

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

комиссии диссертационного совета 24.1.087.02
для принятия к защите диссертации Лисейкина Алексея Владимировича
**«Обнаружение разрушительных процессов при эксплуатации
технических сооружений и определение структуры земной коры с
использованием малоамплитудных сейсмических сигналов»**
по специальности 1.6.9 – «геофизика» на соискание учёной степени
доктора технических наук

Объектом исследования в диссертации А.В. Лисейкина являются 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 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.

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. Однако 17 августа 2009 г. произошла крупнейшая катастрофа на Саяно-Шушенской ГЭС, 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. Современные сейсмостанции оснащаются высокочувствительной калиброванной цифровой аппаратурой для регистрации событий природного и техногенного характера, при этом

одновременно регистрируется и непрерывный сейсмический шум. Материалы мониторинга накапливаются и хранятся неограниченное время. В техногенной составляющей шума регистрируются в виде малоамплитудных сигналов упругие волны, возбужденные колебаниями различных объектов, расположенных даже в нескольких километрах от сейсмической станции. 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 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, однако значительные территории страны протяженностью в сотни километров все еще остаются неизученными. На больших глубинах (в десятки километров) разрезы определяются в основном по результатам дорогостоящих исследований методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), объем финансирования которых на сегодня существенно сокращен. Одним из рациональных путей построения разрезов средней и нижней частей земной коры, является дообработка материалов речной сейсморазведки методом общей глубинной точки (ОГТ), отличающимся использованием сейсмограмм увеличенной длительности. В результате проведения экспериментальных полевых работ по рекам Восточной Сибири, на профилях общей длиной около 2700 км, получен и хранится на электронных носителях значительный объем материала в виде непрерывных записей 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.

Методы исследования, фактический материал: Теоретической и методической основой решения поставленных задач является классический гармонический анализ и современные высокопроизводительные алгоритмы дискретного оконного преобразования Фурье. 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. 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 сеймостанций, 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 (ОГТ), реализованные в программном обеспечении RadExPro, верификация результатов выполнялась сопоставлением полученных разрезов с результатами обработки материалов близлежащих профилей наземной сейсморазведки и ГСЗ. В качестве исходных материалов использовались сейсмограммы зарегистрированного непрерывно сейсмического шума на профилях речной сейсморазведки (р. Лена, лето 2018 г.; р. Витим, лето 2019 г.).

Достоверность 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.

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.

Научная новизна результатов исследования.

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.

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 частотах 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.

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.

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 вступлений в материалах речного профилирования методом ОГТ.

Всё вышеуказанное дает основание утверждать, что **диссертационная работа А.В. Лисейкина соответствует 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».**

Результаты исследования 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.

При экспертизе текста диссертации, автореферата, публикаций, а также результатов проверки текста системой «Антиплагиат» **комиссией установлено, что:**

- оригинальных блоков в диссертации с учетом добросовестного самоцитирования 98,75 %.
- соискателем сделаны ссылки на все источники заимствования материалов, **фактов некорректного цитирования или заимствования без ссылки на соавторов в тексте диссертации и автореферате не обнаружено;**
- **сведения, представленные соискателем об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны;**
- **несоответствий текста диссертации, представленного соискателем в диссертационный совет, тексту диссертации, размещённому на сайте, не выявлено;**
- **недостоверных сведений в документах, представленных соискателем в диссертационный совет, не выявлено.**

Комиссия рекомендует:

1. Принять к защите диссертацию А.В. Лисейкина.

2. **Ведущей организацией** назначить Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук (ГЦ РАН), г. Москва. В составе организации входят научные лаборатории, специалисты которых проводят научные исследования по тематике диссертации и способны определить ее научную и практическую ценность, имеют публикации по тематике диссертации соискателя.

3. В качестве официальных оппонентов рекомендуются:

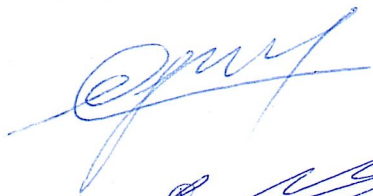
Антоновская Галина Николаевна, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией сейсмологии, г. Архангельск.

Завьялов Алексей Дмитриевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), главный научный сотрудник, г. Москва.

Ковалевский Валерий Викторович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН), заведующий лабораторией геофизической информатики, г. Новосибирск.

Комиссия диссертационного совета:

Председатель комиссии,
д.г.-м.н.



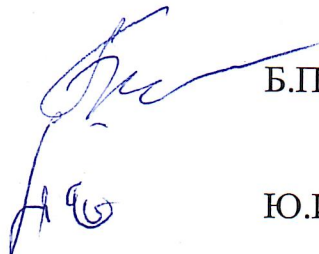
В.С. Селезнев

д.т.н.



А.Ф. Еманов

д.ф.-м.н.



Б.П. Сибиряков

д.т.н.

Ю.И. Колесников