

На правах рукописи



ЕРОХИН АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

**ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ГРАВИИНЕРЦИАЛЬНЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ).

Научный руководитель: **Петров Алексей Владимирович**
доктор физико-математических наук, профессор кафедры геофизики ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

Официальные оппоненты: **Александров Павел Николаевич**
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории № 3 Центра геоэлектромагнитных исследований – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии науки.

Непоклонен Виктор Борисович
доктор технических наук, профессор кафедры высшей геодезии, научный руководитель Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН).

Защита диссертации состоится 24 сентября 2026 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.1.132.01 при ИФЗ РАН по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <https://vak.gisnauka.ru> и на сайте института www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, с подписью, заверенной печатью, в 1 экземпляре, с согласиями об использовании персональных данных, просьба направлять по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета кандидату физико-математических наук Жосткову Руслану Александровичу.

Автореферат разослан «__» июля 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Р. А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Потребность в надежном контроле геодинамических процессов и развитии высокоточных систем геофизического мониторинга. Совершенствование методов прогноза сейсмических событий рассматривается как частный, но важный результат такого контроля. В условиях роста требований к технологическому суверенитету внедрение полностью цифровых систем на основе отечественных гравиметров является критически важной задачей импортозамещения.

Актуальность создания и внедрения разработанного комплекса методов параметризации и алгоритмов автоматизированной оцифровки подтверждена возможностью их практического применения для решения широкого круга задач прикладной геофизики: от фундаментального изучения механизмов подготовки землетрясений до прикладных задач разведки месторождений (выделение тектонических нарушений, зон трещиноватости и изменений литологии).

В работе решена актуальная научная задача автоматизации процесса регистрации высокочастотной составляющей гравиинерциальных измерений в режиме реального времени. Предложенный подход к использованию видеотехнологий и методов спектрально-статистического анализа (НОКФАСС, R/S анализ) существенно повышает информативность гравиметрических данных, позволяя обнаруживать скрытые сигналы, недоступные при классических методах измерений.

В рамках диссертационного исследования разработана и практически реализована методика использования отечественного кварцевого гравиметра ГНУ-КВ, обеспечивающая непрерывную регистрацию временных вариаций гравиинерциальных измерений в режиме реального времени.

Автором создан и программно реализован алгоритм оцифровки колебаний чувствительного элемента гравиметра с использованием видеотехнологий, позволяющий автоматизировать процесс регистрации временных вариаций гравиинерциальных измерений (высокочастотной составляющей волновой картины) в режиме реального времени. Предложен комплекс методов спектрально-статистического анализа, включая применение методов НОКФАСС (неортогональный комбинированный Фурье анализ сглаженных сигналов), ПОЛС (процедура оптимального линейного сглаживания), расчёт показателя Хёрста, модифицированное преобразование Фурье, обеспечивающих параметризацию вариаций гравиинерциальных измерений для изучения и выявления их фрактальных свойств.

Полученные модели позволяют выделять устойчивые компоненты временных рядов, обнаруживать скрытые сигналы, связанные с геодинамическими процессами,

и могут использоваться для изучения процессов механизма подготовки и реализации сейсмических событий.

Степень разработанности темы исследования

Проблема регистрации и интерпретации временных вариаций гравиинерциальных измерений разрабатывается в геофизике на протяжении нескольких десятилетий. В отечественной и зарубежной литературе подробно исследованы приливные, сезонные, атмосферные и гидрологические вариации, а также возможности использования высокоточных гравиметрических наблюдений для изучения геодинамических, сейсмических и вулканических процессов.

Вместе с тем недостаточно разработанными остаются вопросы непрерывной цифровой регистрации вариаций гравиинерциальных измерений на базе доступных отечественных кварцевых гравиметров, автоматизированной видеооцифровки их сигнала и параметризации сложных нестационарных временных рядов с учетом случайных «гостевых» процессов. Требуют дальнейшего развития и методические подходы к совместному использованию спектрально-статистических, фрактальных и феноменологических методов для построения интерпретационных моделей, применимых как к фундаментальным, так и к прикладным задачам геофизического мониторинга. Указанные обстоятельства определили постановку цели и задач настоящего исследования.

Степень достоверности

Достоверность результатов проведенных исследований и обоснованность выводов, научных положений и рекомендаций подтверждена использованием значительного объема репрезентативных экспериментальных данных, полученных с помощью отечественного оборудования (гравиметр ГНУ-КВ), корректным применением известных методов спектрального и корреляционного анализа, апробацией и публикациями.

Разработанный алгоритм и методика опробованы при проведении многократных измерений, обеспечивающих достаточную репрезентативность данных.

Внедрение практических результатов исследования подтверждено полученными свидетельствами о государственной регистрации программ для электронно-вычислительных машин.

Цель исследования

Заключается в разработке подхода к построению и анализу моделей вариаций гравиинерциальных измерений на основе принципов параметризации для понимания процессов подготовки и механизма реализации сейсмических событий.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Разработать методы параметризации вариаций гравиинерциальных измерений для понимания механизма подготовки и реализации сейсмических событий. Изучить теоретические основы и существующие методы регистрации вариаций гравиинерциальных измерений.
2. Адаптировать модель прототипа сейсмологической станции на основе использования кварцевого гравиметра ГНУ-КВ для изучения вариаций гравиинерциальных измерений в реальном времени. Работа выполнена в рамках программы импортозамещения.
3. Разработать и программно реализовать алгоритм оцифровки колебаний кварцевого гравиметра с использованием видеотехнологий в реальном времени
4. Провести сравнительный анализ результатов измерений гравиметром ГНУ-КВ с данными зарубежных аналогов гравиметров марки Sintrex для подтверждения точности и надежности разработанной системы регистрации и параметризации вариаций гравиинерциальных измерений.
5. Исследовать периодичность вариаций гравиинерциальных измерений с использованием критерия Хёрста и выявить их фрактальные свойства.
6. Проанализировать возможности феноменологического метода для моделирования вариаций гравиинерциальных измерений.
7. Разработать методику получения «универсальной» аппроксимирующей функции на основе применения модифицированного преобразования Фурье для моделирования вариаций гравиинерциальных измерений.

Методология и методы исследования

Методологическую основу исследования составляет комплексный подход, объединяющий инструментальные гравиметрические наблюдения, цифровую регистрацию сигнала, методы математической статистики, спектрального и корреляционного анализа, методы параметризации временных рядов и феноменологическое моделирование. В качестве общей исследовательской логики использован безмодельный подход, при котором описание изучаемых процессов строится на основе эмпирических данных, их статистических характеристик и сопоставления результатов, полученных на различных приборах и объектах наблюдения.

В работе использованы следующие методы: непрерывная видеорегистрация положения чувствительного элемента гравиметра ГНУ-КВ; алгоритмы компьютерного зрения и цифровой оцифровки сигналов; спектрально-

статистический анализ, включая НОКФАСС, ПОЛС, R/S-анализ и модифицированное преобразование Фурье; сравнительный анализ данных отечественных и зарубежных гравиметров; методы математического моделирования, корреляционного анализа и геологической интерпретации результатов экспериментальных наблюдений.

Научная новизна

1. Впервые предложено использовать отечественный кварцевый гравиметр ГНУ-КВ для непрерывной регистрации вариаций гравиинерциальных измерений в режиме реального времени на основе непрерывной видеофиксации индикатора кварцевого гравиметра.

2. Создан и программно реализован оригинальный алгоритм оцифровки колебаний индикатора кварцевого гравиметра с использованием видеотехнологий, позволяющий автоматизировать процесс измерений вариаций гравиинерциальных измерений в режиме реального времени.

3. Предложен новый механизм параметризации вариаций гравиинерциальных измерений на основе метода НОКФАСС для понимания процессов механизма подготовки и реализации сейсмических событий.

4. Обнаружено явление периодичности временных вариаций гравиинерциальных измерений (фрактальность) на основе использования критерия Хёрста.

5. Предложен феноменологический подход к моделированию временных вариаций гравиинерциальных измерений.

6. Впервые предложено использование модифицированного преобразования Фурье для получения «универсальной» аппроксимирующей функции при моделировании вариаций гравиинерциальных измерений.

Практическая значимость

Адаптированный гравиметр ГНУ-КВ и разработанный алгоритм оцифровки могут использоваться для непрерывного мониторинга вариаций гравиинерциальных измерений для понимания и изучения механизмов подготовки и реализации геодинамических процессов при фундаментальных геофизических исследованиях. Для решения прикладных задач результаты исследований применимы при выделении скрытых локальных участков тектонически экранированных залежей для увеличения дебита скважин, выделении вертикальных плотностных контактов и тектонических нарушений, прогнозировании зон изменения литологии коллекторов, определении областей повышенной пористости и трещиноватости при проектировании и эксплуатации нефтегазовых скважин. Предлагаемые методики отличаются

экономической доступностью, простотой обработки и высокой информативностью, что обеспечивает их экономическую эффективность.

Личный вклад

Основу диссертации составили исследования, выполненные автором.

Вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, разработке нового подхода к видеофиксации и оцифровке колебаний чувствительного элемента гравиметра ГНУ-КВ, а также в программной реализации алгоритма видеорегистрации временных вариаций гравиинерциальных измерений в режиме реального времени. Автор обосновал применение комплекса методов спектрально-статистического анализа (включая модифицированное преобразование Фурье и феноменологический подход) для параметризации и моделирования инструментальных измерений.

Автор лично участвовал в проведении экспериментальных исследований, математической обработке полученных данных, построении моделей и их геологической интерпретации.

Результаты исследования, составляющие научную новизну работы и выносимые на защиту, получены автором лично.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Доказана и практически обоснована возможность регистрации вариаций гравиинерциальных измерений гравиметром ГНУ-КВ. Разработан и программно реализован алгоритм оцифровки колебаний в режиме реального времени.

2. Предложен новый подход к параметризации и моделированию вариаций гравиинерциальных измерений, основанный на использовании метода неортогонального комбинированного Фурье анализа сглаженных сигналов (НОКФАСС), процедуры оптимального линейного сглаживания (ПОЛС) и модифицированного преобразования Фурье (МПФ). Установлен фрактальный характер (периодичность) временных вариаций результатов гравиинерциальных измерений на основе критерия Хёрста.

3. Впервые предложено использование модифицированного преобразования Фурье (МПФ) для получения «универсальной» аппроксимирующей функции при моделировании гравиинерциальных измерений.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на IX Международном симпозиуме «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (Бишкек, 2024), XVI и XVII Международных научно-практических конференциях «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, МГРИ, 2023, 2024, 2025), Международном семинаре им.

Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (Екатеринбург, 2023; Москва, 2024; Пермь, 2025), на практических семинарах ПАО «НК «Роснефть» по геологическому сопровождению бурения (Москва, 2023), а также на конференции «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» (ИТПЗ РАН, Москва, 2023) и др.

Практическая апробация разработанного аппаратурно-методического комплекса и алгоритмов параметризации была успешно проведена в условиях интенсивной техногенной нагрузки на территории Лебединского карьера Курской магнитной аномалии (КМА). Результаты экспериментального мониторинга динамического отклика среды на массовые взрывы подтвердили применимость модернизированного гравиметра ГНУ-КВ для выявления скрытых структурно-литологических неоднородностей, оценки геомеханического состояния породного массива и картирования зон потенциальной нестабильности.

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 100 наименований. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков и 8 таблиц.

Благодарности

Автор диссертационной работы выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность своим учителям и наставникам: научному руководителю, д.ф.-м.н., профессору А.В. Петрову, научному консультанту, к.г.-м.н., доценту А.П. Белову, а также к.т.н., доценту А.М. Лобанову и д.ф.-м.н., профессору Р.Р. Нигматуллину. Ваше чуткое руководство, профессиональная мудрость и всесторонняя поддержка стали тем фундаментом, на котором построена данная работа.

Отдельное спасибо хочу сказать моему коллеге А.Р. Мухаметзянову за плодотворное сотрудничество, совместный научный поиск.

Также выражаю особую благодарность д. т. н., профессору, руководителю научного направления «Потенциальные поля» Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) В.Н. Конешову и к. т. н. наук, ведущему научному сотруднику Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) М.Н. Дробышеву за неоценимую помощь в организации экспериментальных работ и предоставление возможности проведения исследований на базе фундаментального гравиметрического пункта «Ледово».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели исследования и его основные задачи, указаны научная новизна и положения, выносимые на защиту, приведены сведения о практической ценности.

Глава 1. Проблемы и задачи исследования вариаций гравиинерциальных измерений. В развитие положений, сформулированных во введении, в главе рассмотрены теоретические предпосылки исследования, современное состояние проблемы регистрации вариаций гравиинерциальных измерений и обоснована необходимость модернизации отечественного гравиметра ГНУ-КВ. Первая часть главы посвящена детальному обзору литературы и анализу современного состояния проблемы. Подробно рассмотрена физическая природа вариаций гравиинерциальных измерений, включающая широкий спектр явлений: от суточных и полусуточных приливных колебаний до сезонных гидрологических и атмосферных эффектов. Проведен критический анализ существующих методов регистрации, отмечена сложность разделения гравитационных и инерционных эффектов при измерениях на подвижных основаниях или в условиях микросейсмического шума. Дан подробный обзор современного гравиметрического оборудования, включая автоматизированные гравиметры Scintrex (CG-5, CG-6), Burris, LaCoste Romberg, а также отечественные разработки (ГНШ-МА, ГНУ-КВ). Обоснован выбор серийного кварцевого гравиметра ГНУ-КВ (рисунок 1) для проведения исследований, обусловленный его высокой чувствительностью, надежностью упругой системы, портативностью и потенциалом для работы в режиме непрерывной регистрации при условии модернизации.



Рисунок 1. Общий вид гравиметра наземного узкодиапазонного с кварцевой чувствительной системой класса «В» ГНУ-КВ

Подчеркнута необходимость регистрации инфранизкочастотных колебаний (в диапазоне менее 1 Гц) для анализа процессов подготовки сейсмических событий, которые часто пропускаются стандартными сейсмологическими станциями.

Глава 2. Аппаратура и методика эксперимента. После обоснования выбора гравиметра ГНУ-КВ и необходимости его модернизации в главе описаны аппаратные решения и методика экспериментальной регистрации вариаций гравиинерциальных измерений. Для реализации задачи непрерывного мониторинга штатная оптическая система визуального отсчета была заменена на цифровую систему видеофиксации. Использован электронный окуляр (камера-микроскоп Levenhuk M35 Base), жестко закрепленный на окуляре прибора и фиксирующий положение светового блика от индикатора маятника (рисунок 2). Это позволило исключить субъективные ошибки оператора и автоматизировать процесс измерений. Разработан и реализован специальный программный алгоритм распознавания видеоизображения, основанный на методах компьютерного зрения. Алгоритм позволяет автоматически определять координаты центра индикатора (рисунок 3) и формировать цифровой временной ряд с последующим усреднением и фильтрацией до 5 Гц. Корректность процедуры оцифровки подтверждена статистическим анализом распределения измеренных значений: максимальная ошибка аппроксимации нормального распределения не превышает 2,7 %, максимальное отклонение функции распределения составляет 0,027, коэффициент детерминации – не менее 99 %. Описаны процедуры калибровки модернизированной системы, выполненные двумя независимыми способами: динамическим импульсным методом и статическим градиентным методом.



Рисунок 2. Гравиметр ГНУ-КВ с установленной камерой (цифровым окуляром)

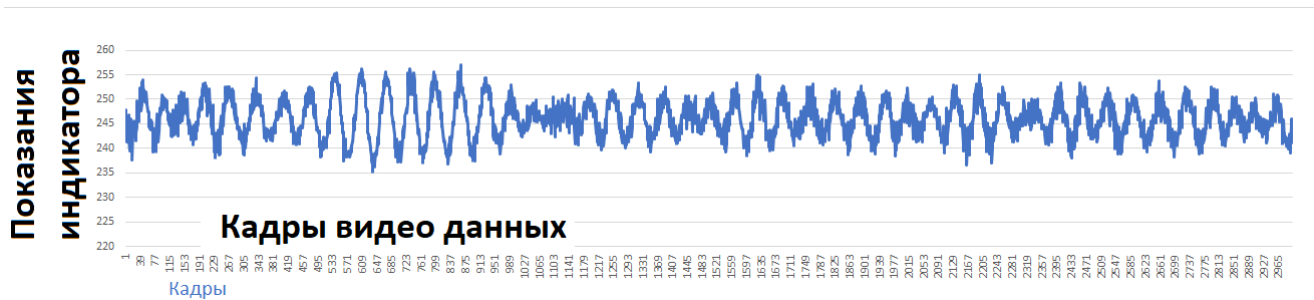


Рисунок 3. Пример оцифрованного сигнала гравиметра (фрагмент). По оси абсцисс отложено время t , по оси ординат – смещение индикатора маятника (в делениях шкалы или пикселях)

Глава 3. Современные методы параметризации вариаций гравиинерциальных измерений. После описания аппаратной реализации эксперимента и получения цифрового временного ряда в главе рассмотрен математический аппарат, используемый для параметризации и анализа зарегистрированных данных. Вводится понятие параметризации как извлечение из данных наблюдений минимального набора наиболее существенных параметров, характеризующих изучаемую систему или процесс. Описан примененный метод НОКФАСС (неортогональный комбинированный Фурье анализ сглаженных сигналов), который базируется на резонансных свойствах функции Дирихле и позволяет определять амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) случайных процессов с высокой точностью (рисунок 4). Детально рассмотрен R/S-анализ (метод нормированного размаха) для расчета показателя Хёрста. Этот метод использован для оценки фрактальных свойств, долговременной памяти и степени хаотичности временных рядов гравиинерциальных измерений. Экспериментально установлено, что распределение измеренных значений с высокой точностью (ошибка аппроксимации не более 2,7%) соответствует нормальному закону. Анализ показателя Хёрста для записей вариаций гравиинерциальных измерений выявил устойчивое наличие цикличности (антиперсистентности) в вариациях гравиинерциальных измерений, характеризующееся значениями. Это означает, что система стремится компенсировать отклонения и вернуться к равновесному состоянию.

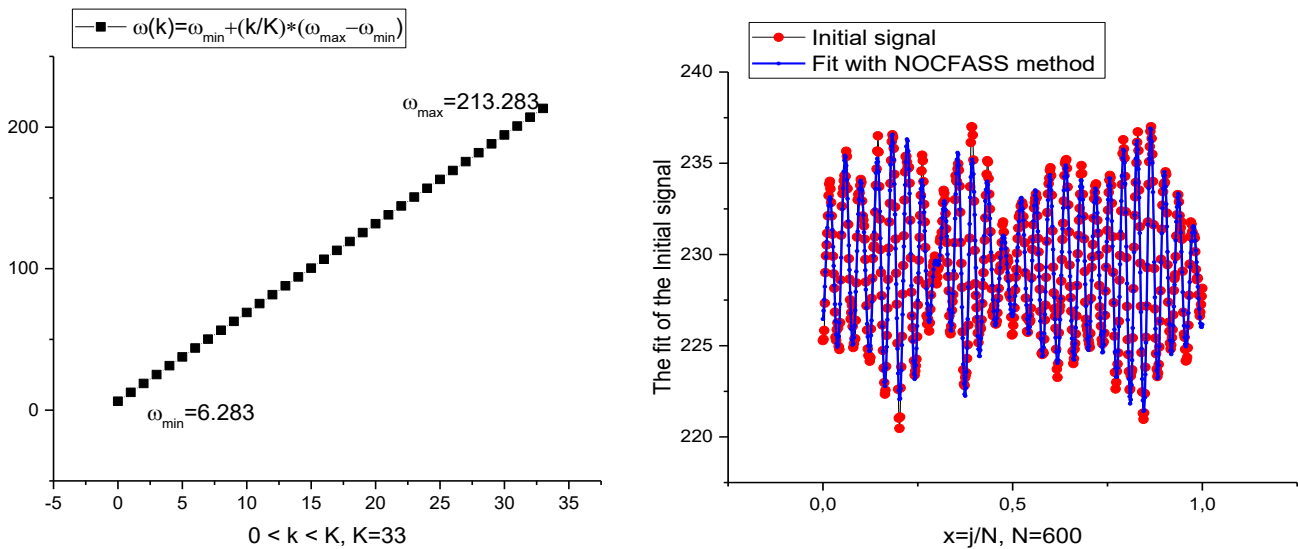


Рисунок 4. Слева показан усечённый НОКФАСС-спектр, справа – аппроксимация исходного сигнала. Точность аппроксимации 0,01%

Глава 4. Феноменологический метод моделирования и анализа вариаций гравиинерциальных измерений. В развитие рассмотренных методов параметризации в главе приведены результаты экспериментальной проверки и феноменологического моделирования вариаций гравиинерциальных измерений на базе фундаментального гравиметрического пункта «Ледово» ИФЗ РАН. Проведены длительные синхронные измерения группой из четырех гравиметров: одного модернизированного ГНУ-КВ и трех эталонных приборов Scintrex (модели CG-5-350, CG-5-351, CG-6). Выполнен кросс-корреляционный и спектральный анализ полученных записей. Проведено сравнение различных математических моделей аппроксимации экспериментальных данных: полиномиальных (2-4 степени), моделей на основе ряда Фурье (1-4 гармоники) и экспоненциальных моделей. Установлено, что полиномиальная модель 3-й степени (R^2) и экспоненциальная модель с 2 членами (R^2) обеспечивают наилучший баланс между точностью описания и сложностью модели. Для построения обобщенной феноменологической модели предложен метод ПОЛС (процедура оптимального линейного сглаживания). Данный метод позволяет эффективно разделять регулярные составляющие сигнала и случайные «гостевые» процессы, вызванные неконтролируемыми внешними факторами. Доказана высокая корреляция спектральных характеристик между показаниями модернизированного ГНУ-КВ и эталонного CG-6, что подтверждает метрологическую состоятельность разработанного комплекса (рисунок 5).

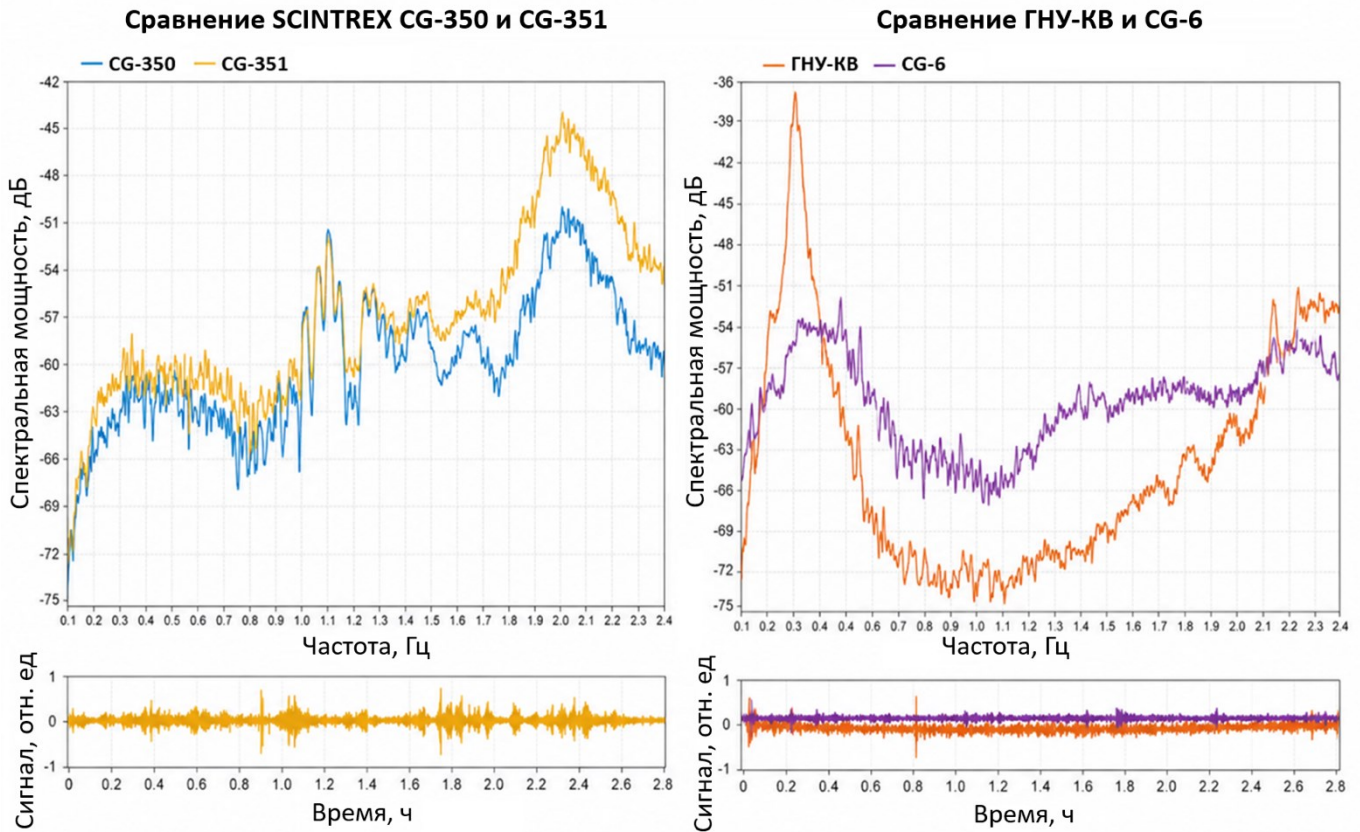


Рисунок 5. Сравнение АЧХ гравиметров SCINTREX CG-5-350 и SCINTREX CG-5-351 – слева; ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6 – справа

Глава 5. Применение модифицированного преобразования Фурье для моделирования вариаций гравиинерциальных измерений. После феноменологического анализа экспериментальных данных в главе обосновано применение модифицированного преобразования Фурье как метода построения «универсальной» аппроксимирующей функции для описания квазипериодических вариаций гравиинерциальных измерений. Рассмотрена проблема классического Фурье анализа, предполагающего строгую периодичность сигнала, что редко выполняется для реальных геофизических данных. Предложено использовать модифицированное преобразование Фурье (МПФ), применимое к сигналам с частотной и фазовой модуляцией (ЧФМ). Суть метода заключается в преобразовании аргумента функции косинуса $F(t)$ таким образом, чтобы свести задачу к разложению строго периодической функции. Это позволяет корректно описывать аperiodические процессы в рамках гармонического анализа. С помощью МПФ были получены «универсальные» аппроксимирующие функции для амплитудно-частотных характеристик гравиметров ГНУ-КВ и CG-6. Достигнута высокая точность аппроксимации с относительной ошибкой менее 0,2% (рисунок 6).

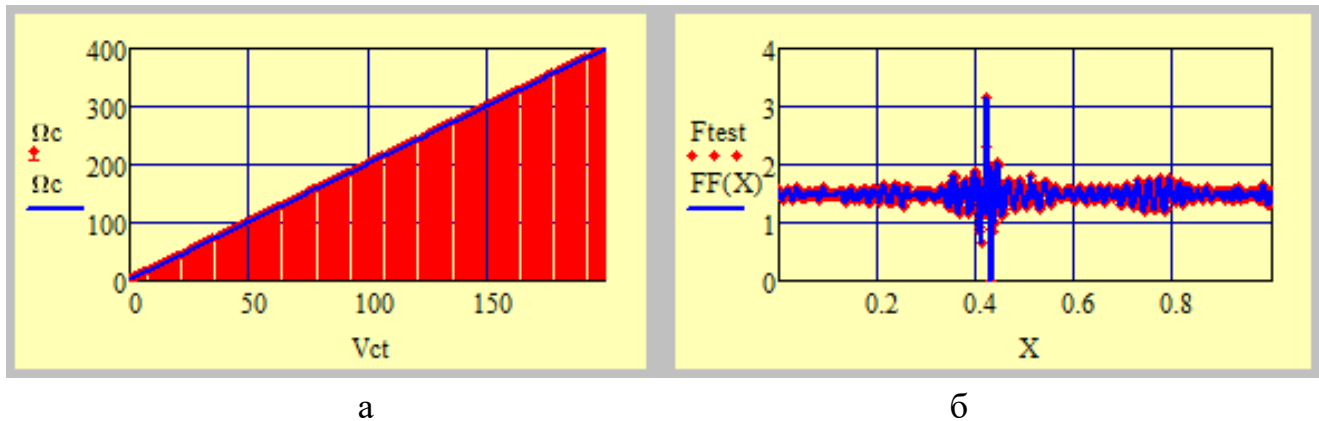


Рисунок 6. Слева (а) показан укороченный спектр. Справа (б) показана аппроксимация распределения $F_2(t)$. Относительная ошибка аппроксимации не превышает 0,2 %

Также показано, что распределение фаз преобразованного сигнала является равномерным, что свидетельствует о полноте извлечения информации из временного ряда.

Глава 6. Гравиметрический мониторинг для параметризации процессов техногенной деформации земной коры при разработке месторождений с использованием взрывных технологий (на примере Курской магнитной аномалии). После разработки и проверки методов регистрации, параметризации и моделирования в данной главе показана практическая апробация предложенной методики в промышленных условиях Лебединского карьера Курской магнитной аномалии. Полевые работы проводились на участке Лебединского карьера КМА по профилю (рисунок 7), пересекающему различные структурно-литологические зоны: монолитные железистые кварциты, пластичные сланцевые пачки и зоны тектонических нарушений. Выполнялась регистрация вариаций гравиинерциальных измерений и динамического отклика среды на взрывное воздействие в 7 точках профиля.

Выполнен расчет комплекса статистических и фрактальных параметров: энергии сигнала, эксцесса (мера импульсности), энтропии (мера хаотичности) и показателя Хёрста (явление периодичности). Проведено картирование геомеханического отклика массива.

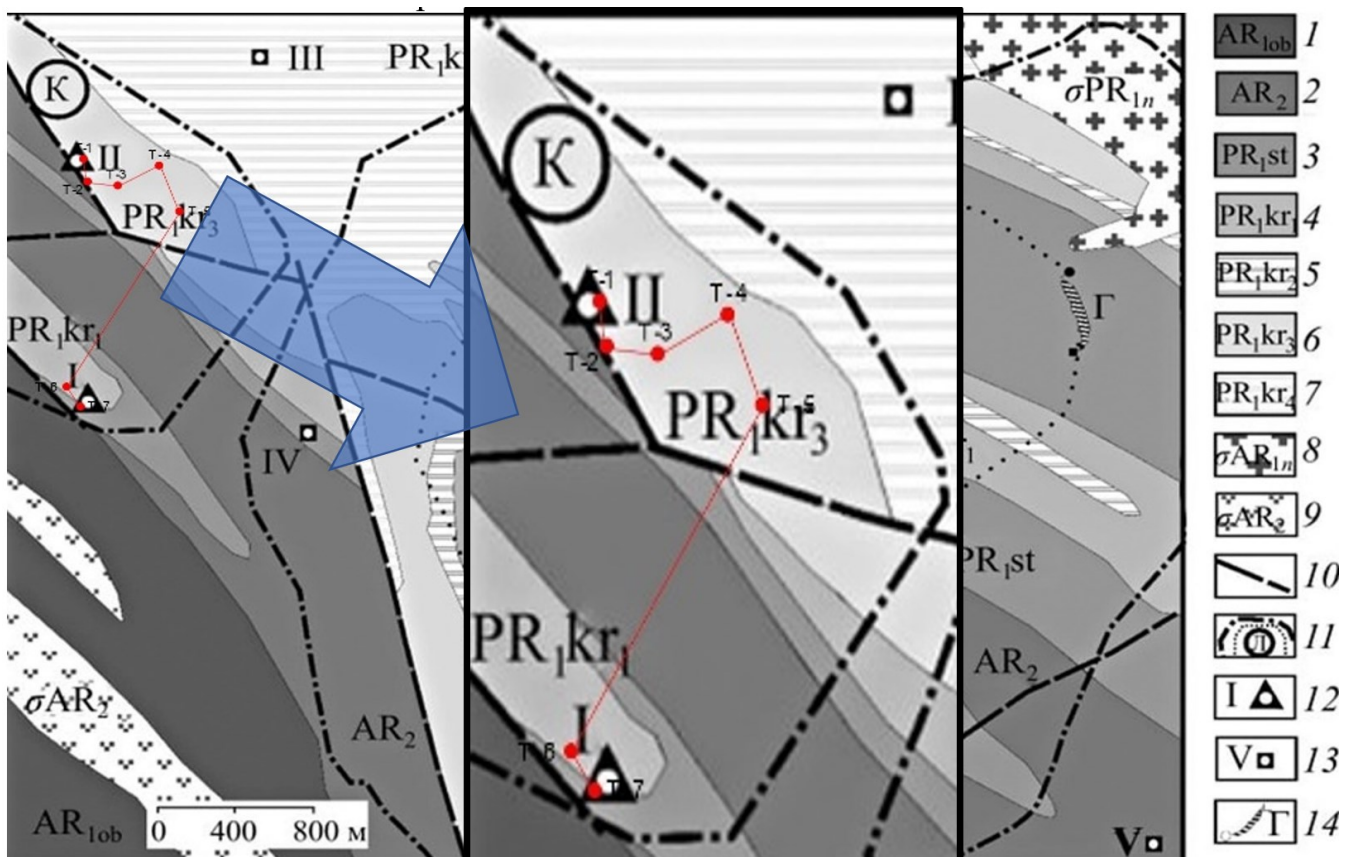


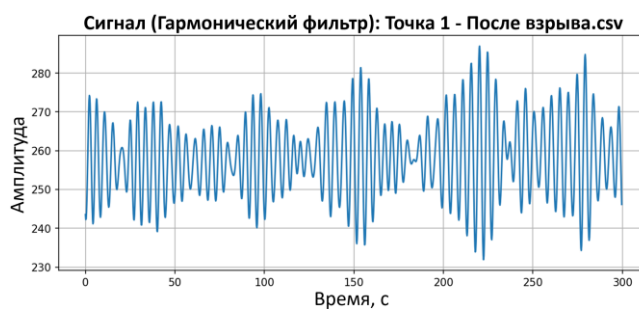
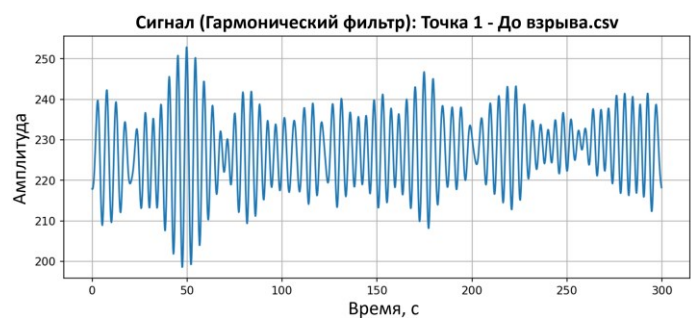
Рисунок 7. Профиль на тектонической схеме участка работ: Т1–Т7 – точки пунктов измерений на профиле; 1 – отложения обоянской серии нижнего архея (плагитограниты, гнейсы); 2 – отложения михайловской серии верхнего архея (амфиболиты, актинолиты); 3–7 – отложения курской серии нижнего протерозоя: 3 – отложения стойленской свиты (сланцы двуслюдяные, конгломераты), 4 – отложения нижней коробковской железорудной подсвиты (сланцы метаморфизованные), 5 – отложения промежуточной коробковской сланцевой подсвиты (сланцы филлитовые), 6 – отложения верхней коробковской железорудной подсвиты (железистые кварциты), 7 – отложения верхней сланцевой подсвиты (сланцы слюдистые); 8–9 – интрузивные образования: 8 – Стойло-Николаевский комплекс нижнего протерозоя (гранодиориты), 9 – Сергиевский комплекс верхнего архея (серпентиниты); 10 – разломы; 11 – границы Коробковского (К) и Лебединского (Л) железорудных месторождений (штрихпунктир), контур Лебединского карьера (точки); 12 – пункты сейсмической и гидрогеологической регистрации; 13 – пункты сейсмической регистрации; 14 – контур блока и его обозначение: начало подрыва – треугольник и квадрат, окончание – кружок

Например, монолитные блоки кварцитов (точка Т-1, рисунок 8) характеризуются упругим откликом с ростом энергии (RMS) и сохранением структуры сигнала, действуя как волноводы.

Состояние ДО
(Точка 1 – до взрыва)

Состояние ПОСЛЕ
(Точка 1 – после взрыва)

Временная область сигнала



Частотно-временное распределение (спектрограмма)

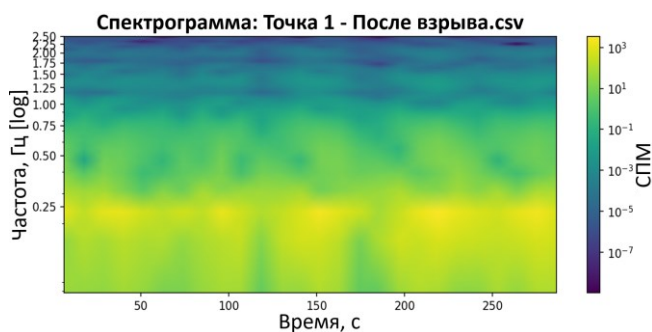
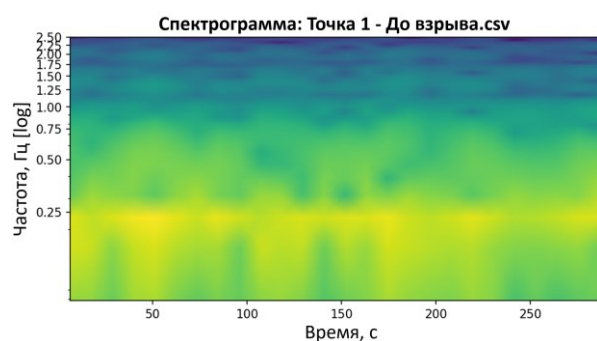


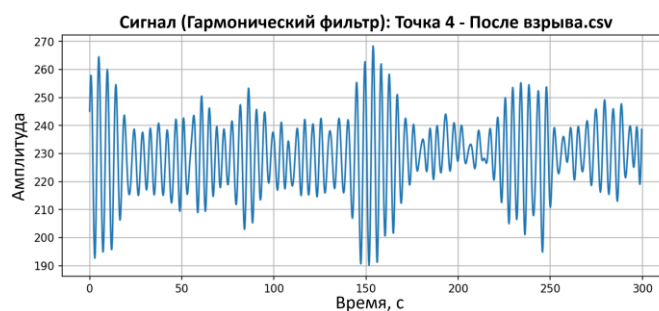
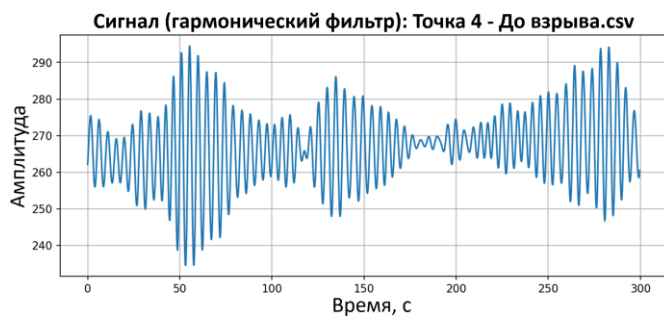
Рисунок 8. Временное и частотное представление замера на точке профиля Т-1

Зоны разломов (точка Т-4, рисунок 9) проявляют свойства демпфера, демонстрируя резкое падение энергии сигнала и отсутствие роста эксцесса, что указывает на поглощение энергии в разуплотненной среде.

Состояние ДО
(Точка 4 – до взрыва)

Состояние ПОСЛЕ
(Точка 4 – после взрыва)

Временная область сигнала



Частотно-временное распределение (спектрограмма)

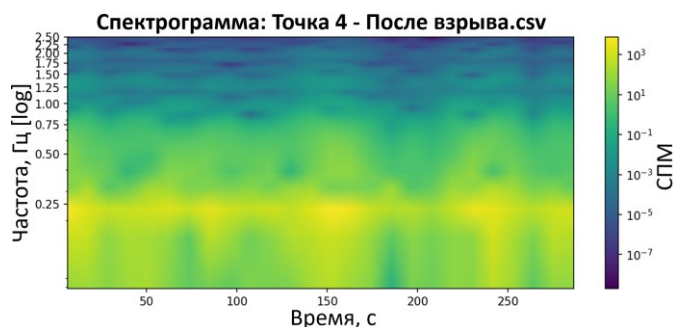
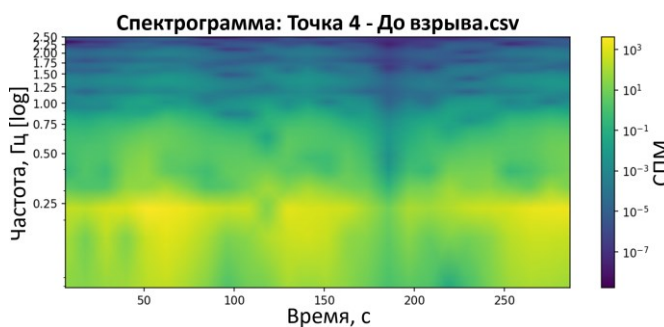


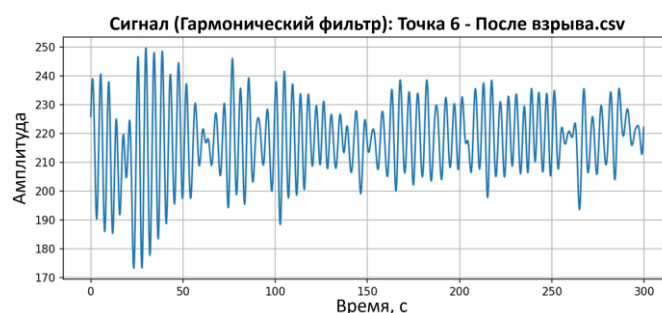
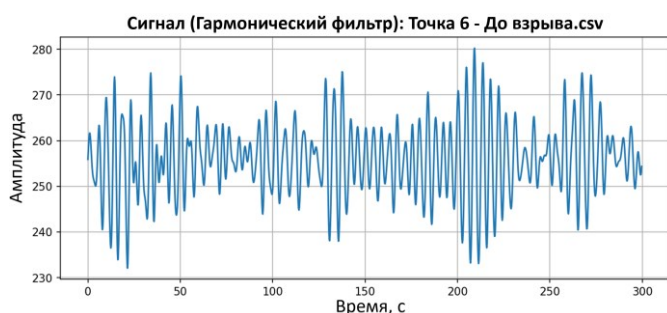
Рисунок 9. Временное и частотное представление замера на точке профиля Т-4

Зоны критического состояния (точка Т-6 на контакте пород) демонстрируют фазовый переход (рисунок 10). Смещение спектра в низкочастотную область и резкое возрастание показателя Хёрста до (стохастический режим, «белый шум»). Это потенциальный очаг техногенной сейсмичности.

Состояние ДО
(Точка 6 – до взрыва)

Состояние ПОСЛЕ
(Точка 6 – после взрыва)

Временная область сигнала



Частотно-временное распределение (спектрограмма)

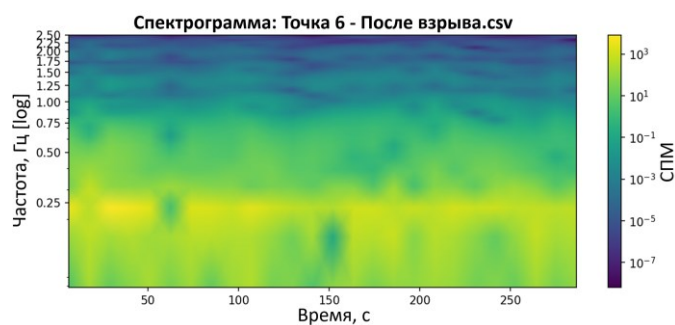
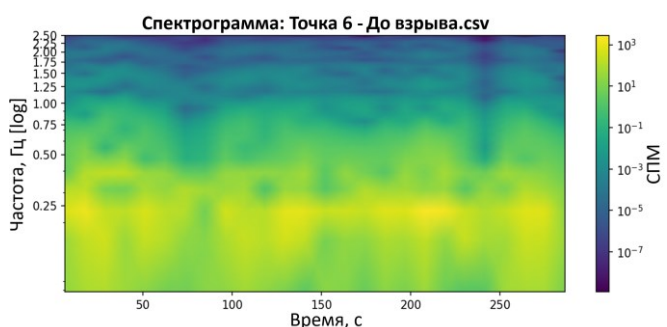


Рисунок 10. Временное и частотное представление замера на точке профиля Т-6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты и выводы проведенного исследования заключаются в следующем:

– Доказана и практически обоснована возможность регистрации вариаций гравиинерциальных измерений гравиметром ГНУ-КВ. Разработан и программно реализован алгоритм оцифровки колебаний в режиме реального времени. Технически реализована система видеофиксации колебаний чувствительного элемента гравиметра. Статистическая оценка корректности процедуры оцифровки показала согласованность экспериментального распределения с нормальным законом: максимальная ошибка аппроксимации не превышает 2,7%, максимальное отклонение функции распределения составляет 0,027, коэффициент детерминации — не менее 99%. Сравнительный анализ с эталонным Scintrex CG-6 подтвердил сопоставимость регистрируемых вариаций.

– Предложен новый подход параметризации вариаций гравиинерциальных измерений для построения физико-геологической модели среды на основе использования методов НОКФАСС и ПОЛС. Использование критерия Хёрста позволило установить явление периодичности вариаций гравиинерциальных измерений (фрактальность). НОКФАСС обеспечивает параметризацию и сжатие регистрируемых вариаций гравиинерциальных измерений. Критерий Хёрста выявляет скрытую периодичность и структурные изменения (нарушение стационарности). Феноменологическая модель (ПОЛС) позволяет учитывать и разделять регулярные и «гостевые» (случайные) процессы, что невозможно при классических подходах.

– Впервые предложен новый оригинальный подход к моделированию гравиинерциальных измерений на основе «универсальной» аппроксимирующей функции, построенной с использованием модифицированного преобразования Фурье. МПФ позволяет математически корректно описывать квазипериодические сигналы. Достигнута высокая точность аппроксимации (ошибка $< 0,2\%$) для данных разных приборов (ГНУ-КВ и CG-6).

– Лабораторная верификация на фундаментальном пункте «Ледово» и полевая апробация на участке Лебединского карьера КМА подтвердили прикладную состоятельность разработанного подхода. Показана связь между параметрами вариаций гравиинерциальных измерений и фактическим геологическим строением среды.

Практическая ценность подтверждается тем, что разработанная технология обеспечивает доступный и автоматизированный мониторинг гравиинерциальных измерений на базе модифицированного гравиметра ГНУ-КВ. Эта технология, может быть, применена для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач

геологии и геофизики. Экономическая эффективность метода обусловлена относительной дешевизной и простотой применяемого оборудования при сохранении высокой информативности получаемых данных.

В то же время, результаты исследования выявили и ряд новых вопросов, требующих дальнейшего изучения. В частности, наличие существенных случайных компонентов в сигнале затрудняет однозначное математическое описание гравиинерциальных измерений. Целесообразно расширить длительность и географию наблюдений, внедряя сеть подобных сейсмогравиметрических станций в различных регионах, особенно в сейсмически активных зонах, для накопления статистики. Дальнейшее совершенствование аппаратуры (например, использование прямых цифровых датчиков положения маятника) может повысить точность и разрешающую способность мониторинга. Планируется развитие алгоритмов распознавания аномальных сигналов и интеграция гравиметрических данных с другими геофизическими методами, что позволит создать комплексную систему раннего выявления геодинамических изменений.

Таким образом, проделанное исследование внесло значимый вклад в методологию регистрации и анализа вариаций гравиинерциальных измерений. Разработанные подходы и полученные научные результаты подтверждают достижение поставленной цели, формируют фундаментальную основу для последующих шагов в изучении процессов механизма подготовки и реализации геодинамических событий.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Нигматуллин Р.Р., Белов А.П., **Ерохин А.М.**, Петров А.В. Применение модифицированного преобразования Фурье для моделирования вариаций поля силы тяжести // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2025. – Т. 67, № 4. – С. 87–101. – DOI 10.32454/0016-7762-2025-67-4-87-101. – EDN ОНОХJB. (Перечень ВАК – 1.6.9. Геофизика (технические науки), К-1, СА(pt), GeoRef).
2. Нигматуллин Р.Р., Белов А.П., **Ерохин А.М.**, Мухаметзянов А.Р., Конешов В.Н., Дробышев М.Н. Построение и анализ некоторых математических моделей, связанных с временными вариациями гравитационного поля // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2025. – Т. 67, № 2. – С. 76–94. – DOI 10.32454/0016-7762-2025-67-2-76-94. – EDN JSULIZ. (Перечень ВАК – 1.6.9. Геофизика (технические науки), К-1, СА(pt), GeoRef).
3. Лобанов А.М., Белов А.П., **Ерохин А.М.**, Венедиктов К.В. Алгоритм распознавания видеофайла для оцифровки колебаний аналогового индикатора на примере кварцевого гравиметра ГНУ-КВ // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2024. – Т. 66, № 1. – С. 128–134. – DOI 10.32454/0016-7762-2024-66-1-128-134. – EDN SINCVC. (СА(pt), GeoRef).
4. Белов А.П., Лобанов А.М., **Ерохин А.М.** Опыт амплитудно-частотной оценки колебания грунтов в диапазоне 0,05–0,5 Гц с использованием чувствительного элемента гравиметра ГНУ-КВ // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2023. – Т. 65, № 2. – С. 67–73. – DOI 10.32454/0016-7762-2023-65-2-67-73. – EDN VLTCHP. (СА(pt), GeoRef).

Статьи, опубликованные в других изданиях:

5. **Ерохин А.М.**, Петров А.В., Белов А.П. Анализ временных вариаций гравитационного поля Земли: эксперименты и моделирование с использованием машинного обучения // XVII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле». Тезисы докладов. – 2025. – Т. 1. – С. 262–265.
6. Нигматуллин Р.Р., Белов А.П., Петров А.В., **Ерохин А.М.**, Мухаметзянов А.Р., Конешов В.Н., Дробышев М.Н. Моделирование вариаций гравитационного поля // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: сборник научных трудов. — 2025. – Вып. 1 (51). – С. 208–211.
7. Нигматуллин Р.Р., Белов А.П., **Ерохин А.М.** Параметризация вариаций гравитационного поля на основе использования НОКФАСС-метода // IX Международный симпозиум «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов». Тезисы докладов. – Бишкек, 2024. – С. 222–224.

8. Нигматуллин Р.Р., Белов А.П., **Ерохин А.М.** Применение R/S-анализа (метод Хёрста) для изучения вариаций гравитационного поля // IX Международный симпозиум «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов». Тезисы докладов. – Бишкек, 2024. – С. 225–227.

9. Белов А.П., **Ерохин А.М.**, Мухаметзянов А.Р. Оценка достоверности и статистической значимости результатов колебаний индикатора кварцевого гравиметра ГНУ-КВ // Материалы XI Международной научной конференции молодых ученых: в 5 т. – 2024. – С. 16–19.

10. Белов А.П., Лобанов А.М., Утесинов В.Н., **Ерохин А.М.**, Венедиктов К.В. Статистический анализ функции распределения колебаний индикатора кварцевого гравиметра // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 50-й юбилейной сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. – М., 2024. – С. 38–41.

11. **Ерохин А.М.**, Венедиктов К.В., Лобанов А.М., Белов А.П. Анализ естественных низкочастотных колебаний горных пород с помощью кварцевого гравиметра для решения прикладных задач геологии // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: материалы III Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. А.А. Соловьева. – 2023. – С. 87–91.

12. **Ерохин А.М.**, Бойко А.М., Белов А.П., Лобанов А.М., Кудрявцева У.Д., Венедиктов К.В. Оцифровка колебания индикатора прибора ГНУ-КВ. Использование алгоритма распознавания видео // XVI Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле». Тезисы докладов. – 2023. – Т. 1. – С. 217–220.

13. Бойко А.М., **Ерохин А.М.**, Белов А.П., Лобанов А.М., Кудрявцева У.Д., Венедиктов К.В. Сравнение результатов замеров variability гравитационного поля между двумя гравиметрами ГНУ-КВ // XVI Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле». Тезисы докладов. – 2023. – Т. 5. – С. 249–252.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. А. с. № 2023611494 Российская Федерация. Информационная система управления бурением [Текст] / К.В. Кемпф (RU), Д.В. Шкарин (RU), Д.В. Турчановский (RU), **А.М. Ерохин (RU)** и М.Ф. Ахметов (RU); Акционерное общество «Зарубежнефть» (RU). – Заявка № 2022686598; зарегистрир. 30.12.2022; опубл. 20.01.2023. – 400 МБ; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50134398>

2. А. с. № 2023611110 Российская Федерация. Система управления «Автоплан» (СУ «Автоплан») [Текст] / **А.М. Ерохин (RU)**, Н.С. Цындра (RU),

К.В. Венедиктов (RU), А.Е. Раков (RU), Н.С. Самохвалов (RU); Общество с ограниченной ответственностью «Петровайзер Софт» (RU). – Заявка № 2022682466; зарегистрир. 22.11.2022; опубл. 17.01.2023. – 200 МБ; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50133973>

3. А. с. № 2024619583 Российская Федерация. Цифровая платформа «Эволюция» (ЦП «Эволюция») [Текст] / Т. Н. Нестерова (RU), А.А. Макаров (RU), Д.Ю. Сапрыкин (RU), Д.А. Кудрявцев (RU), А.В. Пономарев (RU), П.В. Семенов (RU), **А.М. Ерохин (RU)** [и др.]; Общество с ограниченной ответственностью «Петровайзер Софт» (RU). – Заявка № 2024617764; зарегистрир. 11.04.2024; опубл. 24.04.2024. – 800 МБ; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67263211>

Подписано в печать 03.07.2026 г.
Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.
Тираж 100 экз.

Отпечатано в ООО «ТФП»
170006, г. Тверь, Беляковский пер., д. 46
Тел.: +7 (4822) 35-32-13