

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Лисейкина Алексея Владимировича

«Обнаружение разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений и определение структуры земной коры с использованием малоамплитудных сейсмических сигналов»
на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 1.6.9 – геофизика

Актуальность темы исследования.

В настоящее время наблюдается заметный рост научного и практического интереса к развитию идеи использования микросейсм для изучения недр Земли и мониторинга техногенных объектов (зданий и сооружений, промышленного оборудования). Эти работы относятся к так называемым «легким» методам исследования, поскольку экономичнее геофизических методов с контролируемым источником. Кроме того, они позволяют получить дополнительную информацию о состоянии инженерных объектов, строении земной коры и ее геодинамических особенностях. Эти методы основаны на анализе сейсмического шума, присутствующего всегда и везде. Стоит отметить, что сложный состав и свойства сейсмического шума, регистрируемого в пределах населенных пунктов и функционирующих предприятий, требует разработки эффективных алгоритмов выделения в нем «полезных» сигналов.

В этой связи диссертационная работа А.В. Лисейкина, посвященная поиску новых решений, способствующих надежному выделению в сейсмическом шуме малоамплитудных сейсмических сигналов и их использованию в двух направлениях: для дистанционного обнаружения разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений, а также для определения строения земной коры, является актуальной и своевременной.

Сформулированные диссертантом задачи исследований в полной мере соответствуют поставленной цели работы и обеспечивают ее достижение.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 146 наименований. Текст диссертации изложен на 253 страницах, содержит 108 рисунков и 4 таблицы.

В первой главе рассматриваются особенности выделения малоамплитудных сигналов в сейсмическом шуме на основе гармонического анализа. Диссертант приводит аналитический обзор современных зарубежных и отечественных разработок, обсуждает их достоинства и

недостатки, результатом которого стала разработка и программная реализация алгоритма выделения малоамплитудных сигналов из сейсмического шума на основе гармонического анализа.

Разработанное специальное программное обеспечение SpectrumSeism, как можно судить из представленных диссертационных материалов, весьма удобно для использования. Отметим только некоторые достоинства созданной программы для обработчика записей: наличие функций интегрирование/дифференцирование, низкочастотная деконволюция; расчет и визуализация усредненных спектров в выделенной на спектрограмме области частота-время, учет высокоамплитудных помех; расчет и визуализация временной развертки амплитуды сигнала на заданной частоте. Отрадно, что приведена пошаговая схема работы в созданном ПО, т.к. именно это ПО является основным в работе.

Вторая глава посвящена дистанционному обнаружению разрушительных процессов в работающем оборудовании крупных промышленных сооружений. В качестве объекта исследования рассматриваются гидроагрегаты ГЭС. Диссертант приводит краткий обзор современных методик, направленных на анализ сигналов, создаваемых промышленными объектами, с указанием их преимуществ и ограничений. Далее идет постановка задачи и ее реализация в виде разработки новой методики дистанционного контроля опасных процессов, возникающих при работе мощного оборудования. На примере аварии на Саяно-Шушенской ГЭС (2009 г.) демонстрируются возможности разработанной методики, приводится детальный анализ микросейсм сейсмостанции «Черемушки», установленной на расстоянии 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, за разные временные промежутки. Методика позволяет уверенно выделить малоамплитудные сигналы, создаваемыми не только работающими гидроагрегатами, но и гидроакустические автоколебания, возникающие в водоводах гидротурбин. Результаты сопоставляются с графиками изменения нагрузок гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС. Достоверность идентификации достигается результатами сопоставления частот и интервалов прослеживаемости выявленных сигналов при одновременной регистрации сейсмического шума на исследуемом объекте и на удаленной сейсмостанции. Отметим, что для анализа волновых форм применяется разработанное ПО SpectrumSeism.

Диссертантом определены следующие факторы, связанные с разрушительными процессами в работающем оборудовании:

- возрастание амплитуды колебаний на рабочей частоте (например, на частоте вращения гидроагрегатов);

- при негативном воздействии на конструкции или сооружения работающего оборудования (резонансного эффекта) возрастает амплитуда собственных колебаний.

В третьей главе рассматривается задача дистанционного определения аномалий в частотах собственных колебаний зданий и сооружений по малоамплитудным сигналам как индикатора начавшихся разрушений их конструкции и/или основания. Выполнен аналитический обзор известных решений и приводится новая методика, направленная на решение поставленной задачи, на примере оценки состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Для выделения слабоамплитудных «полезных» сигналов из поля микросейсм применяется разработанное ПО SpectrumSeism. С использованием разработанной методики установлено, что частоты собственных колебаний первых семи мод плотины Саяно-Шушенской ГЭС на протяжении последних 20 лет возрастают, при этом интегральный рост частот составляет 0.02–0.05 Гц. В качестве дополнительного примера приводятся результаты оценки устойчивости отвалов угольных месторождений (на примере схождения склона на Елбашинском отвале) путем анализа микросейсм до и после его деформации, зарегистрированных удаленной сейсмической станцией.

Глава 4 посвящена построению разрезов земной коры на всю глубину по малоамплитудным сигналам отраженных волн речной сейсморазведки методом ОГТ. Аналогично предыдущим главам, приводится аналитический обзор современных разработок в соответствующей области с указанием их достоинств и недостатков.

Диссертант справедливо поднимает вопрос о возможности получения разрезов средней и нижней частей земной коры с использованием сейсмограмм увеличенной длительности путем переобработки архивных материалов речной сейсморазведки методом общей глубинной точки. Результатом этого является разработка методики экспресс-обработки сейсмограмм увеличенной длительности и ПО SSlicer для пакетной обработки любого количества и длительности сейсмограмм, зарегистрированных малоканальной (1-4 канала) автономной аппаратурой серии «Байкал», с формированием многоканальной сейсмограммы в традиционном для сейсморазведки формате SEG-Y.

На примере полевого материала, полученного при изучении строения рек Лена и Витим в Восточной Сибири по методике речных сейсморазведочных исследований, разработанной специалистами сибирских филиалов ФИЦ ЕГС РАН, демонстрируется методика построения сейсмограмм увеличенной длительности и временных разрезов на всю

мощность земной коры. В результате получены данные о глубинном строении неизученной ранее территории, где затруднено в силу орографических условий проведение сухопутных глубинных сейсмических работ методом ОГТ. Полученные оценки глубины залегания границы Мохоровичича согласуются с ранее проведенными исследованиями.

В заключении сделаны основные выводы по диссертационной работе.

Все поставленные в разделах диссертации задачи решены, защищаемые положения доказаны. Вопросы, на которые автор вызвался найти обоснованные ответы, проработаны в достаточной мере и свидетельствуют о завершенности в целом диссертационной работы. Работа проиллюстрирована в необходимом объеме, текст изложен хорошим литературным языком.

Научная новизна. В процессе выполнения работы соискателем получены результаты, представляющие научную новизну. На взгляд оппонента, к основным значимым научным результатам исследований можно отнести разработку новых методик:

- методика дистанционного обнаружения разрушительных процессов в работающем оборудовании крупных промышленных объектов;
- методика дистанционного определения аномалий в частотах собственных колебаний зданий и сооружений;
- методика построения разрезов земной коры на всю ее мощность по материалам речного профилирования методом ОГТ.

Достоверность, новизна и практическая ценность результатов. Достоверность диссертации подтверждается взаимосвязанностью результатов разработанного ПО и методик обработки данных с существующими сведениями о динамических параметрах инженерных объектов и геолого-геофизическими моделями. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций определяется привлечением большого объема фактического материала, современных методов получения и обработки информации, соответствием результатов исследований с ранее опубликованными данными.

Работа построена логично, содержит новые выводы и положения, которые могут быть успешно применены для оценки состояния зданий, сооружений и промышленного оборудования, и построения временных разрезов на всю мощность земной коры, вносит значительный вклад в развитие сейсмологии при снижении затрат на исследования и решения задач в области развития технологий предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Практическая ценность результатов исследований заключается в том, что разработанные методики являются достаточно общими для разных объектов и позволяют проводить дистанционную оценку характеристик вибрации оборудования, резонансных эффектов и частот собственных колебаний технических сооружений. Разработанный трехмодульный алгоритм, реализованный в программном обеспечении SpectrumSeism, позволяет выделять «полезный» сигнал из сейсмического шума, в том числе полученного на функционирующих промышленных площадках. Программное обеспечение SSlicer позволяет проводить пакетную обработку любого количества и длительности сейсмограмм, зарегистрированных малоканальной автономной аппаратурой серии «Байкал» (разработка ФИЦ ЕГС РАН). В совокупности все вышесказанное позволяет утверждать, что автор диссертационной работы достиг поставленной цели и значимых для практики результатов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа А.В. Лисейкина соответствует паспорту специальности 1.6.9 «Геофизика» по следующим пунктам: 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».

Специальность соответствует технической отрасли наук.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена в 90 публикациях, зарегистрированных в РИНЦ, из них 20 публикаций в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов из списка ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций, 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.

Основные положения, выводы и рекомендации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях.

Замечания.

1. Чувствительность и разрешающая способность методики и применяемого регистрирующего оборудования при выделении слабых сигналов из микросейсмического фона является принципиальным вопросом. Например, в работе при регистрации собственных колебаний плотин ГЭС

применяются низкочувствительные датчики GS-10 с собственной частотой 10 Гц, таким образом, искомый сигнал существенно ниже, он регистрируется на склоне АЧХ, причем датчиком с малым динамическим диапазоном. Для выделения слабоамплитудных сигналов, сравнимых с уровнем микросейсм, автор предлагает применить накопление сигнала и низкочастотную деконволюцию. Использование низкочастотной деконволюции позволяет расширить частотный диапазон регистрируемых сейсмических записей при использовании «грубых» датчиков, что в итоге позволяет вовлечь в анализ большой объем информации. Это суть подхода, предложенного диссертантом. Тем не менее, известно, что для слабоамплитудных низкочастотных сигналов, регистрируемых совместно с микросейсмическим и аппаратным шумом, при деконволюции увеличивается аппаратный шум, что может приводить к снижению точности оценки амплитуды «полезного» сигнала. Учитывая, что длительность накопления «полезного» сигнала определяется интервалом стационарности помех (природных и аппаратных) и шириной частотной полосы искомого сигнала, применяемая процедура имеет предел, определяющий точность и разрешающую способность методики.

Следует отметить важную роль в методике, которую играет тип измерительного оборудования (собственные шумы аппаратуры, чувствительность характеристик к экзогенным факторам (вариации температуры и давления)), уровень микросейсмического фона, в том числе наличие в нем «вредных» сигналов (например, от работающего оборудования при условии выделения собственных частот колебаний сооружения).

К сожалению, автором не рассмотрены эти вопросы, в том числе оценки точности и разрешающей способности методики выделения слабых сигналов в необходимой мере, и в том числе с учетом применяемого измерительного оборудования. Хотя, на наш взгляд, напрашивается весьма простой эксперимент – это сравнение записей предлагаемого датчика с эталонным – короткопериодным велосиметром, классически применяемым в отечественной сейсмологии – СМ-3КВ, или даже с широкополосным велосиметром, например, используемым в работе CMG-3ESPCDE (например, установленным на станции «Черемушки»). Но, в отличие от подобного эксперимента в работе (Дергач и др., 2018), сигнал должен быть слабым.

Точность оценки амплитуды «полезного» сигнала влияет на выявление ее изменения в течение времени, что в итоге учитывается в оценке состояния, например, промышленного оборудования, а также в построении форм (мод) собственных колебаний объекта, их временном сопоставлении и выделении аномальных участков.

2. Показано недостаточно четко, какие существуют возможные недостатки у предложенных методик и как их можно устранить, каковы границы применимости методик.

3. Еще одним вопросом, связанным с первым замечанием, является оценка параметров микросейсмического шума (допустимого уровня, частотного состава и пр.) при удаленной регистрации (на площадке объекта, сейсмической станции) и его влияния на точность выделения «полезного» сигнала. Такую оценку хотелось бы увидеть в работе.

4. В вопросе обнаружения начавшихся разрушений конструкций и/или основания сооружения при учете многофакторного искажения частот при воздействии внешней среды остановимся на следующих моментах, требующих пояснения. Что понимается под «начавшиеся разрушения» и кто его определяет (геофизик. строитель)? Какие, по мнению автора, должны произойти изменения в граничных значениях динамических параметров, свидетельствующие о начавшихся разрушениях?

Для строительных конструкций, автор приводит пример для плотины ГЭС и указывает на изменения собственных частот колебаний за 20 лет в среднем на 0.03 Гц, что связано с различными «адаптационными процессами» и не говорит о развитии разрушительных процессах. Мы подобный эффект наблюдали при мониторинге высотного 44-х этажного нового здания, где за 12 лет непрерывного мониторинга значения собственных частот уменьшилось примерно на 20%, причем тенденция спада кривых трендов напоминает закономерности, получаемые на образцах для ползучести бетона. Здание целостное и прекрасно функционирует в г. Москве.

Здесь хотелось бы увидеть обсуждение (собственного или из литературы) примера обследования объекта с явными нарушениями в конструкции с демонстрацией изменения значений собственных частот по всему объему сооружения и как эти изменения отражаются на записях удаленной сейсмической станции.

Отметим, что идея использовать записи стационарных сейсмостанций для мониторинга состояния антропогенных объектов не плоха, но нужно иметь в виду, что ответственные объекты по нормативам имеют собственные системы, нацеленные именно на эту задачу, поэтому данные с сейсмостанций могут быть лишь неплохим дополнением к общему анализу результатов мониторинга.

5. Автором предлагается методика максимального вовлечения в анализ сейсморазведочного материала, что в итоге позволяет получить временные

разрезы на всю мощность земной коры. Здесь возникли следующие вопросы, требующие уточнения.

Отсутствует постановка задачи получения глубинных разрезов и, соответственно, анализа полученных абсолютно новых результатов. На взгляд оппонента, целесообразно было бы привести тестовую работу, где есть разрез ГСЗ, что позволило бы наглядно убедиться в правильности выделенных глубинных границ. Отсутствует обсуждение непроявления границы средней и нижней коры на всех приведенных примерах, как и анализ глубинной структуры района проведения исследований. Какие выделены общие черты для Восточной Сибири и явные особенности для каждого отдельно взятого объекта?

Несомненно, проработка отмеченных замечаний потребует дополнительных исследований, и мы надеемся, что диссертант проведет их в будущем.

Несмотря на отмеченные замечания, считаем, что работа А.В. Лисейкина соответствует уровню докторской диссертации и обладает несомненной научной новизной и практической значимостью.

Достигнутые результаты диссертационной работы.

Диссертация является законченным исследованием, выполненным автором самостоятельно. Полученные соискателем результаты достоверны, выводы и защищаемые положения обоснованы. Работа основана на большом фактическом материале и содержит новые выводы и положения, которые могут быть успешно применены в области предотвращения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа Лисейкина Алексея Владимировича является научно-квалификационной работой, выполнена на хорошем научном уровне и удовлетворяет требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с учетом изменений и дополнений), а ее автор, Лисейкин Алексей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.6.9 – геофизика.

Официальный оппонент:

член-корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук,
заместитель директора по научной работе,

главный научный сотрудник лаборатории сейсмологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лавёрова Уральского отделения Российской академии наук

163020, Россия, г. Архангельск, проспект Никольский, д. 20

e-mail: antonovskaya@fciarctic.ru

телефон: +78182287636

Я, Антоновская Галина Николаевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

АНТОНОВСКАЯ Галина Николаевна

« 17 » ноября 2025 г.

Подпись официального оппонента заверяю:



Личную подпись Г.Н. Антоновской
Заверяю:
Начальник отдела кадров ФГБУН ФГИЦИА УрО РАН
О.В. Лек
« 17 » ноября 2025 г.