

На правах рукописи



ЛИСЕЙКИН АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ОБНАРУЖЕНИЕ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ
СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

1.6.9 – геофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН).

Официальные оппоненты:

Антоновская Галина Николаевна, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией сейсмологии, заместитель директора по науке Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова УрО РАН;

Завьялов Алексей Дмитриевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией сейсмической опасности Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН;

Ковалевский Валерий Викторович, доктор технических наук, заведующий лабораторией геофизической информатики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук (ГЦ РАН).

Защита состоится 23 декабря 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.087.02 на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале. Адрес: пр-т Ак. Коптюга, 3, г. Новосибирск, 630090.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3
факс (8-383) 330-28-07, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-03/liseykin2025>

Автореферат разослан 10 ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м.н., доцент



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – слабые колебания земной поверхности, амплитудой от нескольких нанометров до микрометров и частотой от десятых долей до первых десятков герц, регистрируемые в составе сейсмического шума на расстоянии до первых десятков километров от возбуждающих их источников, таких как работающее оборудование, колеблющиеся здания или сооружения и характеризующиеся постоянной или медленно меняющейся во времени частотой. На отдельных этапах выполнения работы как объект исследования рассматриваются слабые, по амплитуде до двух порядков ниже общей амплитуды сейсмического шума, колебания отраженных упругих волн, возбужденных сейсмическими источниками импульсного типа. Для обозначения перечисленных типов сигналов используется термин «малоамплитудные сейсмические сигналы».

Предмет исследования – поиск новых решений, способствующих надежному выделению в сейсмическом шуме малоамплитудных сейсмических сигналов и их использованию для дистанционного обнаружения разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений и определения структуры земной коры на всю ее мощность.

Актуальность. В настоящее время выявление разрушительных процессов в зданиях, инженерных сооружениях и работающем оборудовании промышленных объектов осуществляется главным образом на основе данных размещенной на них контрольно-измерительной аппаратуры. Это – системы вибрационного, сейсмометрического, деформационно-напряженного, температурного и других видов мониторинга. Однако 17 августа 2009 г. произошла крупнейшая катастрофа на Саяно-Шушенской ГЭС с разрушением дорогостоящего имущества и человеческими потерями, причины которой не сразу были выяснены из-за неполноты данных мониторинга при выходе из строя установленной на гидроагрегатах аппаратуры. Это событие заставило задуматься о разработке новых способов дистанционного обнаружения разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений по материалам мониторинга сейсмических сигналов, регистрируемых в их окрестности, на станциях сейсмологических сетей. Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН» (ФИЦ ЕГС РАН) располагает такой сетью из более чем 350 станций, часть из которых расположена в

окрестностях особо важных промышленных объектов (ГЭС, ТЭЦ, АЭС, заводы и др.). Ряд объектов окружен еще и собственными станциями локальных сейсмологических наблюдений. Современные сейсмостанции оснащаются высокочувствительной калиброванной цифровой аппаратурой для регистрации событий природного и техногенного характера (землетрясений, промышленных взрывов), при этом одновременно регистрируется и непрерывный сейсмический шум. Зарегистрированные в режиме, близком к реальному времени, сейсмограммы передаются в обрабатывающие центры ФИЦ ЕГС РАН и хранятся по регламенту неограниченное время в виде цифровых архивов, доступных для исследования по ряду станций с конца 1990-х – начала 2000-х годов. При спектральном анализе сейсмического шума выясняется, что в его техногенной составляющей регистрируются слабые упругие волны, возбужденные колебаниями различных объектов, расположенных даже в нескольких километрах от сейсмической станции. К ним относятся: вибрация оборудования при работе крупных промышленных объектов и собственные колебания зданий и технических сооружений. При развитии каких-либо нештатных ситуаций характеристики этих колебаний изменяются. Располагая современными способами выделения из сейсмического шума малоамплитудных (на порядки ниже уровня фона) сигналов от колебаний конкретного объекта и интерпретируя изменение их характеристик во времени, можно дистанционно обнаружить начавшиеся разрушительные процессы при эксплуатации этого объекта. Кроме этого, с использованием архивных данных длительного мониторинга контролируется долговременное (измеряемое годами и даже десятилетиями) изменение устойчивости сооружений и работающего оборудования, остро необходимое при расследовании нештатных ситуаций (как при аварии на Саяно-Шушенской ГЭС).

Сейсмические разрезы земной коры, как известно, широко используются для решения задач геодинамики и тектоники, а также при выборе методов и параметров методик проведения более детальных поисковых и прогнозных работ с учетом связи между строением верхней, средней и нижней частей земной коры. Специалисты знают, что разрез земной коры на больших глубинах (в десятки километров) определяется в основном по результатам геофизических методов исследования, причем наиболее детальные и достоверные разрезы получают по данным метода глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) на преломленных и отраженных волнах. Однако на сегодня объем

финансирования этих за пределами дорогих исследований значительно сокращен, в связи с чем территории протяженностью в сотни километров еще остаются неисследованными. Одним из рациональных путей построения разрезов средней и нижней частей земной коры является дообработка материалов речной сейсморазведки методом общей глубинной точки (ОГТ), отличающаяся использованием сейсмограмм увеличенной длительности. В результате проведения экспериментальных полевых работ вдоль русла рек Лена, Витим и Нижняя Тунгуска, на профилях общей длиной около 2700 км, получен и хранится на электронных носителях значительный объем материала. Это – непрерывные записи сейсмического шума, включающего сигналы от пневмоисточников с периодом между воздействиями больше, чем время пробега продольных волн близвертикально отраженных от границ в земной коре на любой глубине, включая поверхность Мохоровичича. Современные сейсморазведочные станции характеризуются широким динамическим диапазоном, обеспечивая регистрацию слабых сигналов на порядки ниже общей амплитуды сейсмического шума. Располагая специальными способами обработки сейсмограмм методом ОГТ, можно существенно повысить отношение сигнал-помеха и выделить малоамплитудные сигналы отраженных волн из сейсмического шума.

Анализ степени разработанности темы исследования показывает, что несмотря на значительное количество современных разработок российских и зарубежных исследователей, остается нерешенным ряд вопросов. Так, сложный состав сейсмического шума, особенно регистрируемого в пределах крупных населенных пунктов, диктует необходимость разработки новых эффективных алгоритмов выделения в нем малоамплитудных сигналов и их реализации в специальном программном обеспечении. Дистанционный контроль исправности работающего оборудования по данным мониторинга станциями сейсмологической сети в настоящее время практически не используется, так как не разработаны специальные методики выделения и интерпретации малоамплитудных сигналов в сейсмическом шуме. Методика контроля технического состояния зданий и сооружений по частотам их собственных колебаний нуждается в дальнейшем развитии в связи с необходимостью учета многих факторов, влияющих на текущие значения частот. Материалы сейсморазведки со слабыми источниками возбуждения упругих волн и удлинённой записью в настоящее время также не востребованы для определения строения

земной коры на всю глубину по причине отсутствия специального методического обеспечения.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется необходимостью выполнения исследований в целях обеспечения безопасного функционирования промышленных объектов способом дистанционного обнаружения разрушительных процессов при их эксплуатации и определения структуры земной коры на всю мощность по малоамплитудным сейсмическим сигналам, зарегистрированным в составе сейсмического шума.

Цель исследования – развить составляющую сейсмологии в части использования малоамплитудных сейсмических сигналов для дистанционного обнаружения разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений (напр., ГЭС, АЭС, ТЭЦ), работающего оборудования (гидроагрегатов, турбин и др.) и для уточнения структуры земной коры на всю мощность.

Научная проблема – найти и реализовать новые научно-обоснованные эффективные решения для дистанционного обнаружения начавшихся разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений и уточнения структуры земной коры на всю мощность с использованием малоамплитудных сигналов, выделенных в сейсмическом шуме.

Научные задачи

1. По материалам мониторинга сейсмического шума на основе Фурье-анализа разработать эффективный алгоритм и программную реализацию выделения малоамплитудных сейсмических сигналов.

2. Исследовать возможности дистанционного изучения механики процессов при эксплуатации промышленных объектов по малоамплитудным сейсмическим сигналам и на основе полученных результатов разработать методику обнаружения начавшихся разрушений в работающем оборудовании.

3. По данным многолетнего мониторинга сейсмического шума разработать методику дистанционного определения аномалий в частотах собственных колебаний зданий и сооружений по малоамплитудным сигналам как индикатора начавшихся разрушений их конструкции и/или основания.

4. С использованием архивных материалов речного сейсмического профилирования методом ОГТ разработать методику определения структуры земной коры на всю мощность по малоамплитудным отраженным волнам.

Методы исследования, фактический материал.

Теоретической и методической основой решения поставленных задач является классический гармонический анализ и современные высокопроизводительные алгоритмы дискретного оконного преобразования Фурье для построения спектрограмм.

Для программной реализации алгоритмов и разработки визуальных интерфейсов (программы [SpectrumSeism, 2021; Geofiters, 2022; SSlicer, 2022]) использована библиотека Qt, язык программирования C++. Верификация программного обеспечения осуществлялась на основе сравнительного анализа результатов обработки синтетических сейсмограмм, содержащих малоамплитудные сигналы с заданными амплитудно-частотными характеристиками, изменяющимися во времени. Кроме этого, часть функциональных возможностей разработки проверялась сопоставлением с результатами обработки реальных данных при использовании известного программного обеспечения других авторов (П.А. Дергач, В.Ю. Юшин, 2016; А.А. Бах и др., 2019).

Исходным материалом для исследования служат цифровые сейсмограммы сейсмического шума, непрерывно регистрируемого стационарными станциями сейсмологической сети ФИЦ ЕГС РАН (Алтае-Саянского, Дагестанского и Камчатского филиалов) и локальных сейсмологических сетей ПАО «РусГидро» (филиалов Чиркейской, Саяно-Шушенской и Новосибирской ГЭС), а также временных сейсмостанций, устанавливаемых на промышленных объектах (в машинном зале и плотине Саяно-Шушенской, Чиркейской ГЭС, на зданиях).

При построении разрезов земной коры по материалам речной сейсморазведки использовались алгоритмы метода общей глубинной точки, реализованные в программном обеспечении RadExPro, такие как: криволинейное бинирование, полосовая фильтрация, автоматическая регулировка усиления, ввод кинематических поправок и суммирование. Верификация результатов выполнялась сопоставлением полученных разрезов с результатами обработки материалов близлежащих профилей наземной сейсморазведки и ГСЗ.

В качестве исходных материалов для разработки методики построения разрезов земной коры использовались сейсмограммы зарегистрированного непрерывно сейсмического шума на профилях речной сейсморазведки (р. Лена, лето 2018 г.; р. Витим, лето 2019 г.) в рамках исполнения контракта между ФИЦ ЕГС РАН и ФГБУ «Институт

Карпинского» №12/20-4 от 08.06.2020 г. «Подготовка сейсмических данных, полученных при региональных сейсморазведочных работах МОГТ-2Д для оценки возможности их использования с целью изучения глубинного строения земной коры на всю ее мощность».

Соискатель защищает новые научно обоснованные **решения**, совокупность которых представляет собой инструментарий для дистанционного обнаружения начавшихся разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений и уточнения структуры земной коры на всю мощность с использованием малоамплитудных сигналов, выделенных в сейсмическом шуме. Их внедрение вносит значительный вклад в развитие сейсмологии при снижении затрат на исследования, а значит выгодно для экономики страны.

Защищаемые положения, отражающие главные результаты диссертационной работы:

1. Комбинированный алгоритм обработки сейсмограмм на основе оконного преобразования Фурье с формированием спектрограмм с одной стороны, и расчета усредненных амплитудных спектров и временных рядов амплитуд монохромных сигналов в выделенных на спектрограмме интервалах, с другой, реализованный в программном обеспечении SpectrumSeism, позволяющий более эффективно, чем традиционно применяемые алгоритмы, выделять малоамплитудные сейсмические сигналы в сейсмическом шуме.

2. Методика дистанционного обнаружения разрушительных процессов в связи с ростом вибрации и резонансами в работающем оборудовании крупных промышленных объектов по выделенным малоамплитудным сигналам с использованием накопленных данных мониторинга сейсмического шума.

3. Методика дистанционного определения аномалий в частотах собственных колебаний зданий и сооружений по малоамплитудным сигналам как индикатора начавшихся разрушений их конструкции и/или основания по данным многолетнего мониторинга сейсмического шума.

4. Методика построения разрезов земной коры на всю мощность по выделенным в сейсмическом шуме малоамплитудным отраженным волнам на увеличенных временах вступления в материалах речного профилирования методом ОГТ.

Обоснованность и высокая степень достоверности научных результатов подтверждается использованием апробированных на практике классических и современных алгоритмов цифровой обработки

сейсмограмм (на основе методов Фурье-анализа и ОГТ), представительного материала многолетнего мониторинга сейсмического шума, зарегистрированного современной высокочувствительной калиброванной аппаратурой станций сейсмологической сети, а также данными многочисленных экспериментов, выполненных как лично, так и под руководством соискателя с использованием новейшей аппаратуры и современных методов исследований, применяемых в сейсмологии и сейсморазведке.

Научная новизна.

Найден оригинальный подход для решения трех разных научных задач с использованием малоамплитудных сигналов, выделенных в сейсмическом шуме:

1. Для разработки первой методики найдено новое решение, а именно: с использованием накопленных данных мониторинга на сеймостанциях в окрестности крупных промышленных объектов дистанционно выявляются факторы, указывающие на начавшиеся разрушительные процессы в работающем оборудовании в связи с повышенной вибрацией и резонансными эффектами.

2. По-новому разрабатывается вторая методика: по локальным максимумам усредненных амплитудных Фурье-спектров записей сейсмического шума в окрестности зданий и/или сооружений дистанционно определяются частоты их собственных колебаний, аномалии которых служат индикаторами начавшихся разрушений в сооружении и/или его основании.

3. Новизна в третьей методике заключается в использовании для построения разреза земной коры на всю мощность малоамплитудных отраженных волн, зарегистрированных при речной сейсморазведке методом ОГТ и выделенных в сейсмическом шуме при существенном увеличении кратности за счет увеличения площади бина.

Личный вклад.

Соискателю принадлежит ключевая роль в выборе методов исследований, постановке научных задач, участии в экспедиционных работах, поиске подходов и разработке способов их решения, анализе, верификации и внедрении результатов исследования:

1. Поставлена и решена задача разработки и программной реализации комбинированного алгоритма выделения малоамплитудных сигналов в сейсмическом шуме на основе анализа спектрограмм, протестированной лично соискателем на синтетических и экспериментальных данных.

2. Разработана и реализована на примере расследования причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС методика дистанционного обнаружения начавшихся разрушительных процессов в работающем оборудовании крупных промышленных объектов по накопленным данным мониторинга сейсмического шума в их окрестности.

3. На основе усреднения амплитудных спектров сейсмограмм разработана и реализована методика дистанционного определения по выделенным малоамплитудным сигналам частот собственных колебаний зданий и сооружений с высокой точностью (до 0.01 Гц) и их аномалий по данным многолетнего мониторинга сейсмического шума.

4. По архивным материалам речной сейсморазведки в Восточной Сибири (р. Лена, р. Витим) методом ОГТ по специальной технологии, отличающейся непрерывной регистрацией сейсмического шума между возбуждениями, разработана методика экспресс-обработки, включающая формирование сейсмограмм увеличенной длительности и построение разрезов на всю мощность земной коры по малоамплитудным отраженным волнам при существенном увеличении кратности за счет увеличения площади бина.

Практическое значение.

Найденный в исследовании подход к дистанционному обнаружению разрушительных процессов в сооружениях и работающем оборудовании крупных промышленных объектов имеет высокое практическое значение, так как нацелен на предотвращение аварий с разрушением дорогостоящего оборудования и возможными человеческими потерями (как при аварии на Саяно-Шушенской ГЭС).

Разработанный комбинированный алгоритм, реализованный в программном обеспечении SpectrumSeism повышает качество спектрально-временного анализа зарегистрированного сейсмического шума. Так, реализованные функции интерактивного изменения параметров расчета, визуализации спектрограмм и их масштабирования по осям частоты и времени позволяют обработчику быстро обнаруживать в сейсмическом шуме слабые, малоамплитудные сигналы, особенно локализованные в относительно небольших ограниченных частотой и временем интервалах. Отображение спектрограммы на экране компьютера одновременно с процессом определения в модулях программы амплитудно-частотных характеристик сигналов дает возможность обработчику оперативно оценивать влияние на них разного рода помех, что уменьшает вероятность ошибки и повышает качество спектрально-временного

анализа. Наличие в составе программного обеспечения SpectrumSeism дополнительных функций интегрирования, дифференцирования и деконволюции сейсмических трасс расширяет технические возможности используемой сейсмической аппаратуры, что существенно увеличивает полноту извлекаемой из зарегистрированных материалов информации. Аналогичные функции реализованы в программном обеспечении Geofilters, отличающемся пакетной обработкой любого количества сейсмограмм с сохранением ее результатов в файлы для использования при необходимости другими исследователями или в других программах.

Подход к дистанционному определению по малоамплитудным сигналам в накопленных данных многолетнего мониторинга сейсмического шума характеристик вибрации оборудования, резонансных эффектов и частот собственных колебаний технических сооружений используется как источник дополняющей информации о механике процессов, происходящих на работающем промышленном объекте. Так, не на всех сооружениях установлены системы непрерывного сейсмометрического мониторинга, или они функционируют непродолжительное время (напр., в плотине Саяно-Шушенской ГЭС с 2016 г.). В случае же разрушений на промышленном объекте и выходе из строя контрольно-измерительной аппаратуры для установления причин аварии используются материалы мониторинга сейсмического шума с удаленных от объекта сейсмических станций.

Методика экспресс-обработки сейсмограмм увеличенной длительности позволяет с невысокими затратами строить разрезы на всю мощность земной коры с использованием как архивных материалов речного сейсмического профилирования, так и материалов новых сейсморазведочных работ.

Реализация результатов.

Разработанные алгоритмы и программное обеспечение реализовывались при спектрально-временном анализе зарегистрированного в окрестности 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС сейсмического шума, перед и во время крупнейшей техногенной катастрофы, произошедшей 27 августа 2009 г.

Методические разработки и программное обеспечение для обработки сейсмического шума, зарегистрированного как в окрестности (на станциях локальной сейсмологической сети), так и в машинном зале и плотине Саяно-Шушенской ГЭС, с выделением сигналов, возбужденных вновь вводимыми в эксплуатацию после аварии

гидроагрегатами, прошли проверку на практике в более чем 10-ти исследованиях ГС СО РАН по договорам с ПАО «РусГидро» в период 2010-2016 гг.

Методические разработки соискателя, результаты исследований и программное обеспечение используются в учебных курсах «Сейсмомониторинг гидроузлов» Саяно-Шушенского филиала Сибирского федерального университета (СФУ) и «Дистанционный сейсмический мониторинг зданий, сооружений и работающего оборудования» Новосибирского государственного университета (НГУ), в исследовательских и договорных работах филиалов ФИЦ ЕГС РАН, а также Центра геофизического мониторинга НАН Республики Беларусь.

В настоящее время основным направлением научно-исследовательских работ, выполняемых в ФИЦ ЕГС РАН как лично соискателем, так и под его руководством, является развитие этого подхода применительно к обработке данных мониторинга с ряда других станций, расположенных в окрестности различных гражданских и промышленных объектов в черте крупных городов (Москва, Иркутск, Петропавловск-Камчатский).

Исследования являются частью планов научно-исследовательских работ ФИЦ ЕГС РАН – тема «Мониторинг полей малоамплитудных геофизических сигналов для контроля над опасными процессами при техногенном воздействии на земную кору». В 2024-2025 гг. получили развитие при поддержке гранта РНФ 24-27-00145 «Разработка методики контроля раскрытия трещины в теле плотины Саяно-Шушенской ГЭС».

Программное обеспечение SSlicer и методические разработки соискателя по проведению регистрации сейсмических сигналов автономной аппаратурой серии «Байкал» использовались при производстве договорных работ с АО СНИИГГиМС на р. Нижняя Тунгуска (2012 г.), с ООО НППГА «Луч» на реках Лена (2018 г.) и Витим (2019 г.). Полученные в этих исследованиях материалы сейсморазведки методом ОГТ легли в основу разработки методики построения разрезов земной коры на всю мощность по малоамплитудным отраженным волнам на увеличенных временах вступления, которая нашла поддержку двумя контрактами между ФИЦ ЕГС РАН и ФГБУ «Институт Карпинского» в 2020 и 2023 гг.

Публикации и апробация работы.

Результаты диссертационного исследования широко известны научной общественности. Основные результаты представлены за период 2010-2025 гг. в 90 публикациях, зарегистрированных в РИНЦ, из

них 20 публикаций – в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и приравненных к ним, в том числе: 2 патента на изобретение; 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ; 15 журналов, из которых специальности 1.6.9 «Геофизика» по техническим наукам соответствуют 10 журналов («Геология и геофизика» – 4 статьи; «Вопросы инженерной сейсмологии» – 1 статья; «Доклады Академии Наук. Науки о Земле» – 2 статьи; «Seismological Research Letters» – 1 статья; «Российский сейсмологический журнал (2023 г.) – 2 статьи), из них категориям ВАК К1 или К2 соответствуют 8 работ.

Докладывались на 29 международных и российских конференциях и симпозиумах, наиболее значимые из которых: международные конгрессы «Natural cataclysms and global problems of the modern civilization - geocataclysm 2011», Турция, Стамбул, 2011 г.; «18th European meeting of environmental and engineering geophysics of the near surface geoscience division of EAGE, near surface geoscience 2012», Франция, Париж, 2012; «American geophysical union (AGU), meeting of the America», Мексика, 2013 г.; научно-практические конференции «Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири», Россия, Новосибирск (2014, 2015 г.); научно-технические конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга дальнего востока России», Россия, Петропавловск-Камчатский (2015, 2019 г.); научно-технические конференции «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии», Россия, Санкт-Петербург (2015, 2016, 2017 гг.); научно-практическая конференция по сейсмостойкому строительству (с международным участием), Россия, г. Москва, 2016 г.; международные конференции «Интерэкспо Гео-Сибирь», Россия, Новосибирск (2015-2019 гг. и 2022 г.); международные сейсмологические школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных», Киргизия, Чолпон-Ата, 2016 г.; Молдова, Кишинев, 2019 г.; Россия, Новосибирск, 2021 г.; Беларусь, Минск, 2022 г.; Узбекистан, Ташкент, 2023 г.; Беларусь, Витебск, 2024 г.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 146 наименований. Изложена на 253 страницах, содержит 108 рисунков и 4 таблицы.

Выполненные соискателем исследования соответствуют **паспорту научной специальности 1.6.9 «Геофизика»** по техническим наукам – п. 16 «Методы обработки и интерпретации результатов измерений геофизических полей» и п. 18 «Использование геолого-геофизических

данных для построения цифровых геологических, гидродинамических, геодинамических и иных моделей геологической среды и месторождений».

Благодарности.

За помощь в формировании научных взглядов, всестороннюю поддержку в проведении исследовательской работы на всех ее этапах соискатель благодарен своему наставнику д.г.-м.н. В.С. Селезневу. За ценные советы при обсуждении материалов исследования автор глубоко признателен д.т.н. А.Ф. Еманову и к.г.-м.н. В.М. Соловьеву. Содействие в выполнении ряда экспериментов, доброжелательность и поддержка чл.-корр. РАН А.А. Маловичко и директора ФИЦ ЕГС РАН д.т.н. Ю.А. Виноградова способствовали успешному проведению исследования. Автор выражает отдельную благодарность коллективу АСФ ФИЦ ЕГС РАН и лично директору к.г.-м.н. А.А. Еманову за высокое качество предоставленных материалов мониторинга сейсмического шума со станций сейсмологической сети Алтае-Саянского региона, без которого невозможно проведение исследования. Содействие директора ДФ ФИЦ ЕГС РАН Х.Д. Магомедова и З.А. Адилова помогло в реализации сейсмических исследований на Чиркейской ГЭС. За помощь в получении экспериментальных материалов, в их обработке и обсуждение результатов автор благодарит коллег из СЕФ ФИЦ ЕГС РАН: А.А. Брыксина, Д.Б. Севостьянова, П.В. Громыко, И.В. Коковкина, Д.В. Кречетова, Е.Э. Пархоменко и др. За содействие и поддержку в проведении сейсмических исследований на ГЭС автор благодарит руководителей и специалистов ПАО «РусГидро» и филиалов: В.А. Кяри, Т.М. Юсупова, Р.Ш. Альжанова, Н.И. Стефаненко, Н.С. Наумкина, В.А. Булатова, А.М. Курахмаева и др. Автор благодарит коллектив ООО НППГА «Луч» и лично директора К.Н. Каюрова и Д.В. Напреева, благодаря сотрудничеству с которыми выполнены уникальные речные сейсморазведочные работы на р. Лена и р. Витим, и коллег из ФГБУ «Институт Карпинского» д.г.-м.н. С.Н. Кашубина, к.г.-м.н. Е.Д. Мильштейн, Н.Г. Заможнюю, А.Ю. Каширского, сотрудничество с которыми помогло воплотить идею использования малоамплитудных отраженных волн для построения разрезов земной коры на всю мощность. Автор выражает искреннюю признательность В.И. Самойловой за методические рекомендации и консультации при подготовке диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Выделение малоамплитудных сигналов в сейсмическом шуме на основе гармонического анализа

Глава начинается с аналитического обзора современных зарубежных и отечественных разработок. Многими российскими и зарубежными исследованиями доказывается, что по материалам мониторинга сейсмического шума, а именно по выделенным в нем малоамплитудным колебаниям, можно получить полезную информацию о механике процессов, происходящих в океанах, озерах, атмосфере, внутри Земли, а также на крупных промышленных объектах, как источниках таких колебаний. С увеличением расстояния от источника возбуждения колебаний до регистрирующей станции уменьшается амплитуда упругих волн в связи с затуханием и поглощением энергии на пути их пробега. С другой стороны, за счет высокой чувствительности современной цифровой аппаратуры, используемой в сейсмологии, в составе сейсмического шума регистрируются сигналы амплитудой в нанометры, что на несколько порядков ниже его общей амплитуды. Для выделения столь слабых сигналов применяются специальные современные способы обработки, такие как накопление, повышающие соотношение сигналы/помеха.

Механические колебания различных установок по выработке электроэнергии, двигателей, а также собственные колебания зданий и сооружений характеризуются определенными частотами, т.е. являются квазипериодическими функциями. Поэтому при их выделении в сейсмическом шуме используется гармонический анализ. В связи с низкой амплитудой, исследуемые сигналы значительно искажаются при наложении близких по частоте разнообразных и непредсказуемых по амплитуде и времени помех природного и техногенного происхождения. Это значительно усложняет проведение Фурье анализа и приводит к ошибкам. Для оценки степени влияния этих помех на малоамплитудные сигналы, с целью снижения ошибок в их интерпретации, разрабатывается комбинированный алгоритм на основе спектрально-временного анализа сейсмического шума по спектрограммам, построенным в результате оконного преобразования Фурье.

Алгоритм реализован в специальном программном обеспечении для Windows [SpectrumSeism, 2021] (Рисунок 1). Главное окно состоит из двумерного изображения – спектрограммы. Параметры ее расчета

(длина окна, шаг окна, тип оконной функции) и визуализации подбираются пользователем в интерактивном режиме в соответствии с амплитудно-частотными характеристиками исследуемых сигналов. Однако спектрально-временной анализ сейсмического шума с помощью спектрограмм – это лишь качественный анализ. С его помощью наглядно представлена полная картина разных по амплитуде сигналов в сейсмическом шуме и приближенно оцениваются характеристики (такие, как частота и амплитуда, дата и время). В связи с этим в программе реализованы дополнительные инструменты для количественного определения характеристик сигналов: с помощью мыши пользователь выделяет интервалы для визуализации в виде дополнительных окон программы: трассы, мгновенного или усредненного на заданном интервале амплитудного спектра; временной развертки амплитуды сигнала вдоль заданной линии.

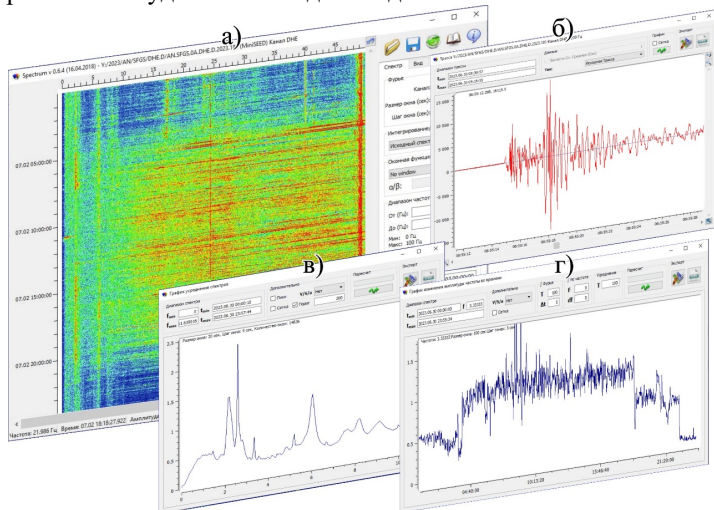


Рисунок 1 – Интерфейс программы SpectrumSeism: главное окно со спектрограммой (а); фрагмент сейсмической трассы (б); усредненный амплитудный спектр Фурье (в); развертка во времени амплитуды сигнала на заданной частоте (г).

Алгоритм состоит из комбинации трех основных модулей. Первый – это спектрально-временной анализ сейсмического шума, включающий следующие шаги. Во-первых, с использованием оконного преобразования Фурье с заданными по характеристикам сигналов

априорных данных параметрами (окно, шаг окна, частотный и временной диапазон), формируется спектрограмма сейсмической трассы. Во-вторых, при интерактивном изменении масштаба спектрограммы, подбора цветовой палитры амплитуд, перемещения изображения по осям частота-время, определяется прослеживаемость в сейсмическом шуме малоамплитудных сигналов. В-третьих, для повышения детальности или устойчивости отображения обнаруженных (на втором шаге) малоамплитудных сигналов на спектрограмме уточняются параметры оконного преобразования Фурье. В-четвертых, для исключения из обработки помех по спектрограмме определяются интервалы их наложения на малоамплитудные сигналы в границах частота-время. И наконец, по спектрограмме определяются характеристики сигналов, а именно частота и ее вариации во времени, ширина спектральной линии, временной период прослеживания.

Второй модуль предназначен для количественного определения частот и амплитуд слабых сигналов при усреднении амплитудных спектров (Рисунок 2). Во-первых, по построенной спектрограмме в границах частота-время определяются интервалы устойчивого прослеживания малоамплитудных сигналов. Во-вторых, с исключением из обработки помех в виде высокоамплитудных сигналов рассчитываются и строятся графики усредненных амплитудных спектров Фурье в заданных границах. Наконец, по построенным графикам выделяются малоамплитудные сигналы в виде локальных максимумов и по ним определяются значения амплитуд и частот.

Третий модуль предназначен для выделения в шуме монохромных сигналов, т.е. сигналов с высокостабильной частотой, по временной развертке их амплитуды. Во-первых, по построенной спектрограмме во временных границах определяются интервалы устойчивого прослеживания монохромных малоамплитудных сигналов. Во-вторых, при исключении из обработки интервалов с высокоамплитудными помехами рассчитывается временной ряд амплитуд монохромного сигнала по приведенной формуле [Селезнев, Лисейкин и др., 2012]:

$$A_f(t) = \frac{2}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} F(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \right|,$$

где $A_f(t)$ – амплитуда колебаний на частоте f , t – время регистрации, T – длительность сигнала («окно» - у обработчиков), в котором определяется амплитуда, $|\dots|$ – обозначение модуля комплексного числа. И наконец, способом скользящего среднего временной ряд

сглаживается для повышения помехоустойчивости в определении по нему амплитуд сигнала. Необходимо отметить, что частота в приведенной выше формуле задается любым положительным числом в отличие от результата вычислений спектрограмм с использованием быстрого преобразования Фурье, где дискретизация по частоте равна $1/T$ (т.е. все частоты кратны этой величине). Такой подход выгодно отличается более точным определением амплитуд монохромных сигналов, частота которых в общем случае не кратна шагу дискретизации рассчитанного спектра.

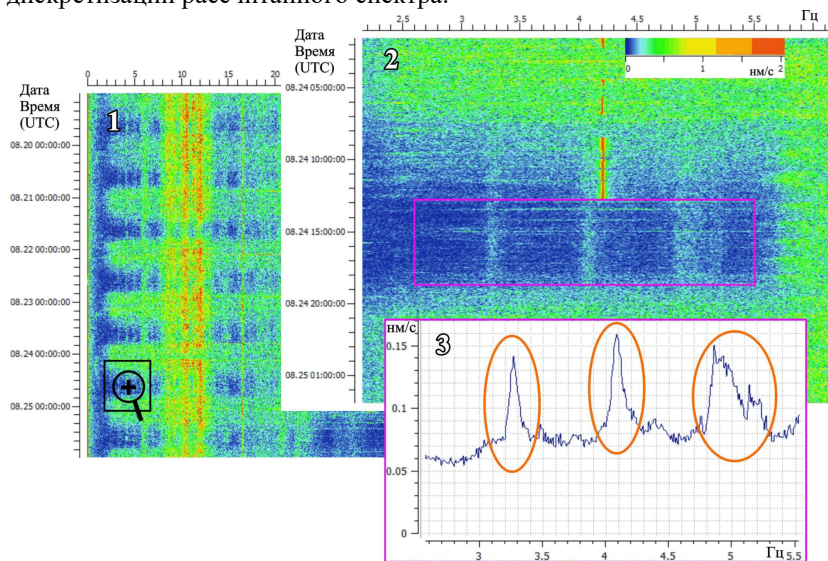


Рисунок 2 – Спектрограмма (1), ее увеличенный фрагмент (2) и усредненный амплитудный спектр (3). Прямоугольником выделена частотно-временная область устойчивого прослеживания малоамплитудных сигналов (на примере материалов мониторинга на станции IVS, г. Петропавловск-Камчатский)

В результате выполненного исследования, по данным мониторинга сейсмического шума (относительно постоянной вибрации земной поверхности, возникающей из-за множества разных техногенных и природных источников возбуждения упругих волн), разработан, теоретически и экспериментально обоснован, апробирован и программно реализован комбинированный алгоритм выделения малоамплитудных сейсмических сигналов на основе Фурье-анализа

[SpectrumSeism, 2021]. Преимущество найденного решения заключается в сочетании в одной программе оперативного анализа спектрально-временных характеристик сейсмического шума, включающего удобную навигацию по спектрограмме с возможностью интерактивно менять параметры ее расчета и масштаб, со одной стороны, а с другой – инструментов усреднения амплитудных спектров и расчета амплитуд монохромных сигналов во времени в заданных на спектрограмме областях их устойчивого прослеживания. Такая комбинация позволяет обработчику надежно выделять в сейсмическом шуме малоамплитудные сигналы с учетом влияния помех, что уменьшает вероятность ошибки и повышает эффективность обработки данных мониторинга по сравнению с традиционно применяемыми алгоритмами и программами.

Глава 2. Дистанционное обнаружение разрушительных процессов в работающем оборудовании крупных промышленных объектов

В начале главы приводится обзор современных методик с анализом их преимуществ и ограничений. Тематикой использования сейсмических сигналов, возбужденных работающим оборудованием (напр., гидроагрегатами ГЭС) или колеблющимся зданием (напр., от ветровых нагрузок) и зарегистрированных в сейсмическом шуме на расстоянии от их источника, занимались в России и за рубежом такие исследователи, как Е. Hjortenberг, Т. Risbo, Н. Bungum, А.В. Николаев, П.А. Троицкий, И.А. Володин, Ф.Н. Юдахин и др. Из современников следует отметить работы их последователей – Н.К. Капустян и Г.Н. Антоновской. В совокупности исследования кардинально отличаются от представленного в диссертации. Во-первых, по большей части они направлены на изучение среды прохождения упругих волн. Во-вторых, использовались данные относительно кратковременной регистрации сейсмических сигналов (дни, месяцы), в то время как долговременные (годы, десятилетия) процессы на работающих ГЭС не исследовались. А.В. Николаевым и А.Л. Александровым отмечены значительные трудности в использовании слабых сигналов, возбужденных гидроагрегатами ГЭС: низкая помехоустойчивость, вероятность ошибки интерпретации при наличии сигналов от посторонних источников с близкими частотными характеристиками, низкая стабильность частоты колебаний, наложение сигналов с одинаковой частотой. В связи с этим соискателем разрабатывается специальная методика, в которой роль перечисленных трудностей

снижается за счет детального спектрально-временного анализа сейсмического шума, достоверной идентификации выделенных в нем малоамплитудных сигналов и повышения помехоустойчивости.

Сначала по спектрограммам сейсмического шума, зарегистрированного в окрестности (до 30 км) крупного промышленного объекта (напр., ГЭС, АЭС, ТЭЦ и др.), выполняется спектрально-временной анализ для качественного выделения в нем малоамплитудных сигналов. Как результат, уточняются параметры оконного преобразования Фурье для повышения детальности и/или устойчивости отображения выделенных малоамплитудных сигналов; определяются интервалы наложения помех на малоамплитудные сигналы в границах частота-время для исключения их из обработки; по спектрограмме определяются приближенные характеристики малоамплитудных сигналов, а именно частота и ее вариации во времени, добротность по ширине спектральной линии, временной период устойчивого прослеживания.

Затем выделенные сигналы по значению частоты априорных данных идентифицируются с источниками колебаний: высокодобротные – с работающими гидроагрегатами ГЭС, турбоагрегатами АЭС, ТЭЦ, двигателями различных промышленных установок; низкодобротные – с собственными колебаниями крупных сооружений (напр., плотины ГЭС, здания, мосты и т.п.). Достоверность такой идентификации повышается результатами сопоставления частот и интервалов прослеживаемости выявленных сигналов при одновременной регистрации сейсмического шума на исследуемом объекте и на удаленной сейсмостанции.

В качестве примера приводится сопоставление спектрограмм сейсмического шума, зарегистрированного одновременно в верхней части плотины Саяно-Шушенской ГЭС и на сейсмостанции «Черемушки» в 4.4 км от плотины, из которого видно, что колебания с частотами около 1.3, 1.7, 2.1, 2.6, 3.2 Гц, выделяются в обоих случаях (Рисунок 3). Указанные колебания являются собственными для плотины, а изменение амплитуды во времени связано со сменой режимов работы гидроагрегатов ГЭС [Влияние..., 2012]. Однако их амплитуда при регистрации на удаленной сейсмостанции ниже примерно на 3 порядка, что выражается в значительном уменьшении соотношения сигнал/помеха. Повышение помехоустойчивости достигается двумя способами. Во-первых, временные промежутки сейсмических трасс с высокоамплитудными помехами (напр., как от

землетрясения на Рисунке 3), не берутся в обработку. Во-вторых, амплитуды сигналов усредняются.

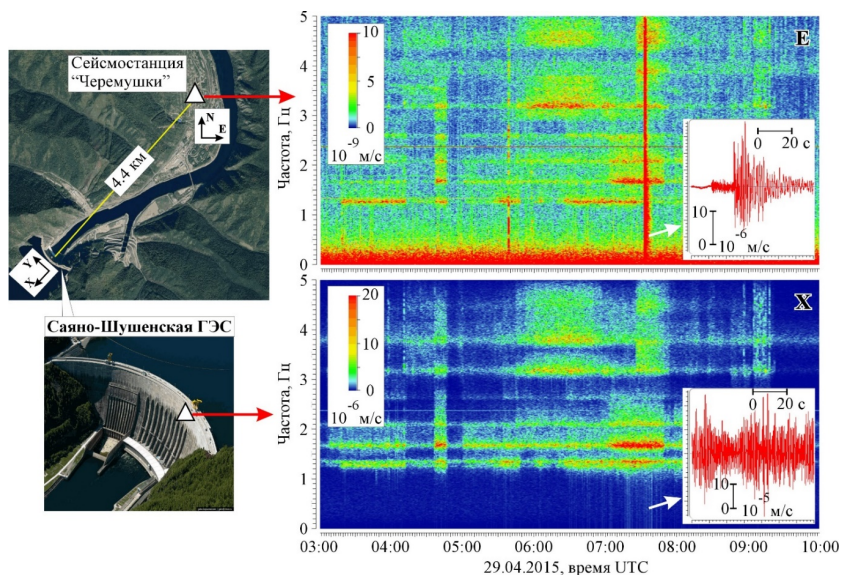


Рисунок 3 - Спектрограммы одновременно зарегистрированного сейсмического шума на удаленной сеймостанции и на плотине Саяно-Шушенской ГЭС.
(на врезках показаны фрагменты сейсмических трасс)

Определение истинной амплитуды колебаний объекта по малоамплитудным сигналам, зарегистрированным на удалении, осуществляется по эмпирической зависимости между их амплитудами при спектрально-временном анализе материалов эксперимента. Как пример, из соотношения амплитуд колебаний на частоте 1.68 Гц, зарегистрированных одновременно на плотине и на удаленной сеймостанции видно, что связь между ними линейная, если исключить из внимания значения при сверхмалых амплитудах (менее 10 нм/с), при которых предположительно малоамплитудные сигналы искажены или аппаратным шумом или другими неучтенными помехами (Рисунок 4). Линейность также характерна и связи между собственными колебаниями, зарегистрированными на сооружении и в его основании при условии отсутствия нелинейных элементов конструкции, напр., таких как сейсмоизоляция [Результаты..., 2017]. С использованием

полученной зависимости по малоамплитудным сейсмическим сигналам, зарегистрированным на удаленной от плотины станции определяется истинная амплитуда колебаний плотины.

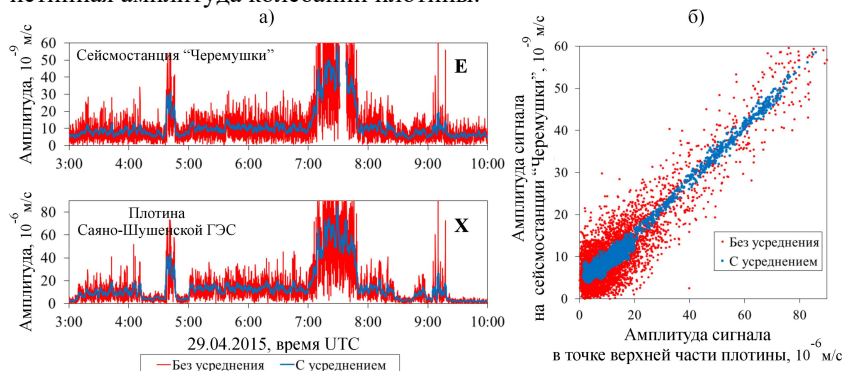


Рисунок 4 – Изменение во времени амплитуд сигнала на частоте 1.68 Гц при регистрации сейсмического шума на сейсмостанции «Черемушки» и в точке верхней части плотины (а), и соотношение между ними (б). Е и Х – направление осей сейсмоприемников (см. Рисунок 3)

Далее по зарегистрированным в течение длительного времени, архивным цифровым данным мониторинга сейсмического шума в период безаварийной эксплуатации промышленного объекта, с использованием разработанного алгоритма и его программной реализации SpectrumSeism, определяются регулярные (напр., ежедневные) значения частот и амплитуд малоамплитудных сигналов для получения статистически значимой информации о нормальных пределах их изменения.

По поступающим новым данным мониторинга сейсмического шума в реальном или близком к нему времени определяются текущие значения частот и амплитуд малоамплитудных сигналов. С использованием найденной зависимости (напр., как на Рисунке 4) по амплитудам сигналов при сопоставлении их с нормальными значениями при безаварийной эксплуатации объекта определяются интервалы аномальных колебаний идентифицированных объектов для дистанционного выявления факторов, указывающих на начавшиеся разрушительные процессы в работающем оборудовании. Так, при опасном увеличении вибрации промышленного оборудования возрастает амплитуда колебаний на его рабочей частоте (напр., на

частоте вращения турбин при увеличении дисбаланса); при негативном воздействии на конструкции или сооружения работающего оборудования (резонансного эффекта) возрастает амплитуда собственных колебаний.

Методика разрабатывалась и реализовывалась на примере событий 17.08.2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС: по данным мониторинга сейсмических сигналов со станции «Черемушки», расположенной в 4.4 км от ГЭС определялось, что с точки зрения сейсмологии могло быть причиной разрушений [What..., 2014; Лисейкин, Селезнев, 2024] (Рисунок 5). На момент этих событий озвучивались две версии – либо это кратковременное высокоамплитудное воздействие (землетрясение, взрыв, гидроудар), либо длительное вибрационное, которые привели к разрушению шпилек крышки турбины. Так, необоснованно говорилось о возросшей вибрации 2-го гидроагрегата за месяц до аварии.

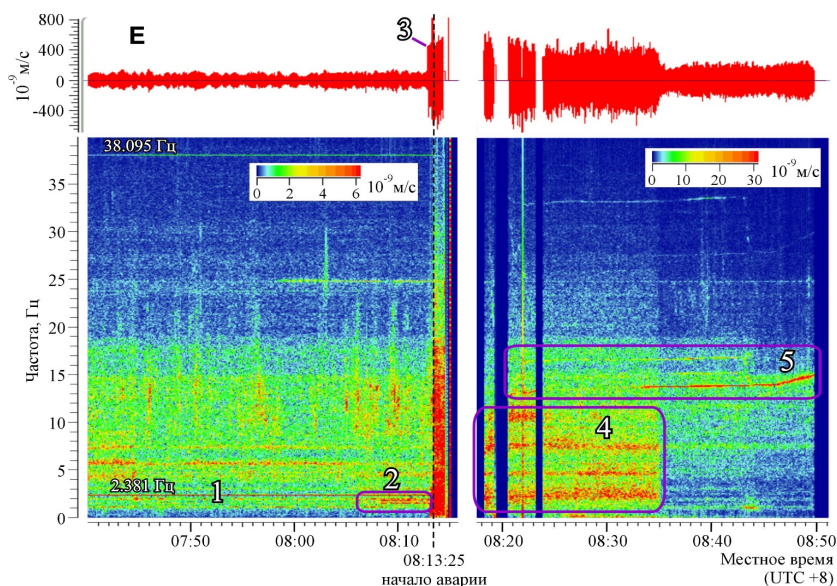


Рисунок 5 - Сейсмическая трасса (вверху) и спектрограмма (внизу) до и при развитии аварии на Саяно-Шушенской ГЭС по данным мониторинга сейсмического шума на удаленной в 4.4 км станции «Черемушки». Цифрами обозначены исследуемые малоамплитудные сигналы, возбужденные разными источниками (см. текст).

По результатам спектрально-временного анализа шума были выделены малоамплитудные сигналы, зарегистрированные перед аварией и во время ее развития (см. Рисунок 5). Затем, согласно методике, сигналы идентифицировались с источниками их возбуждения. Часть из них устанавливалась по имеющимся фактам (напр., сигнал под цифрой «1» на частоте вращения турбин, 2,381 Гц, что известно из характеристик оборудования; информация о землетрясении в Японии (сигнал по цифрой «3») известна по сейсмологическим данным и т.д.). Остальные сигналы идентифицировались по результатам специальных исследований. Так, зарегистрированные за 5 минут до разрушения возросшие низкочастотные колебания (сигнал «2») являются собственными колебаниями плотины – это подтверждается результатами исследования методом стоячих волн; зарегистрированные в течении ~21 минут после разрушения колебания (сигнал «4») возбуждаются собственными (органными) колебаниями воды в водоводах [О собственных..., 2016]). На заключительном этапе по архивным цифровым данным мониторинга со станции «Черемушки» (с 2001 г.) анализировались изменения характеристик выявленных сигналов: аномалий, которые бы свидетельствовали о нештатной работе 2-го гидроагрегата перед его разрушением не выявлено. Из этого следует вывод, что события развивались по сценарию «аварии последней капли» [Селезнев, Лисейкин и др., 2012]. По результатам сейсмических исследований, выполненных после аварии на восстановленных и новых гидроагрегатах, предположено, что причина аварии связана с длительным неучтенным воздействием высокочастотных вибраций на шпильки крышки турбины, в результате которого образовались усталостные дефекты.

Таким образом, с использованием накопленных на сегодня цифровых материалов мониторинга сейсмического шума на сети сейсмостанций ФИЦ ЕГС РАН по выделенным квазигармоническим малоамплитудным сигналам соискателем разработана подтвержденная результатами исследований методика дистанционного обнаружения разрушительных процессов в работающем оборудовании крупных промышленных объектов в связи с повышенной вибрацией и резонансным усилением колебаний окружающих конструкций и сооружений [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Глава 3. Дистанционное определение аномалий в частотах собственных колебаний зданий и сооружений по малоамплитудным сигналам как индикаторов начавшихся разрушений их конструкции и/или основания

Глава начинается с аналитического обзора современных решений задачи выявления начавшихся разрушительных процессов по данным мониторинга частот собственных колебаний зданий и/или сооружений. Этой тематикой в России и за рубежом занимаются такие исследователи, как: М. Sun, L. Qin, Y.V. Ardila-Ardila, S. Prereira, А.Ю. Егоров, М.И. Саранцев и др., которые на основе Фурье-анализа, определяют частоты по материалам мониторинга сейсмического шума аппаратурой, установленной непосредственно на сооружении, причем ограниченное время (от нескольких месяцев до 1-3 лет). Этим исследование кардинально отличается от представленного в диссертации, в котором частоты предлагается определять по материалам многолетнего (годы, десятилетия) мониторинга сейсмического шума со станции, расположенной не на объекте, а в его окрестности (в нескольких километрах).

Современными исследователями отмечаются существенные трудности в интерпретации выявленных при мониторинге изменений частот собственных колебаний сооружений из-за значительного влияния на их текущие значения факторов переменного воздействия внешней среды (напр., у плотин ГЭС наблюдаются сезонные изменения частот до 10% от уровня наполнения водохранилища [Лисейкин и др., 2019; Определение..., 2023]; в колебаниях мостов выявлены того же порядка значительные изменения частот от температуры; в зданиях – от температуры [Изменение..., 2024] и промерзания грунта в основании [Контроль..., 2023] и т.д.). Большинство исследователей предлагает учесть такие факторы вводом поправок, определенных при аппроксимации текущих значений частот (напр., при аппроксимации линейными или квадратичными функциями зависимостей частот собственных колебаний плотин от уровня воды в водохранилище). Однако результаты настоящего исследования свидетельствуют о несостоятельности такого подхода из-за неоднозначности таких зависимостей.

В диссертации, по материалам многолетнего (более 20 лет) мониторинга сейсмического шума разработана методика дистанционного определения по малоамплитудным сигналам аномального изменения частоты собственных колебаний зданий и

сооружений (на примере плотины Саяно-Шушенской ГЭС) как индикатора начавшихся разрушений их конструкции и/или основания, которая базируется на следующей концепции [Определение частот..., 2023].

По данным метода стоячих волн доказывалось, что частоты, определяемые по локальным максимумам амплитудных спектров записей сейсмического шума на объекте исследования, являются частотами его собственных колебаний. Затем проводится спектрально-временной анализ одновременных записей сейсмостанций, расположенных в нескольких километрах от исследуемого объекта, и зарегистрированных в ряде точек на объекте (но не в узлах стоячих волн [Способ..., 2015; Liseikin et al., 2020]) для идентификации малоамплитудных сейсмических сигналов, связанных с собственными колебаниями объекта, и определения оптимальных параметров цифровой обработки сейсмических записей. Так, из результатов сопоставления усредненных спектров сейсмического шума, зарегистрированного одновременно в плотине Саяно-Шушенской ГЭС и на удаленной 4.4 км станции, следует, что их локальные максимумы совпадают (Рисунок 6). Эти максимумы являются частотами собственных колебаний плотины, что доказывалось результатами выполненных ранее исследований методом стоячих волн (В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов и др., 1999). Погрешность их определения невысокая, до 0.01 Гц, что подтверждается сравнительным анализом двух независимых выборок данных – значений частот, определенных в дневное и ночное время суток.

Далее по набору статистических данных, полученных в результате обработки сейсмических записей многолетнего мониторинга, и их ретроспективному анализу определяются закономерности в изменениях частот собственных колебаний в связи с воздействиями внешней среды, такими как изменение температуры, изменение уровня воды в периоды наполнения и сброса водохранилища, промерзание/оттаивание материалов конструкций и т.п. И наконец, по поступающим новым данным мониторинга выявляются начавшиеся разрушения сооружения и/или его основания (предположительно, из-за старения материалов конструкций, образования трещин, ослабленных зон и т.п.) по аномальным значениям частот собственных колебаний сооружения с учетом воздействия внешней среды.

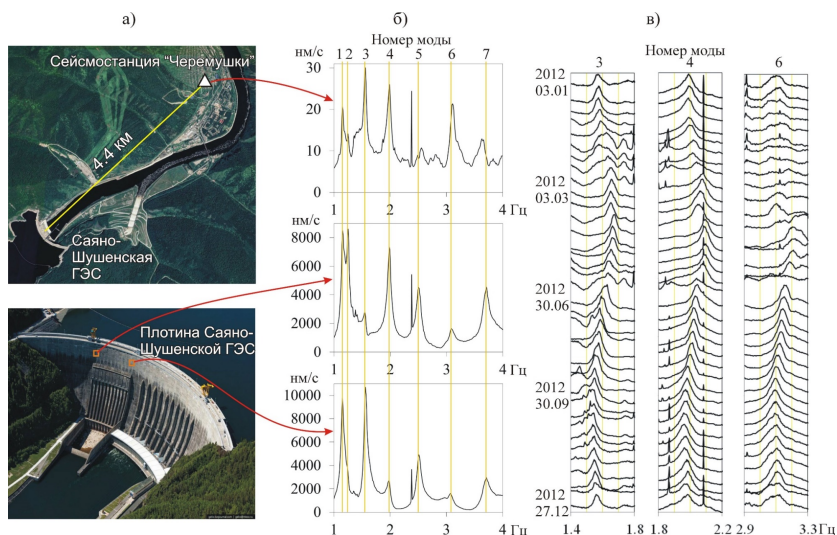


Рисунок 6 – Схемы расположения стационарной сейсмостанции «Черемушки» и временных сейсмических регистраторов в плотине Саяно-Шушенской ГЭС на фотографиях (а); усредненные спектры одновременных записей (б); усредненные спектры односуточных записей сейсмостанции, на которых видны изменения частот собственных колебаний плотины (в)

В результате анализа изменений частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС за более чем 20-летний период (с 2001 г.) [Определение..., 2023], а также аналогичных исследований на плотине Чиркейской ГЭС [Liseikin, 2020] и зданиях [Контроль..., 2023; Изменение..., 2024] установлено многофакторное влияние среды на их значения. Раньше уже было известно, что частоты собственных колебаний не постоянные величины – напр., как отмечено выше, у плотин они значительно меняются от уровня воды в водохранилище. Судя по опубликованным работам, исследователи считали, что это – единственный фактор. В то же время, на графиках зависимости частоты от уровня воды видна неоднозначность такой зависимости: при одном и том же уровне воды отмечается два значения частоты в зависимости от того, наполняется или срабатывается водохранилище (Рисунок 7). Такая многофакторность усложняет решение задачи по выявлению начавшихся разрушений в сооружении. Однако с использованием данных мониторинга за много лет эта задача решается. Так, в

представленном примере найдены временные интервалы, где влияние разных факторов наименее выражено (период мониторинга с июля по декабрь, Рисунок 7а). А если данные мониторинга недоступны (напр., сейчас по регламенту частоты собственных колебаний плотин определяются раз в 5 лет), то задача не может быть решена.

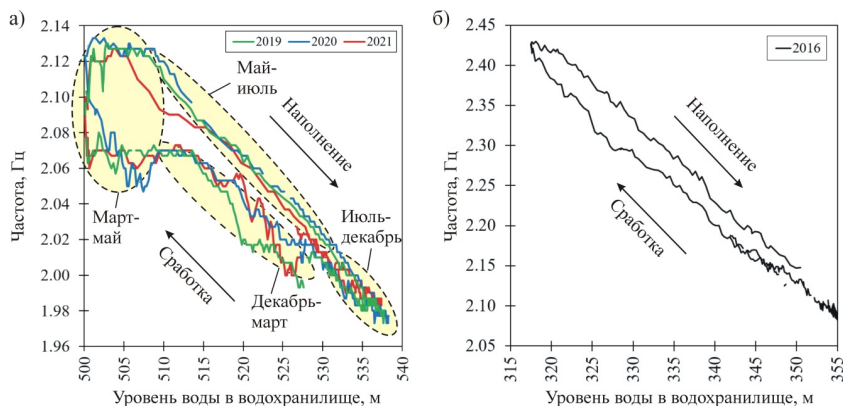


Рисунок 7 – Изменение частоты собственных колебаний 4-й моды плотины Саяно-Шушенской ГЭС (а) и собственных колебаний 1-й моды плотины Чиркейской ГЭС (б) в связи с сезонным изменением уровня воды в водохранилищах

В результате применения разработанной методики установлен незначительный стабильный рост частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС на 0.02-0.05 Гц за 20 лет (Рисунок 8). Это свидетельствует о том, что жесткость сооружения не снижается и за указанный период мониторинга разрушений в плотине или ее основании не происходило. Несмотря даже на то, что в этот период были и ощутимые землетрясения (от 4 до 6 баллов), и авария с разрушением гидроагрегата. Но чем объяснить рост частот? Предположение о следствии известного процесса адаптации плотины к основанию малообоснованно, т.к. по данным деформационного мониторинга этот процесс в последние 10 лет практически завершился. Предположительно, рост частот связан с другим процессом, который идет постоянно – это процесс накопления осадков на дне водохранилища (в области примыкания к плотине) в связи с размыванием грунта берегов водохранилища. Это приводит к

изменению граничных условий и как следствие – к медленному росту частот собственных колебаний плотины.

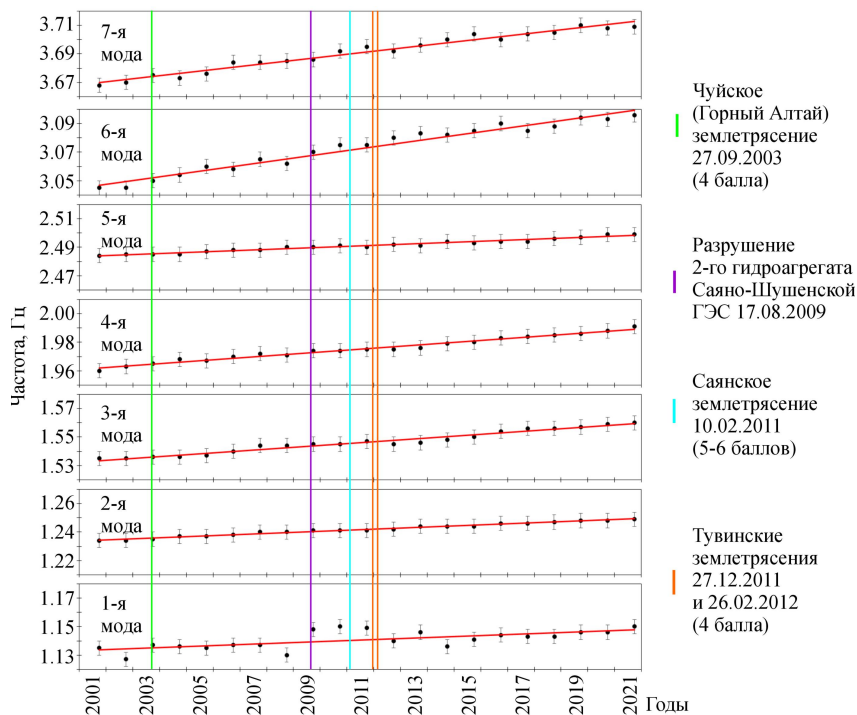


Рисунок 8 – Увеличение частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при уровне воды в водохранилище 535 м за 20-летний период наблюдений в результате применения разработанной методики

В качестве примера использования найденного подхода на других объектах приводится результат обработки материалов мониторинга сейсмического шума, зарегистрированного в 7 км от отвала угольного месторождения в Новосибирской области, на котором 18.07.2020 г. произошел крупный оползень (Рисунок 9) [Сейсмологические..., 2021]. Характер разрушений и анализ изменений ландшафта по снимкам со спутника (отвал в течение нескольких лет отсыпался на месте временного водотока), свидетельствует о том, что причина неустойчивости отвала – обводнение.

В сейсмограммах не зарегистрировано землетрясений, которые бы могли спровоцировать оползень. В то же время, в сейсмическом шуме с конца 2018 г. выделяются малоамплитудные сигналы, возбужденные собственными колебаниями отвала с частотой около 0.6 Гц, прекратившиеся сразу после оползня. Постепенное понижение этой частоты в течение полуторагодового периода происходит из-за увеличения отвала как по размеру, так и массе при разработке месторождения (Рисунок 9а). После оползня, по оценкам, отвал потерял около 10% массы, это видно в повышении частоты (Рисунок 9б,в). Снижение амплитуды сигнала после оползня объясняется осушением отвала и повышением его устойчивости. Данные последующего мониторинга свидетельствуют, что подобных колебаний больше не происходит. Таким образом, критерием неустойчивости отвалов угольных месторождений является наличие в сейсмическом шуме сигналов, возбужденных их собственными колебаниями и зарегистрированных приборами сейсмических станций на значительном расстоянии [Определение..., 2023].

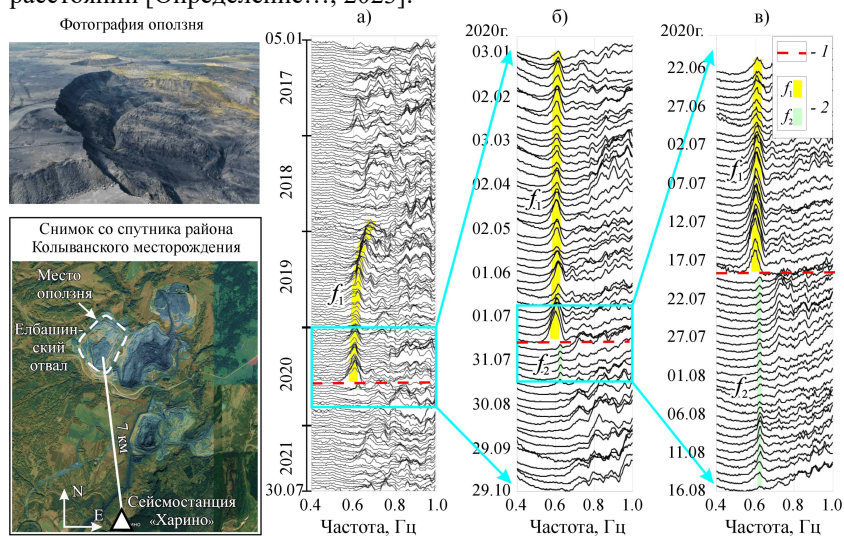


Рисунок 9 – Изменение колебаний Елбашинского отвала Кольванского месторождения антрацита по Е-компоненте в рядах усредненных амплитудных спектров десяти- (а), пяти- (б) и односуточных (в) записей сейсмостанции «Харино». 1 – отметка времени оползня (18.07.2020 21:15); 2 – выделенные сигналы на собственной частоте отвала.

Таким образом, по материалам многолетнего (более 20 лет) мониторинга сейсмического шума разработана методика дистанционного определения по малоамплитудным сигналам аномального изменения частоты собственных колебаний зданий и сооружений (на примере плотин Саяно-Шушенской и Чиркейской ГЭС) как индикатора начавшегося разрушения их конструкции и/или основания. Результаты диссертационного исследования доказывают, что разрушительные процессы при эксплуатации технических сооружений контролируются с использованием разработанной методики, мало затратной при реализации, простой в использовании, которая основывается на выделении и интерпретации малоамплитудных сейсмических сигналов от собственных колебаний объектов, регистрируемых станциями сейсмологической сети на расстоянии до нескольких километров.

Глава 4. Построение разрезов земной коры на всю мощность по малоамплитудным сигналам отраженных волн речной сейсморазведки методом ОГТ

В период с 2007 по 2019 гг. на реках Восточной Сибири выполнено около 2700 км профилей, по материалам которых построены разрезы верхней части земной коры (Рисунок 10). Структура же всей коры на сегодня остается неизученной. Как известно, сейсмические разрезы земной коры могут быть получены специальным дорогостоящим методом глубинного ОГТ, с мощными источниками возбуждения упругих волн. В исследовании по материалам речной сейсморазведки, выполненной методом общей глубинной точки, с относительно слабыми пневматическими источниками (объем 10 л, давление 150 атм.), разрабатывается малозатратная методика построения разрезов на всю мощность земной коры с использованием сейсмограмм увеличенной длительности, необходимой для регистрации продольных отраженных волн от любой из границ в земной коре [Методика..., 2022]. В Восточной Сибири, по опубликованным данным, это время составляет 13-15 с (для близвертикально отраженных волн).

Разработанная специалистами ФИЦ ЕГС РАН технология речной сейсморазведки подразумевает регистрацию сейсмических сигналов автономной аппаратурой серии «Байкал» в непрерывном режиме: постоянно регистрируется сейсмический шум в интервалах между возбуждениями упругих волн, который составляет не менее 20 с. Это обеспечивает возможность дообработать имеющиеся материалы и

получить сейсмограммы необходимой длительности. Подготовка материалов выполняется с использованием специально разработанного программного обеспечения, на вход которого подаются сейсмические трассы и заданная в табличном виде информация о порядке следования пунктов приема и пунктов возбуждения [SSlicer, 2022]. Результатом работы программы являются сейсмограммы общего пункта приема в традиционном формате SEG-Y.

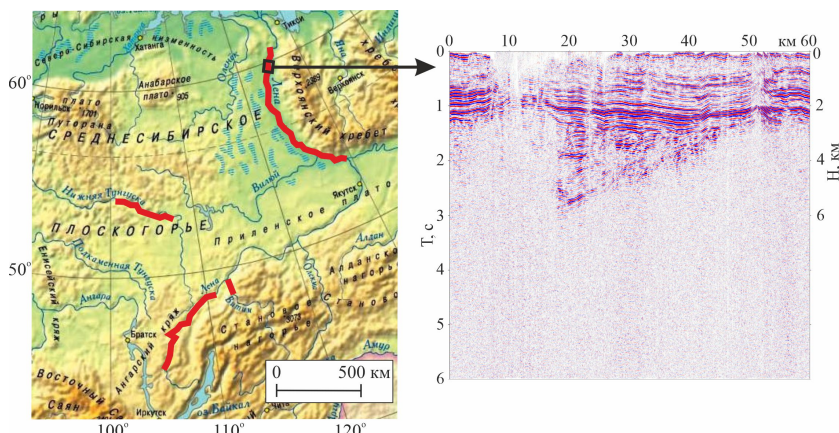


Рисунок 10 – Схема речных сейсмических профилей и фрагмент временного разреза при традиционной сейсморазведке методом ОГТ

Необходимо отметить, что речная сейсморазведка отличается от наземных работ аналогичного масштаба существенно увеличенным (на порядок) объемом первичных сейсмических материалов [Построение..., 2025]. Их обработка возможна только с использованием высокопроизводительных вычислительных мощностей и с привлечением квалифицированных специалистов. Несомненно, что перед проведением такой трудоемкой, дорогостоящей обработки необходимо обеспечить высокое качество первичных материалов, а именно, гарантированную регистрацию малоамплитудных отраженных волн на увеличенных временах пробега. Для этой цели разрабатывается экспресс-методика построения разрезов на всю мощность земной коры (на примере данных профилирования методом ОГТ на реках Лена и Витим в 2018-2019 гг.) [Методика..., 2022; Возможности речной..., 2023].

Методика включает следующие основные шаги. Сначала выполняется оценка характеристик регистрирующей аппаратуры при сопоставлении усредненных спектров Фурье сейсмического и аппаратурного шумов, из которой следует достаточность ее чувствительности для регистрации малоамплитудных сигналов отраженных волн. Затем выполняются опытные работы на участке профиля с получением набора кондиционных сейсмограмм увеличенной длительности. Следующим шагом выполняется их экспресс-обработка методом ОГТ, с подбором параметров, при которых на временном разрезе прослеживаются малоамплитудные отраженные волны от границ в нижней части земной коры до поверхности Мохоровичича. Этот шаг включает следующие процедуры: сортировка (бинирование) сейсмических трасс вдоль профиля с подобранными увеличенными размерами бина; фильтрация сейсмограмм в подобранной полосе частот; автоматическая регулировка усиления; расчет и ввод кинематических поправок с учетом известного распределения скоростей упругих волн в земной коре (напр., по данным с ближайших профилей ГСЗ); суммирование сейсмических трасс с получением временного разреза на всю мощность земной коры. Наконец, полученный разрез качественно оценивается на предмет прослеживания границ, отражающих волны до времен вступления продольных волн от границы Мохоровичича. При положительной оценке профилирование продолжается, при отрицательной – параметры полевой съемки меняются: напр., увеличивается мощность источника возбуждения, повышается чувствительность регистрирующей аппаратуры, устанавливаются предельно допустимые значения помех, чтобы получить качественный разрез.

В результате экспресс-обработки методом ОГТ совокупности данных для выделенного (см. Рисунок 10) 60-километрового участка профиля в нижнем течении р. Лена построен временной разрез до 23 с (Рисунок 11). Хорошо видно, что время до выделенной границы Мохоровичича изменяется от 13.0 до 14.2 с. С учетом того, что средняя скорость продольных волн в земной коре на данном участке составляет около 6.6 км/с, глубина достигает 43-47 км. Эти значения не противоречат имеющимся сведениям о мощности земной коры в близлежащих районах, что свидетельствует о достоверности результата.

После опытных работ выполняется речное сейсмическое профилирование с параметрами, подтвержденными или уточненными результатами экспресс-обработки. Окончательную обработку

полученных материалов с построением финального глубинного сейсмического разреза земной коры на всю мощность предлагается выполнять с использованием методик, разработанных А.К. Сулеймановым, Н.Г. Заможней и др. (2001, 2007 гг.), Е.В. Мосягиным, А.С. Ефимовым (2021 г.) и неоднократно применяемых к материалам опорных геолого-геофизических профилей, с высоко гетерогенной средой, повышенными скоростями и слабым уровнем сигнала [Построение..., 2025]. Так, в качестве примера, в диссертации приводится сейсмический разрез по профилю вдоль р. Витим (часть опорного профиля 1-СБ-Восточный), построенный Н.Г. Заможней и А.Ю. Каширским (ФГБУ «Институт Карпинского») по материалам, подготовленным соискателем, из которого следует соответствие (по прослеживаемости, количеству отражающих границ) в зоне стыковки двух профилей – выполненного по технологии глубинного ОГТ с мощными источниками возбуждения упругих волн и речного сейсморазведочного профиля с маломощными источниками, предназначенными для определения структуры только верхней части земной коры.

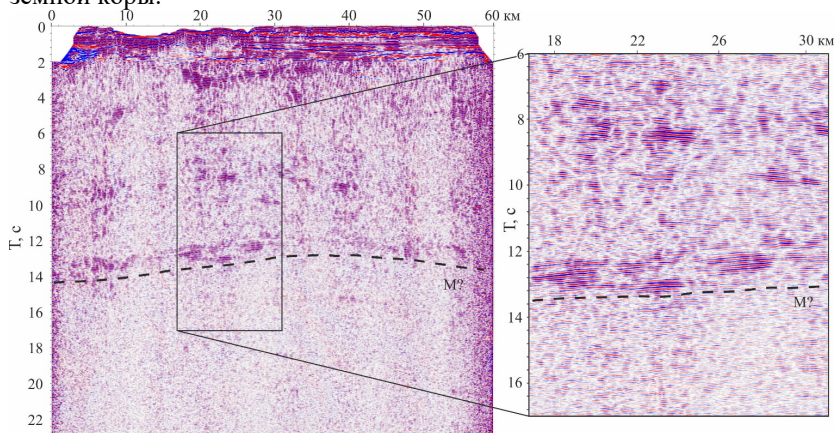


Рисунок 11 – Временной разрез на всю мощность земной коры в результате экспресс-обработки материалов речной сейсморазведки в нижнем течении р.

Лена. Пунктирной линией отмечено предполагаемое положение границы Мохоровичича (М).

В результате разработана методика построения разрезов земной коры на всю мощность по выделенным из сейсмического шума

малоамплитудным сигналам отраженных волн на увеличенных временах вступлений (на примере данных профилирования методом ОГТ на реках Лена и Витим в 2018-2019 гг.). Проведенное исследование обосновывает возможность использования для этого материалов речной сейсморазведки, малозатратных по сравнению с традиционными, специально организованными работами методом глубинного ОГТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Соискателем найден и реализован оригинальный подход к решению научной проблемы: по данным мониторинга сейсмического шума разработан и реализован эффективный алгоритм выделения малоамплитудных сейсмических сигналов и с их использованием разработаны две методики дистанционного обнаружения разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений (ГЭС, ТЭЦ, АЭС и др.) и методика определения структуры земной коры на всю ее мощность, что имеет важное практическое и экономическое значение. Найденные новые решения имеют ряд преимуществ по сравнению с известными.

Во-первых, применение разработанного комбинированного алгоритма выделения в сейсмическом шуме малоамплитудных сигналов, повышает качество спектрально-временного анализа данных мониторинга. Реализованные в программном обеспечении удобные функции интерактивного изменения параметров расчета, визуализации спектрограмм и их масштабирования по осям частоты и времени позволяют обработчику оперативно обнаруживать в сейсмическом шуме не только слабые по амплитуде сигналы, но и сигналы, локализованные в относительно небольших ограниченных частотой и временем интервалах. Отображение спектрограммы на экране одновременно с инструментами количественного определения амплитудно-частотных характеристик сигналов дает возможность обработчику быстро оценить влияние на них разного рода помех, что уменьшает вероятность ошибки. Наличие в составе программного обеспечения SpectrumSeism функций интегрирования, дифференцирования и деконволюции сейсмических трасс расширяет технические возможности используемой сейсмической аппаратуры, что существенно увеличивает полноту извлекаемой из сейсмограмм информации.

Во-вторых, в результате применения разработанной методики дистанционного обнаружения разрушительных процессов в

работающем оборудовании крупных промышленных объектов увеличивается полнота данных для анализа за счет получения информации как о характеристиках механических колебаний объектов, недоступных для прямого их измерения, так и о взаимодействии работающих агрегатов и механизмов с окружающими конструкциями и сооружениями, приводящем к негативным резонансным эффектам. К тому же, накопленные за длительный период мониторинга данные используются при необходимости как «черный ящик» для исследования механики процессов, происходящих на промышленных объектах задолго до и во время развития аварий, необходимого для выяснения их причин.

В-третьих, методика дистанционного определения частот собственных колебаний зданий и сооружений по малоамплитудным сигналам при многолетнем мониторинге сейсмического шума в их окрестности позволяет определять длительные (годы, десятилетия) предположительно деструктивные процессы в конструкциях, что не доступно без организации специального мониторинга на этих объектах.

В-четвертых, разработанная методика построения разрезов земной коры на всю мощность по малоамплитудным сигналам отраженных волн на увеличенных временах вступления в материалах речной сейсморазведки методом ОГТ позволяет существенно снизить затраты на полевые исследования.

Разработанные методики имеют ряд ограничений в применении. В большей мере они обусловлены низкой амплитудой исследуемых сигналов по сравнению с помехами. Для достижения приемлемого соотношения сигнал/шум необходимо использовать длительные интервалы регистрации сейсмического шума, а это ведет к снижению разрешающей способности методик. Из-за затухания упругих волн при распространении в среде расстояния до объекта, на которых возможно устойчивое выделение полезного сигнала, по опыту проведенного исследования не превышают первых десятков километров. Аналогичное ограничение возникает при построении разрезов земной коры по малоамплитудным сигналам отраженных волн: необходимо существенно увеличить кратность суммирования за счет увеличения площади бина, что влечет снижение разрешающей способности разреза. К тому же теряется некоторые возможности обработки методом ОГТ таких данных (напр., затруднено проведение скоростного анализа).

Несомненно, что разработки в исследуемой области должны быть продолжены. В рамках найденного подхода к решению задачи

дистанционного обнаружения разрушительных процессов при эксплуатации крупных промышленных объектов целесообразно дальнейшее развитие алгоритмов обработки и методик интерпретации данных мониторинга с повышением не только качества выделения малоамплитудных сейсмических сигналов, но и ее оперативности. Последнее наиболее актуально в связи со значительным объемом, в сотни терабайт, исходного цифрового материала, включающего сейсмограммы с сети станций, зарегистрированные за десятки лет мониторинга. В этом плане представляется прогрессивным использовать технологии искусственного интеллекта для обработки и анализа такого колоссального объема данных.

В связи со значительным сокращением в последние годы финансирования дорогостоящих методов определения глубинной структуры земной коры, необходимо и дальше развивать найденный подход по использованию для этих целей выделенных в сейсмическом шуме малоамплитудных отраженных волн.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Патенты

1. Селезнев В.С. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления : пат. 2461847 Российская Федерация / В.С. Селезнев, **А.В. Лисейкин**, А.А. Брыксин ; заявитель и патентообладатель Новосибирск. ООО «Геофизическая служба». – 2010128394/28 ; заявл. 08.07.2010 ; – опубл. 20.09.2012, Бюл. №26, - 10 с.

2. Способ организации непрерывного сейсмометрического мониторинга инженерных сооружений и устройство для его осуществления : пат. 2546056 Российская Федерация / В.С. Селезнев, **А.В. Лисейкин**, Р.Ш. Альжанов, П.В. Громыко ; заявитель и патентообладатель Новосибирск. ГС СО РАН. – 2013127923/28; заявл. 18.06.2013 ; – опубл. 10.04.2015, Бюл. №10, - 6 с.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. SpectrumSeism / В.С. Селезнев, **А.В. Лисейкин**, Д.Б. Севостьянов, А.А. Брыксин // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021666241; RU; № 2021665611, заявл. 11.10.2021, опубл. 11.10.2021.

2. Geofilters / **А.В. Лисейкин**, В.С. Селезнев, Д.Б. Севостьянов, А.А. Брыксин // Свидетельство о государственной регистрации

программы для ЭВМ 2022613238; RU; № 2022613181, заявл. 11.03.2022, опубл. 12.03.2022.

3. SSlicer / **А.В. Лисейкин**, В.С. Селезнев, Д.Б. Севостьянов, А.А. Брыксин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2022613238. Заявка № 2022613181 от 11.03.2022, опубл. 12.03.2022.

Журналы, включенные в перечень ВАК

1. Влияние работы гидроагрегатов на собственные колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС / В.С. Селезнев, **А.В. Лисейкин**, Р.Ш. Альжанов, П.В. Громыко // Гидротехническое строительство. – 2013. – №7. – С. 2-7.

2. What Caused the Accident at the Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Plant (SSHPP): A Seismologist's Point of View / V.S. Seleznev, **A.V. Liseikin**, A.A. Bryksin, P.V. Gromyko // Seismological Research Letters. – 2014. – V. 85. – P. 817-824.

3. О собственных акустических колебаниях в водоводах Саяно-Шушенской ГЭС / В.С. Селезнев, В.Б. Курзин, **А.В. Лисейкин**, П.В. Громыко // Гидротехническое строительство. – 2016. – №7. – С. 41-45.

4. **Лисейкин А.В.** Результаты исследования здания с резинометаллической сейсмоизоляцией методом стоячих волн (на примере здания гражданского строительства Национального университета Тайваня, г. Тайбэй) / **А.В. Лисейкин**, В.С. Селезнев, А.А. Брыксин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 53-59.

5. **Лисейкин А.В.** Сезонные изменения параметров собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС по данным метода стоячих волн / **А.В. Лисейкин**, В.С. Селезнев, З.А. Адилов // Гидротехническое строительство. – 2019. – №10. – С. 28-33.

6. **Liseikin A.V.** Monitoring of the natural frequencies of Chirkey arch dam / A.V. Liseikin, V.S. Seleznev, Z.A. Adilov // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – V. 96 (4). – P. 15-26.

7. Сейсмологические наблюдения во время оползня на отвале Кольванского месторождения антрацита (Новосибирская область) / В.С. Селезнев, **А.В. Лисейкин**, А.Ф. Еманов, В.М. Соловьев // Докл. РАН. Науки о Земле. – 2021. – Т. 499. № 1. – С. 65-70.

8. Методика изучения строения земной коры на всю мощность средствами речной сейсморазведки / **А.В. Лисейкин**, В.С. Селезнев,

В.М. Соловьев, А.А. Брыксин // Докл. РАН. Науки о Земле. – 2022. – Т. 502, № 2. – С. 101-106.

9. Контроль технического состояния зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах по изменению частот собственных колебаний (по данным сейсмического мониторинга здания свайного типа – Дворца культуры г. Норильска) / Е.Э. Косякина, **А.В. Лисейкин**, П.В. Громыко, В.С. Селезнев // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, №3. – С. 45-58.

10. Определение устойчивости отвалов угольных разрезов по собственным колебаниям (по данным мониторинга на Колыванском месторождении антрацита, Новосибирская область) / **А.В. Лисейкин**, В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов, В.М. Соловьев // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64, № 5. – С. 754-763.

11. Определение частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сейсмическим сигналам (на примере плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным мониторинга 2001–2021 гг.) / **А.В. Лисейкин**, В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов, Д.В. Кречетов // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 32-50.

12. Возможности речной сейсморазведки для изучения строения земной коры и верхней мантии территории Сибири / **А.В. Лисейкин**, В.С. Селезнев, В.М. Соловьев [и др.] // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64, №2. – С. 280-292.

13. Изменение значений частот собственных колебаний зданий и сооружений в зависимости от внешних факторов / В.С. Селезнев, **А.В. Лисейкин**, И.В. Коковкин, В.М. Соловьев // Геология и геофизика. – 2024. – Т. 65, № 7. – С. 1036-1044.

14. **Лисейкин А.В.** Методика дистанционного контроля разрушительных процессов по малоамплитудным сейсмическим сигналам при эксплуатации крупных промышленных объектов / **А.В. Лисейкин**, В.С. Селезнев // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2024. – Т. 51, № 3. – С. 86-106.

15. Построение разрезов земной коры до границы Мохоровичича по малоамплитудным отраженным волнам речной сейсморазведки методом ОГТ-2D (р. Витим, зона сочленения Ангаро-Ленской моноклизы Сибирской платформы и Бодайбино-Патомской складчатой системы) / **А.В. Лисейкин**, В.С. Селезнев, В.М. Соловьев [и др.] // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66, № 1. – С. 109-123.

Подписано в печать 18.09.2025 г. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат 60х84 1/16. Усл. печ. 2,4 л.
Тираж 100 экз. Заказ № 1003

Отпечатано в типографии «АЛЕКСПРЕСС»
ИП Малыгин Алексей Михайлович
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6/1, оф.104
Тел. (383) 217-43-46