



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Российский государственный
геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ)

На правах рукописи
УДК 550.831+ 551.2.02

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 на кафедре Геофизики Российского государственного геологоразведочного университета 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:

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ).

Защита состоится «___» _____ 2026 г. в ___ час. ___ мин. на заседании диссертационного совета [Шифр совета] при [Название организации] по адресу: [Индекс, Город, Улица, Дом, Аудитория].

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке [Название организации] и на сайте [Адрес сайта организации].

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета [Шифр совета], [Ученая степень, звание] _____ [И.О. Фамилия]

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Актуальность темы обусловлена необходимостью совершенствования методов прогноза сейсмических событий и развития высокоточных систем геофизического мониторинга. В условиях роста потребности в надежном контроле геодинамических процессов, внедрение полностью цифровых систем на основе отечественных гравиметров является критически важной задачей импортозамещения и технологического суверенитета.

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 гравитационного поля 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 достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность 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 подготовки процессов механизма реализации сейсмических событий.

Задачи исследования

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 Херста и выявить их фрактальные свойства.
6. Проанализировать возможности феноменологического метода для моделирования вариаций гравиинерциальных измерений.
7. Разработать методику получения «универсальной» подгоночной функции на основе применения модифицированного преобразования Фурье для моделирования вариаций гравиинерциальных измерений.

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 Херста.
 5. Предложен феноменологический подход к моделированию временных вариаций гравиинерциальных измерений.
 6. Впервые предложено использование модифицированного преобразования Фурье для получения «универсальной» подгоночной 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.

Личное участие автора в получении научных результатов, изложенных в диссертации

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.

Защищаемые положения

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. Установлен фрактальный характер (периодичность) вариаций гравиинерциальных измерений на основе критерия Херста. Предложен новый подход к параметризации и моделированию вариаций гравиинерциальных измерений исследуемого района, основанный на

использовании методов НОКФАСС, ПОЛС и модифицированного преобразования Фурье («универсальная» подгоночная функция).

3. Разработан и программно реализован оригинальный алгоритм оцифровки колебаний чувствительного элемента гравиметра с использованием видеотехнологий, обеспечивающий автоматизацию обработки данных и повышение точности 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 (полевая) 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 неустойчивости.

Публикации

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 диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 100 наименований и приложений. Работа изложена на 171 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков и 8 таблиц.

Благодарности

Автор 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».

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.

Первая глава 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.



Рис. 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.

Вторая глава содержит техническое описание модернизации гравиметра ГНУ-КВ и разработанной методики сбора данных. 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 в реальном времени определять координаты центра индикатора (рисунок 3) с субпиксельной точностью, оцифровывая колебания с исходной частотой 30 Гц (с последующим усреднением и фильтрацией до 5 Гц). Описаны процедуры калибровки модернизированной системы, выполненные двумя независимыми способами: динамическим импульсным методом (подача калибровочного сигнала известной амплитуды микрометрическим винтом) и статическим градиентным методом (измерения на разных высотах с известным вертикальным градиентом). Установлен масштабный коэффициент системы. Подробно рассмотрены этапы предварительной обработки «сырых» данных: коррекция линейного и нелинейного дрейфа нуля, медианная фильтрация импульсных помех и сглаживание высокочастотного шума.



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

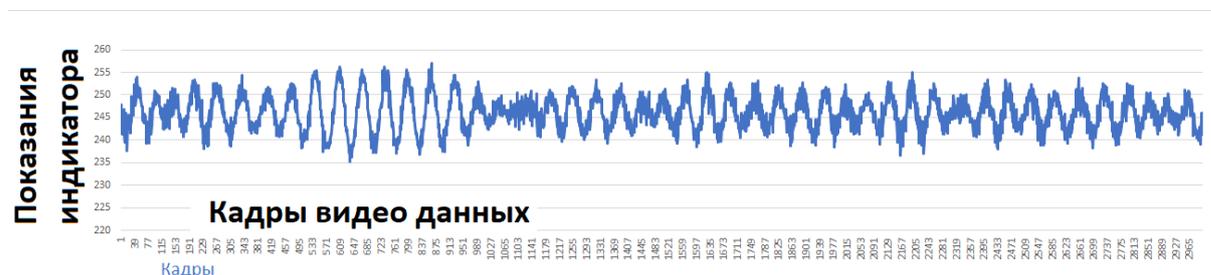


Рис. 3. Пример оцифрованного сигнала гравиметра (фрагмент). По оси абсцисс отложено время t , по оси ординат – смещение индикатора маятника Δx (в делениях шкалы или пикселях).

Третья глава посвящена описанию математического аппарата, использованного для анализа временных рядов. 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 Херста. 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 Херста для записей вариаций гравиинерциальных измерений выявил устойчивое наличие цикличности (антиперсистентности) в вариациях гравиинерциальных измерений, характеризующееся значениями $H < 0.5$. Это означает, что система стремится компенсировать отклонения и вернуться к равновесному состоянию.

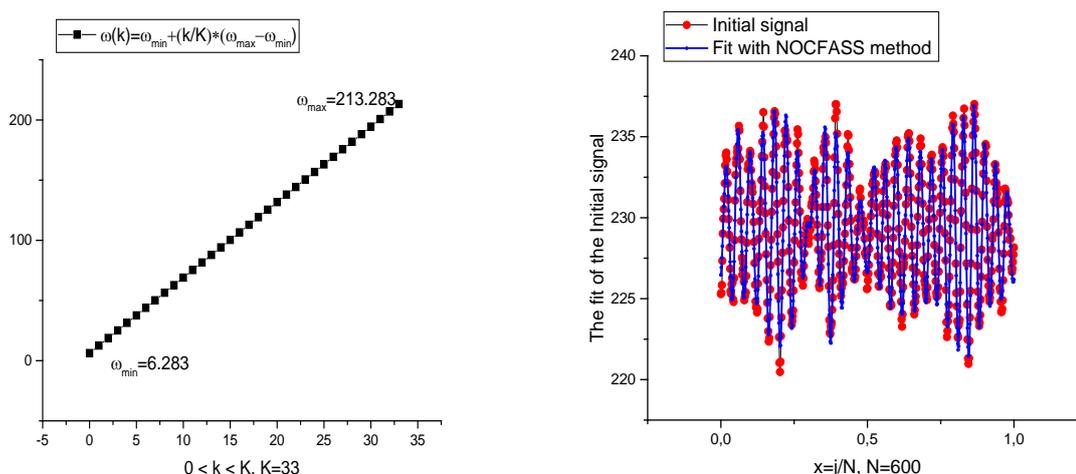


Рис. 4. Слева показан усеченный НОКФАСС спектр, справа подгон исходного сигнала, осуществленный с помощью формулы (1). Точность подгона 0.01%.

Четвертая глава описывает результаты экспериментов, проведенных 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 степеней), моделей на основе ряда Фурье (1-4 гармоники) и экспоненциальных моделей. Установлено, что полиномиальная модель 3-й степени ($R^2 = 0.9440$) и экспоненциальная модель с 2 членами ($R^2 = 0.7701$) 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).

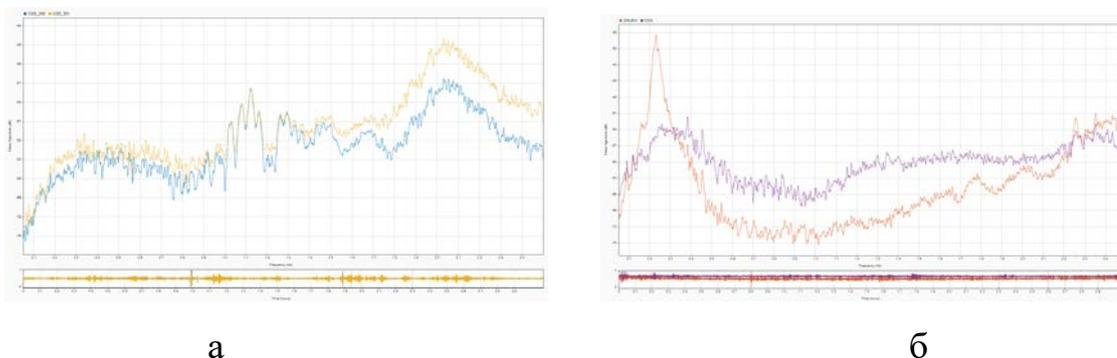


Рис. 5. Сравнение АЧХ гравиметров (а - сравнение SCINTREX CG-350 и CG-351; б – ГНУ-КВ и CG-6)

Пятая глава представляет теоретическое обоснование и практическое применение нового подхода к описанию квазипериодических сигналов. 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» подгоночные функции для амплитудно-частотных характеристик гравиметров ГНУ-КВ и СГ-6. Достигнута высокая точность подгона с относительной ошибкой менее 0.2% (рисунок 6).

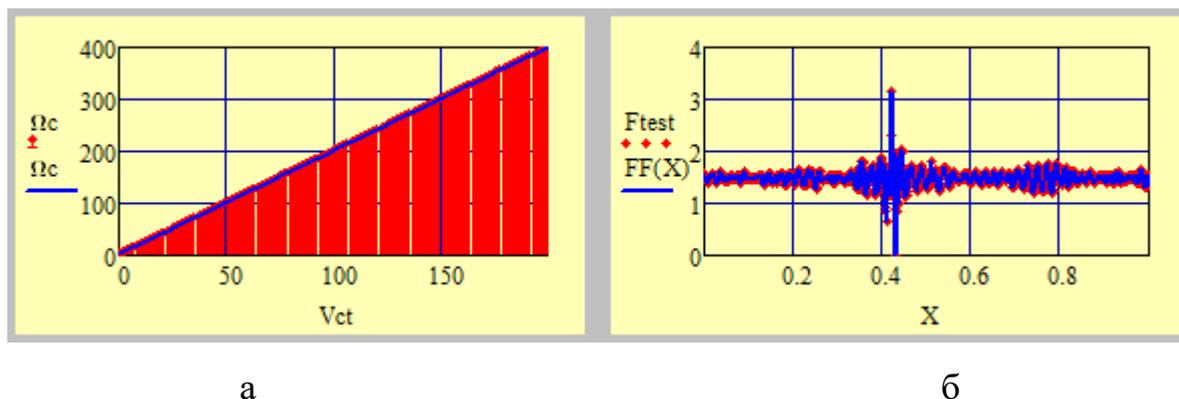


Рис. 6. Слева (а) показан укороченный спектр. Справа (б) показан подгон распределения $F_2(t)$. Относительная ошибка не превышает 0.2%.

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

Шестая глава посвящена практической апробации разработанной методики в промышленных условиях. 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.

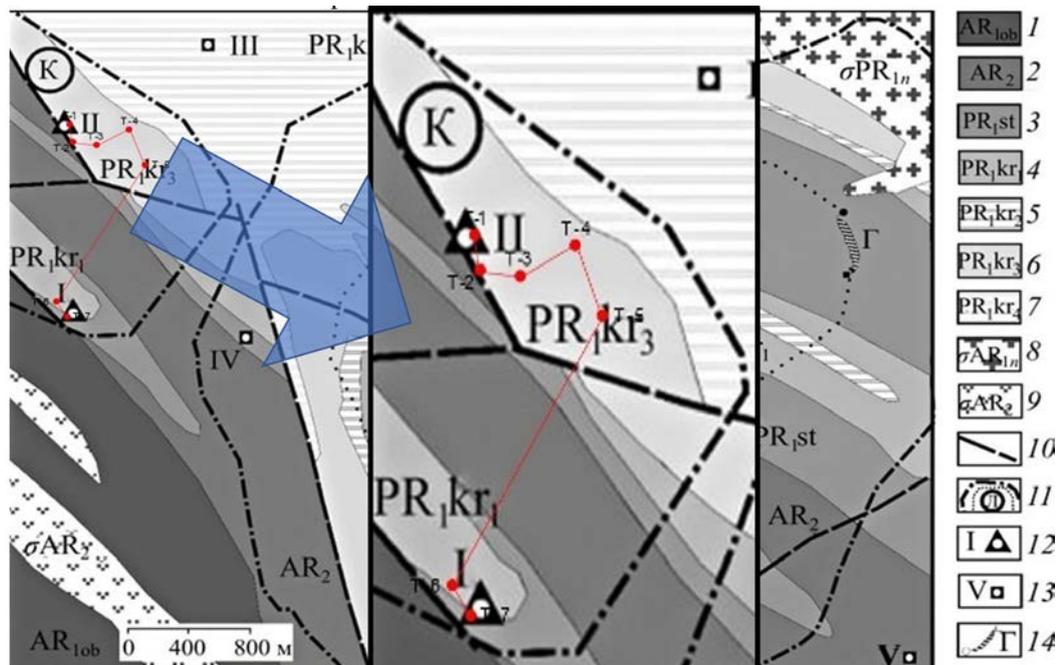


Рис. 7. Профиль на тектонической схеме участка работ: Т1-Т7 – точки пунктов измерений на профиле; 1 – отложения обоянской серии нижнего архея (плаггиогранит, гнейс), 2 – отложения михайловской серии верхнего архея (амфиболит, актинолит); 3-7 – отложения курской серии нижнего протерозоя: 3 – отложения стойленской свитой (сланцы двуслюдяные, конгломерат), 4 – отложения нижней коробковской железорудной подсвитой (сланцы мета морфизованные), 5 – отложения промежуточной коробковской сланцевой подсвитой (сланцы филлитовые), 6 – отложения верхней коробковской железорудной подсвитой (железистые кварциты), 7 – верхней сланцевой подсвитой (сланцы слюдяные); 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 (штрих-пунктир), 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.

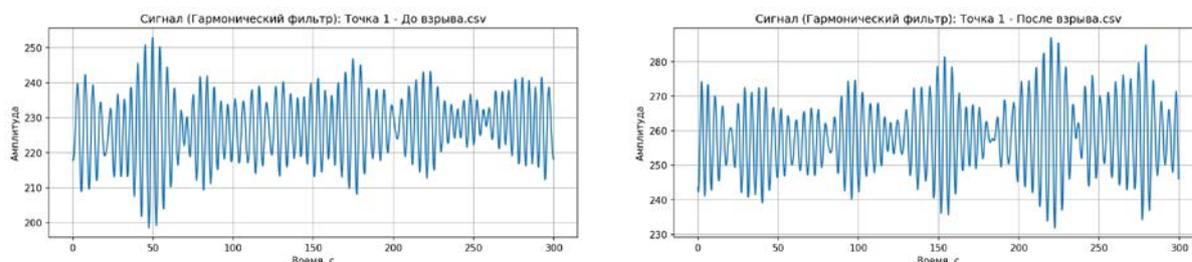
Выполнен расчет комплекса статистических и фрактальных параметров: энергии сигнала, эксцесса (мера импульсности), энтропии (мера хаотичности) и показателя Херста (явление периодичности). Проведено картирование геомеханического отклика массива.

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)

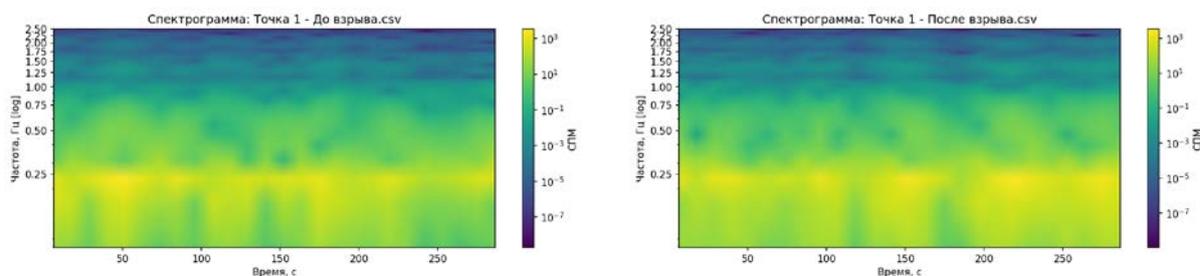


Рис. 8. Временное и частотное представление замера на точке профиля Т-1.

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.

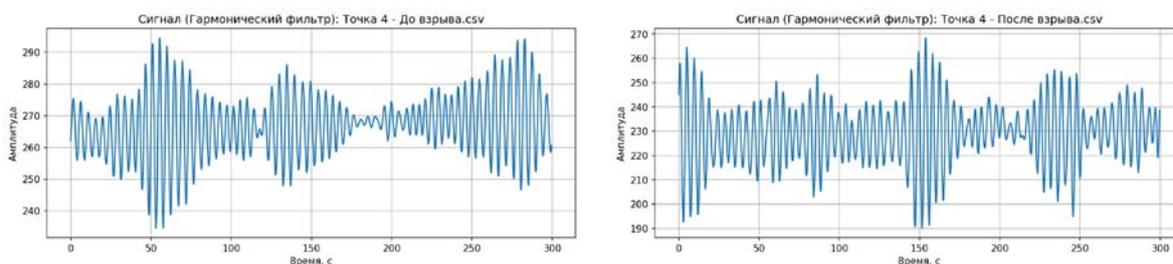
Состояние ДО

Состояние ПОСЛЕ

(Точка 4 – до взрыва)

(Точка 4 – после взрыва)

Временная область сигнала



Частотно-временное распределение (спектрограмма)

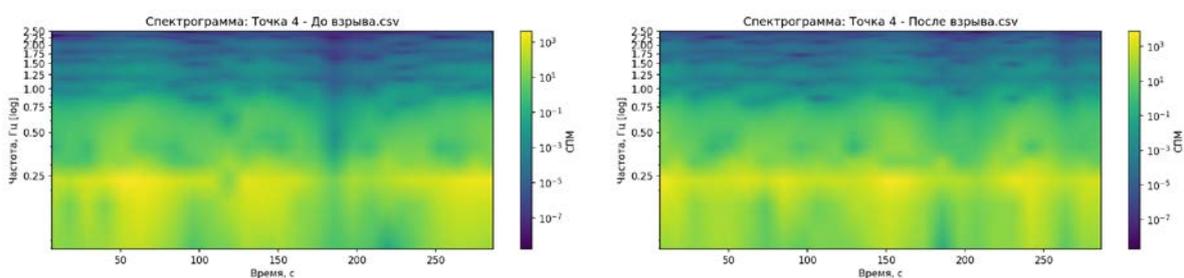


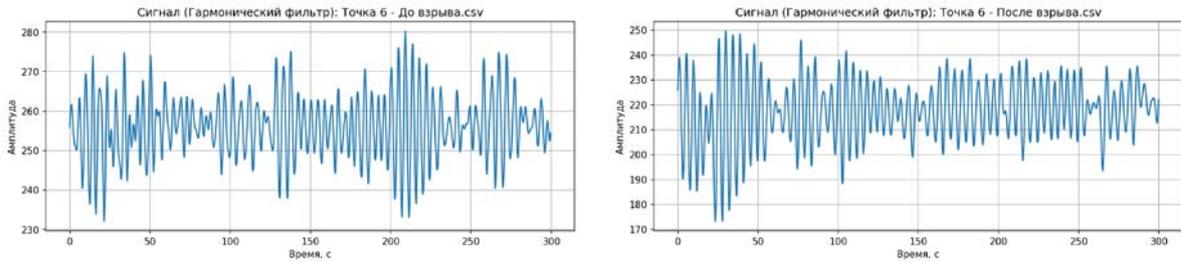
Рис. 9. Временное и частотное представление замера на точке профиля Т-4.

Зоны критического состояния (точка Т-6 на контакте пород) демонстрируют фазовый переход (Рисунок 10). Смещение спектра в низкочастотную область и резкое возрастание показателя Херста до $H \approx 0.5$ (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)

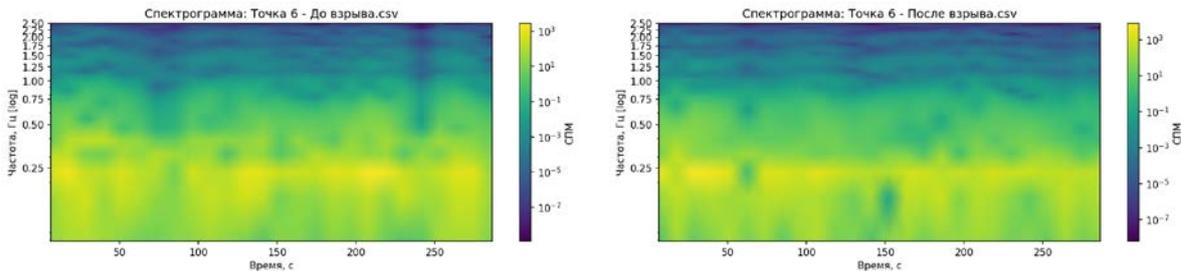


Рис. 10. Временное и частотное представление замера на точке профиля Т-6.

В заключении подведены итоги работы, обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований. Подтверждена эффективность разработанного комплекса на базе гравиметра ГНУ-КВ для решения конкретных геологических задач:

- Дополнительная детализации геологического разреза (выделение зон тектонических нарушений, вертикальных плотностных контактов).
- Выявления скрытых зон разуплотнения и трещиноватости (поглощающих энергию волн).

Основные выводы и результаты диссертации

- 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 установка видео-фиксации вариаций гравиинерциальных измерений. Программный алгоритм обеспечивает

субпиксельную точность считывания. Частота дискретизации (отсчетов в секунду – более 10 в секунду). Сравнительный анализ с эталонным Scintrex CG-6 подтвердил идентичность регистрируемых вариаций гравиинерциальных измерений.

- Предложен новый подход параметризации вариаций гравиинерциальных измерений для построения физико-геологической модели среды на основе использования методов НОКФАСС и ПОЛС. Использование критерия Херста 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 для моделирования гравиинерциальных измерений, основанный на применении «универсальной» подгоночной функции, используя при этом модифицированное Фурье-преобразование. МПФ позволяет математически строго описать любой квазипериодический сигнал. Достигнута высокая точность аппроксимации (ошибка $< 0.2\%$) для данных с разных приборов (ГНУ-КВ и CG-6). Это дает инструмент для создания цифровых отпечатков регистрируемых вариаций гравиинерциальных измерений.

- Разработана и успешно применена методика МПФ для изучения плотностных неоднородностей геологического строения на примере КМА. Показана четкая связь между параметрами вариаций гравиинерциальных измерений

и фактическим геологическим строением.

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 ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой

степени доктора наук:

1. Нигматуллин Р.Р., Белов А.П., **Ерохин А.М.**, Петров А.В. Применение модификационного 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 SINCVCU. (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. 3-4 апреля 2025 г. Том 1, стр. 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. – 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. – 24-29 июня 2024 года. – г. Бишкек. – 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. – 24-29 июня 2024 года. – г. Бишкек. – 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-ти томах. – 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, 29 января – 2 февраля 2024 г. – 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. Александра Анатольевича 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. 6-7 апреля 2023 г. Том 1, стр. 217-220.

13. Бойко А.М., **Ерохин А.М.**, Белов А.П., Лобанов А.М., Кудрявцева У.Д., Венедиктов К.В. Сравнение результатов замеров вариабельности гравитационного поля между двумя гравиметрами ГНУ-КВ // XVI Международная научно-практическая конференция "Новые идеи в науках о Земле". Тезисы докладов. 6-7 апреля 2023 г. Том 5, стр. 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>

1. 3. А. с. № 2024619583 Российская Федерация. Цифровая платформа "Эволюция" (ЦПи "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>