



УТВЕРЖДАЮ

Директор ГЦ РАН

чл.-корр. РАН А.А. Соловьёв

«10» *ноября* 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизического центра
Российской академии наук (ГЦ РАН)

на диссертационную работу Лисейкина Алексея Владимировича

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

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук

по специальности 1.6.9 – геофизика

Диссертационная работа Лисейкина А.В. посвящена разработке и реализации научно обоснованных и эффективных подходов к дистанционному обнаружению разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений и определению структуры земной коры на полную её мощность на основе выделения малоамплитудных сейсмических сигналов из данных мониторинга сейсмического шума. На базе созданного алгоритма анализа сейсмических данных, реализованного в программном обеспечении SpectrumSeism, разработаны методики, обеспечивающие выявление начальных стадий разрушений в технических сооружениях (ГЭС, ТЭЦ, АЭС и др.) и построение разрезов земной коры по малоамплитудным отражённым волнам. Предложенные решения позволяют получать информацию о характеристиках механических колебаний оборудования и сооружений, отслеживать долговременные изменения их состояния и существенно снижать затраты при построении разрезов земной коры по отражённым волнам. Разработанные методики имеют важное практическое и экономическое значение, несмотря на ограничения, связанные с низкой амплитудой сигналов и необходимостью длительных интервалов регистрации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и библиографического списка из 146 наименований, из них 47 – на иностранных языках, а 46 публикаций вышли за последние пять лет. Работа изложена на 253 страницах, содержит 108 рисунков и 4 таблицы.

Актуальность исследования

Выявление разрушительных процессов в зданиях, инженерных сооружениях и промышленном оборудовании в настоящее время осуществляется преимущественно с использованием контрольно-измерительных систем (вибрационных, сейсмометрических, деформационно-напряжённых и др.). Однако, как показала катастрофа на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 году, аварии нередко оказываются труднообъяснимыми из-за неполноты данных, связанной с выходом из строя измерительной аппаратуры. Это обусловило необходимость разработки методов дистанционного обнаружения разрушений по сейсмическим сигналам, регистрируемым сетью станций ФИЦ ЕГС РАН, насчитывающей более 350 пунктов, включая станции, расположенные вблизи ключевых промышленных объектов.

Анализ сейсмического шума показывает наличие слабых упругих волн, вызванных колебаниями оборудования и сооружений, находящихся на расстоянии до нескольких километров от станции. Характеристики этих сигналов изменяются при нештатных ситуациях. Применение современных методов выделения из шума малоамплитудных сигналов (на порядки ниже уровня фона) и отслеживание их изменений во времени позволяют дистанционно выявлять начальные стадии разрушительных процессов при эксплуатации сооружений. Использование архивных данных длительного мониторинга делает возможным контроль долговременной (измеряемой годами и десятилетиями) эволюции состояния конструкций и оборудования, что особенно важно при анализе причин аварий, подобных катастрофе на Саяно-Шушенской ГЭС.

Построение сейсмических разрезов земной коры имеет ключевое значение для геодинамических и тектонических исследований, а также для оценки сейсмической активности. Традиционные методы глубинного сейсмического зондирования отличаются высокой стоимостью, что ограничивает их применение. Рациональной альтернативой является использование данных речной сейсморазведки с длинными сейсмограммами и обработкой по методу общей глубинной точки (ОГТ).

Несмотря на значительное число современных отечественных и зарубежных исследований, задачи выделения малоамплитудных сигналов в сейсмическом шуме и дистанционного контроля технических сооружений остаются нерешёнными, что определяет высокую актуальность диссертационной работы Лисейкина А.В. «Обнаружение разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений и определение структуры земной коры с использованием малоамплитудных сейсмических сигналов».

Цель и задачи исследования

Цель работы соискателя заключалась в поиске и реализации научно обоснованных и эффективных решений по использованию малоамплитудных сейсмических сигналов, выделенных из сейсмического шума, для дистанционного обнаружения разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений (ГЭС, АЭС, ТЭЦ), работающего оборудования (гидроагрегатов, турбин и др.) и уточнения структуры земной коры на её полную мощность.

Катастрофическая авария на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 году выявила уязвимость традиционных систем мониторинга и подчеркнула необходимость создания надёжных дистанционных методов раннего выявления вибраций, резонансных явлений и изменений собственных колебаний сооружений, что позволит повысить безопасность эксплуатации промышленных объектов. В геофизике по-прежнему актуальна проблема высокой стоимости глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), что обуславливает потребность в новых подходах к выделению слабых отражённых волн для изучения структуры земной коры на глубинах десятков километров. Таким образом, поставленная цель диссертационной работы соответствует современным требованиям и задачам геофизических исследований и инженерного мониторинга. Её реализация способствует повышению безопасности эксплуатации сооружений, эффективному использованию сейсмических данных для мониторинга и прогнозирования, а также снижению затрат на исследование глубинного строения земной коры.

Для достижения цели соискателем решены следующие научные задачи:

1. Разработаны на основе преобразования Фурье алгоритм и программная реализация выделения малоамплитудных сейсмических сигналов из данных мониторинга сейсмического шума.
2. Исследована возможность дистанционного изучения механики процессов при эксплуатации промышленных объектов по малоамплитудным сигналам и разработана методика обнаружения начальных стадий разрушений в работающем оборудовании.
3. На основе многолетних данных мониторинга сейсмического шума разработана методика дистанционного определения аномалий в частотах собственных колебаний зданий и сооружений как индикаторов развивающихся деструктивных процессов в конструкциях и/или основаниях.
4. С использованием архивных материалов речного сейсмического профилирования методом общей глубинной точки (ОГТ) разработана методика определения

структуры земной коры на полную мощность по малоамплитудным отражённым волнам.

Решение указанных задач позволило достичь поставленной цели и получить новые, практически значимые результаты, связанные с разработкой методов дистанционного выявления разрушительных процессов на промышленных объектах и уточнением структуры земной коры.

Значимость и практическая ценность полученных результатов. Рекомендации по использованию.

В данном разделе представлены основные результаты, полученные соискателем в диссертационной работе, а также проанализирована их практическая значимость. В конце раздела даны рекомендации по их использованию.

1. Разработан 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.

Преимущество разработанного решения состоит в объединении в одном программном комплексе функций оперативного анализа спектрально-временных характеристик сейсмического шума и инструментов детального исследования выделенных сигналов. Программа обеспечивает навигацию по спектрограмме, возможность интерактивного изменения параметров её расчёта и масштаба, а также включает средства усреднения амплитудных спектров и вычисления амплитуд монохромных сигналов во времени в выбранных областях их устойчивого проявления. Такое сочетание позволяет надёжно выделять малоамплитудные сигналы в сейсмическом шуме с учётом влияния помех, снижает вероятность ошибок и повышает эффективность обработки данных мониторинга по сравнению с традиционными алгоритмами и программами.

2. Разработана методика дистанционного обнаружения разрушительных процессов в работающем оборудовании крупных промышленных объектов в связи с повышенной вибрацией и резонансным усилением колебаний окружающих конструкций и сооружений.

Исходным материалом исследования являются данные многолетнего мониторинга – сейсмограммы, регистрируемые в реальном времени высокочувствительными приборами сейсмических станций, расположенных в радиусе до 30 км от исследуемого объекта. Разработанная методика позволяет не только контролировать вибрации оборудования

крупных промышленных предприятий, но и оценивать его взаимодействие с окружающими конструкциями, выявляя потенциально опасные резонансные эффекты. Использование накопленных за многие годы данных мониторинга обеспечивает возможность ретроспективного анализа и получения дополнительной информации, необходимой для объективного расследования причин аварийных ситуаций. Всё это повышает достоверность контроля устойчивости сооружений и оборудования в реальном времени, что имеет ключевое значение для предупреждения разрушений и анализа нештатных процессов.

3. Предложена 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.

Методика дистанционного определения частот собственных колебаний зданий и сооружений по малоамплитудным сигналам с использованием многолетнего мониторинга сейсмического шума в их окрестности позволяет выявлять длительные (годами и десятилетиями) потенциально деструктивные процессы в конструкциях, что невозможно без организации специализированного мониторинга на самих объектах. Основное преимущество метода перед известными решениями заключается в возможности регулярного определения собственных частот различных значимых объектов (плотины ГЭС, мосты, гражданские здания и др.), не оборудованных сейсмометрической аппаратурой, как на протяжении длительных периодов времени, так и практически в реальном режиме. При этом методика отличается низкой стоимостью по сравнению с подходами, основанными на прямой регистрации колебаний непосредственно на объектах.

4. Создана 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.

Предложенный подход может быть использован для получения относительно дешевой информации о глубинном строении земной коры по профилям, которые будут выполнены методом речной сейсморазведки ОГТ. Для этого требуется использовать сейсмическую аппаратуру с достаточной чувствительностью, регистрировать сейсмограммы с увеличенной продолжительностью и выбирать расстояние между источником и приемником с учетом предполагаемой глубины 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 теряются некоторые возможности обработки методом ОГТ таких данных (напр., затруднено проведение скоростного анализа).

На основе полученных соискателем результатов можно сформулировать следующие конкретные рекомендации по их применению и внедрению:

1. Разработанное программное обеспечение SpectrumSeism рекомендуется для применения при обработке материалов мониторинга сейсмических сигналов в части спектрально-временного анализа данных и выделения слабых сигналов в сейсмическом шуме. Практическое использование возможно в профильных научных и производственных организациях, таких как Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Институт нефтегазовой геофизики СО РАН, а также в предприятиях, выполняющих работы по геофизическому мониторингу (АО «Росгеология», АО «Сейсмотек» и др.).
2. Разработанный подход к дистанционному определению по малоамплитудным сейсмическим сигналам характеристик вибрации оборудования и резонансных эффектов может использоваться как дополнительный источник информации о механике процессов, происходящих на работающих промышленных объектах (ГЭС, АЭС, ТЭЦ), для раннего обнаружения признаков развивающихся разрушений. Потенциальными организациями для внедрения являются ПАО «РусГидро», Концерн «Росэнергоатом» (Госкорпорация «Росатом»), ПАО «Интер РАО», а также специализированные центры диагностики оборудования – АО «ВНИИАЭС», АО «ОРГРЭС», НИЦ «Курчатовский институт».
3. Опыт, полученный при анализе и моделировании причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, может быть использован в практике ПАО «РусГидро», Ростехнадзора, НИЦ «Безопасность гидротехнических сооружений» и ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева при исследовании нештатных ситуаций и разработке мероприятий по повышению надёжности и безопасности эксплуатации крупных энергетических объектов.
4. Предложенная методика дистанционного определения частот собственных колебаний зданий и сооружений по данным регистрации сейсмического шума в их окрестности может быть использована для оценки технического состояния объектов, не

оснащённых специальными системами мониторинга. Потенциальными организациями-исполнителями являются НИЦ «Строительство» (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко), НИИ строительной физики РААСН, Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, НИЦ «Стройдиагностика», а также проектные и экспертные организации (Мосгосэкспертиза, АО «Гидропроект»).

5. Разработанная методика построения разрезов по выделенным в сейсмическом шуме малоамплитудным отражённым волнам на увеличенных временах вступления в материалах малоглубинного метода ОГТ может применяться для исследования глубинного строения земной коры в условиях ограниченного финансирования. Она может быть внедрена в работу Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Института земной коры СО РАН, Института геологии и геохронологии докембрия РАН, а также геологоразведочных подразделений АО «Росгеология» и геофизических кафедр МГУ им. М.В. Ломоносова.

Замечания к диссертационной работе

Вместе с тем работа не лишена некоторых недочётов и упущений:

1. Недостаточно проработана верификация алгоритма на синтетических и реальных данных в условиях сложных помех. В частности, автор не приводит сравнение с вейвлет-преобразованием, которое в ряде случаев демонстрирует хорошие результаты.
2. Отсутствуют чёткие количественные критерии идентификации разрушительных процессов (аномалий): не определена граница, при которой событие считается аномальным, а при которой – нет. Нет чёткой схемы прогнозирования катастрофических явлений.
3. В диссертации и автореферате не указано, на каком расстоянии от объекта надёжно регистрируются сигналы для контроля работы гидроагрегатов ГЭС.
4. В тексте указаны ограничения по амплитуде и длительности регистрации сигналов, однако не упомянуты ограничения, связанные с сильными техногенными помехами, источники которых (транспорт, работа промышленных установок, техногенные взрывы) находятся вблизи станций.
5. Отсутствует сравнительный анализ глубины до поверхности Мохоровичича, полученной автором по сейсмическим данным, и данных, полученных ранее другими исследователями, например, по гравитационным методам.
6. В первой научной задаче формулируется цель «Разработать эффективный алгоритм», однако критерий эффективности не определён.

Высказанные замечания не снижают достоинств диссертационного исследования Лисейкина А.В.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация Лисейкина Алексея Владимировича является завершённым научно-исследовательским трудом на актуальную тему, обладает научной новизной и практической значимостью, выполнена соискателем самостоятельно на высоком научном уровне. В работе решена научная проблема, связанная с разработкой новых научно обоснованных и эффективных методов дистанционного обнаружения начавшихся разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений, а также уточнения структуры земной коры на всю мощность с использованием малоамплитудных сигналов, выделенных в сейсмическом шуме. Основные результаты диссертации являются новыми и практически значимыми, так как направлены на предотвращение аварий с разрушением дорогостоящего оборудования и возможными человеческими потерями.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), а её автор Алексей Владимирович Лисейкин достоин присуждения учёной степени доктора технических наук.

Заместитель директора по науке ГЦ РАН,
заведующий лабораторией геодинамики,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук



- Виктор Николаевич Татарinov

Заместитель директора по науке ГЦ РАН,
заведующий лабораторией геоинформатики и Больших данных Арктики,
доктор физико-математических наук



Борис Аркадьевич Дзевоев

Работа рассмотрена на заседании Научного семинара ГЦ РАН 8 октября 2025 г.

Отзыв рассмотрен и обсужден на заседании семинара лаборатории геодинамики ГЦ РАН, одно из основных направлений научно-исследовательской деятельности которой связано с разработкой научно-технических основ выбора мест размещения, проектирования и эксплуатации объектов атомной энергетики 27 октября 2025 г., протокол № 1, и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Мы, Дзедоев Борис Аркадьевич и Татаринов Виктор Николаевич, даём согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук (ГЦ РАН), адрес: 119296, Российская Федерация, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3, gcras@gcras.ru.

Подписи Бориса Аркадьевича Дзедоева и Виктора Николаевича Татаринова заверяю.

Ученый секретарь ГЦ РАН, к.ф.-м.н.

Р.И. Красноперов

