, во время и после паводка. Микросейсмические колебания, связанные с паводками, показывают постепенное плавное увеличение амплитуд с последующим плавным понижением и занимающее достаточно большое время – до десятков часов, и не зависят от времени суток. Диаграммы движения частиц в среде при прохождении сейсмических волн во время паводка не показывают определенной ярко выраженной ориентации колебаний (рис. 6г, вкладка). На основе изменения частотного состава МСШ было определено время начала и конца паводкового процесса. Для этого рассматривались поляризационные диаграммы пятиминутных отрезков сейсмических записей до и после паводка, а также во время начала подъема и спада амплитуд колебаний МСШ, определенному по спектрам. За время начала паводка принималось время одновременного увеличения спектральных амплитуд и появления высоких частот в диапазоне от 4 до 20 Гц, время окончания паводка определялось как время возвращения амплитуд и частот излучения к фоновому состоянию.

Генерация сейсмических волн водным потоком происходит вследствие турбулентности, возникающей при течении потока по дну и вдоль бортов реки, а также при встрече потока с препятствиями (в случае русла реки Кынгарга – это валуны и крупные камни). В зимний период, когда р. Кынгарга покрыта толстым слоем льда, движение водных масс по руслу проходит в спокойном режиме с постоянной скоростью с минимальным образованием турбулентных потоков, и, соответственно, в спектре сейсмических волн исчезает пик в области высоких частот. В теплый период увеличивается уровень воды в русле за счет таяния снегов и выпадения атмосферных осадков, скорость течения увеличивается и возникают турбулентные волны, которые генерируют в спектре МСШ усиление сейсмических волн в частотном диапазоне до 10 Гц. При прохождении больших объемов воды (паводки) также увеличиваются скорость потока и количество встречаемых потоком препятствий, что приводит к усилению турбулентности, вследствие чего происходит изменение амплитудно-частотного состава МСШ, выражающееся в появлении высокоамплитудного пика в области частот от 4 до 40 Гц.

Основные выводы про Главе 5:

МСШ, зарегистрированные на станции ARS, не стабильны во времени и имеют значительные вариации, связанные с сезоном. В теплые периоды при таянии ледового покрова и увеличении уровня воды в реке Кынгарга наблюдается усиление сейсмических колебаний в области частот 4–10 Гц. Выпадение обильных жидких атмосферных осадков и следующий за ним значительный подъем воды в реке Кынгарга приводят к изменению амплитудно-частотного состава МСШ – усилению колебаний в частотном диапазоне от 2 до 40 Гц с максимумом излучения в области частот 20–30 Гц. Для разных событий это увеличение значительно варьируется и зависит от количества водных масс, проходящих по руслу реки в единицу времени. Изменение амплитудно-частотного состава МСШ в летний период относительно зимнего, а также во время паводков относительно меженных уровней происходит в результате увеличения турбулентности потока при возрастании скорости течения, расходов воды и наносов. Диаграммы движения частиц в среде в спокойном состоянии и при паводках не показывают какой-либо доминирующей ориентации колебаний, что связано с протяженностью источника колебаний, представляющего собой все русло реки.

В шестой главе «Закономерности вариаций амплитудно-частотных характеристик микросейсмических шумов от природных и техногенных источников и их практическое применение» приводятся основные полученные закономерности вариаций МСШ от источников различной природы и их возможное практическое применение.

На основе результатов оценки сезонных вариаций МСШ, полученных на стационарных сейсмических станциях Байкальского региона (см. Главу 3), влияние различных внешних факторов на формирование кривой Н/V-отношений можно представить в виде схемы (рис. 3). Осредненная кривая Н/V-отношений показывает три основных источника экзогенных помех разной природы: в области низких частот (< 4 Гц) это классические микросейсмы (озерные, океанические I и II рода), в диапазоне частот от 4 до 18 Гц проявляются антропогенные шумы (в нашем случае это, в основном, автомобильный транспорт, для отдельных пунктов – влияние гидроэлектростанций, железнодорожных транспорт), помехи в области средних и высоких частот (от 6 до 45 Гц) представляют собой сейсмические волны, генерируемые водным потоком в руслах рек.

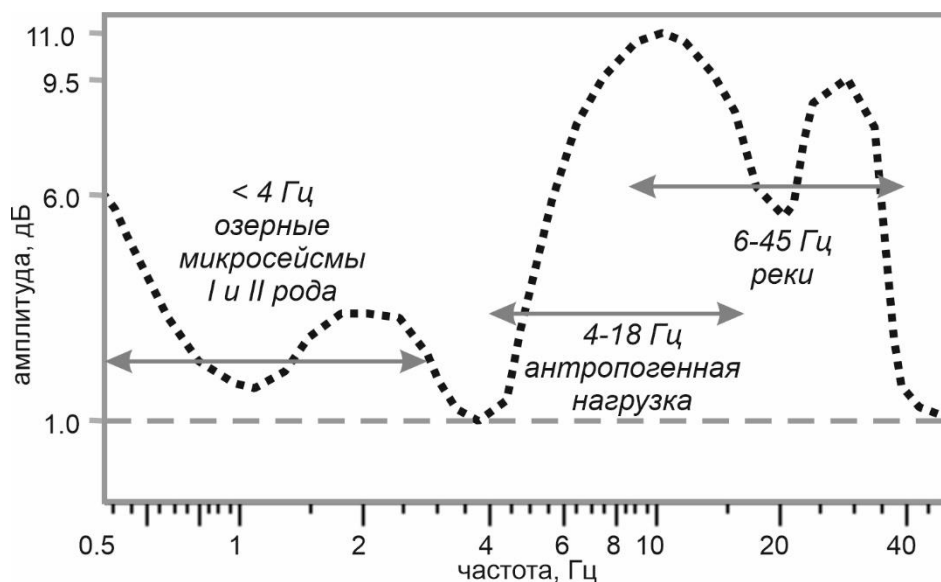


Рисунок 3 – Осредненная кривая Н/V-отношений, показывающая относительное расположение пиков, связанных с экзогенными помехами различной природы. Цифрами показано относительное увеличение амплитуд в дБ, стрелками – частотный диапазон, серым пунктиром – уровень амплитуд Н/V-отношений равный 1, соответствующий Н/V-отношениям на скальном основании без влияния сторонних помех.

На основе изучения антропогенных шумов в городах Иркутск и Байкальск (см. Главу 4) построена компиляционная диаграмма, отражающая частотное распределение сигналов техногенной природы (рис. 8, вкладка). При оценке воздействия железнодорожного транспорта на уровень МСШ с увеличением расстояния «источник – приемник» отмечается разделение спектра колебаний на две компоненты – низко- и высокочастотную, что может быть связано с проявлением сейсмического подобия эффекта Доплера. Природа наблюдаемого эффекта в настоящей работе не рассматривается, в дальнейшем планируется провести измерения и детальный анализ сигналов, генерируемых железнодорожным транспортом, с помощью более плотной локальной сети сейсмических станций. Известно, что городская застройка также является источником сейсмических помех (собственные колебания зданий и сооружений). Согласно справочной информации

[ГОСТ 34081-2017], в зависимости от типа здания и его этажности периоды собственных колебаний могут меняться в широком диапазоне – от 0.18 до 2.24 с (0.45–5.56 Гц) по горизонтальной оси без учета грунтовых условий под фундаментами (показаны серой областью на рис. 181, вкладка). Этот диапазон частично перекрывается с сейсмическими сигналами, генерируемыми авто- и железнодорожным транспортом и, в меньшей степени, работой ГЭС (рис. 8, вкладка), а также с частотами сейсмических волн от местных и близких землетрясений (0.5–20 Гц). Наложение собственных периодов колебаний зданий и сейсмических волн от землетрясений и техногенных источников может привести к появлению резонансных колебаний и последующему снижению прочности и сейсмостойкости строений. В целом, на диаграмме хорошо видно, что каждый сигнал (авто- и железнодорожный транспорт, ГЭС, ТЭЦ) характеризуется своим частотным диапазоном и длительностью, что в совокупности с анализом формы записи позволяет достаточно легко интерпретировать природу неизвестного источника рис. 8, вкладка). Есть мнение, что МСШ рассматриваемого диапазона могут оказывать негативное влияние на состояние зданий и сооружений, а также здоровье людей (см., например, [Копылова, Хайретдинов, 2021; Котов, 2022]). Наряду с самими МСШ, техногенные источники создают в пределах городской агломерации области повышенного дискомфорта (превышение комфортного уровня звукового фона, вибрации зданий), а также опасности для здоровья (длительные низкочастотные вибрации, значительное превышение допустимого уровня звукового фона). В последние десятилетия в связи с взрывным ростом городских агломераций проблема шумового и вибрационного загрязнения городской среды становится все более актуальной проблемой. Результаты оценки техногенных вариаций в пределах городов показывают, что с точки зрения практического сейсмологического мониторинга, размещение станций в крупных городах и населенных пунктах с высокой антропогенной активностью представляется неоптимальным, так как частотный диапазон техногенных воздействий перекрывается с частотами излучения сейсмических волн от местных и близких землетрясений (~0.5–20 Гц). Помимо этого, при установке сейсмических станций на территориях городских агломераций неизбежно приходится уменьшать отношение STA/LTA, чтобы избежать ложных срабатываний. Эти факторы приводят к потере данных, что особенно заметно при анализе умеренных и слабых землетрясений. В то же время, расстановка сейсмических станций в пределах городских агломераций и на территориях опасных и особо важных стратегических объектов необходима, т.к. только в этом случае возможно получение точных инструментальных данных об интенсивности сотрясений при сильных землетрясениях в отдельных районах города в разных грунтовых условиях. При регистрации сильных движений шум, создаваемый техногенной активностью, может быть проигнорирован (при значительном превышении амплитуд колебаний при землетрясении относительно фона) или достаточно легко удален с помощью процедуры отношения спектров полезного сигнала и шума. В случае сейсмометрического мониторинга зданий и сооружений проведения каких-либо дополнительных процедур также не требуется, достаточно выбирать для анализа «не зашумленные» участки записей либо, при необходимости, использовать техногенные шумы в качестве зондирующего сигнала. При невозможности перемещения станций в менее шумные условия, при обработке можно использовать анализ спектрограмм для выделения частотного диапазона и длительности полезного сигнала и систему полосовых фильтров для удаления помех.

В Главе 3 выделена группа шумов в частотном диапазоне 20–45 Гц, генерируемых водными потоками в руслах рек, в Главе 5 этот вопрос рассмотрен

более детально на примере прохождения паводков (подъема воды) на р. Кынгарга. Выпадение обильных жидких атмосферных осадков и следующий за ним значительный подъем воды приводят к изменению амплитудно-частотного состава МСШ – усилению колебаний в частотном диапазоне от 2 до 40 Гц с максимумом излучения в области частот 20–30 Гц. Для разных событий это увеличение значительно варьируется и зависит от количества водных масс, проходящих по руслу реки в единицу времени. Диаграммы движения частиц в среде в спокойном состоянии и при паводках не показывают какой-либо доминирующей ориентации колебаний. В работе [Чечельницкий и др., 2018] представлены результаты изучения катастрофического водокаменного селя 27–29 июня 2014 г. на реке Кынгарга по данным сейсмической станции ARS. Спектральный анализ МСШ показал, что период селевой активности сопровождался изменением свойств микросейсмических колебаний: появлением в спектре скоростей колебаний двух составляющих – высокочастотной (22–48 Гц) и низкочастотной (0.35–0.45 Гц), связанных с перемещением водных масс и движением твердой фракции селевого потока. Поляризационный анализ сейсмических сигналов, генерируемых селевым потоком, показывает, что зарегистрированные упругие колебания представляют собой поверхностные волны, поляризованные в горизонтальной плоскости с выраженной северо-восточной ориентацией. Таким образом, можно заключить, что амплитудно-частотный состав МСШ, генерируемого водным потоком, зависит как от сезона, так и от объемов перемещающихся водных масс и твердой фракции (таблица).

Таблица – Основные характеристики МСШ в зависимости от гидроклиматических условий (р. Кынгарга, Тункинская долина)

Гидроклиматические условия	Характеристики сигнала	Поляризация сигнала
зимний период	Понижение амплитуд, в случае полного замерзания реки – снижение амплитуд сигнала до фонового уровня	нет
спокойное течение реки	Амплитуда сигнала повышается относительно зимнего периода	Проявляется только в случае наличия физической преграды (водопад, излучина реки и пр.)
паводок	Амплитуда сигнала повышается относительно спокойного фона, появляются высокочастотные компоненты в спектре	Проявляется только в случае наличия физической преграды (водопад, излучина реки и пр.)
селевой поток	Резкий рост амплитуд сигнала, разделение спектра на две составляющие, обусловленные движением твердой фракции и турбулентностью потока	Резкая смена ориентации колебаний с указанием на источник

На основе этих результатов предлагается принципиальная схема системы мониторинга и экстренного оповещения о селевой опасности. Данная система основана на различиях в скоростях селевых потоков и сейсмических волн, формирующихся при ударах каменного материала селевого потока о дно и борта русла: скорость селевого потока равна несколько метров – первые десятки метров в секунду, что на 2 порядка ниже скорости сейсмических волн. Система экстренного оповещения о селевой опасности состоит из комплекса оборудования, позволяющего

контролировать условия формирования селевого потока, уровень и концентрацию твердой составляющей в селевом потоке, осуществлять передачу данных на вычислительную станцию и при достижении критических значений (фиксирующих формирование селевого потока) подавать сигналы предупреждения об угрозе схода селевого потока: метеостанция для измерения и контроля климатических селеформирующих условий (температура, осадки, влажность); сейсмические станции для определения момента начала движения селевого потока, его направления и скорости, а также наличия твердой составляющей в селевом потоке; фотоловушки/видеокамеры для визуального контроля водного/селевого потока и русла селеопасной реки; уровнемер для контроля уровня водного/селевого потока; телеметрическая станция для сбора и передачи данных на вычислительную станцию; вычислительная станция для анализа контрольных параметров, характеристики водного/селевого потока и подачи сигнала о формировании селевого потока на систему оповещения; система оповещения, для сигнализации органов местного самоуправления, органов ГО и ЧС, а также населения о селевой угрозе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате настоящего исследования, основанного на использовании цифровых записей сети сейсмических станций БФ и БуФ ФИЦ ЕГС РАН и ИЗК СО РАН, получены новые данные об амплитудно-частотных характеристиках МСШ в Байкальском регионе и их вариациях в зависимости от различных природных и техногенных факторов.

По результатам исследования методом спектральных H/V -отношений были получены амплитудно-частотные характеристики МСШ и их сезонных вариаций для сейсмических станций Байкальского региона и прилегающих территорий. По полученным H/V -кривым станции региона делятся на две группы: стабильные и со значительными сезонными вариациями. В первую группу входят станции с устойчивыми характеристиками МСШ, которые не зависят от сезона. Во вторую группу входят станции, для которых были получены кривые H/V -отношений со значительными сезонными вариациями. Сезонные вариации МСШ связаны с сезонным промерзанием/оттаиванием грунтов, антропогенными факторами, речными стоками, озерными и океаническими микросейсмами.

В результате изучения МСШ техногенной природы установлено, что формирующаяся при сбросах пара на НИ ТЭЦ акустическая волна при переходе в земную кору преобразуется в сейсмическую волну с излучением в частотном диапазоне от 6 до 18 Гц, наблюдаемую на расстояниях до 9.5 км. Расчетная интенсивность звука в районе НИ ТЭЦ составляет 80–110 дБ. При повышении уровня воды в Иркутской водохранилище отмечается увеличение среднесуточных амплитуд МСШ. Увеличение сброса воды приводит к росту МСШ в частотном диапазоне от 0.1 до 40 Гц, максимум приходится на полосу высоких частот – от 1 до 20 Гц. Анализ суточной антропогенной нагрузки в пределах г. Иркутска показал увеличение уровня МСШ в рабочие дни в 1.3 раза в полосе частот 4–15 Гц относительно выходных. Спад активности, связанной с антропогенной нагрузкой, во время самоизоляции (COVID-19) привел к уменьшению уровня МСШ в 1.13 раз в рабочие дни и в 1.09 – в выходные в полосе частот 4–15 Гц. Автотранспортная активность в районе Академгородка в поле МСШ проявляется в диапазоне 5–15 Гц, среднечасовые амплитуды шума в дневное время возрастают в ~5.4 раза для горизонтальных компонент и в ~8 раз для вертикальной. При прохождении железнодорожных составов в г. Байкальск в ближней зоне (несколько десятков метров) генерируются сейсмические волны с излучением в области 5–30 Гц, с увеличением расстояния (до

километра и более) наблюдается разложение спектра колебаний на две составляющие: увеличение в диапазоне от 2 до 11 Гц и 32–45 Гц. Таким образом, антропогенная деятельность в пределах населенных пунктов находит свое отражение в изменении микросейсмического и акустического полей. При этом, каждое антропогенное воздействие имеет собственные характерные частоты излучения и может быть уверенно идентифицировано.

Анализ вариаций МСШ, генерируемых р. Кынгарга в спокойном состоянии и при значительных подъемах воды (паводках), показал, что микросейсмические колебания, зарегистрированные на станции ARS, не стабильны во времени и имеют значительные вариации, связанные с сезоном. В теплые периоды при таянии ледового покрова и увеличении уровня воды в реке Кынгарга наблюдается усиление сейсмических колебаний в области частот от 4 до 10 Гц. Выпадение обильных жидких атмосферных осадков и следующий за ним значительный подъем воды в реке Кынгарга приводят к изменению амплитудно-частотного состава микросейсмических шумов – усилению колебаний в частотном диапазоне от 2 до 40 Гц с максимумом излучения в области частот 20–30 Гц. Изменение амплитудно-частотного состава микросейсмических колебаний в летний период относительно зимнего, а также во время паводков относительно меженных уровней происходит в результате увеличения турбулентности потока при возрастании скорости течения, расходов воды и увеличения механических преград, служащих вторичными источниками микросейсмического шума. Диаграммы движения частиц в среде в спокойном состоянии и при паводках не показывают какой-либо доминирующей ориентации колебаний, что связано с протяженностью источника колебаний, представляющего собой все русло реки. На основе результатов, полученных в настоящей работе и в работе [Чечельницкий и др., 2018], предлагается принципиальная схема системы мониторинга и краткосрочного оповещения о прохождении селевого потока. Система основана на разнице в скоростях селевых потоков и сейсмических волн, формирующихся при ударах каменного материала селевого потока о дно и борта русла, и разнице спектрально-поляризационных характеристик событий различной природы (паводки и сели). Система состоит из комплекса оборудования позволяющего контролировать условия формирования селевого потока, уровень и концентрацию твердой составляющей в водном/селевом потоке, осуществлять передачу данных на вычислительную станцию и при достижении критических значений (фиксирующих формирование селевого потока) подавать сигналы предупреждения об угрозе схода селевого потока.

Наряду с самими МСШ, техногенные источники создают в пределах городской агломерации области повышенного дискомфорта и опасности для здоровья (длительные низкочастотные вибрации, значительное превышение допустимого уровня звукового фона). В последние десятилетия в связи с взрывным ростом городских агломераций проблема шумового и вибрационного загрязнения городской среды становится все более актуальной проблемой. По этой причине в дальнейшем планируется продолжение работ по изучению МСШ различной природы и их вариаций. В частности, будут изучены сейсмические сигналы, формирующиеся при взлете и посадке самолетов, оценено их шумовое воздействие, будут детально рассмотрены сигналы, генерируемые движущимися железнодорожными составами, трамваями и пр. Также, автор планирует провести детальное изучение сезонных изменений скоростей сейсмических волн в Байкальском регионе при промерзании и оттаивании грунтовой толщи по методу Накамуры с определением скоростного разреза среды.

Основные публикации по теме диссертации:

1. **Блинова (Король) С.А.**, Саньков А.В., Добрынина А.А. Изучение сезонных вариаций спектрального состава сейсмических волн в Байкальской рифтовой системе по данным землетрясений и микросейсм // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы шестой молодежной тектонофизической школы-семинара. – М.: ИФЗ, 2019. С. 84-85
2. **Блинова (Король) С.А.**, Саньков А.В., Добрынина А.А. Сезонные вариации H/V-отношений в Байкальском рифте по данным землетрясений и микросейсм // Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы: Материалы IV Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых, посвященного 90-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева / Под редакцией С.В. Рассказова, С.П. Приминной. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2019. С. 40-41
3. **Блинова (Король) С.А.**, Добрынина А.А., Саньков А.В., Саньков В.А. Глубинное строение осадочного чехла Сибирской платформы района Ковыктинского газоконденсатного месторождения по данным микросейсмического профилирования // Пятая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием – М.: ИФЗ. 2020. – С. 197-202.
4. **Король С.А.**, Саньков А. В., Добрынина А. А. Связь микросейсмических шумов с землетрясениями // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. / ФГБУН ИЗК СО РАН; ФГБОУ ВО «ИГУ»; отв. ред. К. Ж. Семинский. – Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. – С. 193-194. <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1919-0.2021.1-233>
5. **Король С.А.**, Саньков А.В., Добрынина А.А. Вариации микросейсмических шумов в Байкальском рифте // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 11–16 мая 2021 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. С. 139-141
6. Добрынина А.А., **Король С.А.**, Саньков В.А., Саньков А.В. Сезонные вариации H/V-отношений в Байкальском рифте // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. 26 сентября – 2 октября 2021 г. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 35-36
7. Саньков В.А., Добрынина А.А., Саньков А.В., **Король С.А.** Вариации микросейсмических шумов в Байкальской рифтовой системе перед землетрясениями // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. 26 сентября – 2 октября 2021 г. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 54-55
8. Добрынина А.А., Саньков В.А., Борняков С.А., **Король С.А.**, Саньков А.В. Вариации микросейсмических шумов перед Кударинским землетрясением 09 декабря 2020 г. с $M_w=5,6$ // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2022), 29 августа – 3 сентября 2022 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 45-48
9. Dobrynina A.A., Rybchenko A.A., Kichigina N.V., **Korol S.A.**, Sankov A.V., Chechelnitzsky V.V. Seismic effects of debris flows and floods on Kyngarga river according to short-period seismic data // Ресурсы, окружающая среда и региональное устойчивое развитие в Северо-Восточной Азии: Тезисы докладов V Международной научной конференции (Иркутск, 23–26 августа 2022 г.). – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2022. С. 94.
10. Добрынина А.А., Саньков В.А., Борняков С.А., **Король С.А.**, Саньков А.В. Аномалии микросейсмических шумов перед Кударинским землетрясением 9 декабря 2020 г. с $M_w=5.6$ // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции. Вып. 20. 18–21 октября 2022 г., ИЗК СО РАН, г. Иркутск / ответственный редактор Е.В. Скляров, председатель Оргкомитета Е.В. Скляров; Сибирское отделение РАН, Институт земной коры СО РАН. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2022. С. 83-84
11. Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Первалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., **Король С.А.** Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // **ГЕОДИНАМИКА И ТЕКТОНОФИЗИКА**. 2022; 13(5). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0677>
12. **Король С.А.**, Саньков А.В., Добрынина А.А., Саньков В.А. Вариации уровня микросейсм

- перед землетрясениями в Байкальской рифтовой системе // **ГЕОДИНАМИКА И ТЕКТОНОФИЗИКА**. 2022; 13(2). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0632>
13. **Король С.А.**, Добрынина А.А. Вариации микросейсмических шумов в байкальском рифте в зависимости от сезона // В сборнике: Орогенез: от методов исследования до геодинамических реконструкций. Материалы Байкальского молодежного научного семинара «Современные проблемы в вопросах геологии, петрологии и геофизики». Избранные труды. 2022. С. 20-22.
14. **Король С.А.**, Добрынина А.А. Вариации микросейсмических шумов в Байкальском рифте // В сборнике: Вестник Иркутского университета. Научные работы. Иркутск, 2022. С. 206-207.
15. Добрынина А.А., Рыбченко А.А., Кичигина Н.В., Саньков В.А., **Король С.А.**, Саньков А.В., Чечельницкий В.В. Сейсмический мониторинг прохождения селей и паводков на примере р. Кынгарга (Тункинская долина) // Материалы конференции «Ляпуновские чтения» (г. Иркутск, 5 – 9 декабря 2022 г.). – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2022. С. 41-42
16. Добрынина А. А., Саньков В. А., Борняков С. А., **Король С. А.**, Саньков А. В. Аномалии микросейсмических шумов в связи с Кударинским землетрясением 09 декабря 2020 г. с $M_w=5,6$ в Байкальской впадине // **ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК**. Науки о Земле. 2023, том 509, № 1, с. 74–80. DOI: 10.31857/S2686739722602733
17. Добрынина А.А., Саньков В.А., Саньков А.В., **Король С.А.**, Борняков С.А. Аномалии микросейсмических шумов как предвестник опасных геологических процессов // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023) [Электронный ресурс]: Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием (22-25 августа 2023 г., г. Бердск). Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 384-387. DOI:10.25743/sdm.2023.10.46.064
18. Добрынина А.А., **Король С.А.**, Саньков В.А., Борняков С.А., Рыбченко А.А., Саньков А.В. Вариации микросейсмических шумов как предвестник опасных геологических процессов // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции. Вып. 21. 17–20 октября 2023 г., ИЗК СО РАН, г. Иркутск / ответственный редактор Е.В. Скляр, председатель Оргкомитета Е.В. Скляр; Сибирское отделение РАН, Институт земной коры СО РАН. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2023. С. 88-89
19. Григорюк А.П., Брагинская Л.П., Добрынина А.А., **Король С.А.** Длиннопериодные микросейсмические колебания как краткосрочные предвестники землетрясений в Байкальском рифте // Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона: тез. докл. XIV Рос.-Монг. междунар. конф. / РАН, Сиб. отд-ние, Ин-т земной коры, Ин-т солн.-зем. физики. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2023. С. 26-27
20. Добрынина А.А., Саньков В.А., Саньков А.В., **Король А.А.**, Рыбченко А.А. Мониторинг микросейсмических шумов в Байкальском рифте // Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона: тез. докл. XIV Рос.-Монг. междунар. конф. / РАН, Сиб. отд-ние, Ин-т земной коры, Ин-т солн.-зем. физики. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2023. С. 31
21. Добрынина А.А., В.А. Саньков, **С.А. Король**, Н.В. Кичигина, А.А. Рыбченко. Сейсмические эффекты паводков на р. Кынгарга (Тункинская долина, Восточный Саян) // Материалы 40-й международной конференции «Ляпуновские чтения – 2024» (г. Иркутск, 2 – 6 декабря 2024 г.). – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2024. С. 69-70
22. Добрынина А.А., В.А. Саньков, **С.А. Король**, Н.В. Кичигина, А.А. Рыбченко. Сейсмические эффекты паводков на р. Кынгарга (Тункинская долина, Восточный Саян) // **ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА**, 2025. Т. 66, № 3. С. 395-411. DOI: 10.15372/GiG2024170
23. Добрынина А.А., **Король С.А.**, Саньков В.А., Саньков А.В. «Портрет» городской агломерации в микросейсмических шумах // **ГЕОДИНАМИКА И ТЕКТОНОФИЗИКА**. 2026;17(4):903. <https://doi.org/10.5800/GT-2026-17-4-0903>.

Подписано в печать 12.10.2026. Формат 60x84 1/16

Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать Riso

Уч.-изд. Л. 1,25. Усл. печ. л. 1,33

Тираж 120 экз. Заказ 710

Отпечатано в типографии Института земной коры СО РАН

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128