

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

на правах рукописи



Ерохин Александр Михайлович

Параметризация временных вариаций гравиинерциальных измерений

Специальность 1.6.9 – Геофизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

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

Москва – 2026

Оглавление

Введение	6
Глава 1. Проблемы и задачи исследования вариаций гравиинерциальных измерений	20
1.1. Природа временных вариаций гравиинерциальных измерений: приливные колебания, сезонные и атмосферные эффекты, сейсмические и вулканические влияния	20
1.1.1. Приливные колебания.....	20
1.1.2. Сезонные и атмосферные эффекты	21
1.1.3. Сейсмические влияния на гравитационное поле	22
1.1.4. Вулканические влияния на гравитационное поле	23
1.1.5. Микросейсмь и длиннопериодные компоненты.....	23
1.2. Обзор результатов предыдущих исследований по регистрации гравиинерциальных измерений и микросейсм; значение изучения длиннопериодных компонентов гравиинерциальных измерений для анализа подготовки и реализации сейсмических событий	25
1.2.1. Значение длиннопериодных компонентов для прогноза сейсмических событий.....	28
1.2.2. Необходимость регистрации инфранизкочастотных колебаний	29
1.2.3. Трудности разделения гравитационных и инерционных эффектов	30
1.3. Современные подходы к оцифровке и анализу данных.....	30
1.3.1. Оцифровка аналоговых измерений	30
1.3.2. Анализ гравиметрических данных	31
1.4. Обзор современного оборудования гравиметрических исследований.....	33
1.4.1. Гравиметры и их типы	33
1.4.2. Гравиметр для съемки CG-6 Autograv™.....	35

1.4.3. Гравиметр Burris Gravity Meter™	38
1.4.4. Гравиметр LaCoste Romberg (принцип нулевой длины пружины и системы обратной связи).....	40
1.4.5. Гравиметр ГНШ-МА.....	42
1.4.6. Гравиметры GT-2A, GT-2A/1	46
1.4.7. Гравиметрический комплекс морской набортный ГМН-КМ	50
1.4.8. Гравиметр наземный с кварцевой чувствительной системой и компьютерным управлением ГНУ-КВК	51
1.4.9. Гравиметр наземный кварцевый ГНУ-КВ.....	52
1.5. Обоснование выбора гравиметра ГНУ-КВ.....	54
Глава 2. Аппаратура и методика эксперимента	55
2.1. Описание гравиметра ГНУ-КВ и его модернизация	55
2.2. Модернизация прибора.....	58
2.3. Система сбора данных и оцифровка сигнала	61
2.4. Алгоритм распознавания видеоизображения.....	62
2.5. Предварительная подготовка и обработка инструментальных данных	64
Глава 3. Современные методы параметризации вариаций гравиинерциальных измерений.....	69
3.1. Спектральный анализ вариаций гравиинерциальных измерений.....	70
3.2. Применение метода НОКФАСС для обработки и анализа вариаций гравиинерциальных измерений	73
3.3. Расчет показателя Хёрста (R/S-анализ)	76
Глава 4. Феноменологический метод моделирования и анализа вариаций гравиинерциальных измерений	81
4.1. Постановка задачи.....	81
4.2. Фундаментальный гравиметрический пункт «Ледово»	83

4.3. Используемые приборы в процессе эксперимента.....	83
4.4. Процедура измерений	84
4.5. Спектральный анализ.....	87
4.6. Обобщенные корреляционные методы.....	89
4.7. Критерии выбора модели аппроксимации.....	91
4.8. Рассмотренные модели аппроксимации и графическое представление результатов.....	93
4.8.1. Полиномиальная модель 2-й степени	94
4.8.2. Полиномиальная модель 3-й степени	94
4.8.3. Полиномиальная модель 4-й степени	95
4.8.4. Модели на основе разложения Фурье.....	96
4.8.5. Экспоненциальные модели	98
4.9. Анализ рассмотренных моделей.....	99
4.9.1. Полиномиальные аппроксимации	100
4.9.2. Фурье-аппроксимации	100
4.9.3. Экспоненциальные аппроксимации	100
4.10. Метод ПОЛС.....	103
4.11. Результаты.....	108
Глава 5. Применение модифицированного преобразования Фурье для моделирования вариаций гравиинерциальных измерений	109
5.1. Постановка задачи.....	110
5.2. Описание гравиметрических данных.....	111
5.3. Алгоритм обработки данных	112
5.4. Результаты.....	123

Глава 6. Гравиметрический мониторинг для параметризации процессов техногенной деформации земной коры при разработке месторождений с использованием взрывных технологий (на примере Курской магнитной аномалии)	124
6.1. Постановка задачи	124
6.2. Ограничения методов оценки геомеханического состояния	124
6.3. Концептуальная основа метода: параметризация динамического отклика гравиметрического сигнала	125
6.4. Цели и задачи практического исследования	126
6.5. Геолого-структурная характеристика района исследований	127
6.5.1. Стратиграфия, литология и механические контрасты	128
6.6. Аппаратурно-методический комплекс	130
6.6.1. Принцип динамического гравиинерциального измерения	130
6.6.2. Методы параметризации геомеханического отклика	130
6.6.3. Расчет показателя Хёрста	131
6.7. Картирование геомеханического отклика массива	133
6.8. Результаты	140
6.8.1. Практическое значение для оценки геотехнических рисков	140
6.8.2. Основные выводы	141
6.8.3. Направления дальнейших исследований и перспективы развития: от диагностики к прогнозированию	141
Заключение	143
Список литературы	146
Благодарности	157

Введение

Данная работа относится к области фундаментальных научных геолого-геофизических исследований и посвящена разработке нового подхода к построению математических моделей временных изменений гравиинерциальных измерений для понимания процессов механизма подготовки и реализации сейсмических событий. В центре внимания исследования находятся вариации, возникающие вследствие природных и техногенных процессов, которые являются ключевыми для понимания геодинамических явлений, таких как землетрясения, вулканизм и тектонические движения. Особенностью предлагаемого подхода является использование эмпирических данных, спектрально-статистических методов, а также учет случайных факторов («гостевых процессов»), недостаточно изученных ранее, но существенно влияющих на колебания гравиинерциальных измерений. Это необходимо для понимания вопросов функционирования механизма раннего обнаружения процессов подготовки и реализации сейсмического события.

Актуальность работы

Актуальность темы обусловлена потребностью 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 диссертации

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 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 процессов подготовки и механизмов 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 Scintrex 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» аппроксимирующей функции на основе применения модифицированного преобразования Фурье для моделирования вариаций гравиинерциальных измерений.

Методология и методы диссертационного 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 Херста.

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.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии представлений о структуре и закономерностях временных вариаций гравиинерциальных измерений как сложных нестационарных процессов, формируемых совокупным воздействием регулярных и случайных факторов. Предложенные подходы уточняют возможности параметризации таких рядов на основе сочетания спектрально-статистических, фрактальных и феноменологических методов, а также расширяют методическую базу анализа длиннопериодных и инфранизкочастотных компонент гравиметрического сигнала.

Полученные результаты создают теоретические предпосылки для дальнейшего построения физико-геологических моделей, описывающих связь параметров вариаций гравиинерциальных измерений с геодинамическими процессами, состоянием горного массива и механизмами подготовки сейсмических событий. Разработанный подход может быть использован как основа для дальнейших исследований в области сейсмогравиметрического мониторинга и интерпретации сложных геофизических временных рядов.

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. 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 аппаратно-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 и списка литературы из 100 наименований. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков и 8 таблиц.

Научные публикации и доклады на конференциях

Основные результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждены на научных конференциях и семинарах, а также опубликованы в научных статьях.

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 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, CA(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, CA(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. (CA(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. (CA(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. – 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 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. – 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; опубли. 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; опубли. 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; опубли. 24.04.2024. – 800 МБ; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67263211>.

Доклады на конференциях

1. Моделирование вариаций гравитационного поля // Международный семинар им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» – 3-4 апреля 2025 г.

2. Применение R/S анализа (метод Хёрста) для изучения вариаций гравитационного поля // IX Международный симпозиум «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» – 24-29 июня 2024 года. – г. Бишкек.

3. Параметризация вариаций гравитационного поля на основе использования НОКФАСС-метода // IX Международный симпозиум «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» – 24-29 июня 2024 года. – г. Бишкек.

4. Статистический анализ функции распределения колебаний индикатора кварцевого гравиметра // Международный семинар им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» – 29 января-2 февраля 2024 г.

5. Анализ естественных низкочастотных колебаний грунтов в диапазоне 0,05 Гц – 2 Гц // XI Практический семинар ПАО «НК «Роснефть» по геологическому сопровождению бурения скважины. III практический семинар по геолого-технологическим исследованиям в процессе бурения – 23-25 октября 2023 года – г. Москва.

6. Анализ естественных низкочастотных колебаний в диапазоне 0,05-2 Гц // XI практический семинар ПАО «НК «Роснефть» по геологическому сопровождению бурения горизонтальных скважин, октябрь 2023 г.

7. Оцифровка колебания индикатора прибора ГНУ-КВ. Использование алгоритма распознавания видео // XVI Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (к 105-летию МГРИ), сентябрь 2023.

8. Анализ естественных низкочастотных колебаний грунтов периода 10-20 секунд для прикладных задач геологии // VIII Международная научно-практическая конференция «Геофизические исследования и работы в скважинах на нефть и газ – 2023», 19-25 августа 2023. Краснодарский край, Туапсинский р-н, с. Ольгинка.

9. Сравнение результатов замеров вариабельности гравитационного поля между двумя гравиметрами ГНУ-КВ // XVI Международная научно-практическая

конференция «Новые идеи в науках о Земле», 6-7 апреля 2023. г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23. (МГРИ).

10. Оцифровка колебания индикатора прибора ГНУ-КВ. Использование алгоритма распознавания видео // XVI Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле», 6-7 апреля 2023. г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23. (МГРИ).

11. Некоторые аспекты изучения низкочастотных колебаний гравиметра ГНУ-КВ для решения ряда геофизических задач // 49-ая сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей», 23-27 января 2023. г. Екатеринбург (Институт геофизики УрО РАН).

12. Опыт амплитудно-частотной оценки колебания грунтов в диапазоне 0,05-0,5 Гц, используя чувствительный элемент гравиметра ГНУ-КВ // Семинар «Геолого-геофизический мониторинг литосферы Тянь-Шаня» научной станции РАН и Института физики Земли им. О.Ю. Шмитда, 18 ноября 2022. Киргизия, г. Бишкек (Научная станция РАН).

Глава 1. Проблемы и задачи исследования вариаций гравиинерциальных измерений

1.1. Природа временных вариаций гравиинерциальных измерений: приливные колебания, сезонные и атмосферные эффекты, сейсмические и вулканические влияния

1.1.1. Приливные колебания

Суточные и полусуточные приливные силы, вызываемые Луной и Солнцем, приводят к периодическим колебаниям гравиинерциальных измерений на поверхности Земли с амплитудой до сотен микрогал. Основные гармоники приливов – суточные и полусуточные – отчётливо регистрируются высокочувствительными гравиметрами. Для них характерны стабильные параметры: например, фазовые сдвиги не превышают десятых долей градуса, а отношение сигнал/шум достаточно велико. Менее значительные составляющие (второстепенные волны) выявляются с меньшей точностью – их измерения затруднены из-за влияния внешних факторов (сейсмический шум, океанский прибой, атмосферные явления и прочее) [41].

В низкочастотной части спектра приливов выделяются длительные циклы (полумесячные, месячные); в частности, по данным многолетних наблюдений во Владивостоке наиболее стабильной оказалась недельная приливная волна (~13,66 суток) [41]. Данные о приливных вариациях широко используются для тестирования моделей внутреннего строения Земли и океанической приливной нагрузки, а также для калибровки гравиметров [10]. В России созданы программы для расчёта приливных эффектов, например, ATLANTIDA 3.1 (ИФЗ РАН) для моделирования океанической нагрузки на произвольной географической точке [41]. Для иллюстрации приливных вариаций силы тяжести и влияния атмосферно-океанических возмущений приведены фрагменты наблюдений, представленные на рисунке 1.

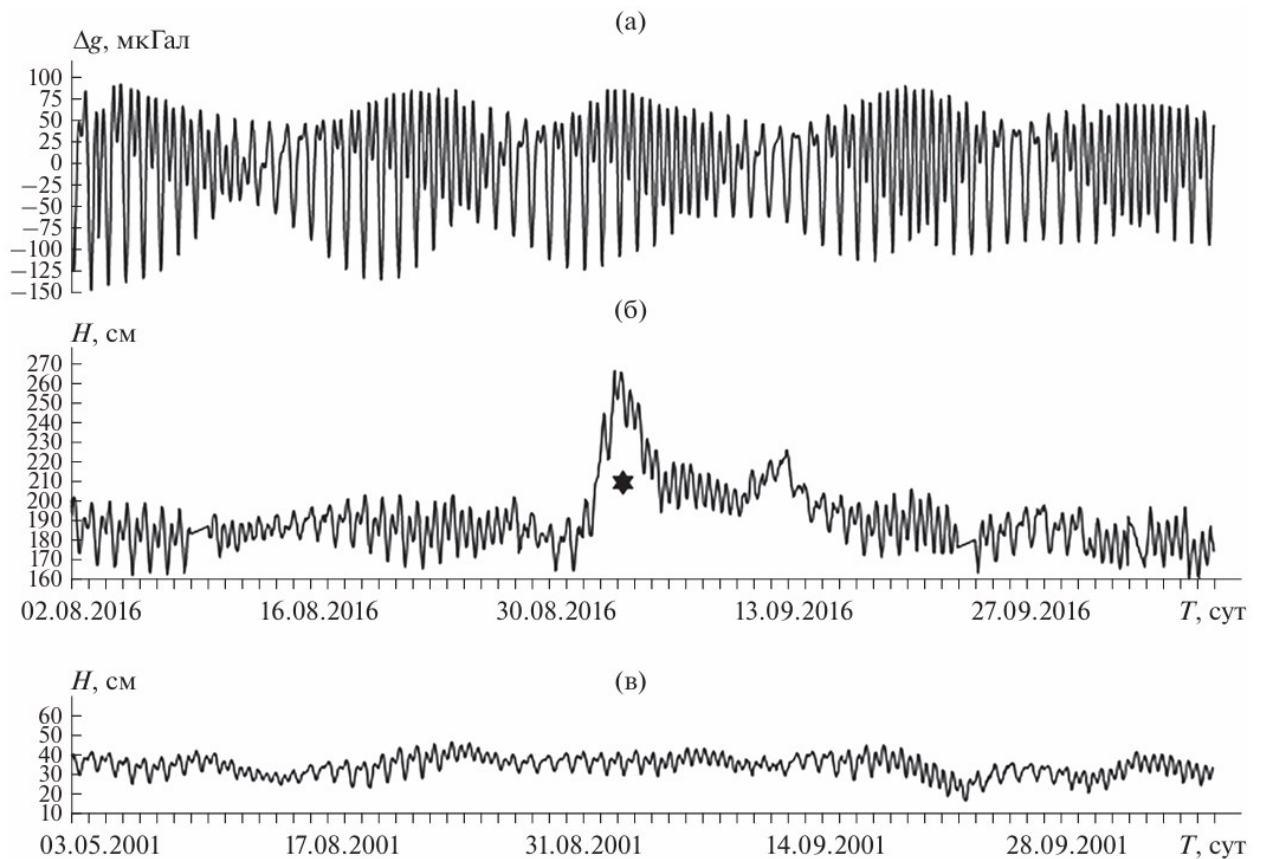


Рисунок 1. Фрагменты записи приливных вариаций силы тяжести (а), уровнемерных наблюдений в порту Посьет (б) и в бухте Витязь (в). Звёздочкой отмечен эффект прохождения тайфуна Лайнрок [41]

1.1.2. Сезонные и атмосферные эффекты

Длиннопериодные вариации гравиинерциальных измерений связаны с сезонными изменениями распределения масс в атмосфере, океанах, криосфере и недрах. Так, по данным локации спутников обнаружены годовые и полугодовые колебания коэффициента (характеризующего глобальное гравитационное поле), накладывающиеся на долговременный тренд [24].

Амплитуда этих глобальных сезонных изменений невелика (доли единиц), но они статистически значимы. На локальном уровне основную роль играют атмосферо-гидрологические факторы. Например, изменение уровня грунтовых вод после сильных дождей или засух может приводить к вариациям силы тяжести до $\sim 10\text{--}12$ мкГал за счёт перераспределения массы воды в породах [85]. Колебания атмосферного давления также существенно влияют на гравиметрические измерения: повышение давления на 1 гПа (мбар) ведёт к уменьшению g

приблизительно на 0,3–0,4 мкГал [89]. В результате прохода крупных барических образований (циклонов/антициклонов) гравитация в пункте наблюдения может меняться суммарно на десятки микрогал [85]. Поэтому при высокоточных измерениях обязательно вводится барометрическая поправка, а также учитываются сезонные эффекты (например, влагосодержание почв, снежный покров), которые вносят вклад в тренд гравитационных данных.

1.1.3. Сейсмические влияния на гравитационное поле

Мощные сейсмические события способны вызывать как кратковременные, так и постоянные изменения гравиинерциальных измерений. Теоретически, перемещения больших масс при разрыве в очаге землетрясения должны приводить к почти мгновенному гравитационному отклику. Практически зафиксировать такие эффекты удалось лишь в последнее время благодаря появлению сверхчувствительных приборов. В частности, на сетях гравиметров были впервые надёжно зарегистрированы изменения силы тяжести порядка долей микрогала во время прохождения сейсмических волн от сильных землетрясений [83].

Эти наблюдения подтвердили предсказания теории упругих деформаций о гравитационном отклике Земли на сейсмический разлом. Спутниковая гравиметрия (миссии GRACE и др.) также обнаружила сейсмические аномалии – например, изменения гравиинерциальных измерений, вызванные землетрясениями Чили 2010 г. и Тохоку 2011 г., были выделены по данным спутников [83]. Кроме того, в 2017 г. сообщено об экспериментальном обнаружении эластогравитационных сигналов (PEGS) – ультранизкочастотных возмущений гравиинерциальных измерений, распространяющихся от очага [93]. Эти слабые предвестники сейсмических волн удалось выявить на дистанциях 1000–2000 км для землетрясения в Японии (2011 г.) путём выделения отклика на гравитацию до прихода первых волн [93].

Данная находка открывает возможность оперативной оценки мощности землетрясения за 1–2 минуты, еще до начала сильной сейсмической вибрации [93].

1.1.4. Вулканические влияния на гравитационное поле

Изменение подповерхностного распределения масс вблизи вулканов приводит к локальным вариациям гравиинерциальных измерений, что используется для мониторинга магматической активности. Повышение g обычно свидетельствует о притоке магмы или флюидов под вулканом, а уменьшение – о разгрузке (утечке) масс во время извержения или подготовки к нему. Метод повторных абсолютных гравиметрических съёмок и непрерывных относительных наблюдений успешно применяется во многих вулканических районах мира (Япония, Италия, Камчатка и др.). Например, на вулкане Асама (Япония) в 2004 г. с помощью непрерывных наблюдений на кварцевом гравиметре были зафиксированы колебания гравиинерциальных измерений (после устранения влияния приливов) величиной порядка нескольких десятков мкГал [83]. Эти вариации коррелировали с этапами подъёма и опускания магмы в канале вулкана и предшествовали извержению [83]. Аналогично, при катастрофическом извержении Мияке-Дзимы (2000 г.) гравиметрические данные указали на перемещение значительных объёмов магмы в боковом направлении под вулканом [83]. Подобные результаты демонстрируют, что гравиметрия позволяет «заглянуть» в магматические системы: контроль гравиинерциальных измерений вместе с геодезическими измерениями (GPS, наклонометры) помогает своевременно выявлять приток/отток магмы и оценивать риск извержения.

1.1.5. Микросейсмы и длиннопериодные компоненты

Помимо перечисленных воздействий, в записях гравиметрических станций присутствует непрерывный фон колебаний различной природы и длительности. К таким относятся микросейсмы – непрерывные слабые колебания грунта, вызванные океанскими волнами, ветром и прочими факторами. Их характерные периоды составляют от долей секунды до нескольких секунд; они создают дополнительное ускорение датчика и проявляются как шум в гравитационных измерениях [41].

Тем не менее микросейсмический сигнал несёт информацию об окружающей среде и, может быть, выделен из гравиметрической записи [8]. Более того, за счёт чувствительности к низким частотам гравиметр иногда способен выполнять роль сейсмометра. Так, экспериментальная адаптация прибора ГНУ-КВ показала, что он улавливает колебания с частотами ниже порога обычных сейсмографов, фактически превращаясь в простую и недорогую сейсмическую станцию мониторинга низкочастотного шума [3, 23].

К длиннопериодным компонентам гравиинерциальных измерений относят вариации с периодами от часов до многолетних трендов. Частично они обусловлены уже упомянутыми приливными и сезонными эффектами, но возможны и собственные колебания Земли. Например, после самых мощных землетрясений возбуждаются глобальные нормальные моды (с периодами от минут до часов), которые регистрируются как в сейсмологических, так и в гравиметрических данных. Интересно, что непрерывные сверхдлинные колебания присутствуют в земном шаре даже в отсутствие крупных землетрясений с периодами ~3–10 мин было открыто именно по спектрам гравиметров [68]. Наблюдения в антарктической обсерватории Сёва показали, что Земля постоянно испытывает слабые свободные колебания (разрешимые при частотах $>1,5$ мГц), возбуждаемые, вероятно, взаимодействием океана и атмосферы [68]. Изучение таких фоновых мод расширяет знания о внутренней структуре планеты и динамике ядра. Длиннопериодные компоненты гравиинерциальных измерений (после удаления известных воздействий) представляют особый интерес, поскольку именно в этом диапазоне могут проявляться медленные предвестники геодинамических событий. Спектральное проявление фоновых свободных колебаний Земли по данным сверхпроводящих гравиметров показано на рисунке 2.

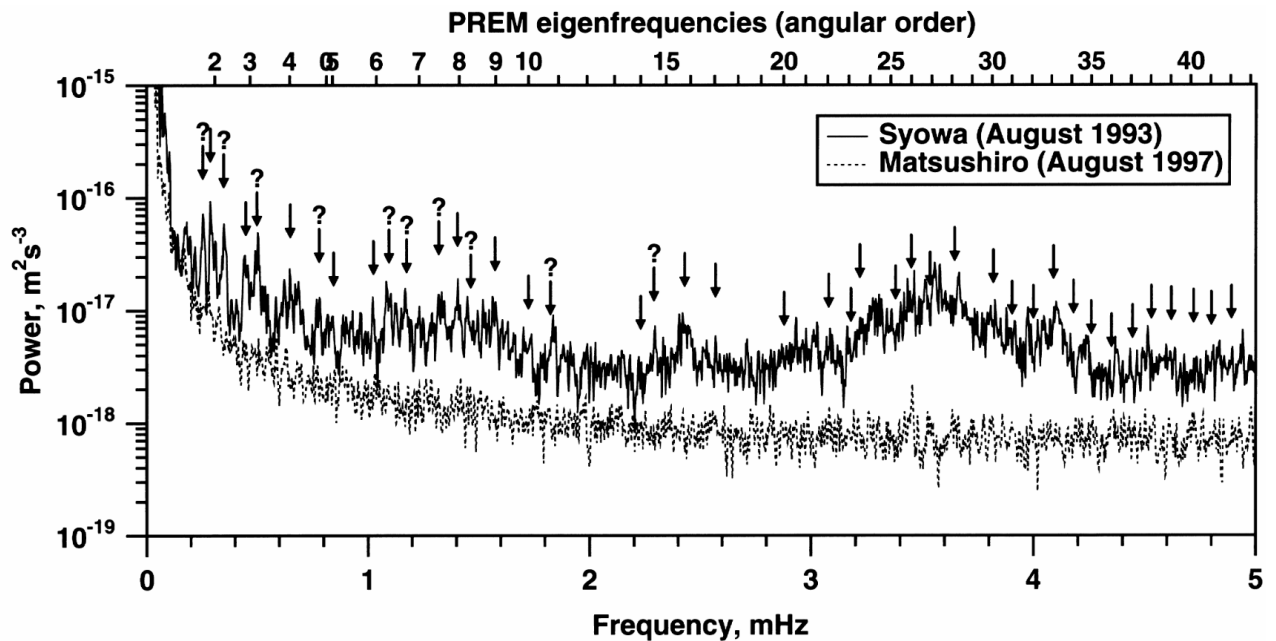


Рисунок 2. Усредненные спектры для сверхпроводящих гравиметров на двух станциях, Syowa (сплошная линия) и Matsushiro (пунктирная линия). Стрелки указывают на местоположение частот, измеренных Nawa et al. (1998). Знаки «?» указывают на частоты, которые не были идентифицированы как фундаментальные сфероидальные моды [68]

1.2. Обзор результатов предыдущих исследований по регистрации гравиинерциальных измерений и микросейсм; значение изучения длиннопериодных компонентов гравиинерциальных измерений для анализа подготовки и реализации сейсмических событий

Вопросами variability гравиинерциальных измерений учёные занимаются уже несколько десятилетий. Ещё в середине XX века были точно измерены основные приливные гармоники и разработаны модели приливных деформаций (классические работы Б. Мелхиора, Торге и др.). В последние годы благодаря созданию международных сетей (GGP – Global Geodynamics Project) накоплены длительные ряды высокоточных наблюдений на сверхпроводящих гравиметрах, что позволило детально изучить спектр вариаций от секунд до лет. Например, в одном из исследований во Владивостоке проанализирован ряд наблюдений за период 2012-2018 гг., содержащий полный спектр суточных, месячных и многолетних гравитационных колебаний [41]. Спутниковые миссии (GRACE, GOCE и др.), а также лазерная локация спутников дали ценную информацию о глобальных изменениях гравиинерциальных измерений, связанных

с перераспределением масс воды и льда. Выявлены годовые, многолетние циклы и секулярные тренды, например постепенное уменьшение коэффициента J_2 с минимумом около 2005 г., что отражает перестройку масс между полярными областями и экватором [24].

Отдельно развивается направление сейсмогравиметрии. Только в 2000-х годах технический прогресс позволил напрямую зарегистрировать гравитационные эффекты землетрясений. Первыми примерами стали измерения на гравиметрах во время крупных землетрясений (Алютика 2003 г., Суматра 2004 г. и др.), подтвердившие существование косейсмических изменений [83]. Пример региональных изменений силы тяжести, зарегистрированных сверхточными гравиметрами при сейсмическом событии, приведен на рисунке 3.

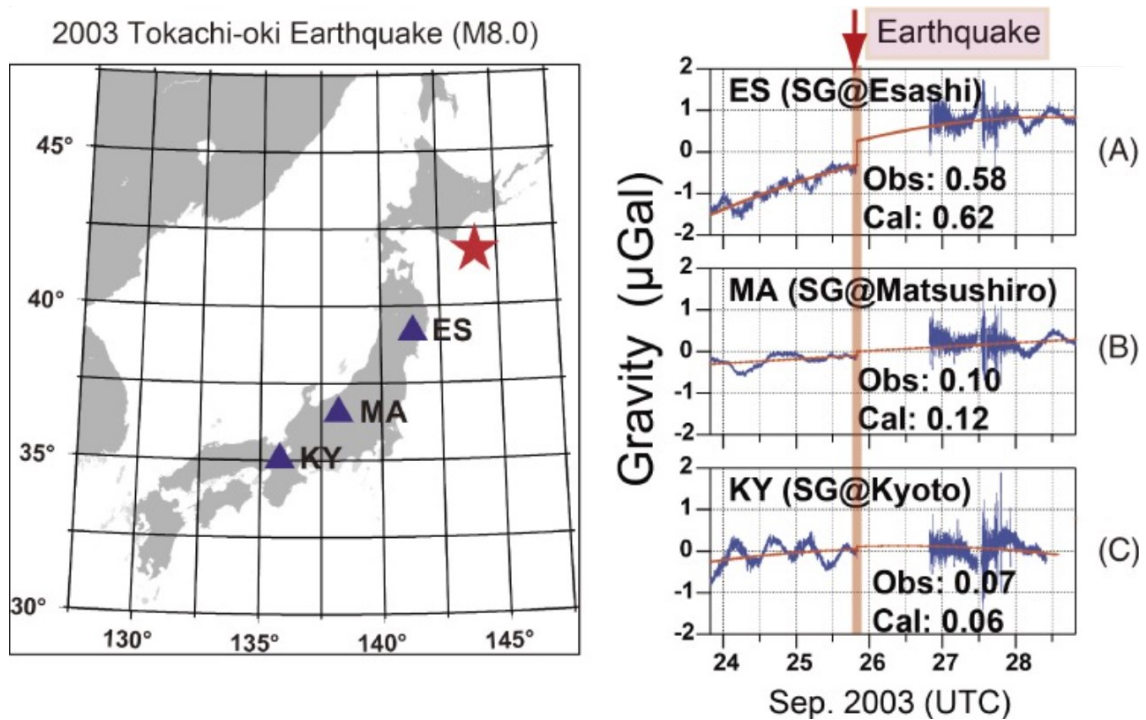


Рисунок 3. Региональные изменения гравитации, зафиксированные массивом сверхточных гравиметров (SGs) (перерисовка оригинальных данных из статьи Imanishi et al. (2004)). Единицы измерения – микрогаллеи (μGal).

(Слева) Эпицентр (красная звезда) землетрясения Токати-оки 2003 года и расположение станций SG (треугольники): ES – Эсаси, МА – Мацусиро, КҮ – Киото. (Справа) Данные о гравитации (синие линии), зафиксированные SG в связи с землетрясением Токати-оки в 2003 году. Единицы – μGal . (А) Эсаси, (В) Мацусиро, (С) Киото. Красные линии – сглаженные значения, полученные с учетом скачков гравитации, вызванных сейсмическим событием, и долгосрочного дрейфа приборов [83]

Параллельно, японскими исследователями были обнаружены изменения гравиинерциальных измерений вблизи действующих вулканов (рисунок 4), соответствующие перемещению магмы (эти данные хорошо согласуются с независимыми геодезическими измерениями высоты поверхности) [83].

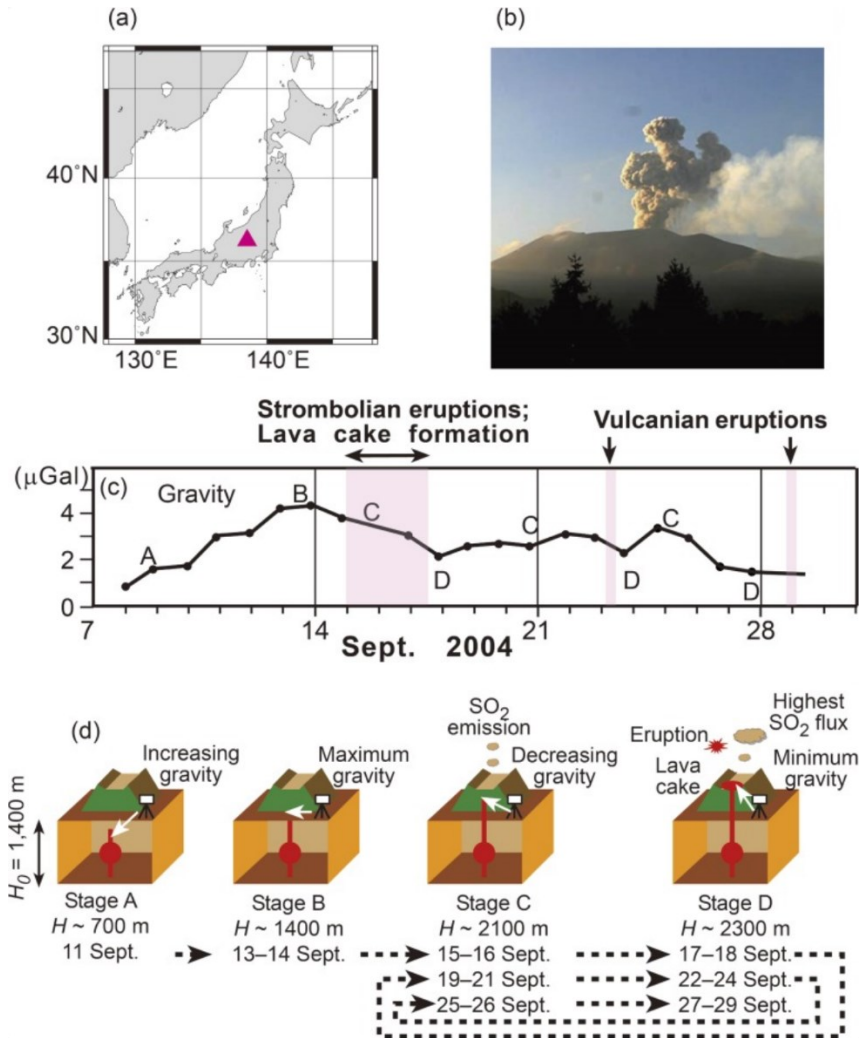


Рисунок 4. (а) Местоположение наблюдаемого вулкана (пурпурный треугольник) на карте Японии. (b) Фотография извержения вулкана. (c) Изменения силы тяжести (в μGal) в сентябре 2004 года. Стрелками обозначены фазы вулканической активности: Stroboliian eruptions и lava cake formation – стромболианские извержения и формирование лавовой «шапки», Vulcanian eruptions – вулканские извержения. (d) Стадии магматических процессов под вулканом: Стадия А (11 сентября): рост силы тяжести. Глубина магмы: $\sim 700 \text{ m}$. Стадия В (13-14 сентября): максимальная сила тяжести. Глубина: $\sim 1400 \text{ m}$. Стадия С (15-16, 19-21, 25-26 сентября): эмиссия SO_2 , снижение силы тяжести. Глубина: $\sim 2100 \text{ m}$. Стадия D (17-18, 22-24, 27-29 сентября): извержение, формирование лавовой шапки, максимальный поток SO_2 . Минимальное значение силы тяжести. Глубина: $\sim 2300 \text{ m}$. Обозначения: $H_0 = 1400 \text{ m}$ – средняя глубина реперного уровня. Белые стрелки на схемах показывают направление движения магмы. Черные треугольники обозначают гравиметры [83]

Таким образом, к настоящему времени накоплен существенный опыт изучения вариаций гравиинерциальных измерений: от приливов и атмосферных влияний до сейсмических и вулканических явлений. Обзор литературы показывает, что мониторинг гравитации предоставляет уникальную информацию о движении масс в Земле, дополняя сейсмологические и геодезические данные. В России ведутся постоянные гравиметрические наблюдения в ряде геодинамически активных зон (например, на Камчатке, Алтае, в Краснодарском крае и др.), результаты которых подтверждают высокую информативность метода [32]. Как отмечается в отечественной литературе, все процессы на поверхности Земли связаны с перемещением масс в её недрах, поэтому при длительном мониторинге гравиинерциальных измерений в сейсмоактивных областях становится возможным фиксировать возможные скрытые предвестники сейсмических событий.

1.2.1. Значение длиннопериодных компонентов для прогноза сейсмических событий

Изучение медленных гравитационных вариаций рассматривается как перспективный путь к краткосрочному прогнозу сильных сейсмических событий. Считается, что на предшествующей событию стадии могут проявляться аномалии в гравитационном поле – например, едва заметные дрейфы уровня g или изменения параметров приливных колебаний под воздействием нарастающего тектонического напряжения. Некоторые исследователи предпринимают попытки выявить такие предвестники с помощью тонкого анализа гравиметрических данных. В частности, предложено применять адаптивное разложение сигнала (например, метод Гильберта-Хуана) для извлечения аномальных компонент из приливной записи [100]. Хотя подобные подходы находятся на стадии обсуждения, их развитие может значительно повысить информативность гравиметрических наблюдений.

В отличие от традиционных сейсмодатчиков, улавливающих только пришедшие упругие волны, гравиметр способен почувствовать перестройку гравиинерциальных измерений практически одновременно с началом разрыва в очаге. В случае реализации практических гравитационных датчиков достаточной

чувствительности это позволит выигрывать десятки секунд [93]. В целом, сочетание данных о длиннопериодных предвестниках (гравиметрических дрейфов, изменений приливных параметров и пр.) с ультрабыстрыми сигналами типа PEGS могло бы существенно обогатить методы прогноза и раннего процессов подготовки сейсмических событий. Именно поэтому в тектонически активных регионах организуются гравиметрические мониторинги: постоянная регистрация гравиинерциальных измерений позволяет отследить зарождение медленных деформаций, признаков возможного приближения сейсмического события.

1.2.2. Необходимость регистрации инфранизкочастотных колебаний

Для исследования процессов подготовки сейсмических событий особое внимание уделяется инфранизкочастотным колебаниям грунта – то есть движениям с периодами от секунд до часов и более. Сейсмологические станции, как правило, оптимизированы под регистрацию колебаний в диапазоне от долей секунды до нескольких десятков секунд. Очень медленные движения (ниже $\sim 0,05$ – $0,2$ Гц) могут оставаться вне поля зрения стандартных сейсмографов. Между тем, колебания с частотой менее 1 Гц обладают сравнительно большими амплитудами и способны распространяться на значительные расстояния [21, 56]. К источникам таких сигналов относят как внешние воздействия (шторма, техногенные вибрации), так и собственно геофизические процессы – крупномасштабные колебания в литосфере, связанные с тектоническими структурами, медленными деформациями и т.д. [20]. Поэтому для полноты мониторинга важно регистрировать и анализировать инфранизкочастотный диапазон. Гравиметрическая аппаратура здесь востребована, так как способна измерять не только высокочастотные сотрясения, но и квазистатические изменения ускорения. Эксперименты показали, что чувствительный элемент гравиметра может фиксировать низкочастотные микросейсм, недоступные обычным сейсмическим станциям [21]. Таким образом, включение гравиметров в системы геофизического мониторинга расширяет диапазон регистрируемых частот и повышает шансы обнаружить аномалии, предшествующие различным сейсмическим событиям [31].

1.2.3. Трудности разделения гравитационных и инерционных эффектов

Одной из методологических проблем является разделение истинных гравитационных вариаций и помех, связанных с движением прибора. Относительный гравиметр по своему принципу измеряет сумму двух величин: локального гравитационного ускорения и составляющей, обусловленной ускорением самого прибора (вместе с опорной поверхностью). Если основание прибора смещается или наклоняется, чувствительный элемент испытывает инерционное ускорение, неотличимое от изменения гравитации. Поэтому сейсмические колебания почвы, вибрации оборудования, просадка грунта и другие эффекты могут маскировать слабые гравитационные сигналы. На практике это требует тщательной фильтрации и учёта посторонних влияний. Даже при наличии современных приборов точностью 3–5 мкГал чрезвычайно трудно выделить геофизические вариации в этом диапазоне из-за наложения внешних факторов [85]. Для решения задачи применяют комплексный подход: гравиметрические наблюдения сопровождаются измерениями вспомогательных параметров (сейсмические акселерометры, датчики наклона, барометры и др.), а затем математически вычитают влияние «нежелательных» факторов из гравиинерциальных измерений [85]. Кроме того, предпочтительно размещать гравиметры на стабильных основаниях (скальный грунт, глубокие подземные лаборатории) и вдали от сильных источников техногенной вибрации, чтобы минимизировать шум. Разделение гравитационных и инерционных эффектов – ключевое условие получения надёжных данных для прогноза геодинамических процессов. Это определило в дальнейшем место проведения автором опыта на фундаментальном гравиметрическом пункте.

1.3. Современные подходы к оцифровке и анализу данных

1.3.1. Оцифровка аналоговых измерений

Гравиметры типа ГНУ-КВ изначально имеют оптическую систему считывания – положение конца пружинного маятника отслеживается по шкале (с помощью зеркала и визирного устройства). Для долговременного мониторинга

критически важно перевести такие аналоговые наблюдения в цифровую форму. В недавних работах автора успешно применён следующий подход: установка видеокамеры, непрерывно записывающей положение индикатора гравиметра, с последующим автоматическим распознаванием положения стрелки на кадрах видео [21]. Специально разработанный алгоритм компьютерного зрения извлекает из видеопотока численные значения отклонения маятника, тем самым оцифровывая сигналы гравиметра. Этот метод позволяет задействовать даже устаревшие приборы в высокочастотном режиме сбора данных (с частотой кадров 20–30 Гц и последующим усреднением до требуемой дискретизации). Альтернативный подход – модернизация прибора установкой цифрового датчика положения маятника (например, ёмкостного или лазерного), однако это технически сложнее. В современных коммерческих гравиметрах оцифровка реализована изначально: так, прибор gPhone (Micro-g LaCoste) оборудован электронной системой, регистрирующей сигнал гравиинерциальных измерений, наклоны и температуру с частотой 1 Гц [41]. Пользователю сразу доступны готовые цифровые ряды с учётом всех калибровочных коэффициентов. Таким образом, оцифровка данных – решённая задача, и основное внимание сосредоточено на корректной обработке полученных рядов. Остается только вопрос достаточной частоты снятия замеров и получения истинного сигнала, без возможных искажений и обработок заложенных и скрытых внутри коммерческих заграничных приборов.

1.3.2. Анализ гравиметрических данных

К обработке непрерывных записей гравиинерциальных измерений применяется широкий арсенал современных методов. Ниже перечислены основные этапы и подходы:

- Удаление известных эффектов: сначала из сырого сигнала вычитаются модельные приливные вариации (с использованием программ вроде ETERNA или Tsoft) и атмосферная поправка. Это позволяет получить остаточный ряд, содержащий локальные аномалии. Без этой процедуры сильные приливные колебания (~100 мкГал) и метеозффекты скрывали бы более слабые сигналы.

– Спектральный анализ: для выявления присутствующих периодических компонентов строятся спектры и периодограммы (например, с помощью БПФ).

– Временно-частотные методы: поскольку интересующие нас процессы могут быть нестационарными (их частота или амплитуда меняются со временем), используются подходы, дающие локальное спектральное представление (к родственным методам относятся преобразования Габора) [63, 66, 73, 86, 87, 88, 97]. К ним относятся вейвлет-преобразование и эмпирическая модовая декомпозиция (ННТ – Hilbert–Huang Transform) [69, 71, 75, 84, 95, 96]. К примеру, метод ННТ был применён для анализа приливного сигнала с целью выявления аномалий [65, 67, 100]. Он позволяет отследить эволюцию амплитуд и фаз приливных волн во времени и тем самым заметить отклонения от нормы, потенциально связанные с подготовкой реализации сейсмического события.

– Статистические оценки и фильтрация шума: важную информацию несут тренды и стохастические (случайные) характеристики гравиметрического ряда. Путём аппроксимации дрейфа можно оценить, например, скорость тектонического подъёма/оседания участка. Для исследования долговременной памяти в колебаниях применяется метод рескейл-ранжирования (R/S-анализ), позволяющий вычислить показатель Хёрста и выявить наличие тенденций или цикличности. Кроме того, оценивается спектральная плотность шума; например, на тихих обсерваториях при периодах 1–10 мин уровень шума близок к достигнутому сейсмологами предельному фону земного «шума покоя». Зная статистические свойства шума, можно повысить надёжность обнаружения слабых аномальных отклонений.

– Машинное обучение: новейшее направление – применение алгоритмов машинного обучения/искусственного интеллекта для автоматического распознавания аномалий и кластеризации гравиметрических данных. Уже разрабатываются системы на основе нейронных сетей, обученные на исторических данных, которые в реальном времени отслеживают поведение гравиинерциальных измерений. Цель – научить алгоритм отличать обычные вариации (приливы, погода, шум) от потенциально «аномального» поведения, связанного, например, с

подготовкой сейсмического события. Пока эти методы находятся в стадии испытаний, но первые результаты обнадеживают.

Современные технологии оцифровки и анализа существенно расширили возможности гравиметрии. Сегодня исследователи могут в режиме реального времени получать очищенные от помех данные и применять к ним продвинутые алгоритмы обработки. Это позволяет более уверенно выделять длиннопериодные компоненты гравиинерциальных измерений и изучать их связь с геодинамическими процессами. Таким образом, сочетание высокоточного оборудования (например, гравиметра ГНУ-КВ) и современных методов анализа открывает путь к более глубокому пониманию вариаций гравиинерциальных измерений и к использованию этой информации для изучения процессов подготовки и реализации сейсмических событий.

1.4. Обзор современного оборудования гравиметрических исследований

1.4.1. Гравиметры и их типы

Современные приборы, применяемые для гравиинерциальных измерений, называются гравиметрами. Существует два основных типа измерений: абсолютные и относительные [47]. Абсолютные измерения силы тяжести основаны на явлениях, напрямую связанных с гравитацией, таких как свободное падение или колебания маятника. Эти методы, называемые динамическими, требуют высокой точности при измерении времени и расстояния. Абсолютные измерения сложнее и требуют больше времени и специализированного оборудования, поэтому в практике гравиразведки применяются в основном относительные измерения [27, 29].

Относительные измерения силы тяжести

Относительные измерения силы тяжести проводятся в небольшом диапазоне изменений, не превышающем нескольких сотен мГал, что значительно упрощает и ускоряет процесс. В этом случае сила тяжести компенсируется упругостью пружины или электростатическими силами. Измеряемой величиной является удлинение пружины под действием силы тяжести, деформация компенсирующей пружины горизонтального маятника или электростатическое напряжение на

конденсаторе маятника. Для исключения влияния инерционных помех необходимо приводить чувствительный элемент гравиметра в состояние покоя, так как гравиметр одинаково реагирует как на изменения силы тяжести, так и на инерционные возмущения.

Исторические измерения и современная точность

Первоначальные измерения силы тяжести, проведенные после открытий Галилея, основывались на подсчете колебаний маятника, подвешенного на тонком волокне. Эти измерения, выполненные в разных широтах, помогли определить уплощение Земли. Например, первые такие измерения проводились Пикаром в Париже в 1668 году, а позже – в Кайенне и Лапландии.

Современные методы измерения достигли высокой точности, порядка 10^{-9} g. Для обеспечения такой точности необходимо учитывать множество факторов, таких как приливные колебания, атмосферное давление, полярное движение, вертикальный градиент силы тяжести и релятивистские поправки. Измерения производятся с использованием сложной аппаратуры и методов.

Принципы действия гравиметров

Гравиметры, используемые в современных исследованиях, основаны на принципе компенсации силы тяжести упругостью пружины, крутильной нити или газа. Они могут быть разделены на две основные категории по принципу действия упругой системы:

1. Гравиметры с поступательным перемещением груза: груз перемещается пропорционально изменению силы тяжести (обычная пружина).
2. Гравиметры с вращательным движением груза: груз совершает вращательное движение вокруг точки подвеса (крутильные весы).

Различия гравиметров

Основные различия между гравиметрами различных систем заключаются в устройстве упругих систем, материале, из которого они изготовлены, и методах учета или устранения внешних влияний. В подавляющем большинстве

современных гравиметров используется метод астазирования, который заключается в усилении реакции упругой системы на изменение силы тяжести. Это достигается путем добавления дополнительных устройств, таких как дополнительные пружины, увеличивающие перемещение маятника при изменении силы тяжести.

Астазирование позволяет значительно повысить чувствительность гравиметров, но при этом ограничивает диапазон измерений и приводит к нелинейной шкале.

Таким образом, современные гравиметры обладают высокой точностью и чувствительностью, что позволяет проводить детальные исследования силы тяжести и выявлять различные геофизические аномалии. Схема принципа астазирования, позволяющего повысить чувствительность упругой системы гравиметра, показана на рисунке 5.

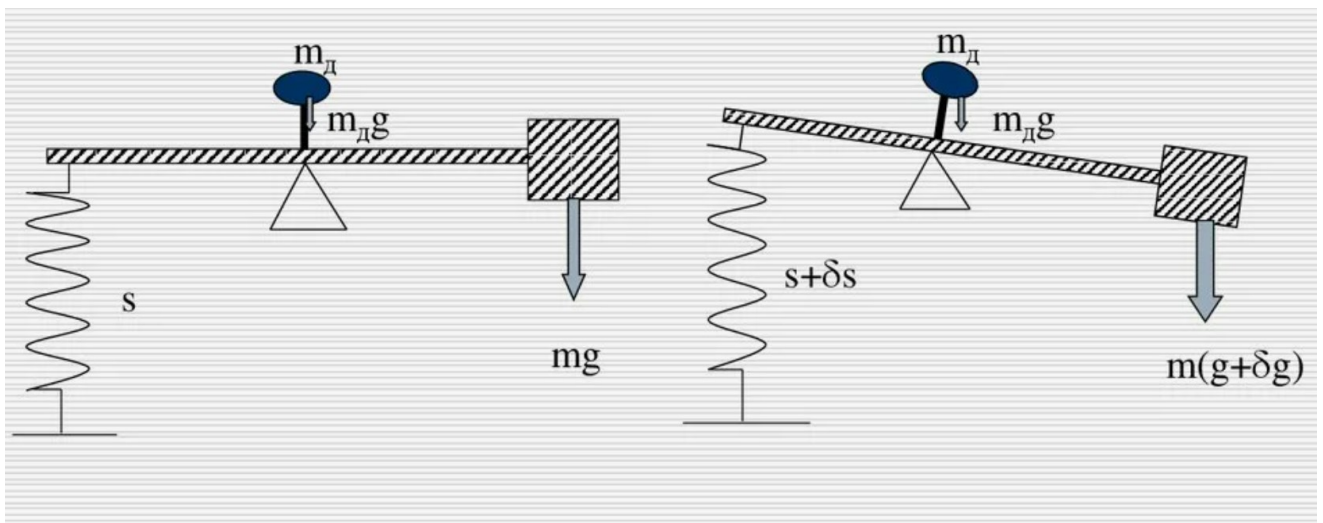


Рисунок 5. Принцип астазирования. Вместо m_d обычно используют дополнительную пружину

1.4.2. Гравиметр для съемки CG-6 Autograv™

SCINTREX CG-6 Autograv™ представляет собой гравиметр нового поколения (рисунок 6), который объединяет современный и интуитивно понятный пользовательский интерфейс с проверенным временем кварцевой сенсорной технологией, размещенной в прочном и легком корпусе. Этот инновационный прибор обеспечивает быстрые, надежные и точные измерения силы тяжести. Он

оснащен множеством функций для картографирования и последующей обработки данных, которые можно легко использовать с дополнительным планшетным компьютером, поставляемым вместе с новым программным обеспечением Lynx LG. Установка этого программного обеспечения также не вызывает сложностей. SCINTREX CG-6 Autograv™ предоставляет точные данные гравиметрических исследований с высокой эффективностью, делая процесс съемки более экономичным и удобным. Внешний вид гравиметра SCINTREX CG-6 Autograv™ приведен на рисунке 6.



Рисунок 6. Гравиметр для съемки SCINTREX CG-6 Autograv™

Особенности системы

SCINTREX CG-6 Autograv™ – это портативный измеритель гравитации с рядом выдающихся особенностей:

- Сокращенное время стабилизации между измерениями;
- Возможность работы в любых погодных условиях (от -40 до +45 °С);
- Пыленепроницаемый и водостойкий корпус;

- Интуитивно понятный интерфейс управления;
- Наклонный дисплей с подсветкой;
- Надежный кварцевый сенсор;
- Отсутствие необходимости в зажиме;
- Встроенный GPS-приемник;
- Поддержка связи по Bluetooth.
- Упрощенный интерфейс выравнивания;
- Встроенное запоминающее устройство на 4 ГБ;
- Двойная батарея большой емкости с возможностью горячей замены (до 24 часов работы при 25 °С);
- Повторяемость измерений 5 мкГал;
- Защита от ударов до 20 g с точностью до 5 мкГал;
- Сенсор с низким дрейфом (без коррекции: <200 мкГал /день);
- Низкий остаточный дрейф (<20 мкГал /день);
- Автоматические корректировки (приливы, наклоны, дрейф, температура).

Области применения

Разведка нефти и газа: измерение силы тяжести может помочь определить местоположение соляных куполов, в которых возможно присутствие нефти или газа, а также изменения плотности в нефтяных пластах, что облегчает процесс извлечения.

Минеральная разработка: гравиметрия способна обнаруживать отложения вулканических массивных сульфидов, ассоциированных с никелевыми месторождениями, алмазонасными кимберлитами, железными образованиями и ударными бассейнами. Она также помогает определить размеры депозитов.

Геологическое картирование: дополняет результаты геологического картирования, предоставляя данные о подповерхностных структурах.

Гражданское строительство: с помощью гравиметрии можно изучать целостность дорог, плотин и дамб, выявляя области слабости под поверхностью.

Геотехнические исследования: позволяет обнаруживать пустоты и полости, такие как туннели, ямы и провалы.

Региональные исследования гравитации: определяет типы пород, плотность почвы и наличие воды в регионе.

Геоидная карта: измерения силы тяжести на поверхности Земли позволяют применять точные коррекции к данным GPS для получения более точной высоты поверхности.

Археология: гравиметрия используется для поиска скрытых стен, зданий и гробниц, предоставляя археологам ценную информацию о подземных структурах.

1.4.3. Гравиметр Burris Gravity Meter™

Гравиметр Burris Gravity Meter™ – это инновационный продукт компании ZLS Corporation, расположенной в Остине, штат Техас, США. Этот прибор основан на изобретении Л. Лакоста и А. Ромберга 1942 года, использующем пружину нулевой длины (ZLS). В нем применена цифровая система с обратной связью, что позволяет эффективно компенсировать луч и использовать новейшие достижения в цифровых технологиях.

Этот гравиметр обладает широким диапазоном обратной связи, около 50 мГал, и обеспечивает быструю реакцию с высокой стабильностью и точностью. Сплав металла, применяемый для пружины нулевой длины, характеризуется низкими смещениями, что обеспечивает стабильность смещений: новоизготовленные пружины демонстрируют смещение около 1 мГал в месяц, а с течением времени – менее 0,5 мГал. Прототип показал даже более низкую скорость дрейфа, около 0,03 мГал в месяц.

Металлический микрометрический винт выбран для обеспечения диапазона измерений до 7000 мГал. Управление лучом осуществляется системой UltraGrav, которая включает линейную импульсно-широотно-модулированную (PWM) систему с электростатической обратной связью. Эта система производит электростатическое напряжение обратной связи от емкостного индикатора

положения, которое затем прикладывается к пластинам конденсатора, восстанавливая луч в нулевое положение и удерживая его там.

Ультра-миниатюрные электронные уровни гарантируют точную и надежную работу гравиметра. Эти уровни состоят из вертикального маятника длиной около 1,2 см с резонирующей частотой около 5 Гц и демпфированием 0,707 критического, и имеют разрешение одной угловой секунды. Они установлены ортогонально на крышке датчика, а их выход может контролироваться как на гальванометрах, установленных в крышке гравиметра, так и на экране основного компьютера.

Точное выравнивание прибора необходимо, поскольку в реальном времени ровные коррекции автоматически рассчитываются системой UltraGrav. Датчик, электронные уровни и важные электронные компоненты защищены от температурных изменений окружающей среды высокостабилизированной термостатированной печью, что позволяет эксплуатировать прибор при температуре окружающей среды от -15° до $+50^{\circ}\text{C}$.

Области применения

- Разведка нефти и газа: помогает определить местоположение соляных куполов, в которых возможно присутствие нефти или газа, а также изменения плотности в нефтяных пластах, что облегчает процесс извлечения.
- Минеральная разработка: позволяет обнаруживать отложения вулканических массивных сульфидов, никелевые месторождения, алмазоносные кимберлиты, железные образования и ударные бассейны, а также определять размеры депозитов.
- Гражданское строительство: используется для анализа целостности дорог, плотин и дамб, выявляя слабые места в подповерхностных структурах.
- Геофизическое картографирование: дополнение геологического картирования для получения более полных данных о подповерхностных структурах.
- Геотехнические исследования: обнаружение пустот и полостей, таких как туннели, ямы и провалы.

- Археология: поиск скрытых стен, зданий и гробниц.
- Исследования подземных вод: определение наличия и расположения подземных вод.
- Экологические исследования: анализ и мониторинг экологических условий.
- Тектонические исследования: изучение тектонических структур и процессов.
- Вулканология: исследование вулканической активности.
- Геотермальная разведка: оценка геотермальных ресурсов.

1.4.4. Гравиметр LaCoste Romberg (принцип нулевой длины пружины и системы обратной связи)

Принцип нулевой длины пружины был разработан для увеличения разрешения гравиметра посредством астатизации (рисунок 7). Патент на это изобретение был зарегистрирован Люсьеном Лакостом в 1942 году (патент США 2293437). Этот принцип лежит в основе знаменитых G- и D-метров LaCoste & Romberg, а также счетчиков L&R Earth Tide. Первоначально G- и D-метры обнулялись вручную, тогда как счетчики приливов и отливов имели сложную механическую систему обратной связи для непрерывной записи. Позже эти счетчики были оснащены системой электростатической обратной связи типа КСВ, разработанной в Ганноверском университете, что привело к преобразованию множества гравиметров.

Период внедрения этих систем составлял от 6 до 10 секунд, а диапазон обратной связи был около ± 10 Вольт, что соответствовало диапазону ± 10 мГал для G- и D-метров. В случае измерений земных приливов общий диапазон обратной связи составлял около 7 мГал.

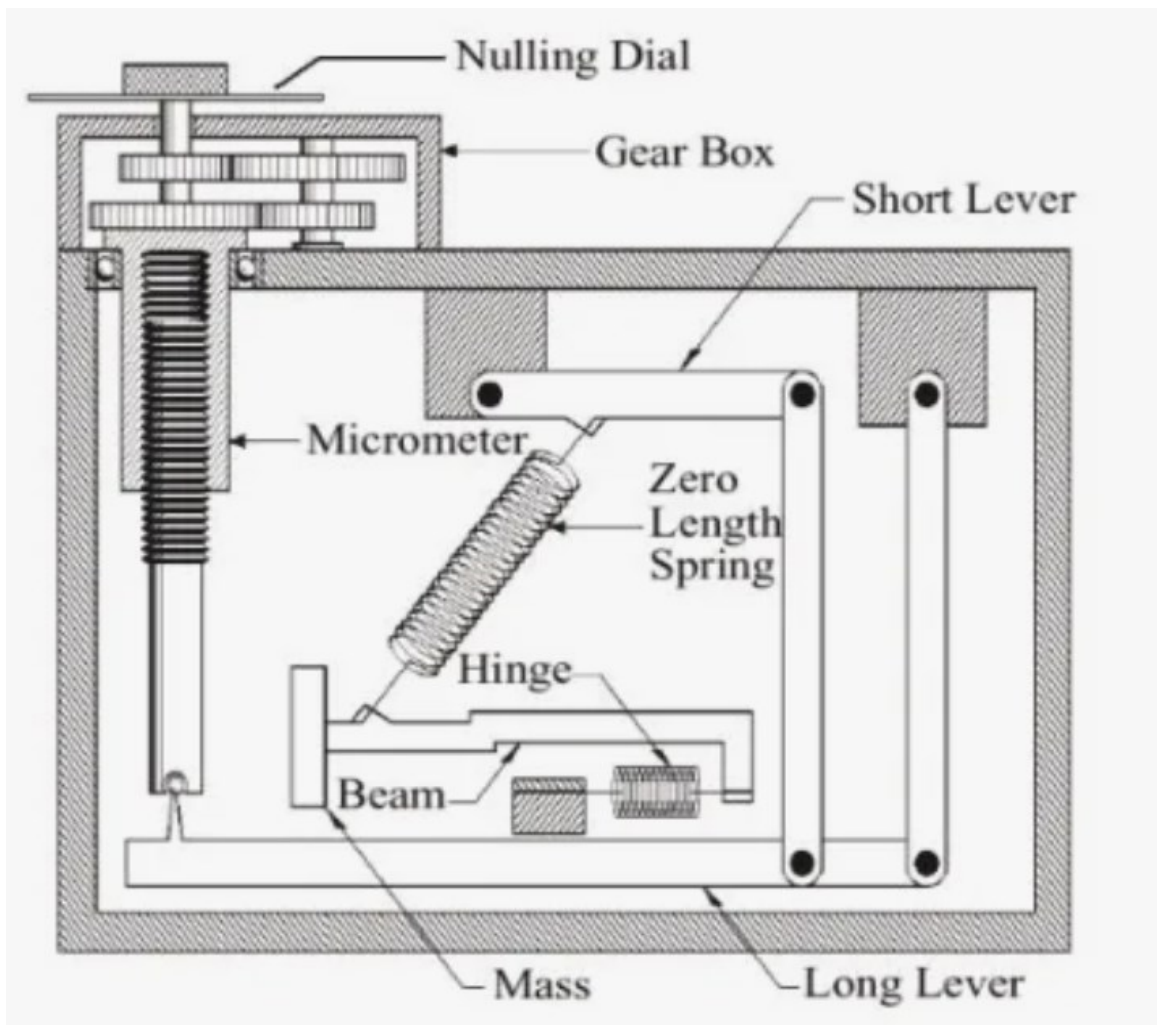


Рисунок 7. Принцип нулевой длины пружины и системы обратной связи

Управление осуществляется через коробку передач, включающую эскиз пластин конденсатора для считывания положения массы и подачи напряжения, необходимого для обнуления луча.

Система обратной связи гравиметра Burriss (рисунок 8) является частью полностью цифровой микропроцессорной системы автоматического считывания и регистрации данных UltraGrav™, установленной на PDA (личный цифровой ассистент) для гибкости в поле (с дополнительным беспроводным модулем PDA). Положение луча считывается, и линейная импульсно-широотно-модулированная (PWM) электростатическая система управления с обратной связью автоматически компенсирует луч. Диапазон обратной связи составляет ± 25 мГал. Если система обратной связи не может обнулить луч, шкала должна быть отрегулирована вручную.

В случае гравиметра Burris возможен выбор шагающего мотора для автоматической регулировки луча. В этом случае луч управляется к откалиброванному пункту шкалы (около каждых 50 мГал), что исключает круговые ошибки по всему диапазону винта 7000 мГал. В ходе рутинных полевых испытаний были достигнуты стандартные отклонения в пределах $\pm 0,003$ мГал или выше. Внешний вид гравиметра Burris Gravity Meter™ представлен на рисунке 8.

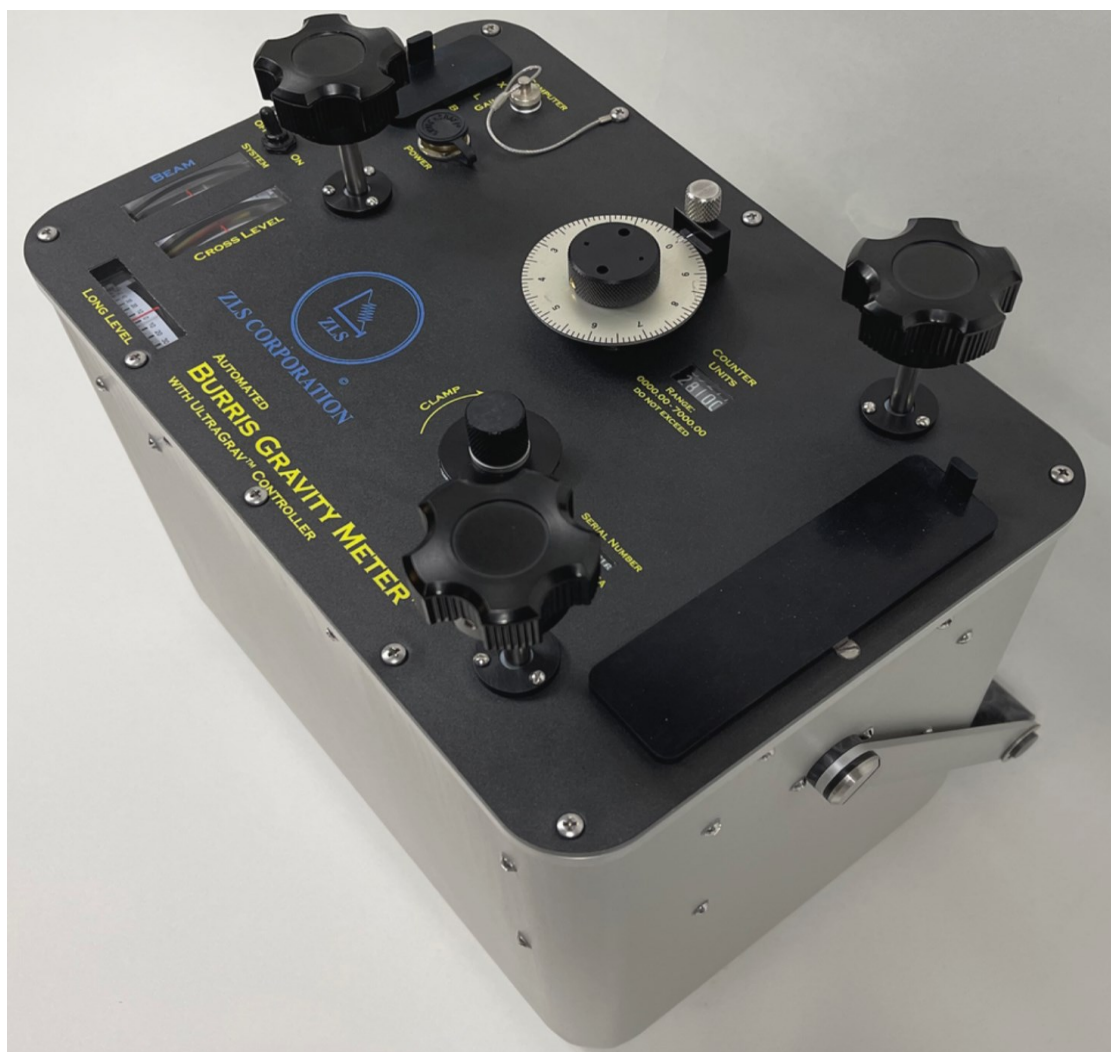


Рисунок 8. Гравиметр Burris Gravity Meter™

1.4.5. Гравиметр ГНШ-МА

Внешний вид гравиметра ГНШ-МА приведен на рисунке 9.

Области применения

- Разведка минералов;
- Геологическое картирование;

- Вулканология, сейсмология (прогноз и регистрация землетрясений, оползней, лавин), метеорология;
- Разведка нефти и газа;
- Инженерные работы;
- Региональные исследования гравитации.

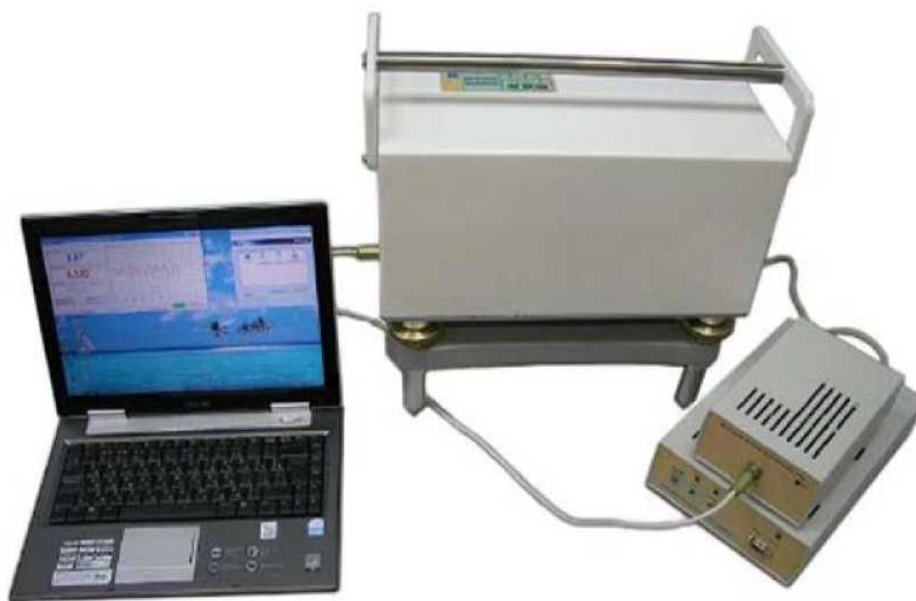


Рисунок 9. Гравиметр ГНШ-МА

Общие сведения

Гравиметр ГНШ-МА предназначен для относительного измерения ускорения силы тяжести (рисунок 9). Он работает по принципу измерения разностей ускорения силы тяжести на основе изменения деформации пружины, компенсирующей силу тяжести небольшого груза. Измерения проводятся последовательно на исходном пункте с известным значением ускорения силы тяжести и на исследуемом пункте.

Основная трудность при создании гравиметров заключается в необходимости обеспечить точное измерение малых упругих деформаций в полевых условиях. Для этого используются различные методы регистрации, такие как оптические, фотоэлектрические, емкостные и индукционные.

Чувствительность лучших гравиметров достигает нескольких десятитысячных долей мГал ($1 \text{ мГал} = 10^{-3} \text{ Гал}$, где $1 \text{ Гал} = 1 \text{ см/сек}^2$). Гравиметры калибруются на пунктах с известной разностью значений ускорения силы тяжести или при различных наклонах прибора. Наземные и скважинные гравиметры обеспечивают точность измерений до 0,01 мГал, морские донные – до 0,05 мГал, морские судовые – до 0,5 мГал, аэрогравиметры – до 5 мГал. Гравиметры обычно используются для картографирования пространственных изменений силы тяжести Земли и микрогравиметрических съемок, позволяя получать разрешение порядка нескольких миллиардных частей.

Гравиметрические исследования также применяются для контроля процесса заводнения на нефтяных и газовых месторождениях, выявляя изменения силы тяжести на поверхности, вызванные закачиванием воды в газовую шапку месторождения. Кроме того, гравиметры позволяют регистрировать приливные движения земли и другие длиннопериодные движения. Они также используются для слежения за движущимися объектами и контроля колебаний конструкций высотных зданий.

Достоинства

– Простота использования: после минимального обучения пользователь может быстро записывать данные с помощью нескольких нажатий клавиш. Полностью автоматизированные возможности устраняют ошибки считывания.

– Интерфейс пользователя: высококонтрастный ЖК-дисплей или графический дисплей (опция), возможность дистанционного управления по Wi-Fi.

– Полная портативность: включает гравитационный датчик, контрольную панель управления, батареи, блок дистанционного управления, GPS-приемник в защитном корпусе.

– Автоматическая компенсация и коррекция: автоматически компенсирует ошибки наклона, приливные коррекции и температурные изменения в реальном времени.

– Температурная стабильность: чувствительный элемент защищен стабилизированным термостатом, обеспечивающим стабильную работу при температуре от -40 до +45°C.

– Нечувствительность к внешним воздействиям: низкий коэффициент влияния атмосферного давления и магнитного поля.

– Автоматическое шумоподавление: интеллектуальная обработка сигнала и фильтрация сейсмических шумов.

– Низкий остаточный дрейф: управление измерительной системой обеспечивает минимальный дрейф менее 0,02 мГал в день.

Технические характеристики ГНШ-МА

- Тип датчика: металлическая пружина;
- Точность измерения: 1 мкГал;
- Стандартное отклонение: < 5 мкГал;
- Рабочий диапазон: 8000 мГал (узкий диапазон 20 мГал);
- Остаточный долговременный дрейф (статический): < 0,02 мГал в день;
- Диапазон автоматической компенсации наклона: ± 200 угловых секунд;
- Автоматическая коррекция: приливы, наклон прибора, температура, шумоподавление, сейсмический фильтр;
- Размеры: не более 45 x 25 x 35 см;
- Вес с аккумуляторами: 11 кг;
- Емкость батарей: (11+11) А·ч, две литий-ионных аккумуляторных батареи 14,4 В, режим работы поочередно-последовательный;
- Рабочая температура: от -40 до +45°C;
- Температурный коэффициент: 0,2 мкГал /°С (обычно);
- Коэффициент атмосферного давления: 0,15 мкГал /кПа (обычно);
- Коэффициент магнитного поля: < 0,2 мкГал /Гаусс;
- Память: ОЗУ 256 или 512 МБ SDRAM, Flash-память 2 МБ, Flash-диск CompactFlash 32 МБ (с возможностью расширения);
- Часы реального времени: день, месяц, год, часы, минуты, секунды;

- Цифровой выход: последовательный интерфейс RS-232, поддержка RS-232/422/485 и USB;
- Аналоговый выход данных: разрешение 12 бит;
- Дисплей: ЖК-дисплей с подсветкой, дополнительный графический дисплей стандарта VGA (опция);
- Клавиатура: 7 клавиш, возможны подключения проводных и беспроводных клавиатур и мышей.

1.4.6. Гравиметры GT-2A, GT-2A/1

Назначение средства измерений

Гравиметры GT-2A и GT-2A/1 предназначены для измерения разности значений ускорения свободного падения с подвижных объектов, таких как самолеты и морские суда.

Описание средства измерений

Принцип действия гравиметра основан на преобразовании разности значений ускорения свободного падения в электрическое напряжение с помощью чувствительного элемента. Этот элемент представляет собой пробную массу, подвешенную на плоских пружинах в поле постоянных магнитов. На пробной массе намотана измерительная обмотка, последовательно соединенная с прецизионным резистором. Положение пробной массы отслеживает оптический датчик положения, состоящий из светодиодов и фотодиодов. Сигнал с фотодиода через усилитель поступает на измерительную обмотку. Ток в обмотке и напряжение на резисторе являются мерой разности значений ускорения свободного падения. Это напряжение преобразуется в цифровой код и поступает в компьютер для дальнейшей обработки.

Гравиметр состоит из центрального прибора ГИ-1 (ГИ-1/1), поворотного стола СНД-1 с амортизатором, прибора управления и индикации ПУИ-1 и прибора питания ЭП-5. Центральный прибор содержит гравиметрический чувствительный элемент, установленный на платформе трехосной гировертикали с системой

интегральной коррекции. Использование GPS-информации обеспечивает стабильное положение платформы при маневрировании носителя.

Прибор управления и индикации ПУИ-1 принимает информацию от центрального прибора и позволяет оператору вводить команды и данные, а также накапливать данные гравиметрической съемки. Обмен информацией осуществляется через последовательный СОМ-порт. Прибор представляет собой промышленный компьютер с процессором Intel Atom 1,6 GHz, 1 GB RAM, 160 GB HDD и последовательным портом RS232.

Прибор питания ЭП-5 обеспечивает питание аппаратуры гравиметра от сети переменного или постоянного тока.

Гравиметры выпускаются в двух модификациях:

- GT-2A: для авиационного носителя;
- GT-2A/1: для морского надводного носителя.

Результаты измерений гравиметром GT-2A/1 выводятся в реальном времени, а гравиметром GT-2A – после обработки информации о координатах носителя.

Гравиметр состоит из трех отдельных устройств:

- Центральный прибор ГИ-1 (ГИ-1/1);
- Прибор управления и индикации ПУИ-1;
- Прибор питания ЭП-5.

Внешний вид составных частей гравиметра GT-2A/GT-2A/1 представлен на рисунках 10–12.



Рисунок 10. Внешний вид центрального прибора ГИ-1 (ГИ-1/1)



Рисунок 11. Внешний вид прибора управления и индикации ПУИ-1



Рисунок 12. Внешний вид прибора питания ЭП-5

Основные метрологические и технические характеристики гравиметров GT-2A и GT-2A/1 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Метрологические и технические характеристики гравиметра GT-2A, GT-2A/1

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерений разности значений ускорения свободного падения, Гал	= 4
Дрейф за 24 ч, мГал, не более	
- для гравиметра модификации GT-2A	5
- для гравиметра модификации GT-2A/1	1
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений разности значений ускорения свободного падения, мГал	
- для гравиметра модификации GT-2A	$\pm 1,0^*$
- для гравиметра модификации GT-2A/1	$\pm 1,0^{**}$
Рабочий диапазон значений ускорения свободного падения, Гал	976 - 984
Масса, кг, не более	
- центральный прибор ГИ-1 (ГИ-1/1)	52
- прибор управления и индикации ПУИ-1	3

Наименование характеристики	Значение характеристики
- стол поворотный СНД-1	23
- амортизатор	62
- прибор питания ЭП-5	14
Габаритные размеры (длина * ширина * высота), мм, не более	
- центральный прибор ГИ-1 (ГИ-1/1)	400*400*600
- стол поворотный СНД-1	420*420*280
- амортизатор	600*320
- прибор управления и индикации ПУИ-1	245*175*80
- прибор питания ЭП-5	490*380*220
Электропитание:	
- от источника переменного тока	220 ±20 В, 50±15 Гц
- от источника постоянного тока	27±3 В
Потребляемая мощность (от источника переменного и постоянного тока), В-А, не более	300
Срок службы , лет	10
Средняя наработка на отказ , ч	10000

1.4.7. Гравиметрический комплекс морской набортный ГМН-КМ

Внешний вид гравиметрического комплекса морского набортного ГМН-КМ приведен на рисунке 13.

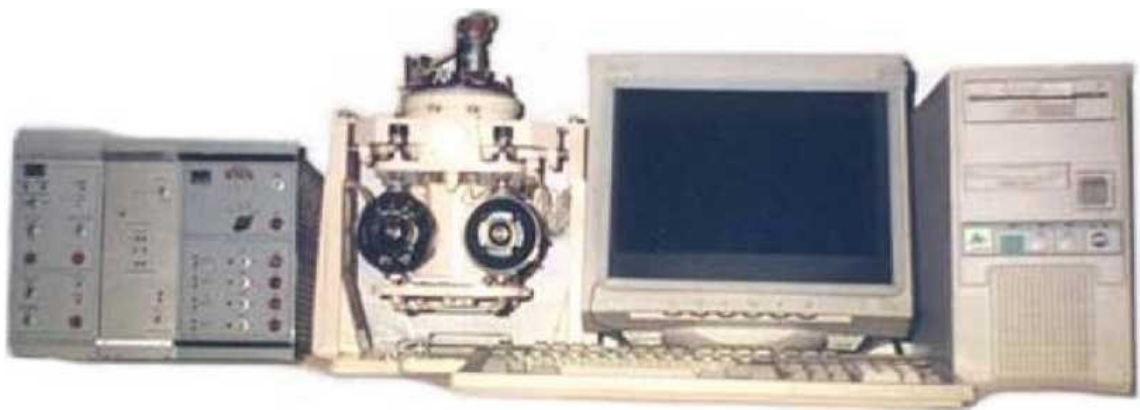


Рисунок 13. Гравиметрический комплекс морской набортный ГМН-КМ

Назначение

Комплекс ГМН-КМ предназначен для гравиинерциальных измерений в океанах, на шельфах и в прибрежно-лиманных зонах. Высокая точность,

помехозащищенность, автоматизация процесса измерений, визуализация данных, мобильность установки и высокая производительность делают этот комплекс особенно выгодным в сравнении с предшествующими разработками. Получение результатов в реальном времени также является значительным преимуществом.

Технические характеристики

- Диапазон измерения поля силы тяжести: 7000 мГал;
- Смещение нуль-пункта гравиметров: не более 0,2 мГал/сутки;
- Вес оборудования комплекса: не более 200 кг;
- Потребляемая энергия: 1,5 кВт;
- Требуемая площадь для установки комплекса: не более 8 м²;
- Масса гравиметра и электронного блока с аккумулятором: ≤ 200 кг;
- Средняя квадратическая погрешность измерения силы тяжести:
 - В океане при вертикальных возмущающих ускорениях до 200 Гал: до 1,0 мГал;
 - На шельфах и в прибрежно-лиманных зонах при вертикальных возмущающих ускорениях до 25 Гал: до 1,0 мГал.

1.4.8. Гравиметр наземный с кварцевой чувствительной системой и компьютерным управлением ГНУ-КВК

Внешний вид гравиметра наземного с кварцевой чувствительной системой и компьютерным управлением ГНУ-КВК представлен на рисунке 14.



Рисунок 14. Гравиметр наземный с кварцевой чувствительной системой и компьютерным управлением ГНУ-КВК

Назначение

Этот высокоточный гравиметрический прибор предназначен для съемок масштаба 1:50000 – 1:100000 и крупнее, мониторинга геологической среды, сейсмоопасных зон и инженерно-технических объектов. Чувствительная система гравиметра изготовлена из плавленого кварца и дополнена электрической индикацией положения чувствительного элемента, остаточных наклонов и температуры.

Технические характеристики

- Погрешность единичного измерения: не более 0,02 мГал;
- Диапазон измерений: 80-450 мГал;
- Остаточное смещение нуля-пункта: 0,2 мГал/сутки;
- Время измерений на пункте: 3 минуты;
- Количество пунктов измерений в памяти: не менее 3000;
- Масса гравиметра и электронного блока с аккумулятором: ≤ 12 кг.

1.4.9. Гравиметр наземный кварцевый ГНУ-КВ

Внешний вид гравиметра наземного узкодиапазонного с кварцевой чувствительной системой класса «В» ГНУ-КВ показан на рисунке 15.



Рисунок 15. Общий вид гравиметра наземного узкодиапазонного с кварцевой чувствительной системой класса «В» ГНУ-КВ

Назначение

Гравиметр ГНУ-КВ предназначен для выполнения полевых работ, региональной гравиметрической съемки и создания опорных гравиметрических сетей. Он обеспечивает высокоточные измерения ускорения силы тяжести и работает в температурном диапазоне от -25°C до $+40^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности до 95%. Прибор устойчив к вибрациям с ускорением до 20 м/с^2 при частоте 70 Гц. Компактные размеры и малый вес делают его удобным для использования в труднодоступных районах.

Технические характеристики

- Диапазон измерений ускорений силы тяжести: 80-500 мГл;
- Диапазон изменений ускорений силы тяжести с перестройкой: 6000-7000 мГл;
- Средняя квадратическая погрешность единичного измерения: 0,02 мГл;
- Чувствительность при измерениях силы тяжести: $<0,001 \text{ мГл}$;
- Остаточное смещение нуля-пункта: 0,2 мГл/день;
- Время измерений на пункте: 3 минуты;

- Количество пунктов измерений в памяти: 3000;
- Масса гравиметра и электронного блока с аккумулятором: 5 кг;
- Габаритные размеры (высота × диаметр): 450 × 210 мм.

1.5. Обоснование выбора гравиметра ГНУ-КВ

Для проведения описанных исследований был выбран относительный кварцевый гравиметр ГНУ-КВ. Данный прибор (гравиметр наземный узкодиапазонный, модификация «КВ») относится ко второму классу точности [40] и изначально предназначен для детальных гравиразведочных работ. Его упругая система на кварцевом маятнике обладает высокой чувствительностью: порог чувствительности порядка 0,006 мГал, то есть ~6 мкГал [40]. Практическая чувствительность индикатора составляет ~3 –10 мкГал, что позволяет регистрировать даже мельчайшие изменения гравиинерциальных измерений [20]. Важной причиной выбора ГНУ-КВ стала его портативность и неприхотливость: прибор массой около 4,5 кг компактен и пригоден для длительной работы в полевых условиях [40]. В отличие от гравиметров, требующих стационарной установки и сложного обслуживания, кварцевый гравиметр прост и относительно недорог в эксплуатации [21]. Это позволяет развернуть сеть наблюдений без чрезмерных затрат. Кроме того, ГНУ-КВ – прибор непрерывного действия: в отличие от абсолютных баллистических гравиметров, дающих дискретные измерения, он обеспечивает запись непрерывного временного ряда значений g .

Таким образом, ГНУ-КВ подходит для мониторинга медленных вариаций: его диапазона и чувствительности достаточно, чтобы одновременно фиксировать приливные колебания, суточно-сезонные эффекты и ожидаемые предвестниковые сигналы.

Глава 2. Аппаратура и методика эксперимента

2.1. Описание гравиметра ГНУ-КВ и его модернизация

Гравиметр ГНУ-КВ относится к классу кварцевых узкодиапазонных наземных гравиметров, предназначенных для относительных измерений ускорения силы тяжести в полевых условиях [14]. Его чувствительным элементом является астазированный маятник, конструкция которого реализована по схеме сейсмографа Б. Б. Голицына [9]. Иными словами, внутри прибора расположена упругая система в виде горизонтального маятника с массой-грузом, подвешенного на тонкой кварцевой нити и уравновешенного пружиной особой конструкции. Такая система находится в положении неустойчивого равновесия: основная (астазирующая) пружина подобрана так, что при некотором номинальном значении силы тяжести маятник находится близко к равновесию (нулевому положению). Небольшие изменения силы тяжести выводят маятник из этого равновесия, вызывая его заметное отклонение – благодаря астазированию чувствительность к изменениям резко повышается [40]. На рисунке 16 приведена схема чувствительной системы гравиметра данного типа: маятник подвешен на горизонтальной нити, связанной с упругими элементами. Главная астазирующая пружина прикреплена одним концом к маятнику, другим – к рычагу, жестко связанному с корпусом, создавая восстанавливающий момент, почти компенсирующий вес маятника [15]. Дополнительно маятник удерживается крутильной упругостью подвесной нити. Весь чувствительный блок изготавливается из кварца, что обеспечивает термостабильность системы [9].

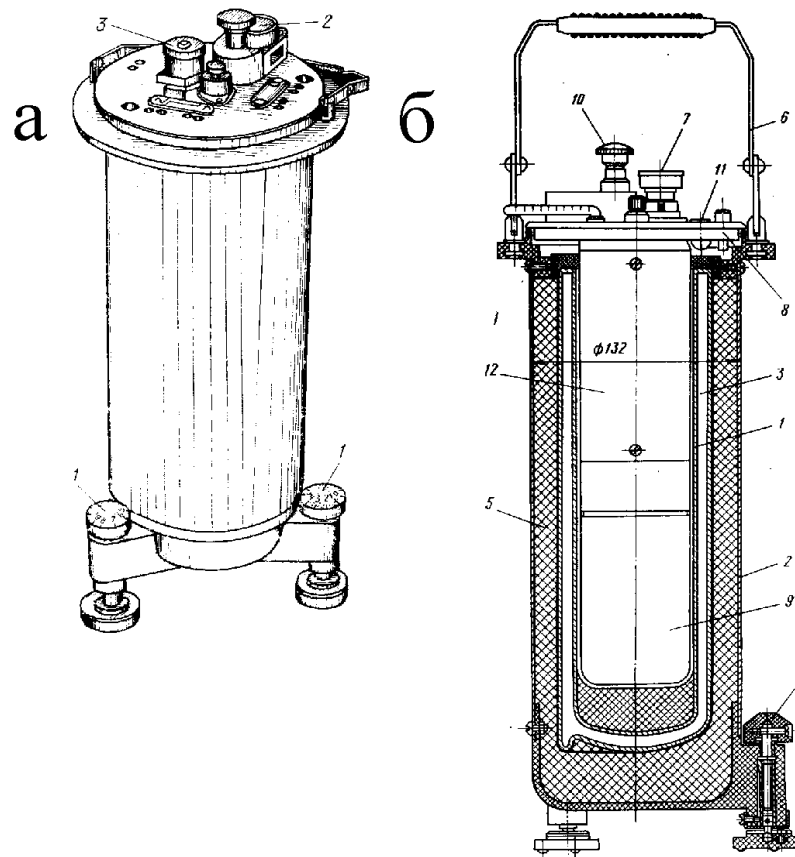


Рисунок 16. Схема устройства астазированного кварцевого гравиметра по принципу сейсмографа Голицына: а – внешний вид гравиметра: 1 – установочные винты; 2 – отсчётное микрометрическое устройство; 3 – окуляр; б – разрез гравиметра: 1 – средняя часть гравиметра; 2 – внешний кожух; 3 – сосуд Дьюара; 4 – установочный винт; 5 – теплоизоляция; 6 – ручка для переноски; 7 – окуляр; 8 – верхняя плата; 9 – вакуумная камера; 10 – отсчётное микрометрическое устройство; 11 – уровень; 12 – теплозащитный столб

На горизонтальной нити подвеса закреплен маятник с грузом; основная пружина поддерживает маятник, создавая условие неустойчивого равновесия. Измерительная (компенсационная) пружина через систему рычагов соединена с микрометрическим винтом измерительного устройства. При изменении силы тяжести g маятник отклоняется, что фиксируется по смещению индексной метки относительно нуля шкалы. Для выполнения измерения оператор поворотом микрометрического винта изменяет натяжение измерительной пружины, возвращая индекс маятника на нуль шкалы; по числу оборотов винта судят о величине изменения ускорения тяжести [9]. Положение маятника в классическом гравиметре ГНУ-КВ определяется оптическим способом: на конце маятника

закреплен индикатор (зеркальце), по отражению света, от которого наблюдается индексная метка через окуляр со шкалой [9]. Цена деления отсчетной шкалы составляет порядка нескольких миллигал (например, около 5–6 мГал) [14], что определяет предельную чувствительность визуальных отсчетов. Абсолютная погрешность измерений разности g данным прибором оценивается в $\pm 0,03$ мГал [14] при использовании стандартной методики компенсированных отсчетов. Конструктивная схема чувствительной системы гравиметра ГНУ-КВ приведена на рисунке 17.

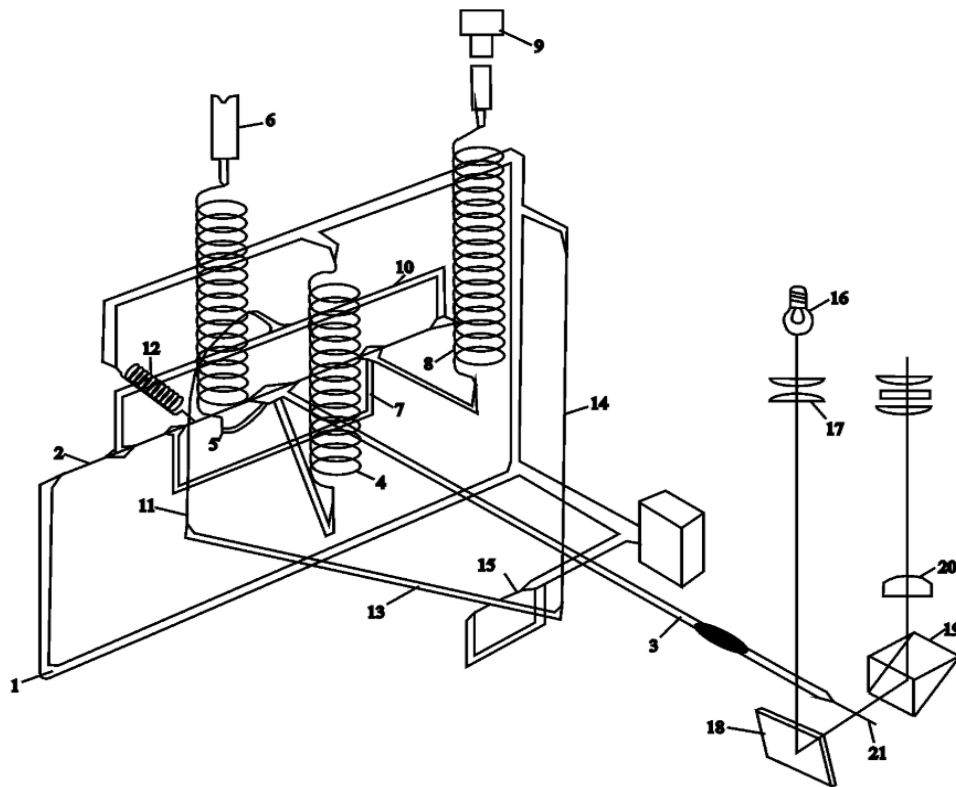


Рисунок 17. Чувствительная система гравиметра: 1 – кварцевая рамка; 2 – тонкая кварцевая нить; 3 – маятник; 4 – рычаг с главной астазирующей пружиной; 5 – диапазонный рычаг с диапазонной пружиной; 6 – диапазонный винт; 7 – измерительная рамка; 8 – рычаг с измерительной пружиной; 9 – микрометрический винт с шестерёнкой счётчика оборотов; 10 – рамка температурной компенсации; 11 – нить компенсации линейной составляющей температуры; 12 – пружина компенсации нелинейной составляющей температуры; 13 – рычаг температурной компенсации; 14 – металлическая нить; 15 – ось, на которой закреплён рычаг (13); 16 – лампочка источника света; 17 – система линз; 18 – зеркальце; 19, 20 – призмы; 21 – кварцевый стерженёк на конце маятника

В исходной конфигурации гравиметра ГНУ-КВ измерение приращений силы тяжести выполняется статическим методом – по смещению равновесного положения маятника, компенсированному с помощью измерительной пружины и микрометрического винта. На каждом пункте измерения оператор вращает винт до совмещения индекса маятника с нулевой меткой шкалы, после чего считывает значение по шкале отсчетного устройства (шестерёнке счетчика оборотов) [9]. Таким образом, гравиметр работает в режиме однократных дискретных отсчетов: на каждом пункте получается одно значение изменения силы тяжести относительно базового пункта. Для повышения точности каждый отсчет обычно получают как среднее из нескольких взаимно согласованных установок маятника на нуль. При дальнейшей переноске прибора на другой пункт производится новая настройка винта для компенсации разности g между пунктами. Подобная методика эффективна для геодезических измерений гравиметрической съемки, однако она не позволяет регистрировать непрерывные вариации силы тяжести или колебания маятника во времени. Иными словами, в стандартном режиме эксплуатации гравиметр ГНУ-КВ не записывает свою реакцию как функцию времени, а дает лишь стационарные отсчёты при установлении равновесия маятника на каждом измерении.

2.2. Модернизация прибора

В рамках данной работы конструкция гравиметра ГНУ-КВ была доработана с целью приспособления прибора к режиму непрерывной регистрации низкочастотных колебаний гравиинерциальных измерений.

Во-первых, реализована замена оптической системы отсчёта на электронную: вместо обычного окуляра установлен цифровой видеокомплекс (камера), позволяющий автоматически фиксировать положение индикатора маятника [22, 30].

Во-вторых, прибор переведен в режим свободных колебаний маятника (режим сейсмографа): компенсирующий винт фиксируется в определенном положении, после чего маятник предоставлен свободно отклоняться под действием

инерционных возмущений (флуктуаций силы тяжести или внешних вибраций грунта).

Таким образом, гравиметр ГНУ-КВ превращается в портативную сейсмологическую станцию, регистрирующую естественные низкочастотные колебания грунта в диапазоне порядка Гц [5]. Эквивалентность гравитационного и инерционного полей приводит к тому, что в этом режиме прибор чувствителен как к реальным вариациям силы тяжести, так и к малым ускорениям, вызываемым сейсмическими (инерционными) движениями грунта. При достаточно высокой чувствительности маятникового датчика (измеряемой долями мГал) модернизированный комплекс способен регистрировать микросейсмические колебания амплитудой порядка долей микрометра и соответствующие им ускорения грунта величиной в десятки нано-g (единиц микрогал) [5].

В качестве системы электронного считывания показаний использована цифровая камера, интегрированная с оптической частью прибора. В экспериментах применялся электронный окуляр – камера-микроскоп Levenhuk M35 Base с разрешением 640×480 пикселей и частотой съемки 30 кадров/с [22, 30]. Камера монтируется на посадочное место окуляра гравиметра (рисунок 18) таким образом, чтобы объектив был сфокусирован на изображение индексной метки маятника. Замена визуального наблюдения на видеорегистрацию решает задачу автоматизации сбора данных: показания прибора фиксируются непрерывно на протяжении эксперимента без участия оператора [22, 30]. Важным преимуществом выбранного оптического метода является его ненавязчивость: камера никак не воздействует на механическую систему гравиметра (в отличие от, например, электромагнитных датчиков положения, которые могли бы оказывать тормозящее влияние на маятник) [22, 30]. Рассматривался также вариант применения лазерного оптического датчика расстояния для регистрации колебаний маятника, однако его реализация оказалась затруднительной из-за сложности калибровки и высокой стоимости оборудования [22, 30]. В итоге видеокамера была признана оптимальным решением благодаря своей простоте, надежности и достаточной точности фиксации положения маятника.



Рисунок 18. Гравиметр ГНУ-КВ с установленной камерой (цифровым окуляром)

Примечание: камера крепится на место штатного окуляра прибора и подключается к вычислительному комплексу для записи видеоизображения индикатора маятника [22, 30].

Описание модернизированного комплекса

Маятниковая система гравиметра ГНУ-КВ в режиме свободных колебаний обладает собственными колебаниями с частотой порядка единиц герц (за счет остаточной упругости основной пружины и крутильной жесткости подвеса). При отсутствии внешних возмущений маятник будет оставаться около положения равновесия, однако малейшие изменения силы тяжести g или инерционные толчки основания (грунта) вызовут его отклонения, которые будут зарегистрированы камерой. Благодаря высокой чувствительности (условие астазиса), прибор способен реагировать на крайне слабые воздействия – по оценкам, до десятых долей микрогала [5]. Для экспериментов гравиметр устанавливается на стабильном

основании; важным условием является гашение высокочастотных вибраций и шумов, которые могут воздействовать на прибор (например, вибрации от шагов, транспорта и т.п.). В исследованиях прибор располагался на фундаментальной площадке в стационарном пункте «Ледово» под Москвой, оснащенный постаментом для длительных гравиметрических наблюдений. Такое размещение обеспечивает минимизацию посторонних колебаний и дрейфа нуля прибора за счет стабильной температуры и изоляции от вибраций. Перед началом съёмки маятник гравиметра разблокируется, после чего система оставляется на ~30 минут для успокоения переходных процессов и термостабилизации. Далее осуществляется непрерывная регистрация колебаний маятника в течение нескольких часов.

2.3. Система сбора данных и оцифровка сигнала

Организация эксперимента: размещение; продолжительность и частота измерений.

После модернизации гравиметра возникает задача организации непрерывного сбора и хранения данных о положении маятника [46]. Решение этой задачи реализовано посредством цифровой видеозаписи с последующим программным распознаванием изображения. Процесс можно разбить на два этапа: (1) регистрация видео с камеры во время эксперимента, и (2) оцифровка видеозаписи, то есть преобразование видеопотока в численный временной ряд координаты индикатора [44]. Ниже описана техническая реализация каждого из этапов.

Регистрация видеосигнала

Камера, установленная на гравиметре, подключается к компьютеру, который выполняет захват и запись видео. Использовалось штатное программное обеспечение камеры Levenhuk, позволяющее сохранять видеопоток в формате AVI на жесткий диск ПК. Частота съёмки выбрана 30 Гц, что значительно выше верхней границы ожидаемого спектра колебаний (0,5 Гц), то есть соблюдается теорема Котельникова для последующего анализа сигнала [22, 30]. Разрешение видео 640×480 достаточно для различения положений индикатора с точностью до малой

доли деления штатной шкалы. Для экономии места на диске при длительной записи можно использовать сжатие видео; однако при наличии достаточного объёма памяти предпочтительно сохранять несжатое видеоизображение, чтобы избежать потери точности при последующем анализе. В экспериментальных сеансах, проведенных авторами, продолжительность одной непрерывной записи составляла около 2 часов. При частоте 30 кадров/с это эквивалентно получению порядка $30 \text{ кадров/с} * 7200 \sim 216000$ кадров видео. Однако для ускорения обработки и уменьшения объема данных часто оказывается достаточным использовать пониженный фреймрейт. В частности, применялась частота дискретизации 5 Гц (получение каждого 6-го кадра из видеопотока), которая всё ещё вдвое выше верхней частоты интересующих нас сигналов. Так, двухчасовая запись при эффективной частоте 5 отсчетов/с дает дискретных отсчетов положения маятника. Именно такой массив данных (36000 значений за 2 часа) был получен, например, в работе по анализу вариаций гравиинерциальных измерений методом R/S-анализа [36]. Данный алгоритм также используется для потокового распознавания сигнала, т.е. в режиме реального времени.

2.4. Алгоритм распознавания видеоизображения

Для преобразования видеоданных в численный ряд разработан специальный программный алгоритм компьютерного зрения [11, 59, 92]. Он решает задачу определения координаты индикатора (индексной метки) на каждом кадре видеозаписи. В конечном итоге результатом работы алгоритма является последовательность чисел – смещений индикатора маятника относительно первоначального положения, для i -го кадра (при известном масштабе в единицах ускорения, см. калибровку ниже) [13]. Блок-схему алгоритма распознавания можно представить следующими шагами:

1. Предобработка кадра. Каждый кадр видео проходит фильтрацию: повышается контрастность изображения (индекс маятника светлый на тёмном фоне, что облегчает пороговую фильтрацию), выполняется сглаживание шумов и

подавление случайных бликов [22, 30]. Цель предобработки – упростить последующее выделение границ индикатора.

2. Детекция индикатора. На контрастном очищенном кадре определяется положение индикаторной метки. Для этого алгоритм выполняет поиск границ маятника (например, с использованием методов поиска контура или градиентного изменения яркости). После нахождения границ вычисляется геометрический центр индикатора – эта координата принимается за фактическое положение маятника на данном кадре [22, 30]. Если на каком-то кадре алгоритм обнаруживает аномальное смещение (скачок позиции, не соответствующий инерционному характеру движения маятника), такой кадр может быть помечен как ошибочный и обработан повторно или откорректирован с помощью аппроксимации (например, путем интерполяции между соседними корректными кадрами или с привлечением моделей движения) [22, 30].

3. Прогнозирующий контроль (опционально). Для повышения надежности распознавания опробован подход с использованием рекуррентной нейронной сети (LSTM). Идея в том, что на основе предыдущих отсчетов можно предсказывать ожидаемое положение индикатора на следующем кадре, а затем сравнивать прогноз с фактически распознанным положением [22, 30]. В случае значительного рассогласования алгоритм сигнализирует о возможной ошибке распознавания и может повторно проанализировать кадр (например, с другими параметрами фильтрации) [22, 30]. Такой подход улучшает устойчивость работы программы при наличии помех. Однако следует отметить, что применение машинного обучения в данном алгоритме носит экспериментальный характер [22, 30]; базовая версия алгоритма справляется с задачей выделения координаты индикатора в силу чёткой контрастности метки и фона.

4. Формирование выходных данных. После обработки всех кадров формируется временной ряд – массив координат центра индикатора маятника x_i (в пикселях) по времени t_i . Частота дискретизации этого ряда равна частоте выборки кадров (например, 5 Гц). Данные сохраняются в формате, удобном для дальнейшего анализа (например, в виде таблицы значений или файла с временным

рядом). На рисунке 19 приведен пример результата – фрагмент оцифрованной записи колебаний индикатора.

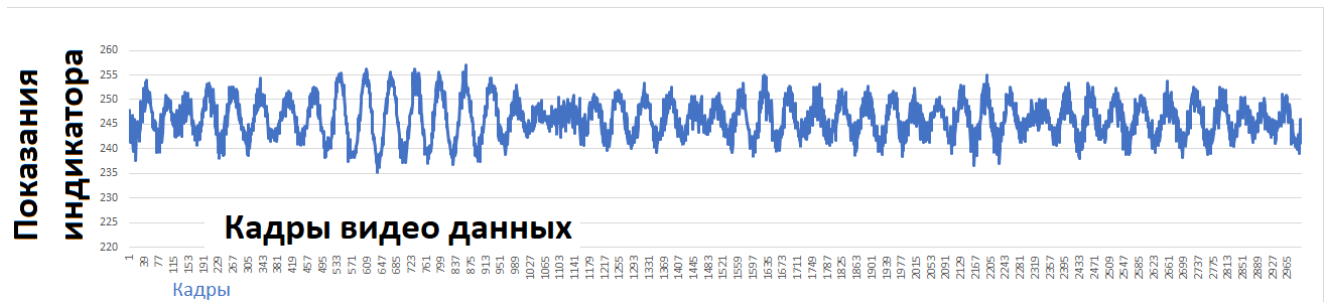


Рисунок 19. Пример оцифрованного сигнала гравиметра (фрагмент). По оси абсцисс отложено время t , по оси ординат – смещение индикатора маятника (в делениях шкалы или пикселях)

Полученный ряд пиксельных координат нуждается в преобразовании к физическим единицам и очистке от возможных ошибок. Ниже описаны процедуры калибровки и фильтрации сигнала [58].

2.5. Предварительная подготовка и обработка инструментальных данных

Формирование временного ряда дискретных отсчетов

На этапе предварительной обработки выполняется перевод «сырых» оцифрованных данных (координат индикатора в пикселях на кадре) к гравиинерциальным измерениям в стандартизованных единицах, а также очистка временного ряда от шумов и артефактов.

Этот этап включает:

1. калибровку шкалы (определение коэффициента перевода пикселей в мГал),
2. коррекцию дрейфа нуля,
3. фильтрацию выбросов и сглаживание шума,
4. подготовку сегментов данных для дальнейшего анализа.

Калибровка и масштабирование

Для преобразования единиц измерения была выполнена калибровка системы «индикатор + камера». Суть калибровки состоит в установлении количественного

соотношения между смещением индикатора (в пикселях или делениях шкалы) и изменением g в единицах ускорения (мГал). Применены два взаимно дополняющих метода: динамический импульсный метод и статический градиентный метод [5]. В первом случае на чувствительную систему подавался калибровочный сигнал известной амплитуды: вручную поворачивался микрометрический винт компенсационной пружины на фиксированный небольшой угол. Например, поворот винта на 0,1 оборота соответствует изменению напряжения измерительной пружины примерно на 0,6 мГал [5]. Такое воздействие приводило к скачкообразному смещению маятника; записывая отклик прибора, определяли, сколько цифровых отсчетов соответствует 0,6 мГал. Во втором методе использовалось известное значение вертикального градиента силы тяжести. Гравиметр последовательно устанавливался на разных высотах, и записывались микросейсмы на каждой высоте. Разность показаний прибора между уровнями давала альтернативную оценку масштаба [5]. Оба подхода дали близкие результаты, позволив определить переводной коэффициент для системы (рисунок 20). Корректность и воспроизводимость процедуры оцифровки дополнительно оценены статистически: распределение измеренных значений значимо приближено к нормальному закону, максимальная ошибка его аппроксимации не превышает 2,7%, максимальное отклонение функции распределения составляет 0,027, а коэффициент детерминации для всех рассмотренных выборок не ниже 99%. Это подтверждает статистическую устойчивость разработанной процедуры регистрации колебаний индикатора.

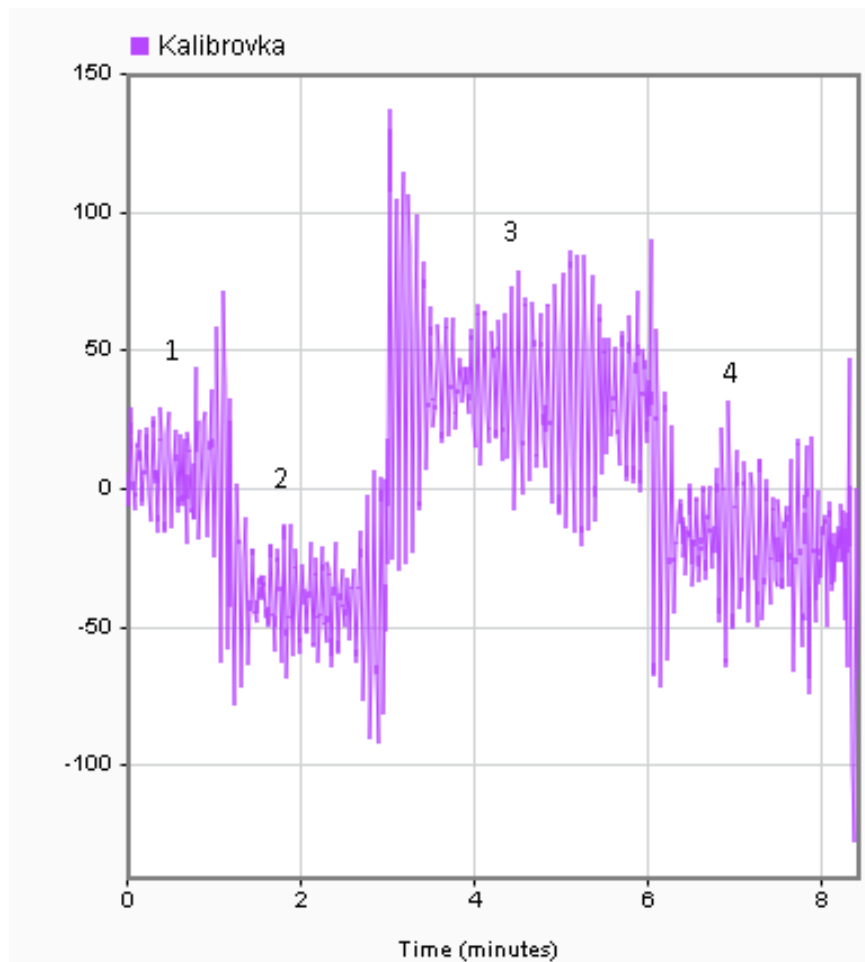


Рисунок 20. График колебаний индикатора ГНУ-КВ при проведении эксперимента по калибровке. Числами 1, 2, 3, 4 отмечены периоды с различным положением калибровочного винта

Коррекция нулевого дрейфа

Кварцевые гравиметры подвержены дрейфу нуля – медленному изменению исходного положения равновесия маятника со временем, обусловленному релаксацией упругих элементов и внешними факторами (например, температурой, лунно-солнечными вариациями). По паспорту прибора ГНУ-КВ суточный дрейф не превышает 2 мГал [14]. В ходе двухчасового опыта дрейф может достигать $\sim 0,1-0,2$ мГал, что сопоставимо с полезным сигналом. Поэтому перед анализом временного ряда важно исключить трендовую составляющую. Для этого из записанных данных вычитается низкочастотный дрейф, аппроксимированный, например, линейной или полиномиальной функцией. В данном случае была рассчитана линейная тенденция по методу наименьших квадратов, характеризующая изменение среднего положения маятника за 2 часа, и эта

тенденция была вычтена из ряда. После удаления дрейфа нуля ряд колебаний был центрирован относительно нуля (среднее значение) – что соответствует предположению о стационарности ускорения в среднем за время опыта.

Фильтрация шумов и выбросов

Оцифрованный сигнал неизбежно содержит шумовую составляющую, вызванную как собственными шумами оптического тракта (шум матрицы камеры, дискретизация изображения), так и внешними факторами (высокочастотные вибрации пола, акустические воздействия и т.п.) [54]. Стандартное отклонение шума по оценкам составляло порядка 0,05–0,1 мГал при частоте дискретизации 5 Гц. Для улучшения соотношения сигнал/шум применялись фильтры сглаживания. В частности, использован цифровой сглаживающий фильтр низкой частоты (напр., скользящее среднее по окну 3–5 отсчетов) для устранения колебаний с частотой выше 1 Гц, которые не представляют интереса для данного исследования. Также применялась медианная фильтрация для удаления выбросов: если некоторые точки временного ряда резко выбиваются из общего тренда (например, из-за ошибок распознавания на отдельных кадрах или кратковременных всплесков помех), они заменяются на медианное значение соседних точек [50]. После такой очистки сигнал приобретает более гладкий характер, пригодный для последующего спектрального анализа. Кроме того, на этапе фильтрации проверялось сохранение энергии сигнала в целевом диапазоне частот 0,05–0,5 Гц: важно не «загладить» полезные низкочастотные колебания при устранении шумов.

Подготовка данных к анализу

Очищенный и откалиброванный временной ряд представлял собой основу для дальнейших научных изысканий. В зависимости от целей анализа, данные могут подвергаться дополнительной сегментации и преобразованиям. В рамках исследования особый интерес представляло выявление стационарных и нестационарных участков сигнала. Поэтому обработанный ряд разбивался на последовательные сегменты (например, по 30 минут) для отдельного анализа каждого из них. Для каждого сегмента вычислялся спектр колебаний, оценивалось

изменение характеристик шума во времени. Такой подход позволил обнаружить однородные блоки – интервалы, в пределах которых спектральные свойства сигнала оставались примерно постоянными, и точки нарушения стационарности, где спектр менялся (что могло указывать на изменения во внешних воздействиях) [22, 30]. В дальнейшем эти данные использованы для геофизической интерпретации: например, сравнение спектров по сегментам позволяет выделить участки с аномально высокой вибрационной активностью грунта. Кроме того, временной ряд был подготовлен для расчетов специализированных метрик – таких, как показатель Хёрста (в рамках R/S-анализа) [36] и других статистических характеристик. Все перечисленные мероприятия по обработке данных обеспечили надёжность и точность последующего анализа вариаций гравиинерциальных измерений, регистрируемых модернизированным гравиметром ГНУ-КВ.

В данной главе подробно описана экспериментальная аппаратура и методика измерений с использованием модернизированного гравиметра ГНУ-КВ. Приведена конструкция прибора (астазированный маятниковый датчик с кварцевой пружиной и микрометрическим отсчетным устройством) и изложены изменения, внесенные для реализации режима непрерывной регистрации. Описана система сбора данных на основе видеокамеры и алгоритма распознавания положения маятника на каждом кадре, позволяющая получить дискретный временной ряд значений с высокой точностью. Рассмотрены процедуры предварительной обработки данных – калибровка масштаба, устранение дрейфа, фильтрация шумов и выбросов, благодаря которым из исходного видеосигнала получен очищенный сигнал вариаций гравиинерциальных измерений, пригодный для анализа. Показано, что разработанная методика обеспечивает статистически устойчивую процедуру оцифровки: распределение измеренных значений значимо приближено к нормальному закону, максимальная ошибка его аппроксимации не превышает 2,7%, максимальное отклонение функции распределения составляет 0,027, а коэффициент детерминации для всех рассмотренных выборок не ниже 99%. Эти результаты подтверждают корректность дальнейшего использования оцифрованных данных в задачах спектрального и статистического анализа Δg .

Глава 3. Современные методы параметризации вариаций гравиинерциальных измерений

В последнее время растет интерес к изучению и анализу длинноволновых составляющих потенциальных полей, и, в частности, изучению временных вариаций гравиинерциальных измерений, поскольку они обеспечивают данные о кинематике и динамике Земли для решения ряда фундаментальных и прикладных задач геофизики [45]. Особый интерес представляют гравиинерциальные измерения, вызванные внутренними геодинамическими процессами. Изменения гравиинерциальных измерений, связанные с землетрясениями и активным вулканизмом, имеют большое значение как предвестники этих явлений. Измерения до и после активной фазы важны для разработки динамических моделей накопления и разрядки напряжений при землетрясениях и пониманию процессов их подготовки, а также построению моделей миграции вещества магмы и вариаций плотности в вулканах.

Исходным материалом для исследования физических процессов являются временные ряды. Примерно до середины прошлого века господствовала достаточно упрощенная, «наивная», точка зрения на временные ряды данных. Считалось, что любой ряд содержит лишь общий тренд, регулярную и случайную компоненты, параметры которых не меняются. Причем тренд можно было рассматривать как фрагмент регулярного движения с очень большим периодом. Методы анализа рядов сводились к выделению регулярных составляющих из ряда таким образом, чтобы в остатке оказался «белый шум» (так называемое «выбеливание» ряда). Далее определялись параметры регулярной составляющей (периоды, амплитуды) и стохастической (моменты распределений). После этого считалось, что параметризация выполнена, и вся значимая информация из ряда извлечена. Такая точка зрения молчаливо предполагала, что любой временной ряд является непрерывным, стационарным, линейным, то есть может быть представлен с заданной точностью суперпозицией тех или иных гладких функций, а случайная компонента (ошибки измерений) является стационарным гауссовым шумом.

Параметризация играет очень важную роль в получении новой информации о любых системах или процессах.

Параметризация – это извлечение из данных наблюдений минимального набора наиболее существенных параметров, характеризующих изучаемую систему или процесс. Фактически, параметризация – это редукция (свертка) массивов данных наблюдений к набору небольшого количества параметров и правил. Параметризация временного ряда – это, вообще говоря, процедура выбора такого набора параметров, которые позволяют количественно охарактеризовать изменение системы со временем, понять происходящие в ней процессы и, в конечном итоге, построить ее теоретическую модель. Правильно проделанная параметризация позволяет восстановить исходные данные с заданной точностью по полученному набору этих правил и параметров. Наиболее популярными методами параметризации являются интегральные преобразования данных [61].

Это преобразования Фурье, Лежандра, Уолша, другие подобные преобразования и вейвлет-анализ [57, 61, 71, 75, 96]. Результатом таких процедур является получение некоторого конечного набора амплитуд базовых функций, суперпозиция которых с заданной точностью представляет исходные данные.

Ниже в главе рассматриваются методы спектрально-статистического анализа гравитационных вариаций, метод НОКФАСС, а также R/S-анализ (метод Хёрста) и другие методы для оценки временных рядов. Особое внимание уделено оценке достоверности получаемых результатов с помощью статистических критериев, что необходимо для уверенной интерпретации параметризованных данных.

3.1. Спектральный анализ вариаций гравинерциальных измерений

Известно, что дискретные значения случайной величины X часто соответствуют процессу, близкому к нормальному закону распределения. Для анализа определения статистических параметров применен комплексный подход, с использованием преобразования Фурье, и оценили точность полученных результатов [5].

Этот подход позволил определить амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) процесса [7]. Результат амплитудно-частотного представления замеров приведен на рисунке 21.

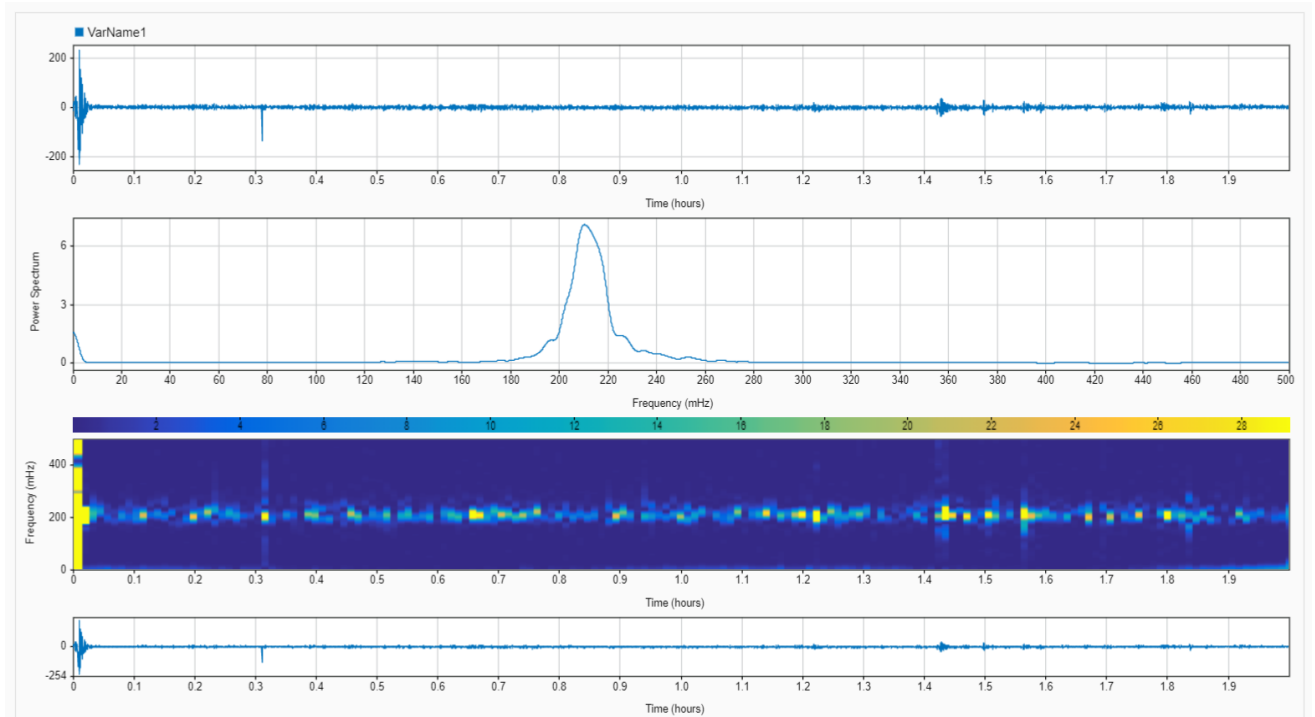


Рисунок 21. Амплитудно-частотное представление замеров, где частота от 0 до 0,5 Гц

Оценить достоверность результатов исследования означает определение, с какой вероятностью возможно перенести результаты изучения признаков с выборочной совокупности на всю генеральную совокупность.

Оценка достоверности позволяет исследователю достаточно обоснованно охарактеризовать выявленные им закономерности. В геофизике приходится иметь дело с частью изучаемого явления, а выводы по результатам такого исследования переносить на все явление в целом, т.е. на генеральную совокупность. Таким образом, оценка достоверности необходима для того, чтобы по части явления можно было бы судить о явлении в целом, для изучения распределения его закономерностей.

В результате проведенного исследования по обработке и анализу экспериментальных данных было установлено, что распределение измеренных значений случайной величины значимо соответствует нормальному закону.

Максимальная ошибка аппроксимации нормального распределения составила не более 2,7%, что свидетельствует о высокой степени согласованности наблюдаемых данных с теоретическими предположениями о нормальном распределении. Кроме того, максимальная ошибка аппроксимации функции распределения случайной величины не превышает 0,027 для временного шага, уменьшенного в восемь раз по сравнению с первоначально выбранным. Это подчеркивает точность аппроксимации и соответствие экспериментальных данных теоретическим моделям.

На рисунке 22 (а-г) дано сравнение функций нормального и натурального распределений для максимального и минимального значений ΔM .

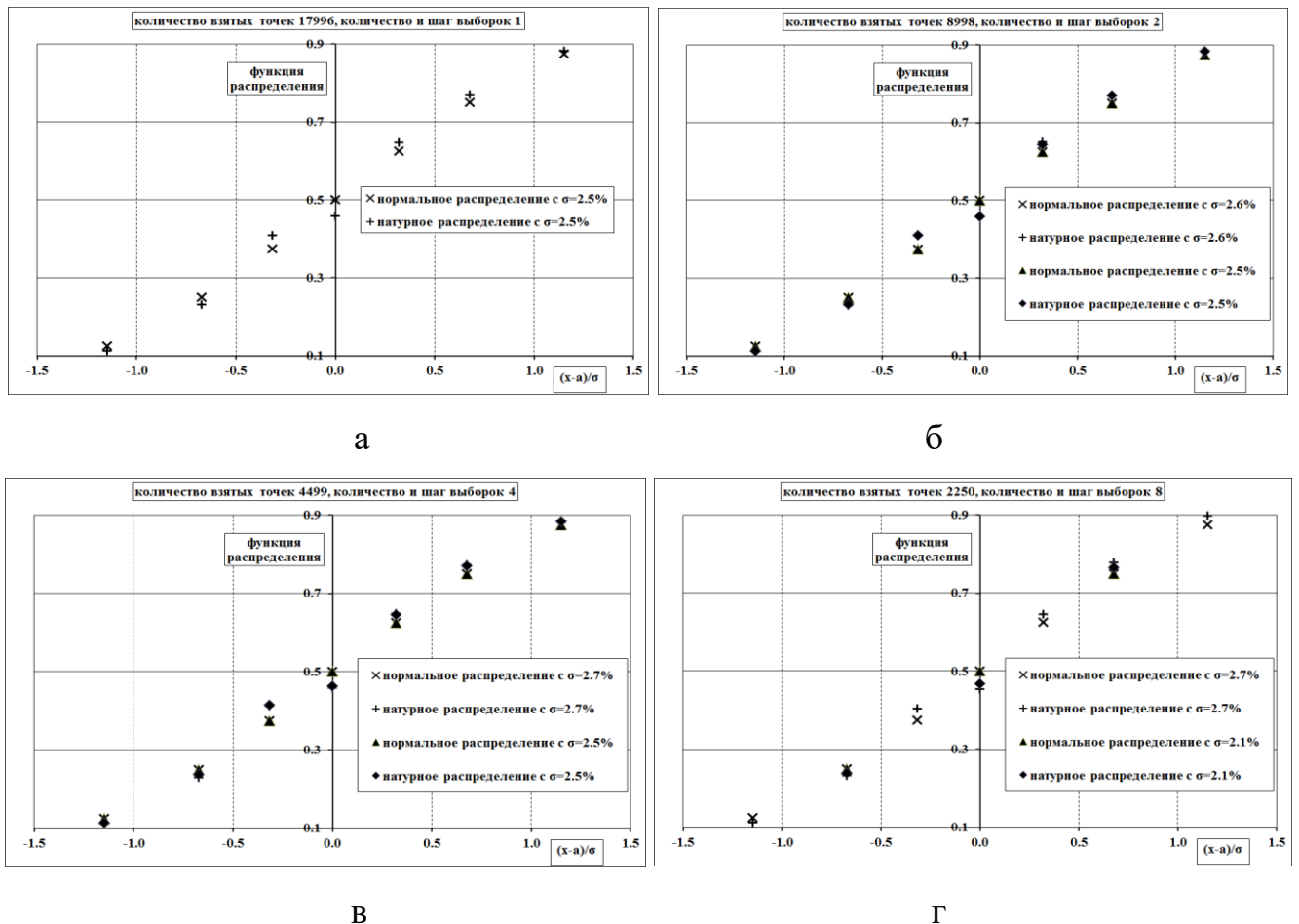


Рисунок 22. Сравнение функций нормального и натурального распределений для максимального и минимального значений ΔM

Коэффициент детерминации для всех результатов составил не менее 99%. Это подтверждает высокую достоверность и корректность применяемых методологических подходов [4].

В исследовании использовался общепринятый 5%-й уровень значимости как стандартный критерий для анализа стационарности данных, включая временные ряды, потенциальные поля. Исследования применения 5%-го уровня ошибки аппроксимации, как критерия определения статистической значимости для анализа потенциальных полей подтверждается в современных научных работах, таких как исследования, проведенные с использованием Augmented Dickey-Fuller и Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin тестов на стационарность при 5% уровне значимости, упомянутых в источниках на ResearchGate и в Journal of Econometrics [55, 60, 64, 74].

Связь между статистической значимостью и ошибкой аппроксимации в контексте исследования сводится к тесту Колмогорова-Смирнова о проверке нулевой гипотезы H_0 , что данные распределения измеренного значения соответствуют нормальному распределению. Связь между ошибкой аппроксимации E и статистической значимостью заключается в определении некоторого параметра теста p [70]:

- Если E велика, это указывает на малое соответствие между данными и нормальным распределением, что может привести к малому p -значению: $E \uparrow \Rightarrow p \downarrow$
- Если $p < \alpha$ (где α обычно равно 0,05), отвергаем H_0 , что указывает на статистическую значимость отклонения данных от нормального распределения.

Таким образом, можно сформулировать, что большая ошибка аппроксимации E может указывать на то, что данные значимо отличаются от модели нормального распределения. Это обеспечивает прямую связь между величиной ошибки аппроксимации и статистической значимостью отклонения данных от предполагаемой модели распределения. Для данного исследования ошибка аппроксимации значительно меньше принятого уровня 5%.

3.2. Применение метода НОКФАСС для обработки и анализа вариаций гравиинерциальных измерений

Был проведен анализ случайных колебаний индикатора гравиметра ГНУ-КВ с целью определения его АЧХ характеристик. После оцифровки двухчасового

видеофайла записи с шагом 5 отсчетов в секунду был получен временной ряд дискретных значений, включающий в себя 36000 отсчетов [6]. Для более детального анализа временной ряд был разделен на матрицу $N \cdot M$, которая включает в себя $N = 600$ строк и $M = 60$ столбцов.

Для нахождения необходимых статистических параметров был применен метод, определенный как Неортогональный Комбинированный Фурье Анализ Сглаженных Сигналов (НОКФАСС) [82]. Этот метод позволяет определить амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) широкого набора случайных процессов [78].

Применение НОКФАСС метода основано на резонансном свойстве функции Дирихле и симметрии частотного спектра Фурье и поэтому этот метод *не* требует дополнительных аргументов для его обоснования. Отличие от традиционного преобразования Фурье состоит в том, что линейный спектр Фурье $\omega(k) = 2\pi k / T \equiv \omega_0 k$ заменяется на усеченный спектр $\omega(k) = a \cdot k + b$, где параметры a , b и величина конечной моды K ($k=0,1,\dots,K$) находятся из минимума относительной ошибки. Формула разложения в НОКФАСС спектр имеет вид:

$$\begin{aligned} S(t) \cong F(t) &= A_0 + \sum_{k=0}^K [Ac_k \cos(\omega(k) \cdot t) + As_k \sin(\omega(k) \cdot t)] = \\ &= A_0 + \sum_{k=0}^K [Amd_k \cos(\omega(k) \cdot t - Ph_k)], \quad \omega(k) = a \cdot k + b, \quad (1) \\ Amd_k &= (Ac_k^2 + As_k^2)^{1/2}, \quad Ph_k = \arctg\left(\frac{As_k}{Ac_k}\right). \end{aligned}$$

Здесь $S(t)$ – исходный квазигармонический сигнал, $F(t)$ его приближенное разложение, остальные линейные параметры A_0 , Ac_k , As_k находятся с помощью линейного метода наименьших квадратов (ЛМНК).

Результатом таких процедур является получение некоторого конечного набора амплитуд базовых функций (A_0 , Ac_k , As_k) суперпозиция которых с заданной точностью представляет исходные данные. Такая параметризация позволяет извлечь из данных наблюдений минимальный набор наиболее существенных параметров, характеризующих изучаемую систему или процесс. Фактически,

параметризация временного ряда вариаций гравиинерциальных измерений является редукцией (сверткой) массивов данных наблюдений к компактному набору небольшого количества параметров. Для иллюстрации НОКФАСС метода выберем случайным образом любую колонку их матрицы данных (пусть эта колонка будет тридцатой, т.е. $s = 30$). Исходный сигнал выбранной колонки и его полный F-спектр показаны на рисунке 23.

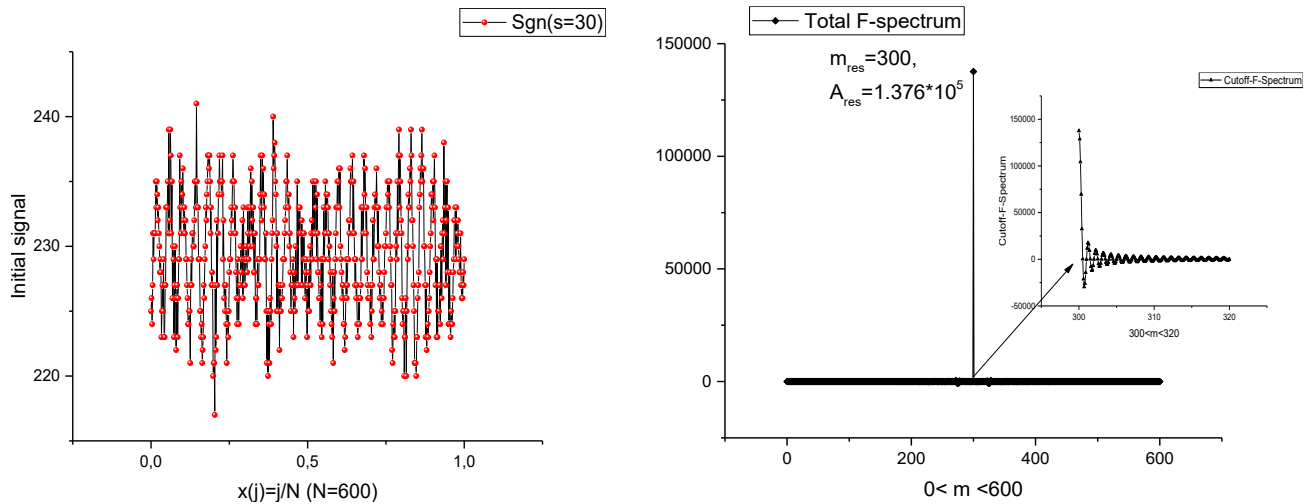


Рисунок 23. Слева изображен исходный сигнал, справа – его полный F-спектр, используемый в НОКФАСС. Резонансная частота перекрывает остальные частоты примерно в 100 и 1000 раз

Параметры НОКФАСС-спектра и качество аппроксимации исходного сигнала представлены на рисунке 24, а зависимость модуля амплитуды и фазы, формирующих АЧХ, – на рисунке 25.

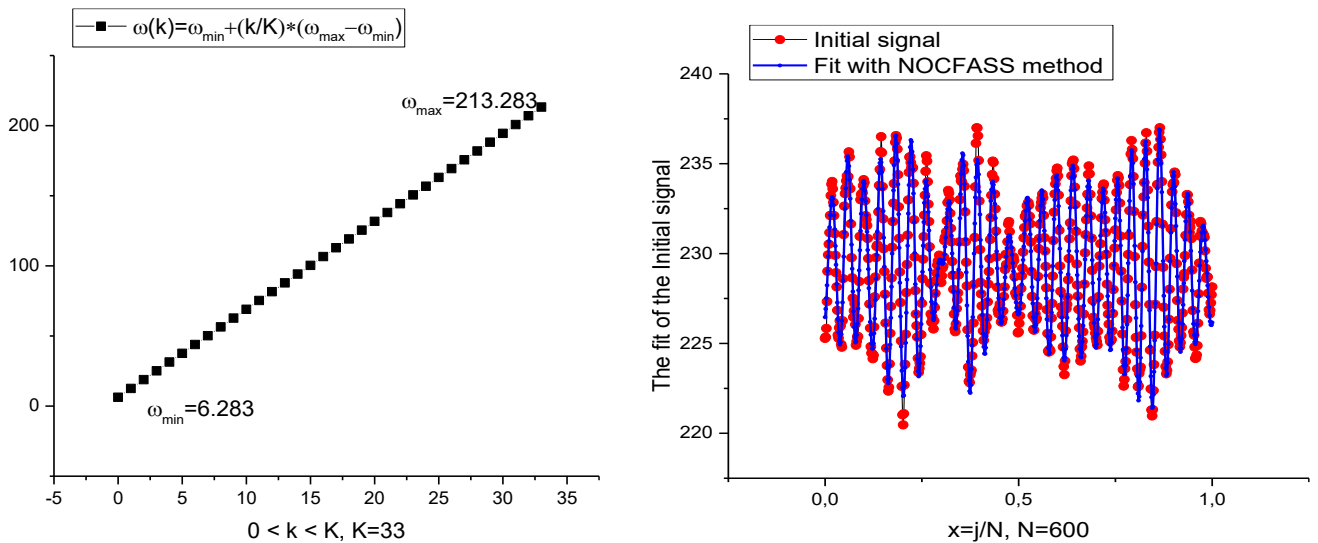


Рисунок 24. Слева показан усечённый НОКФАСС-спектр, справа – аппроксимация исходного сигнала. Точность аппроксимации 0,01%

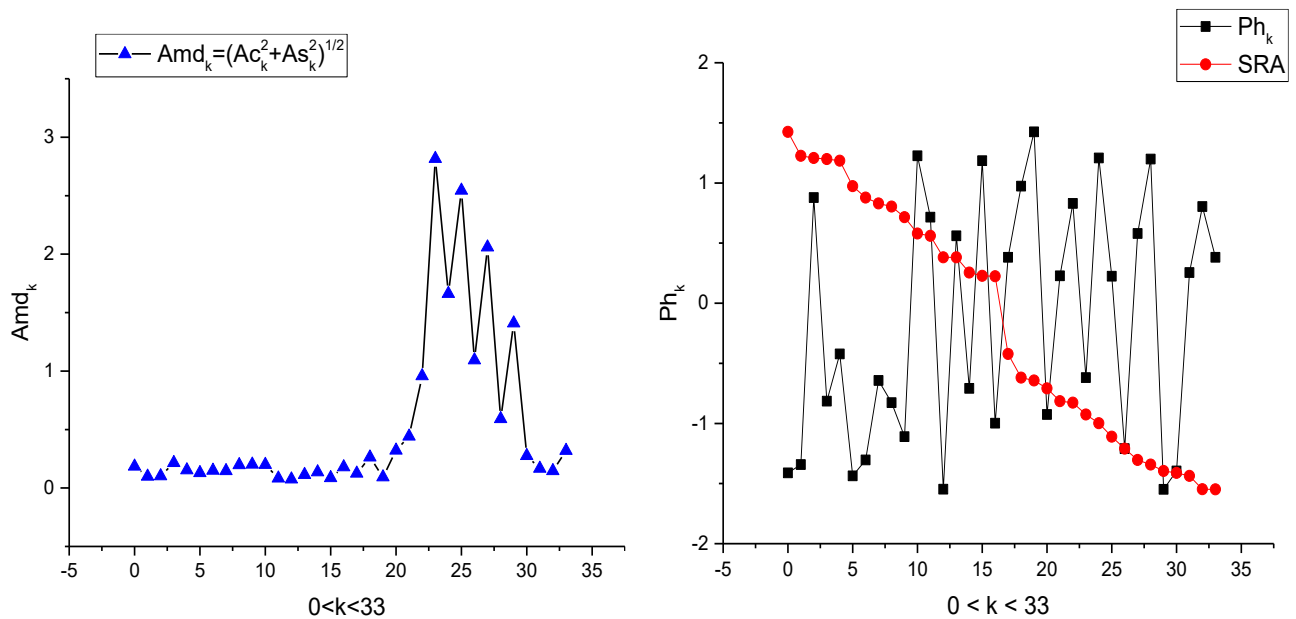


Рисунок 25. Слева показана зависимость модуля амплитуды Amd_k (см. выражение (1)) и фазы Ph_k , которые в конечном счете образуют искомую АЧХ. Если сравнить исходное число точек ($N = 600$) со сжатием данных в методе НОКФАСС, то для воспроизведения исходной кривой, показанной на рисунке 24 (справа), требуется существенно меньше параметров, входящих в выражение (1). К ним можно добавить ещё пару параметров, включая константу $A_0 = 229,335$ (из выражения (1)) и величину относительной ошибки аппроксимации $\epsilon = 0,012 \%$

Применение метода НОКФАСС позволяет восстановить исходные данные с высокой степенью точности (до 1%), и извлечь из данных наблюдений минимальный набор наиболее существенных параметров, характеризующих изучаемый процесс.

3.3. Расчет показателя Хёрста (R/S-анализ)

Для правильного понимания функционирования механизма вариаций гравиинерциальных измерений необходим набор наиболее существенных параметров, характеризующих изучаемый процесс, регистрируемый обычно в виде бесконечного временного ряда. Ввиду того, что данный процесс основан на изучении временных рядов, полученных в результате измерения колебаний индикатора гравиметра, то возникает необходимость построения математической модели временного поведения системы взаимодействия, возникающей от временной проекции различных физических процессов неизученной природы, которые вбирает в себя анализируемый временной ряд. С математической точки

зрения это задача формулируется как проблема аппроксимации данных некоторой функцией или уравнением (системой уравнений) в выделенном пространстве признаков. В процессе выбора такого информационного пространства возникает ряд важных вопросов по обоснованию полноты набора параметров в этом пространстве:

- обоснование количества параметров необходимых и достаточных для идентификации изучаемого объекта;
- информативность расчетных параметров для анализа изучаемой системы;
- характер связи и перехода между измеряемыми переменными и переменными математической модели.

Существует множество подходов и традиционных методов анализа временных рядов произвольной природы. Одним из достаточно простых и эффективных методов анализа нестационарных временных рядов является метод Хёрста, так называемый R/S-анализ. Метод устойчив, содержит минимальные предположения о системе, продуцирующей ряд, и его с успехом можно использовать для параметризации и классификации временных рядов, которые описывают отклик некоторой сложной системы. Основная идея состоит в том, чтобы определить, насколько сильно текущие значения временного ряда зависят от его предыдущих значений.

Анализ Хёрста помогает понять, является ли ряд случайным (шумом), имеет тенденцию к тренду или обладает циклическими свойствами. R/S-анализ можно определить как метод накопленного отклонения или, другими словами, как метод нормированного размаха с использованием показателя Хёрста. Согласно этому методу, анализируется размах суммы отклонений данных от среднего арифметического для выделенного отрезка временного ряда τ , нормированный путем деления на стандартное отклонение. Суммы отклонений подсчитываются для различных периодов времени и для различного количества последовательных моментов времени, которые выступают в качестве масштаба измерения.

Показатель Хёрста, определяется из следующего соотношения [48]:

$$R/S(\tau) = A\tau^H \quad (2)$$

– где R/S – нормированный размах (отношение размаха временного сигнала к стандартному отклонению наблюдений), вычисленный для текущего временного отрезка ряда длиной τ ; A – некоторая константа; H – показатель Хёрста. Этот показатель количественно характеризует меру упорядоченности амплитуд измеряемого параметра во времени, уровень хаотичности временного сигнала и его фрактальные характеристики.

Используя это метод Хёрста, был проведен анализ случайных колебаний индикатора гравиметра ГНУ-КВ. После оцифровки двухчасового видеофайла записи с шагом 5 отсчетов в секунду был получен временной ряд дискретных значений, включающий в себя 36000 отсчетов [6], охватывающий 2-х часовой временной интервал.

В результате обработки этого временного ряда был выполнен перебор значений с минимальным значением окна - `min_window` (от 10 до 130, шаг 30) и максимальным значением окна - `max_window` (от 60 до 990, шаг 30). Результаты оценки поведения R/S -отношения для выбранных интервалов окон представлены на рисунке 26.

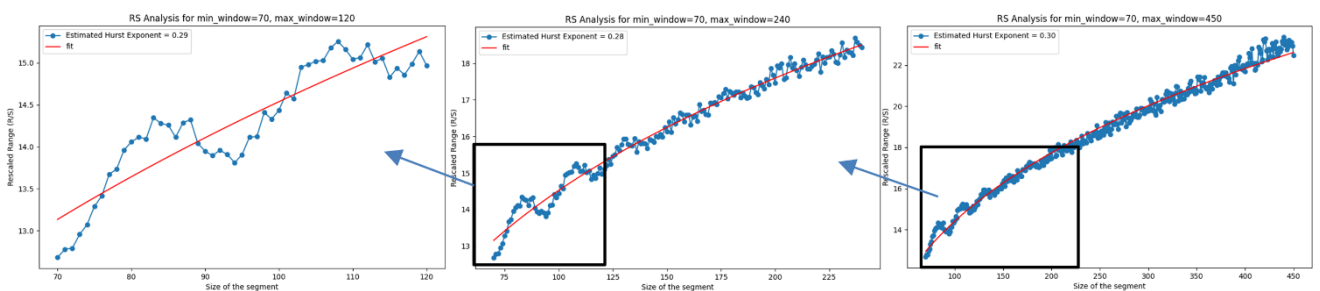


Рисунок 26. Поведение R/S отношения для окон в интервалах от 70 до 120, от 70 до 240, от 70 до 450

На выходе получается по одному графику на пару мин-макс окна, потому что анализируется изменение R/S (масштабированный диапазон) в зависимости от размера окна (от `min_window` до `max_window`). Каждая точка на этом графике представляет среднее значение R/S для всех сегментов определённого размера. Изменяя размер окна от минимального к максимальному, получается серия точек, которые вместе формируют график. Этот график иллюстрирует, как свойство

автокорреляции (или «память») в данных меняется на разных масштабах времени [79].

По сути, такой предварительный анализ временного ряда с использованием различных окон \min_window и \max_window позволяет исследовать временные ряды на различных уровнях детализации, но результаты интегрируются в один график для удобства интерпретации и анализа. Это дает наглядное представление о наличии или отсутствии долгосрочных зависимостей в данных, а также о характере этих зависимостей.

Значение показателя H указывает на характер временного ряда: $H < 0,5$ означает *антиперсистентность* (значения временного ряда склонны к чередованию), $H = 0,5$ соответствует случайному ходу, а величина $H > 0,5$ указывает на *персистентность* или долговременную память.

В результате анализа полученных данных для разных временных интервалов сохраняется четкая зависимость показателя Херста $H < 0,5$. Это позволяет сделать вывод о наличии цикличности, то есть значения временного ряда склонны к чередованию.

Для более детального анализа временной ряд был разделен на матрицу $N \times M$, которая включает в себя $N = 3000$ строк и $M = 12$ столбцов.

При этом был использован метод собственных координат для функций, содержащих нелинейные параметры аппроксимации [81]. Этот метод позволяет свести аппроксимирующую функцию, содержащую изначально нелинейные параметры к традиционному методу наименьших квадратов (МНК).

Для повышения точности аппроксимации функции $R/S(\tau)$ была использована трёхчленная степенная функция

$$\Pr_3(t) = \begin{cases} = \sum_{p=0}^2 A_p t^{v_p} \\ = A_0 t^{v_0} + A_1 t^{\operatorname{Re}(v_1)} \cos(|\operatorname{Im}(v_1)| \ln(t)) + A_2 t^{\operatorname{Re}(v_1)} \sin(|\operatorname{Im}(v_1)| \ln(t)) \end{cases} \quad (3)$$

Для аппроксимации ветвей $R/S(t)$ функцией (3) было выбрано окно расчёта $w = 30$.

Результаты аппроксимации R/S-кривых для первой и аномальной девятой колонок представлены на рисунке 27.

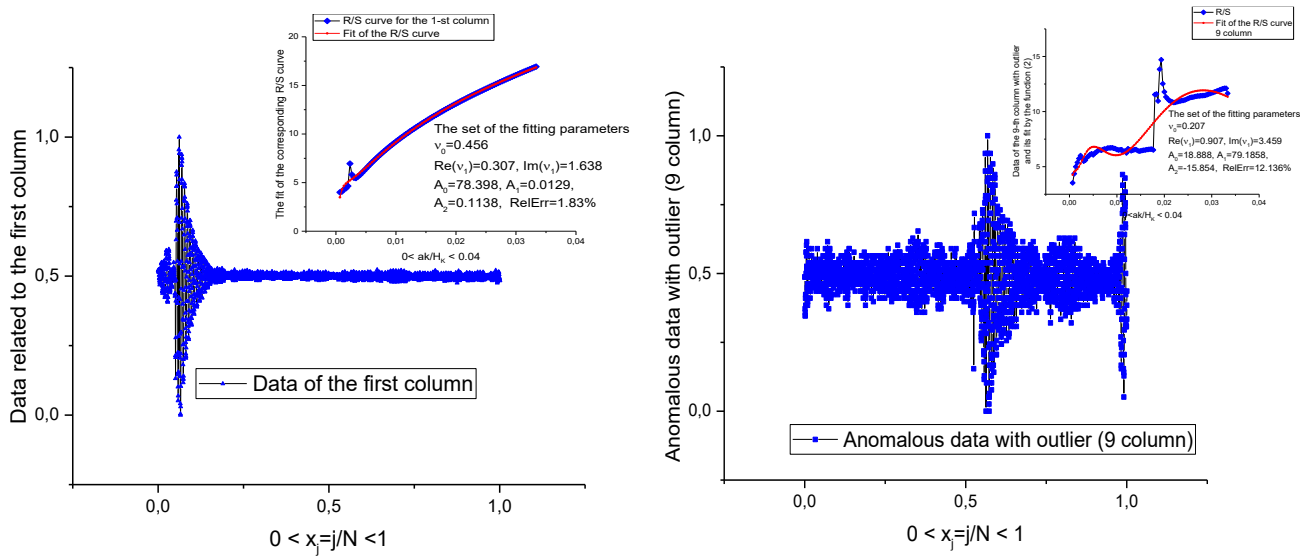


Рисунок 27. Слева показана первая колонка; на малом рисунке справа – R/S-кривая и её аппроксимация функцией (3). Аппроксимационные параметры, включая ошибку аппроксимации (1,83 %), приведены в центре рисунка. Справа на центральном рисунке показана аномальная 9-я колонка и её аппроксимация на малом рисунке справа. Аппроксимационные параметры по кривой (3) также приведены в центре рисунка. Сравнение ошибок аппроксимации показывает, что для аномальной колонки она возрастает до 13 %

Как следует из анализа рисунка 27, R/S-анализ хорошо «чувствует» наличие «гостевого» (аномального) случайного сигнала. Точность аппроксимации при этом существенно снижается.

Таким образом, использование метода Хёрста позволяет установить чередование (цикличность) в исследовании вариаций гравиинерциальных измерений и точно аппроксимировать эти данные в рамках функции (3). Анализ этих данных показывает, что анти (персистентность) может входить в некой пропорции и мнимые части комплексных показателей Хёрста указывают на логопериодические осцилляции. Это совершенно новая особенность обнаружена впервые.

Эти результаты значительно приближают нас к построению математической модели временного поведения системы в целом, а также позволит выяснить, какие физические (и неконтролируемые) процессы продуцируют зарегистрированный данный временной ряд.

Глава 4. Феноменологический метод моделирования и анализа вариаций гравиинерциальных измерений

В данной главе представлен инновационный подход к построению и анализу математических моделей, описывающих временные вариации гравиинерциальных измерений. Основой метода является «безмодельный подход», который не основывается на заранее заданных теоретических моделях, а использует эмпирические данные и феноменологические методы для описания случайных величин. Для реализации предложенного подхода проведены инструментальные измерения временных колебаний (вариации гравиинерциальных измерений) с использованием группы гравиметров различных типов на фундаментальном гравиметрическом пункте «Ледово». Анализ данных включал спектрально-статистический метод и преобразование Фурье, что позволило выяснить статистические параметры вариаций гравиинерциальных измерений для данного пункта, а также оценить корреляцию между измерениями различных приборов.

4.1. Постановка задачи

Колебания, постоянно регистрируемые на поверхности земной коры, являются результатом как природных, так и техногенных процессов. В последние годы наблюдается возросший интерес к изучению длинноволновых компонентов потенциальных полей, в частности, к исследованию временных вариаций гравиинерциальных измерений. Это связано с тем, что с изменением климата наблюдаются не только увеличение уровня Мирового океана, но и локальные деформации на поверхности Земли, что приводит к изменению гравиинерциальных измерений. Периодические изменения значений силы тяжести можно заранее вычислить путем использования различных способов [43, 49, 51]. Для изучения изменения силы тяжести из-за регионального поднятия в Фенноскандии [77] в течение более пяти лет применялся комплекс геофизических и геодезических методов. В него входили наряду со спутниковой информацией, непрерывной информацией GPS наблюдений, данных приливных станций информация об абсолютных измерениях более чем в 30 пунктах Скандинавии. Были созданы

соответствующие методики для сравнения результатов разных методов наблюдения. В результате была оценена точность работы каждого метода и доказано локальное поднятие земной поверхности этого региона. Оценка взаимосвязи гравиметрических измерений с геодезическими изменениями проводилась и в нашей стране [26]. Инструментальные измерения колебаний силы тяжести, полученные относительными гравиметрами, также предоставляют ценные данные для решения ряда фундаментальных и прикладных задач в геофизике, включая мониторинг землетрясений, вулканической активности и изменения распределения масс внутри Земли [45].

Надежные гравиметрические, сейсмометрические, метеорологические и прочие сопутствующие измерения являются необходимой основой, способствующей разработке динамических моделей и улучшению прогностических методов [1, 2].

Разработан и применен подход математического моделирования для описания временных вариаций гравиинерциальных измерений, а также оценка эффективности предложенного подхода на основе экспериментальных данных [37, 38]. Для достижения этой цели в работе решаются следующие задачи:

1. Проведение инструментальных измерений колебаний силы тяжести с использованием группы гравиметров различных типов.
2. Обработка и анализ полученных данных с применением спектрально-статистических методов и преобразования Фурье.
3. Оценка корреляции между измерениями различных гравиметров для подтверждения их идентичности и надежности.
4. Разработка общей модели вариаций гравиинерциальных измерений, основанного на инструментальных гравиметрических измерениях, учитывающей влияние случайных «гостевых» процессов.

В результате проведенного эксперимента и методов обработки данных, был выполнен анализ полученных результатов, построение и оценка математических моделей, а также предложены выводы и рекомендации для дальнейших исследований. Полученные результаты демонстрируют высокую корреляцию

между гравиметрами ГНУ-КВ и CG-6, подтверждая идентичность их спектральных характеристик и надежность в регистрации вариаций гравиинерциальных измерений. Однако анализ также выявил сложности однозначного математического описания вариаций гравиинерциальных измерений из-за влияния неучтенных случайных факторов, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований и разработки более сложных комплексных моделей.

4.2. Фундаментальный гравиметрический пункт «Ледово»

Исследования проводились параллельно с постоянно действующим комплексом геофизической аппаратуры, установленном Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) на постаменте Фундаментального гравиметрического пункта «Ледово». Организация таких пунктов согласуется с требованиями к высокоточным гравиметрическим сетям [25]. Данный пункт находится в помещении гравиметрической лаборатории корпуса экспедиционной базы ИФЗ РАН, расположенном в 300 метрах от Щелковского шоссе. Постамент Фундаментального гравиметрического пункта «Ледово» представляет собой бетонный параллелепипед с размерами 7,3 м в длину, 1,1 м в ширину и около 4 м в глубину. Постамент не соприкасается с полом помещения, что минимизирует влияние вибраций и других механических помех на измерения.

4.3. Используемые приборы в процессе эксперимента

В комплексе геофизической аппаратуры используются гравиметрические приборы различных типов, действующие на одних и тех же физических принципах и обладающие общим частотным диапазоном. Расположение всех гравиметров на одном геофизическом постаменте позволяет считать зарегистрированные инерционные помехи идентичными по происхождению [1, 2]. Несмотря на это, различные типы гравиметров отличаются конструктивными особенностями упругих систем, что влияет на их точностные характеристики. Давление, температура, дрейф нуля при данных измерениях не оказывают значительного влияния на результаты измерений.

При проведении эксперимента использовались следующие гравиметры:

- CG-6 Autograv: автоматизированный относительный гравиметр последней серии компании Scintrex, отличающийся высокой точностью и надежностью.
- CG-5 Autograv (CG-350, CG-351): автоматизированные относительные гравиметры, зарекомендовавшие себя как исключительно надежные приборы за десятилетие эксплуатации [17].
- ГНУ-КВ: кварцевый гравиметр, широко используемый для гравиразведочных работ в Советском Союзе и по настоящее время.

Гравиметры нового поколения CG-5 и CG-6 оснащены чувствительными емкостными индикаторами малых перемещений, что позволило упростить кварцевую систему, уменьшить ее размеры, сделать неастигматизированной и значительно повысить точность измерений [13]. Кроме того, оснащение гравиметров блоками компьютерной обработки позволяет вводить вычисленные поправки в показания прибора в режиме реального времени, существенно снизив влияние помех и обеспечив точность измерений порядка 0,001 мГал. Автоматическое снятие показаний и непрерывная дискретизация данных позволяют минимизировать ошибки оператора.

Как указывалось выше гравиметр ГНУ-КВ был адаптирован для непрерывной регистрации вариаций гравиинерциальных измерений с использованием видеокамеры в качестве ключевого элемента процесса цифровизации показаний. Это инновационное решение позволяет с высокой точностью фиксировать и детально анализировать вариации гравиинерциальных измерений, в том числе амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) [5, 30].

4.4. Процедура измерений

В рамках исследования был использован трехчасовой интервал наблюдения группой из четырех гравиметров: ГНУ-КВ, SCINTREX CG-5 (CG-350 и CG-351), и SCINTREX CG-6. Все временные ряды были приведены к единой системе отсчета с использованием единого масштабирования, обеспечив, тем самым,

синхронизацию данных между различными гравиметрами

$$X_{norm} = [X - \min(X)] / [\max(X) - \min(X)].$$

Традиционные методы математического моделирования временных вариаций гравиинерциальных измерений сталкиваются с рядом ограничений, связанных с высокой сложностью учета множества факторов, влияющих на колебания земной поверхности. В связи с этим в данной работе предлагается безмодельный подход, основанный на использовании феноменологических моделей для аппроксимации экспериментальных данных. Такой подход позволяет эффективно описывать динамические свойства сложных систем, даже при отсутствии точных аналитических выражений для всех влияющих процессов [77].

Для анализа вариаций гравиинерциальных измерений была применена комплексная методика, включающая спектрально-статистический анализ и преобразование Фурье. Известно, что дискретные значения случайной величины часто соответствуют процессам, близким к нормальному закону распределения [45].

Коэффициент корреляции Пирсона был использован для оценки степени линейной зависимости между временными рядами измерений различных гравиметров. Формула для расчета коэффициента корреляции представлена ниже:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})(y_i - \underline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \underline{y})^2}} \quad (4)$$

где r_{xy} – коэффициент корреляции (или, иными словами, коэффициент корреляции Пирсона) между переменными x и y , измеряет степень линейной зависимости между ними (от -1 до 1), x и y – наблюдаемые значения переменных. \underline{x} и \underline{y} – средние значения переменных x и y .

На рисунке 28 представлены результаты измерений (исходные кривые) вариаций гравиинерциальных измерений 4-х гравиметров. По оси ОХ – время, по оси ОУ – отложены безразмерные и нормированные амплитуды.

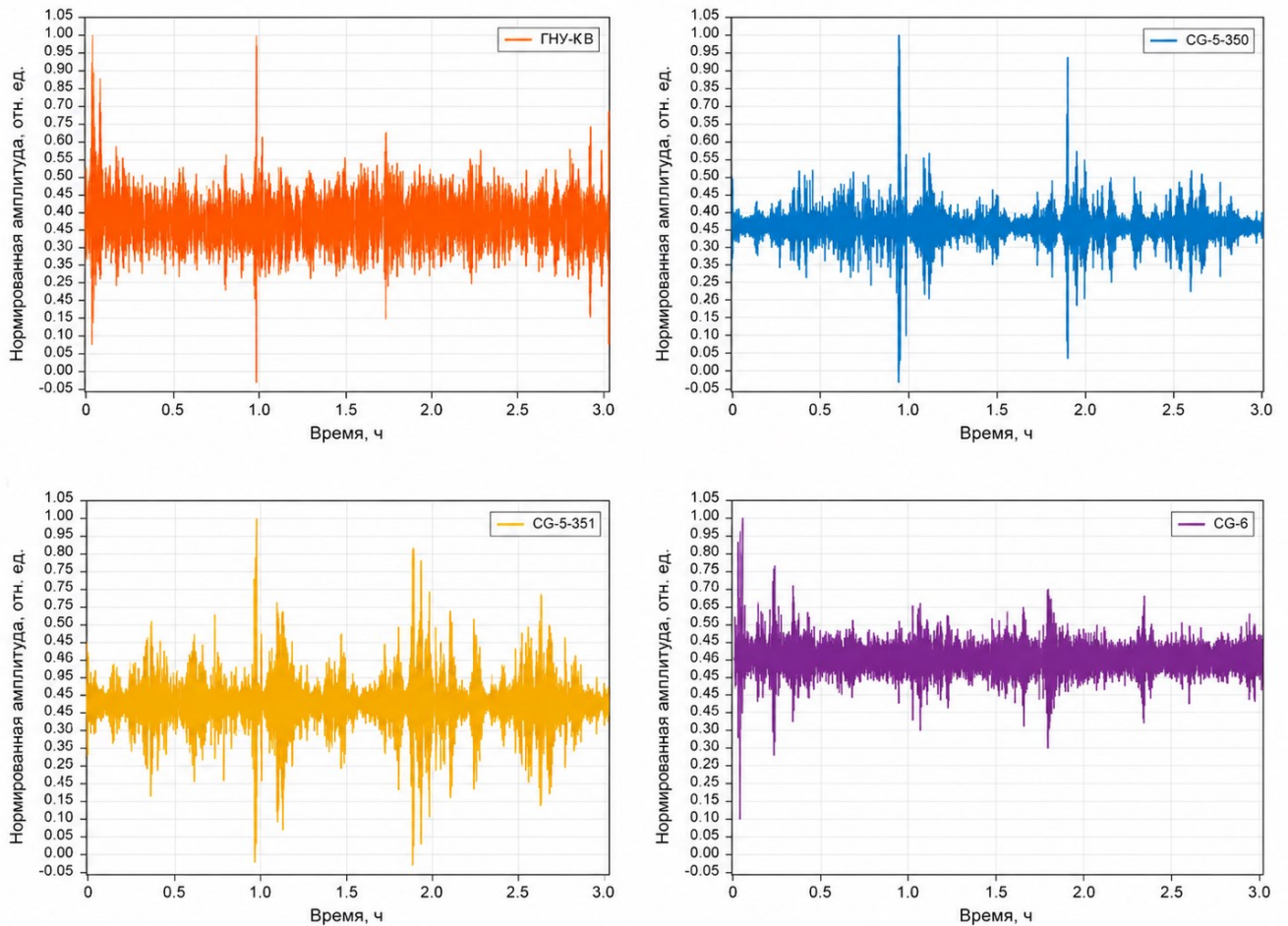


Рисунок 28. Результаты измерений (исходные кривые) вариаций гравиинерциальных измерений для всех четырех гравиметров: ГНУ-КВ, SCINTREX CG-5-350, SCINTREX CG-5-351, SCINTREX CG-6

Результаты расчета коэффициентов корреляции Пирсона между временными рядами гравиметров приведены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции Пирсона между временными рядами гравиметров

Пары гравиметров	Коэффициент корреляции (r)
ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6	0,0285
ГНУ-КВ и SCINTREX CG-5-350	0,0072
ГНУ-КВ и SCINTREX CG-5-351	0,1010
SCINTREX CG-5-350 и SCINTREX CG-6	-0,0011
SCINTREX CG-5-351 и SCINTREX CG-6	0,0138

Низкие значения коэффициентов корреляции указывают на слабую линейную зависимость между временными рядами, что может быть связано с

различиями конструктивных схем и технологий компенсации сползания ноль-пункта.

Для преодоления ограничений временного анализа была выполнена обработка сигналов в частотной области с использованием амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Этот подход позволяет сравнивать спектральное содержание сигналов и выявлять скрытые закономерности и взаимосвязи в частотной области.

4.5. Спектральный анализ

Для всех временных рядов были вычислены Фурье-спектры (рисунок 29), соответствующие каждому гравиметру в той же последовательности, что и на рисунке 28. На этих графиках представлены только модули амплитуд, а фазовые характеристики всех приборов и анализ их зависимости являются предметом будущего отдельного исследования.

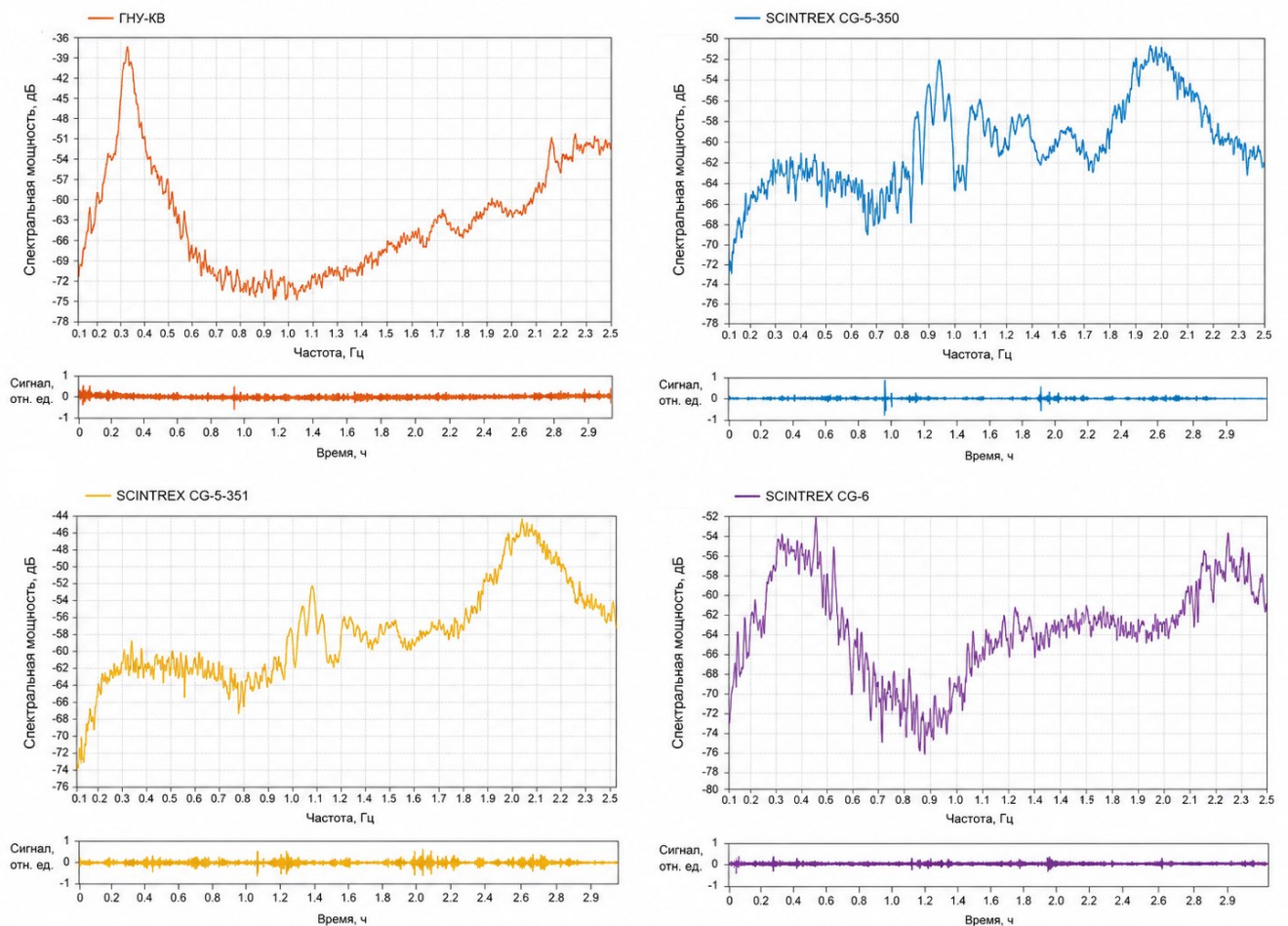


Рисунок 29. Результаты анализа спектральных характеристик исходных данных

SCINTREX CG-5 (CG-350 и CG-351) демонстрируют высокое совпадение АЧХ по амплитудным характеристикам, что объясняется их конструктивной идентичностью и одинаковыми заводскими механизмами регистрации (рисунок 29).

Сравнение амплитудно-частотных характеристик гравиметров SCINTREX CG-5-350 и SCINTREX CG-5-351, а также пары ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6 представлено на рисунке 30.

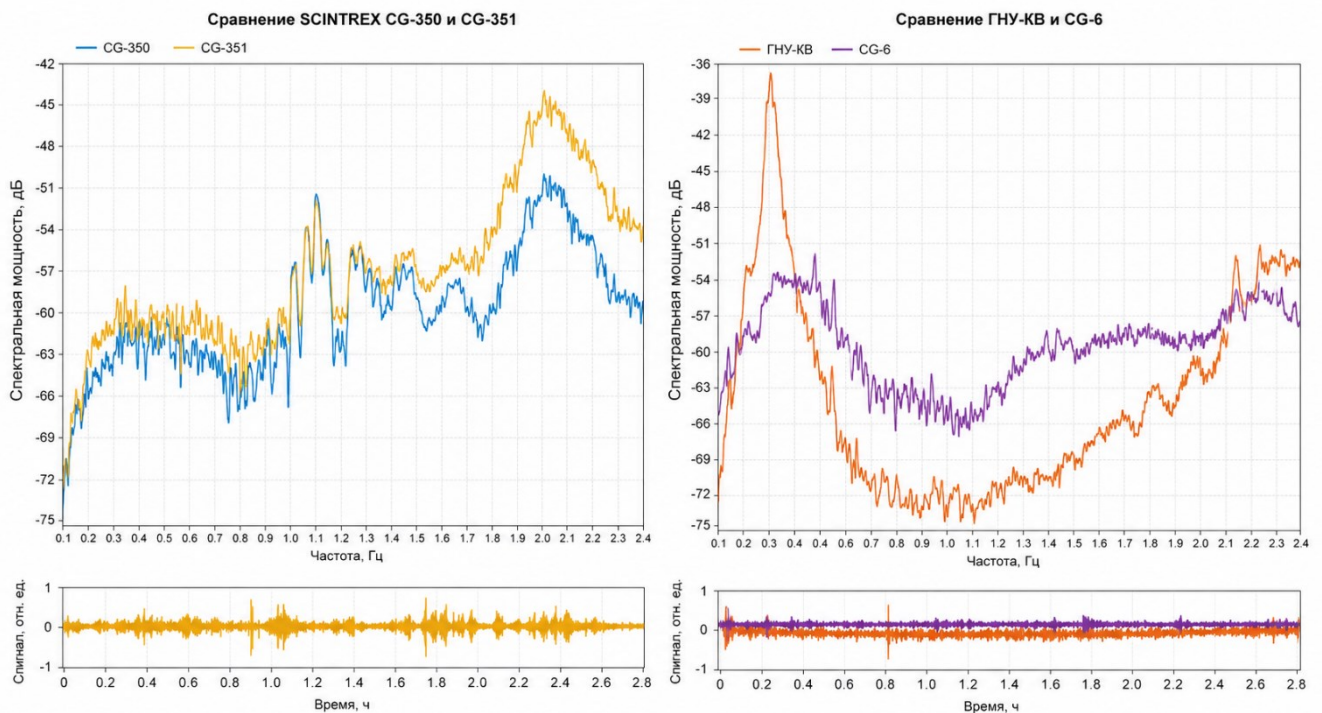


Рисунок 30. Сравнение АЧХ гравиметров SCINTREX CG-5-350 и SCINTREX CG-5-351 – слева; ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6 – справа

В данной работе анализ АЧХ ограничивается только для пары приборов ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6, так как SCINTREX CG-6 является базовым прибором при регистрации вариаций гравиинерциальных измерений на фундаментальном гравиметрическом пункте «Ледово». Из визуального анализа распределения АЧХ для пары приборов ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6 наблюдается хорошее совпадение модулей амплитуд АЧХ по частотным характеристикам (рисунок 30). На этих графиках представлены только модули амплитуд, а фазовые характеристики всех приборов и анализ их зависимости являются предметом будущего отдельного исследования.

При детальном рассмотрении распределения АЧХ (таблица 3) для пары ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6 по отдельным участкам (дробная корреляция) выявлено хорошее совпадение как по амплитудным, так и по частотным характеристикам для отдельных интервалов частот.

Анализ таблицы 3 показывает, что корреляции, выделенные черным* цветом, отражают различную степень близости сравниваемых случайных последовательностей, вычисленные по формулам (7), приведенным ниже. Наиболее близкими между собой являются пары 6 и 10, выделенные синим цветом**.

4.6. Обобщенные корреляционные методы

В данной работе использовались как традиционная формула Пирсона (4), так и обобщенные корреляционные методы, позволяющие учитывать сложные зависимости между временными рядами [19]. Они рассмотрены в недавней монографии [18]. В частности, были введены понятия внешних и внутренних корреляций, описываемые формулами (5) и (6) соответственно.

Формула (5). Внешняя корреляция

$$Ext(y_1, y_2) = \frac{Rg(y_1) + Rg(y_2)}{\max(y_1, y_2) - \min(y_1, y_2)}, \quad (5)$$

$$Rg(f) = \max(f) - \min(f).$$

Формула (6). Внутренняя корреляция

$$GPCF_p = \frac{G_p(y_1, y_2)}{\sqrt{G_p(y_1, y_1) \cdot G_p(y_2, y_2)}}.$$

$$G_p(g, f) = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (gn(j) fn(j))^{mom_p} \right)^{1/mom_p}, \quad (6)$$

$$mom_p = \exp\left(-r + 2 \frac{p}{P} r\right), \quad e^{-r} \leq mom_p \leq e^r, \quad p = 0, 1, \dots, P$$

В главе 9 монографии [18] объясняется, что корреляции в современной математической статистике являются относительными. Помимо традиционного

коэффициента корреляции Пирсона (4), существуют два основных типа корреляций: внешние и внутренние.

Формула (5) используется для определения пересечения двух случайных кривых. Если эти кривые пересекаются, то значение внешней корреляции $Ext(y_1, y_2)$ будет находиться в диапазоне от 1 до 2. Если пересечений нет, то $Ext(y_1, y_2)$ будет в диапазоне от 0 до 1.

Внутренние корреляции, показанные в последних двух столбцах таблицы 3, рассчитываются по более общей формуле (6). В этой формуле $gn(j)$ и $fn(j)$ – это две нормированные функции в диапазоне от 0 до 1. Диапазон моментов охватывает широкий интервал (e^{-r}, e^r) , и для их полного охвата достаточно выбрать $r=10$.

Анализ обобщенной корреляционной функции дробных моментов (ОКФДМ) (5) показывает, что функция в диапазоне от 0 до 1 имеет две важные инвариантные точки (появляющиеся для всех сравниваемых функций): минимальную точку (M) и точку выхода на плато справа (Lm). Эти две точки позволяют определить значения корреляций на всей совокупности моментов в интервале (e^{-r}, e^r) . Эти значения обозначены как $P1$ и $P2$ и приведены в таблице 3. Они рассчитываются по формуле (7):

$$\begin{aligned} P1 &= M \cdot Lm, \quad M^2 \leq P1 \leq M, \\ P2 &= M \cdot \frac{Lm - M}{1 - M}, \quad 0 \leq P2 \leq M. \end{aligned} \quad (7)$$

Из таблицы 3 видно, что коэффициент корреляции Пирсона дает завышенные значения корреляции, а параметры $P1$ и $P2$ – заниженные. Настоящие корреляции достигаются, когда внешняя корреляция $Ext(y_1, y_2)$ превышает единицу, а внутренние корреляции $P1$ и $P2$ близки к минимальному значению M . Полное совпадение двух кривых происходит, когда $Ext(y_1, y_2) = 2$ и $M = 1$. Анализ этих параметров позволяет оценить степень корреляции сравниваемых кривых $gn(j)$ и $fn(j)$. Из таблицы 3 видно, что только пары 6 и 10 соответствуют этим требованиям.

Корреляционные параметры для пары гравиметров ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6

Корр. пара	Мин. частота	Макс. частота	Внешн. корр	Корр. Пирсона	Внутр. корр P1	Внутр. Корр P2
1	0,05590	0,08258	0,33473	0,98049	0,94881*	0,15364
2	0,08267	0,10935	0,32643	0,99127	0,85045	0,00000
3	0,10944	0,13612	0,38338	0,98470	0,93284	0,85085
4	0,13621	0,16290	0,58811	0,99259*	0,93256	0,01125
5	0,16299	0,18967	0,37541	0,99579	0,68148	0,04431
6	0,18976	0,21644	1,19763**	0,98571**	0,94924**	0,94979**
7	0,21653	0,24321	1,28613*	0,98712	0,76093	0,31125
8	0,24330	0,26998	1,23011*	0,96287	0,17545	0,00674
9	0,27007	0,29676	0,44237	0,98776	0,78783	0,00000
10	0,29685	0,32353	0,27078	0,99391**	0,93034**	0,93034**
11	0,32362	0,35030	0,22353	0,99557*	0,36756	0,00000
12	0,35039	0,37707	0,16741	0,99742*	0,91899	0,72916
13	0,37716	0,40385	0,24591	0,99913*	0,90147	0,12485
14	0,40394	0,43062	0,29635	0,99941*	0,94617*	0,58750
15	0,43071	0,45739	0,37903	0,99260*	0,91759	0,74302
16	0,45748	0,48416	0,45718	0,99950*	0,97730*	0,63309
17	0,48425	0,51094	0,25679	0,99607*	0,82016	0,00000
18	0,51103	0,53771	0,41669	0,99171*	0,80994	0,02425

4.7. Критерии выбора модели аппроксимации

Для правильного понимания механизма влияния внешних процессов на вариации гравиинерциальных измерений, необходимо найти математическую функцию, значения которой максимально приближены к экспериментальным гравиметрическим данным. Это достигается с помощью аппроксимации данных эмпирическими функциями. Аппроксимация позволяет изучать числовые характеристики и свойства объекта, сводя задачу к анализу более простых математических моделей. Процесс аппроксимации заключается в построении функции, которая наилучшим образом соответствует исходным данным с минимальной погрешностью.

Целью аппроксимации является построение математической модели, максимально приближенной к «идеальной» модели, которая воспроизводит измеренные данные с минимальными ошибками и высокой достоверностью.

При выборе подходящей аппроксимирующей функции необходимо учитывать параметры, наиболее точно описывающие зависимость между изучаемыми величинами. Из нескольких подходящих вариантов выбирается модель на основе баланса между точностью аппроксимации и простотой вычислительной конструкции модели.

Теория предлагает модели, гипотезы, основанные на некоторых проверяемых предположениях и постулатах. Эксперимент, в свою очередь, проверяет эти гипотезы, стараясь максимально исключить влияние неконтролируемых факторов и искажений (помех), вносимых измерительной аппаратурой (обычно эти факторы определяются как аппаратная функция или функция прибора) и учета случайных «гостевых» процессов – совокупности внешних и локальных факторов, не выясненной и до конца не изученной природы, но влияющих на изучаемые вариации гравиинерциальных измерений. При этом необходим проверенный или верифицируемый принцип, которому подчиняются практически все измерения, из математической формулировки которого можно будет вывести некую «универсальную» аппроксимирующую функцию, которая позволила бы описать все измерения. Таким образом, на основе этого принципа можно будет получить общую математическую модель, которой должны будут подчиняться все измерения, удовлетворяющие этому принципу.

Выбор модели аппроксимации определяется минимизацией ошибки на всем диапазоне исходных данных и максимизацией коэффициента детерминации R^2 . Коэффициент детерминации R^2 измеряет, насколько хорошо модель объясняет вариации данных, и рассчитывается по следующей формуле:

$$R^2 = 1 - D[y] / D[y \uparrow x] \quad (8)$$

где: $D[y]$ – дисперсия зависимой переменной y , $D[y/x]$ – условная дисперсия y при заданных факторах x (дисперсия ошибки модели).

Таким образом, цель аппроксимации – построить математическую модель, максимально приближенную к «идеальной» модели, которая воспроизводит измеренные данные с минимальными ошибками и высокой достоверностью.

При выборе подходящей аппроксимирующей функции необходимо учитывать параметры, наиболее точно описывающие зависимость между изучаемыми величинами. Из нескольких подходящих вариантов выбирается та функция, которая обеспечивает максимальное значение R^2 и минимальную погрешность на всем диапазоне данных. Оценка качества моделей проводится на основе баланса между точностью аппроксимации и простотой вычислительной конструкции модели.

4.8. Рассмотренные модели аппроксимации и графическое представление результатов

Для дальнейшего анализа были рассмотрены следующие модели аппроксимации исходных данных [33]:

1. Полиномиальные аппроксимации
2. Фурье-аппроксимации
3. Экспоненциальные аппроксимации

Представленные модели не охватывают все возможные варианты, но являются наиболее распространёнными и простыми для аппроксимации наборов исходных данных.

Оценка статистических показателей моделей

Для оценки эффективности моделей использовались следующие статистические показатели:

- Коэффициент детерминации (R^2): измеряет степень достоверности аппроксимации между моделью и исходными данными.
- Среднеквадратичная ошибка (RMSE): среднее квадратичное отклонение модели от исходных данных.
- Сумма квадратов ошибок (SSE): общая сумма квадратичных отклонений модели от исходных данных.

Для удобного визуального сравнения качества моделей использовался кросс-плоттинг (диаграмма рассеяния). Кросс-плоттинг позволяет наглядно сравнить несколько измерений данных, отображая их на двух осях и более относительно друг друга. Обычно оси диаграммы линейны, но могут быть представлены в логарифмических и других (экспоненциальных, квадратичных и др.) шкалах.

Кросс-плоты использовались для визуальной оценки соответствия модели экспериментальным данным. На них откладывались экспериментальные значения по одной оси и значения модели по другой. Идеальная модель соответствует расположению точек вдоль линии под углом 45 градусов.

4.8.1. Полиномиальная модель 2-й степени

1. Качество модели (R^2 и RMSE):

- $R^2 = 0,8197$. Это говорит о хорошем соответствии модели исходным данным.
- Значение RMSE (среднеквадратичная ошибка) равно 0,091497.
- Значение SSE (сумма квадратов ошибок) составляет 229,7.
- Параметры модели: $f(x) = 0,1719 + 4,0450x - 3,6688x^2$

2. Графическое отображение (рисунок 31, слева):

- График демонстрирует, что полиномиальная модель 2-й степени неплохо подстроилась под данные, особенно на начальном и среднем участке.
- Однако на концах графика видно, что модель отклоняется от фактических значений. Это может быть связано с тем, что данные имеют более сложное поведение, чем может описать полиномом 2-й степени.

4.8.2. Полиномиальная модель 3-й степени

1. Качество модели (R^2 и RMSE):

- $R^2 = 0,9440$, что значительно выше по сравнению с предыдущей моделью 2-й степени. Это говорит о том, что модель 3-й степени лучше объясняет вариации в данных.

- Значение RMSE (среднеквадратичная ошибка) уменьшилось до 0,051017, что указывает на более низкий уровень ошибки по сравнению с полиномом 2-й степени.
 - Значение SSE (сумма квадратов ошибок) также снизилось до 71,412, что свидетельствует о повышении качества аппроксимации.
2. Параметры модели:
 - Модель имеет вид: $f(x) = 0,1501 + 5,2306x - 10,6823x^2 + 6,2094x^3$
 3. Графическое отображение (рисунок 31, посередине):
 - Модель 3-й степени лучше подстраивается под сложные нелинейные зависимости в данных и более точно повторяет тренды.

4.8.3. Полиномиальная модель 4-й степени

1. Качество модели (R^2 и RMSE):
 - $R^2 = 0,8364$, что ниже по сравнению с полиномиальной регрессией 3-й степени. Это говорит о том, что увеличение степени полинома привело к снижению качества модели.
 - Значение RMSE (среднеквадратичная ошибка) равно 0,087156, что лучше по сравнению с полиномом 2-й степени, но хуже, чем у модели 3-й степени.
 - Значение SSE (сумма квадратов ошибок) – 208,41, что указывает на некоторое улучшение в сравнении с моделью 2-й степени, но всё ещё хуже, чем у модели 3-й степени.
2. Параметры модели:
 - Модель имеет вид:

$$f(x) = 0,1299 + 6,1593x - 18,3722x^2 + 23,1825x^3 - 10,4337x^4$$
3. Графическое отображение (рисунок 31, справа):
 - Модель 4-й степени демонстрирует хорошие результаты на начальном участке и лучше подстраивается под нелинейные зависимости на

средней части графика. Однако, на концах диапазона данные начинают отклоняться от аппроксимирующей кривой.

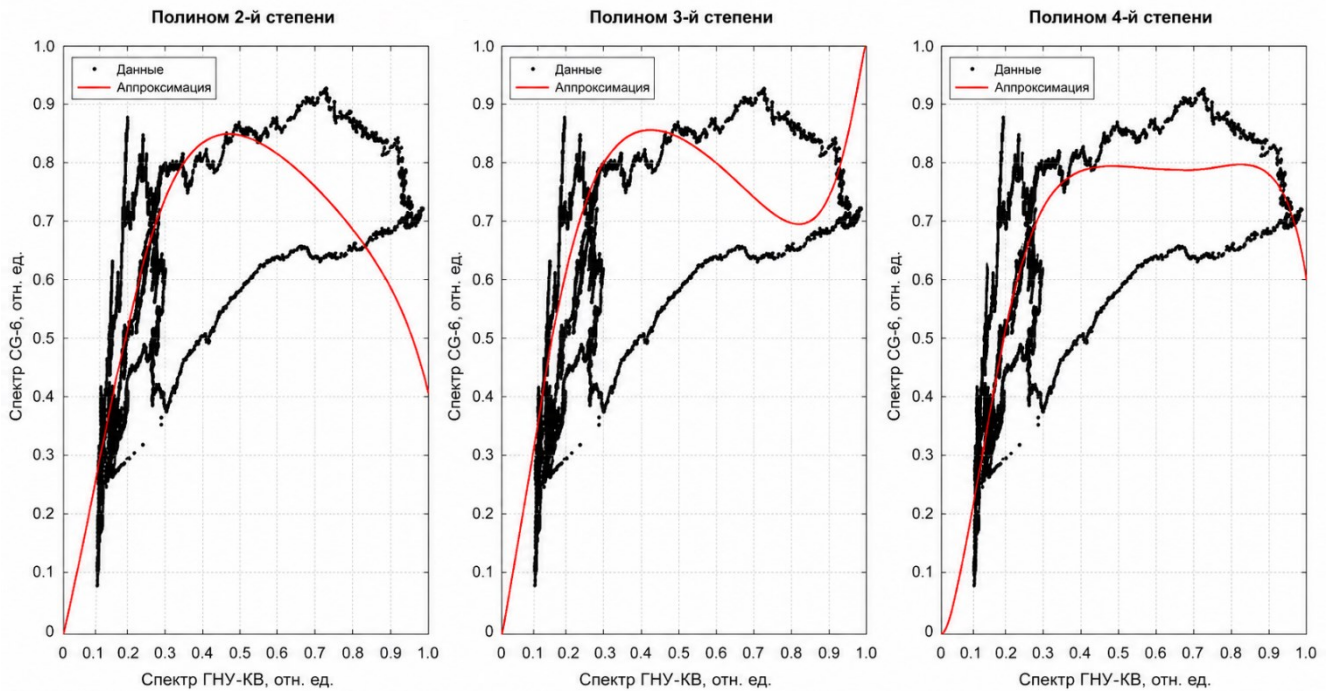


Рисунок 31. Аппроксимация зависимости «спектр ГНУ-КВ – спектр SG-6» полиномиальными моделями: слева – полином 2-й степени; посередине – полином 3-й степени; справа – полином 4-й степени

4.8.4. Модели на основе разложения Фурье

$$f(x) = a_0 + a_i \cdot \cos(x \cdot w) + b_i \cdot \sin(x \cdot w)$$

Частоты для моделей Фурье подбирались методом параметрической аппроксимации.

Модель Фурье с 1 гармоникой: $R^2 = 0,6086$, $RMSE = 0,13482$.

Низкий R^2 и высокая ошибка указывают на то, что одной гармонике недостаточно для описания зависимости.

Модель Фурье с 2 гармониками: $R^2 = 0,7612$, $RMSE = 0,1053$.

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^2 [a_i \cdot \cos(i \cdot x \cdot w) + b_i \cdot \sin(i \cdot x \cdot w)]$$

Увеличение числа гармоник улучшило качество модели.

Модель Фурье с 3 гармониками: $R^2=0,7721$, $RMSE=0,10289$

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^3 [a_i \cdot \cos(i \cdot x \cdot w) + b_i \cdot \sin(i \cdot x \cdot w)]$$

Дополнительная гармоника ещё больше улучшила соответствие модели, снизив ошибку и увеличив R^2 .

Модель Фурье с 4 гармониками: $R^2 = 0,7724$, $RMSE = 0,10282$.

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^4 [a_i \cdot \cos(i \cdot x \cdot w) + b_i \cdot \sin(i \cdot x \cdot w)]$$

Увеличение числа гармоник до 4 уже не дало значительного улучшения по сравнению с моделью с 3 гармониками.

Оптимальная модель Фурье

Модель Фурье с 3 гармониками показывает наилучшие результаты с $R^2 = 0,7721$ и относительно низким $RMSE = 0,10289$. Результаты аппроксимации зависимости «спектр ГНУ-КВ – спектр СГ-6» моделями Фурье для различного числа гармоник представлены на рисунке 32.

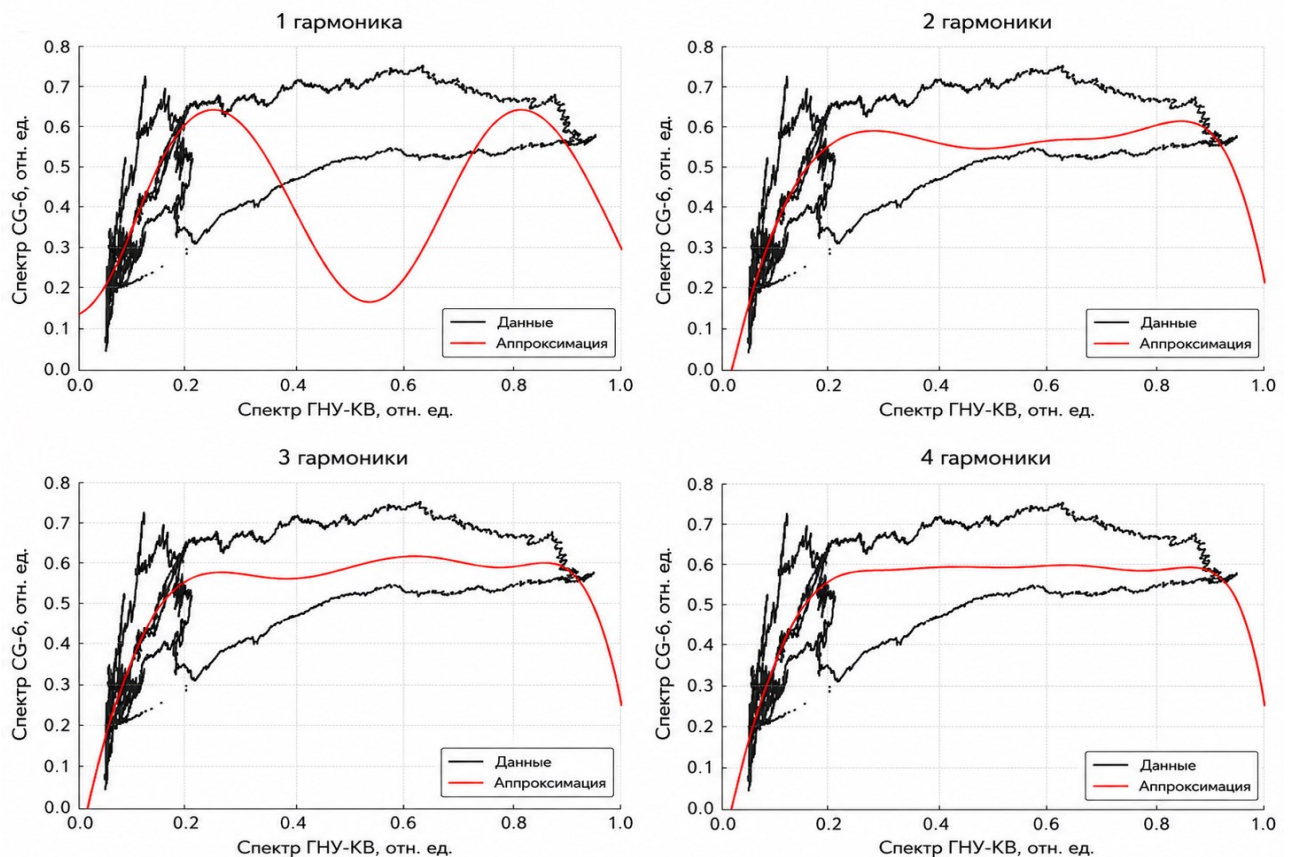


Рисунок 32. Аппроксимация зависимости «спектр ГНУ-КВ – спектр СГ-6» моделями Фурье: 1 гармоника, 2 гармоники, 3 гармоники, 4 гармоники

4.8.5. Экспоненциальные модели

1. Экспоненциальная модель с 1 членом:

- Уравнение: $f(x) = a \cdot e^{(b \cdot x)}$
- $R^2 = 0,2405$, $RMSE = 0,1878$
- Модель демонстрирует очень низкое значение коэффициента детерминации.
- Высокое значение ошибки ($SSE = 967,75$) указывает на то, что данная модель не подходит для описания набора данных.

2. Экспоненциальная модель с 2 членами:

- Уравнение: $f(x) = a \cdot e^{(b \cdot x)} + c \cdot e^{(d \cdot x)}$
- $R^2 = 0,7701$, $RMSE = 0,10331$
- Модель значительно улучшает качество аппроксимации по сравнению с моделью с 1 членом.
- Значительно возросло значение R^2 , что говорит о лучшем соответствии данных выбранной модели.
- Значение SSE снизилось до 292,84, что указывает на более точное описание данных.
- Увеличение в уравнении количества членов >2 приводит к значительным усложнениям технического характера вычислительной конструкции

Результаты аппроксимации зависимости «спектр ГНУ-КВ – спектр CG-6» экспоненциальными моделями приведены на рисунке 33.

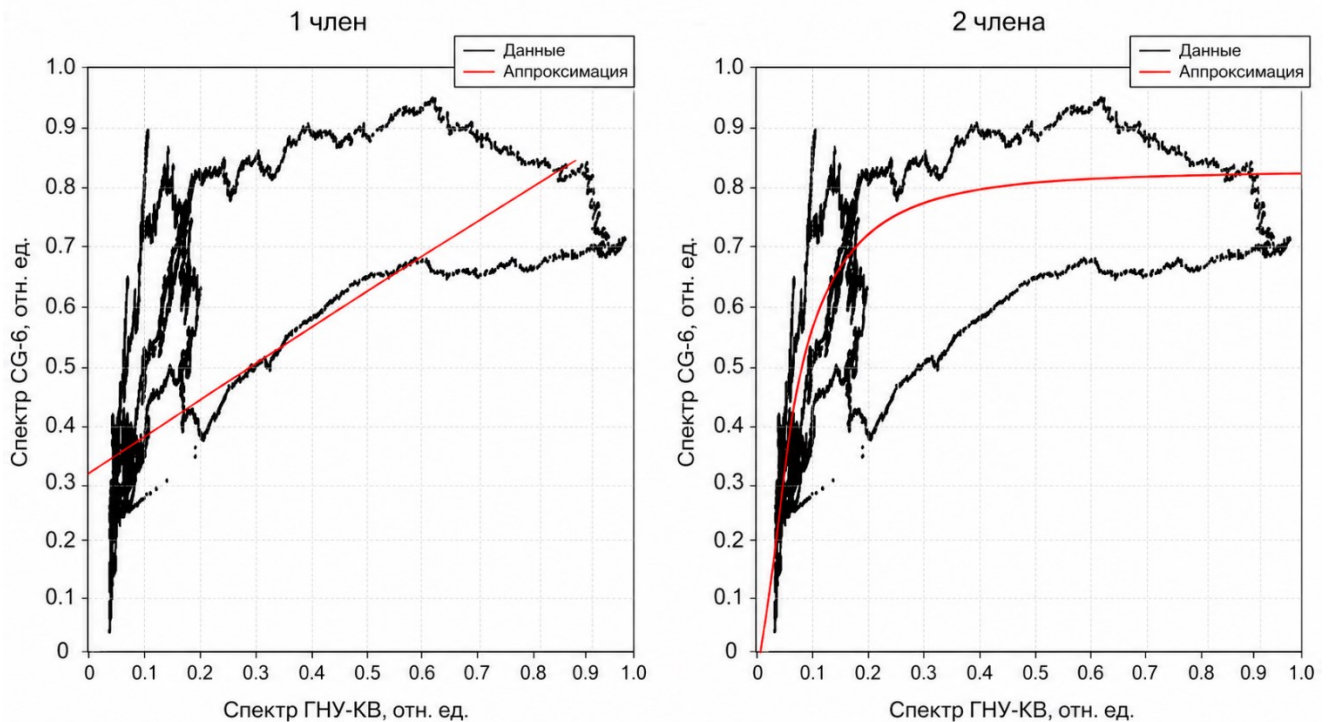


Рисунок 33. Аппроксимация зависимости «спектр ГНУ-КВ – спектр СГ-6» экспоненциальными моделями

Экспоненциальная модель с 2 членами является более оптимальной и показывает гораздо лучшее соответствие данным ($R^2 = 0,7701$) и более низкую ошибку ($RMSE = 0,10331$). Модель с 1 членом слишком проста и не захватывает сложные зависимости в данных на данном интервале исследования.

4.9. Анализ рассмотренных моделей

На основании анализа всех моделей и различных типов аппроксимации можно сделать следующие выводы и рекомендации для набора данных, где:

- X – это спектр ГНУ-КВ
- Y – это спектр СГ-6

Характеристики данных:

- Данные имеют сложные и нелинейные зависимости, и на это указывает поведение кривых на рисунках 31-33.

- Спектры ГНУ-КВ и СГ-6, судя по графикам, не имеют простой линейной или экспоненциальной зависимости. Сложные колебания и изменения трендов указывают на наличие как периодических, так и нелинейных компонентов, а также имеет место дробная корреляция. Также невозможно учесть все реальные геологические процессы.

4.9.1. Полиномиальные аппроксимации

- Полиномы 2-й и 3-й степени показали хорошее соответствие данным принятой модели.
- Полином 3-й степени продемонстрировал наилучшие результаты по принятой системе оценки ($R^2 \approx 0,9440$ при низком $RMSE = 0,0510$), что свидетельствует о хорошем балансе между точностью аппроксимации и сложностью модели.
- Переход к полиному 4-й степени не дал устойчивого улучшения на контрольных данных и приводит к неоправданному усложнению модели.

Таким образом, в рамках принятой схемы верификации полином 3-й степени является предпочтительным среди рассмотренных полиномиальных моделей.

4.9.2. Фурье-аппроксимации

- Модели Фурье использовались, исходя из предположения о наличии периодической составляющей в регистрируемых данных:
 - Фурье-модель с 3 гармониками показала наилучшие результаты ($R^2 \approx 0,7721$), что указывает на наличие периодических компонентов в данных.
 - Увеличение числа гармоник до 4 дало лишь минимальное улучшение и приводит только к усложнению модели.
 - Фурье-модель с 3 гармониками достаточно хорошо описывает данные, учитывая их периодическую составляющую.

4.9.3. Экспоненциальные аппроксимации

- Экспоненциальные модели использовались для анализа экспоненциального роста или затухания:
 - Модель с 1 членом имела низкий коэффициент корреляции и высокую ошибку.
 - Экспоненциальная модель с 2 членами показала значительное улучшение ($R^2 \approx 0,7701$) и снижение $RMSE$, что указывает на наличие экспоненциальных зависимостей в исследуемых данных.

– Экспоненциальная модель с увеличением количества членов > 2 уравнения приводит к значительным усложнениям технического характера вычислительной конструкции.

– Экспоненциальная модель с 2 членами является лучшим выбором для захвата экспоненциальных трендов, если они присутствуют в данных.

Полученные измерения ГНУ-КВ имеют достаточно высокую корреляцию с измерениями SCINTREX CG-6. Также выявлена идентичность спектральных характеристик ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6.

Если полином третьей степени достаточно хорошо описывает функцию на заданном интервале по критерию R^2 , то использование четырёх гармоник Фурье становится избыточным. Полином третьей степени способен описать функции с максимум двумя перегибами, что соответствует его аналитической структуре. С другой стороны, три гармоники Фурье могут создавать до шести перегибов, что излишне для описания функций, которые уже достаточно точно аппроксимируются этим полиномом. При этом, полином третьей степени требует меньше параметров (четыре коэффициента) по сравнению с тремя гармониками Фурье (шесть параметров: три амплитуды и три фазы). Это упрощает интерпретацию модели и значительно снижает вычислительную нагрузку. Таким образом, если полином обеспечивает достаточно высокое качество аппроксимации ($R^2 \approx 1$), то увеличение гармоник Фурье не добавляют значимой точности, а лишь усложняют модель.

Сводные результаты анализа всех рассмотренных моделей представлены в таблице 4.

Результаты анализа всех моделей

Тип модели	Уравнение	R ²	RMSE	SSE	Вывод
Полиномиальная (2 степень)	$f(x) = p_1 \cdot x^2 + p_2 \cdot x + p_3$	0,8197	0,0915	229,7	Хорошее соответствие, но не отражает сложные колебания данных
Полиномиальная (3 степень)	$f(x) = p_1 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x + p_4$	0,9440	0,0510	71,4	Лучшая аппроксимация среди полиномов. Оптимальная модель
Полиномиальная (4 степень)	$f(x) = p_1 \cdot x^4 + p_2 \cdot x^3 + p_3 \cdot x^2 + p_4 \cdot x + p_5$	0,8364	0,0872	208,4	Усложнение модели привело к ухудшению точности по сравнению с моделью 3-й степени
Фурье (1 гармоника)	$f(x) = a_0 + a_1 \cdot \cos(x \cdot w) + b_1 \cdot \sin(x \cdot w)$	0,6086	0,1348	498,7	Недостаточно для описания данных с периодическими компонентами
Фурье (2 гармоники)	$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^2 [a_i \cdot \cos(i \cdot x \cdot w) + b_i \cdot \sin(i \cdot x \cdot w)]$	0,7612	0,1053	304,2	Подходит для периодических данных, но точность ниже, чем у полинома 3-й степени
Фурье (3 гармоники)	$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^3 [a_i \cdot \cos(i \cdot x \cdot w) + b_i \cdot \sin(i \cdot x \cdot w)]$	0,7721	0,1029	290,4	Лучшая Фурье-модель, но всё ещё уступает полиному 3-й степени
Фурье (4 гармоники)	$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^4 [a_i \cdot \cos(i \cdot x \cdot w) + b_i \cdot \sin(i \cdot x \cdot w)]$	0,7724	0,10282	290,01	Увеличение числа гармоник не привело к значимому улучшению модели
Экспоненциальная (1 член)	$f(x) = a \cdot e^{(b \cdot x)}$	0,2405	0,1878	967,8	Очень низкое качество аппроксимации
Экспоненциальная (2 члена)	$f(x) = a \cdot e^{(b \cdot x)} + c \cdot e^{(d \cdot x)}$	0,7701	0,1033	292,8	Хорошая аппроксимация для данных с экспоненциальными трендами

Наилучшие результаты для данного интервала исследования показали полиномиальные модели 3-й степени. Фурье-модели также оказались полезны, особенно для учёта периодических колебаний, однако полиномиальная модель 3-й степени обеспечивает несколько лучшее соотношение между точностью и простотой модели.

4.10. Метод ПОЛС

В то же время анализ показывает сложность однозначного математического описания вариаций гравиинерциальных измерений из-за влияния неизвестных геодинамических процессов и случайных факторов. Для построения общей модели вариаций гравиинерциальных измерений предложен подход, основанный на процедуре оптимального линейного сглаживания (ПОЛС) [80]. Эта модель представляет собой сочетание известных теоретических моделей и учета случайных «гостевых» процессов – совокупности внешних и локальных факторов, не выясненной и до конца не изученной природы, но влияющих на изучаемые вариации гравиинерциальных измерений. Такой подход открывает новые перспективы для дальнейших исследований в области геофизики.

Формула ПОЛС имеет вид:

$$Ysm_j = \frac{\sum_{i=1}^N K\left(\frac{(x_i - x_j)}{w}\right) y_i}{\sum_{i=1}^N K\left(\frac{(x_i - x_j)}{w}\right)_i}, K(t) = \exp(-t^2). \quad (9)$$

Здесь y_j , Ysm_j ($j=1,2,\dots,N$) – соответственно исходная и сглаженная функции, $K(i,j)$ ядро сглаживания, выраженное через функцию Гаусса, а параметр w определяет окно сглаживания. Варьируя параметр w можем получить различную степень сглаживания исходной функции y_j , задавая коэффициент корреляции Пирсона (4) в интервале (0,95-0,99). Заметим, что в предельных случаях формула (8) приводит, соответственно, к среднему арифметическому ($w \gg 1$) и когда ($w \rightarrow 0$) $Ysm_j \approx y_j$, отсутствию усреднения. Ещё один существенный момент применения формулы (9) связан с тем фактом, что расчеты по ней линейны относительно

сглаживаемой функции y_j , что не приводит к дополнительным ошибкам обработки данных. Поэтому применение ПОЛС значительно приближает нас к построению модели наиболее близкой к «идеальной» модели по минимуму относительной ошибки и максимальному значению величины коэффициента корреляции.

Результаты применения ПОЛС к исходным данным представлены на рисунке 34.

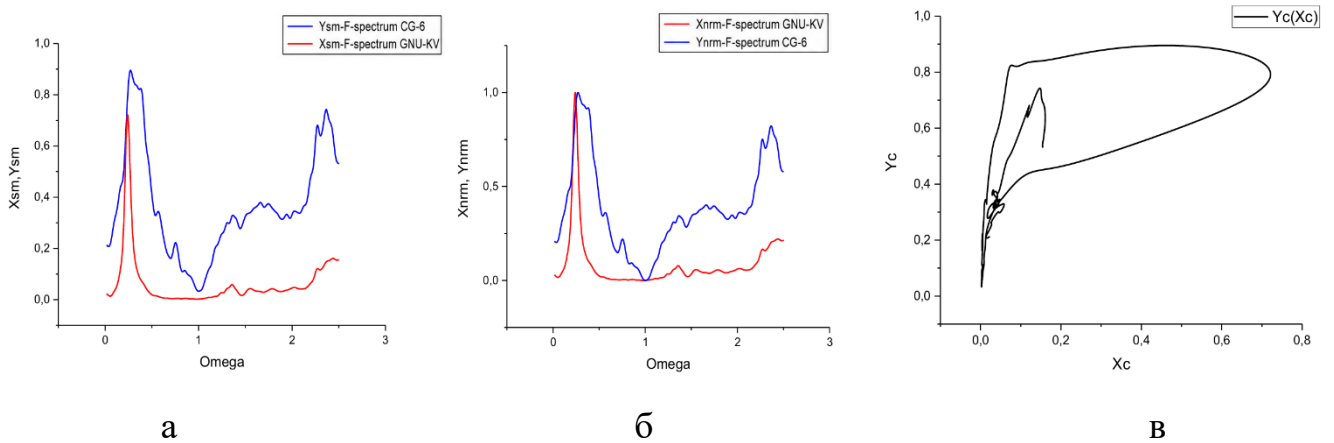


Рисунок 34. Результаты применения ПОЛС к исходным данным

На рисунке 34 графики показывают результат применения ПОЛС к исходным данным, показанных ранее на рисунках 29 (слева и по центру) и 31. Отличие центрального рисунка (б) от рисунка слева (а) состоит в том, что на центральном рисунке оба спектра от гравиметров X (ГНУ-КВ) и Y (CG-6) приведены к единому масштабу. Величина окна сглаживания $w = 0,05$. Величина корреляции Пирсона между исходными данными и сглаженными спектрами лежит в интервале (0,98, 0,99). Наиболее интересен рисунок Кросс-плоттинга, показанный справа (рисунок 34). Этот рисунок ясно показывает, что на самом деле эта кривая *многозначна* и состоит из трех ветвей. Именно этим фактом объясняются не совсем удачные попытки аппроксимации традиционными функциями как полиномами, гармониками Фурье и экспонентами.

Чтобы преодолеть этот существенный недостаток можно упорядочить амплитуды (в порядке возрастания слева направо) исходных Фурье спектров и рассмотреть их упорядоченные структуры.

Если упорядочить амплитуды сглаженных Ф-спектров (рисунок 35), то из рисунка (а), изображенного слева, получатся две упорядоченные кривые,

изображенные на центральном рисунке. Кросс-плот этих кривых изображен на крайнем правом рисунке (в).

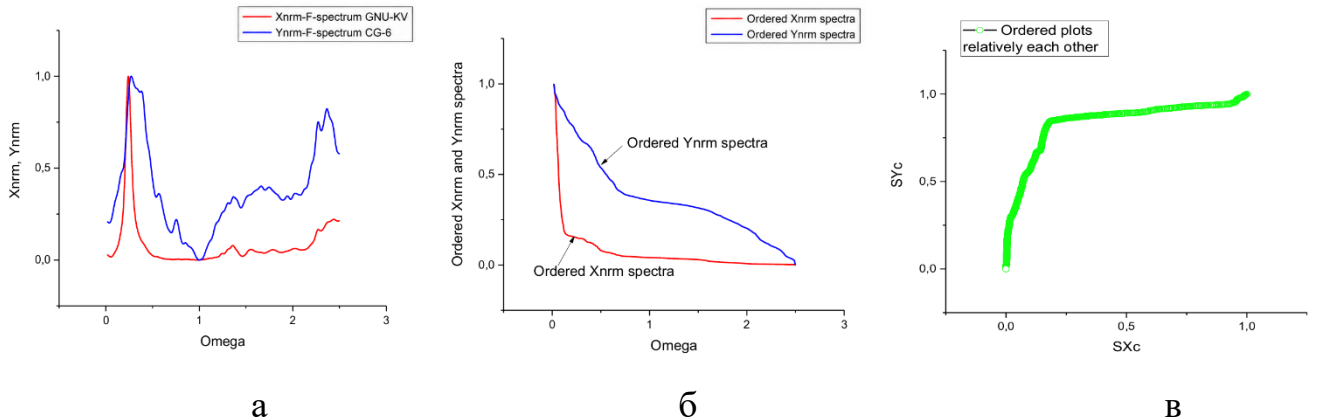


Рисунок 35. Упорядоченные амплитуды сглаженных Ф-спектров

Если сравнить рисунки (в), изображенные на рисунках 34 и 35, то можно заметить, что многозначность исчезает и остается крайняя верхняя ветвь, поддающаяся точной аппроксимации. Аппроксимация этой ветви осуществляется двухэкспоненциальной функцией вида:

$$Y_{sm} = A_0 + A_1 \exp(\lambda_1 SXc) + A_2 \exp(\lambda_2 SXc) \quad (10)$$

Эта экспоненциальная функция содержит 5 параметров аппроксимации ($A_{0,1,2}, \lambda_{1,2}$). Их значения таковы: $A_0 = 0,911$, $A_1 = -0,807$, $A_2 = 0,375 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_1 = -9,810$, $\lambda_2 = 5,1799$.

График аппроксимации этой функцией представлен на рисунке 36.

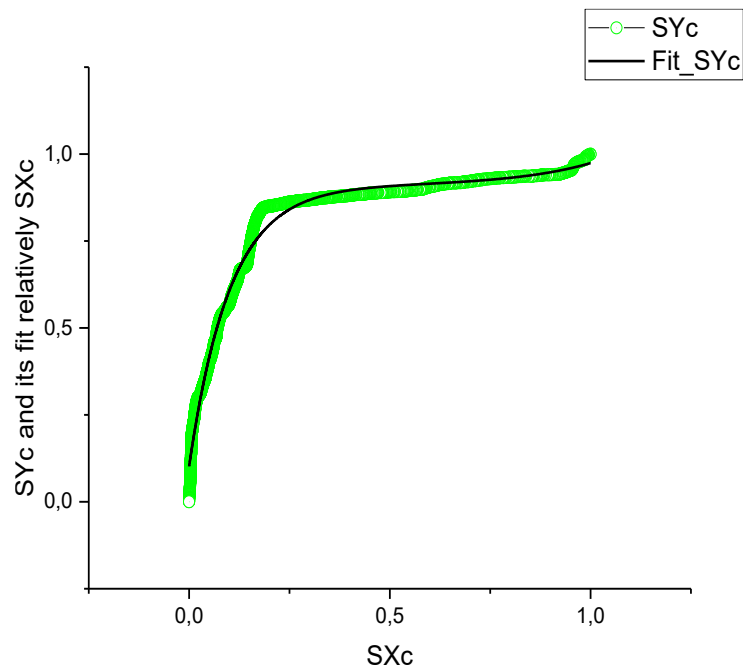


Рисунок 36. Аппроксимирующая кривая феноменологической модели

Аппроксимирующая кривая, показанная чёрной сплошной линией, аппроксимирует значительное число измеренных красных точек ($N = 27440$) с относительной ошибкой менее 1% (рисунок 36). Именно эту аппроксимирующую функцию можно использовать в качестве феноменологической модели для описания нестационарных вариаций гравиинерциальных измерений.

Общий вывод из анализа ряда математических моделей, рассмотренных выше по аппроксимации вариаций гравиинерциальных измерений, сводится к тому, что эта задача является достаточно сложной. Возможно, выбор модели должен учитывать, что конечный процесс, определяющий вариации гравиинерциальных измерений, состоит из смеси стационарных периодических процессов и случайных процессов неизвестной и неизученной природы.

Поэтому вариации гравиинерциальных измерений невозможно описать математически однозначно и аппроксимировать моделью только одного процесса. Имеет место сильное влияние недоучтенных и неизвестных случайных факторов процессов. Измерения, определяющие вариации гравиинерциальных измерений являются, скорее всего, квазипериодическими. Но такая достаточно строго обоснованная с разных сторон математическая модель процесса, описывающая вариации гравиинерциальных измерений, в настоящее время, отсутствует.

В работе [16] был предложен теоретический подход (подкреплённый также экспериментальными данными) для описания сложных моделей, связанных с квазипериодическими измерениями. Из этой теории следует важный вывод: каждый набор квазипериодических измерений может иметь две аппроксимирующие функции: (а) связанную с предлагаемой моделью и (б) связанную с учетом влияния неконтролируемых факторов.

Общая модель таких квазипериодических измерений является случайной смесью известной предполагаемой модели и модели, учитывающей влияние случайных «гостевых» процессов (порожденных внешними случайными факторами). Таким образом, на основе этого принципа можно получить общую математическую модель. Поскольку эксперимент является однофакторным, предполагается, что другие контролируемые переменные не изменяются или их влияние мало. В результате можно получить общую аппроксимирующую функцию, представленную в упрощённом виде.

Только увеличение числа повторных измерений позволит уменьшить влияние случайных ошибок и неконтролируемых факторов, приближая потенциального исследователя к правильному пониманию построения модели реального процесса. Именно в рамках такой модели, основанной на ППЧК, можно будет найти приемлемую для практических нужд модель, описывающую временные вариации гравиинерциальных измерений. Другими словами, чтобы повысить достоверность данных, потребуется работать с еще большим количеством экспериментов, которые должны быть по крайней мере квази-воспроизводимыми для выбранного промежутка времени их измерений. Разумеется, такое исследование выходит за рамки этой работы (лишь указывающей на невозможность описания вариаций гравиинерциальных измерений в рамках общепринятых подходов) и будет являться уже предметом дальнейшего исследования.

4.11. Результаты

В результате проведенных исследований была установлена высокая корреляция между гравиметрами ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6. Анализ измерений показал высокую степень корреляции между данными гравиметров ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6, а также выявлены идентичные спектральные характеристики этих приборов. Это подтверждает надежность приборов и точность регистрации временных вариаций гравиинерциальных измерений.

1. Сложность математического описания вариаций гравиинерциальных измерений: однозначное математическое моделирование вариаций в рамках одной модели невозможно из-за значительного влияния недоучтенных геодинамических процессов и других случайных факторов.

2. Предложен новый подход к моделированию вариаций гравиинерциальных измерений: вариации рассматриваются как случайная смесь известной базовой модели и модели, учитывающей влияние случайных «гостевых» процессов, вызванных внешними случайными факторами.

3. Эффективность применения процедуры оптимального линейного сглаживания (ПОЛС): использование ПОЛС позволяет создать модель, близкую к «идеальной», минимизируя относительную ошибку аппроксимации и максимизируя коэффициент корреляции Пирсона.

Глава 5. Применение модифицированного преобразования Фурье для моделирования вариаций гравиинерциальных измерений

Как уже указывалось выше целью аппроксимации является построение такой математической модели, максимально приближенной к «идеальной» модели, которая воспроизводит измеренные данные с минимальными ошибками и высокой достоверностью.

Для более точного построения модели реального процесса и снижения влияния случайных ошибок и неконтролируемых факторов требуется увеличить количество повторных измерений и расширить интервал наблюдений. Это позволит получить более достоверные данные и повысить качество интерпретации, приближая модель к комплексному описанию временных вариаций гравиинерциальных измерений.

При выборе подходящей аппроксимирующей функции необходимо учитывать параметры, наиболее точно описывающие зависимость между изучаемыми величинами. Из нескольких подходящих вариантов выбирается модель на основе баланса между точностью аппроксимации и простотой вычислительной конструкции модели.

Теория предлагает модели и гипотезы, основанные на проверяемых предположениях и постулатах. Эксперимент, в свою очередь, проверяет эти гипотезы, стараясь максимально исключить влияние неконтролируемых факторов и искажений, вносимых измерительной аппаратурой, а также случайных «гостевых» процессов. При этом необходим проверенный или верифицируемый принцип, которому подчиняются практически все измерения и из математической формулировки которого можно вывести некую «универсальную» аппроксимирующую функцию, позволяющую описать исследуемые измерения.

В данном подходе построения «универсальной» аппроксимирующей функции предлагается использовать модифицированное Фурье-преобразование, справедливое для любого сигнала, в котором промодулированы частота и фаза [39]. Такое преобразование, применённое напрямую к ЧФМ-сигналу, является строго

периодическим, поэтому его можно применять для нахождения АЧХ ЧФМ-сигнала и тем самым аппроксимировать исходный сигнал с высокой точностью.

Данное преобразование было применено для нахождения АЧХ двух гравиметров: ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6. Данные представляют собой бестрендовые временные флуктуации гравиинерциальных измерений, прямое описание которых представляет собой сложную проблему. Тем не менее, модифицированное Ф-преобразование позволяет решить её и найти искомые АЧХ с высокой точностью, что открывает новые возможности в гравиметрии для решения фундаментальных и прикладных геолого-геофизических задач.

5.1. Постановка задачи

Фактически каждый исследователь, применяющий Ф-преобразование, осведомлен об основном его недостатке. Этот недостаток кроется в предположении, что исходный случайный сигнал является строго периодическим, т.е.:

$$Sg(t+T) = Sg(t) \quad (11)$$

Здесь $Sg(t)$ определяет исходный случайный сигнал, T – период, совпадающий с $\text{Range}(t)$, где размах $\text{Range}(t) = \max(t) - \min(t)$ приблизительно определяет длину исходного сигнала $Sg(t)$. Во многих случаях это предположение недоказуемо, поэтому многие исследователи пытаются преодолеть этот недостаток различными методами и способами [52, 90, 91, 98, 99]. Если необходимо заменить чистый периодический сигнал на некую аperiodическую копию, то возникает следующая проблема. Проблема аппроксимации дискретных аperiodических сигналов не решается с помощью интегрального преобразования Фурье аperiodических сигналов, поэтому его нельзя использовать для предсказания дискретного аperiodического сигнала за пределами заданного интервала временного окна. Дискретные представления многих аналоговых сигналов играют важную роль в их обработке. Они содержат необходимую информацию, связанную со свойствами сигналов, и допускают их дальнейшую обработку [76]. В

традиционной схеме сигналы могут быть представлены в виде рядов Тейлора – Маклорена.

Существует ли простое и универсальное преобразование исходного сигнала, позволяющее преобразовать его в другой цифровой сигнал, имеющий строго период равный 2π . Этот вопрос может быть решен положительно, если записать следующее соотношение:

$$Sg(t) = a \cdot \cos(F(t)) + b, \quad (12)$$

Функция $F(t)$ представляет собой объединённый ЧФМ-сигнал и обеспечивает желаемый интервал $[-1,1]$ для $\cos(F(t))$, а искомый аргумент $F(t)$ попадает в периодический интервал $[0, \pi]$. Поэтому конечный результат разложения любого сигнала сохраняет структуру вида (12), если к нему добавить разложение $F(t)$ в форме аппроксимирующей функции $Yft(t,K)$ в виде конечного отрезка ряда Фурье.

$$F(t) \cong Yft(t, K) = Ph_0 + \sum_{k=1}^K [Ac_k \cos(\Omega_k t) + As_k \sin(\Omega_k t)], \quad (13)$$

$$\Omega_k = 2, 3, \dots, K$$

Разложение (13) учитывает свойство аргумента $F(t) = F(t \pm \pi)$, определяющее полу-периодическую функцию. Таким образом, эти два простых выражения (12) и (13) решают задачу разложения любой случайной функции $Sg(t)$ в РФ, базируясь на разложении аргумента $F(t)$.

5.2. Описание гравиметрических данных

Для реализации этой постановки задачи были проведены эксперименты по регистрации вариаций гравиинерциальных измерений одновременно несколькими гравиметрами на базе фундаментального гравиметрического пункта «Ледово» [38].

В комплексе геофизической аппаратуры используются гравиметрические приборы различных типов, действующие на одних и тех же физических принципах и обладающие общим частотным диапазоном. Расположение всех гравиметров на одном геофизическом постаменте позволяет считать зарегистрированные инерционные помехи идентичными по происхождению. Давление, температура, дрейф нуля при данных измерениях не оказывают значительного влияния на

результаты измерений.

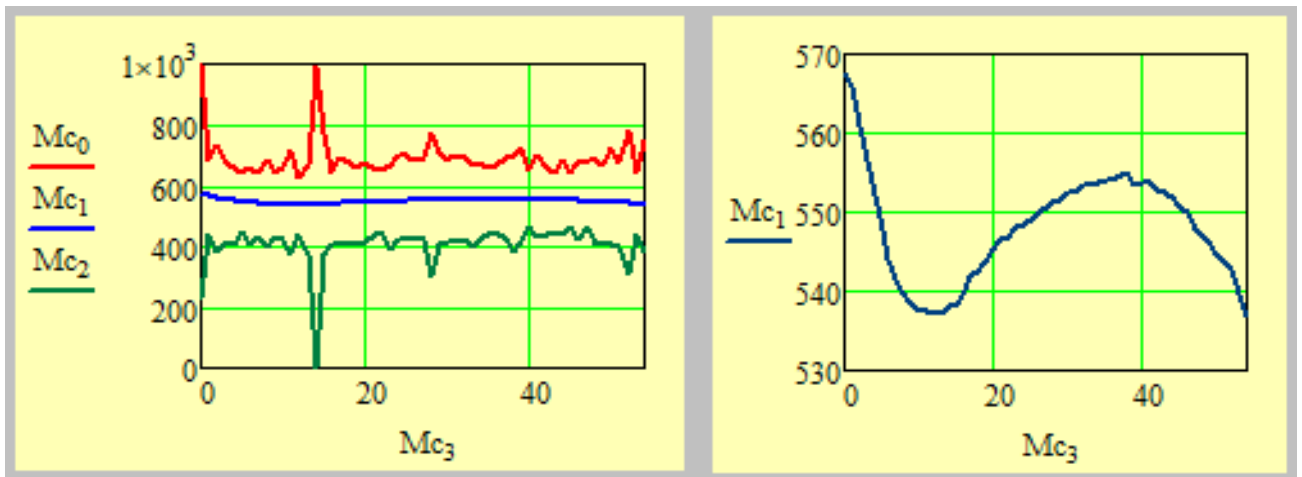
Гравиметры нового поколения SCINTREX CG-6 оснащены блоками компьютерной обработки, которые позволяют вводить вычисленные поправки в показания прибора в режиме реального времени, существенно снизив влияние помех и обеспечив точность измерений порядка 0,001 мГал. Автоматическое снятие показаний и непрерывная дискретизация данных минимизируют ошибки оператора

Гравиметр ГНУ-КВ был адаптирован для регистрации вариаций гравиинерциальных измерений с использованием видеокамеры в качестве ключевого элемента процесса цифровизации показаний. Это инновационное решение позволяет с высокой точностью фиксировать и детально анализировать вариации гравиинерциальных измерений, в том числе амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) [30].

В данной работе анализ АЧХ ограничивается только для пары приборов ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6, так как SCINTREX CG-6 является базовым прибором при регистрации вариаций гравиинерциальных измерений на фундаментальном гравиметрическом пункте «Ледово».

5.3. Алгоритм обработки данных

Так как данные от двух гравиметров представляют собой прямоугольные матрицы с числом строк $N = 1000$ и столбцов $M = 55$, то (для иллюстрации предлагаемого метода и сохранения приемлемого объема страниц данной статьи) можно выделить только три характерных сигнала с максимальным, средним и минимальными значениями, соответственно. Значения этих трех столбцов исходных матриц находятся из так называемой трубы доверия (ТД), которая показывает распределения этих трех значений по всей совокупности столбцов исходных матриц. Для первичного анализа выберем матрицу данных гравиметра ГНУ-КВ. Труба доверия для этой матрицы показана на рисунке 37 (а, б).

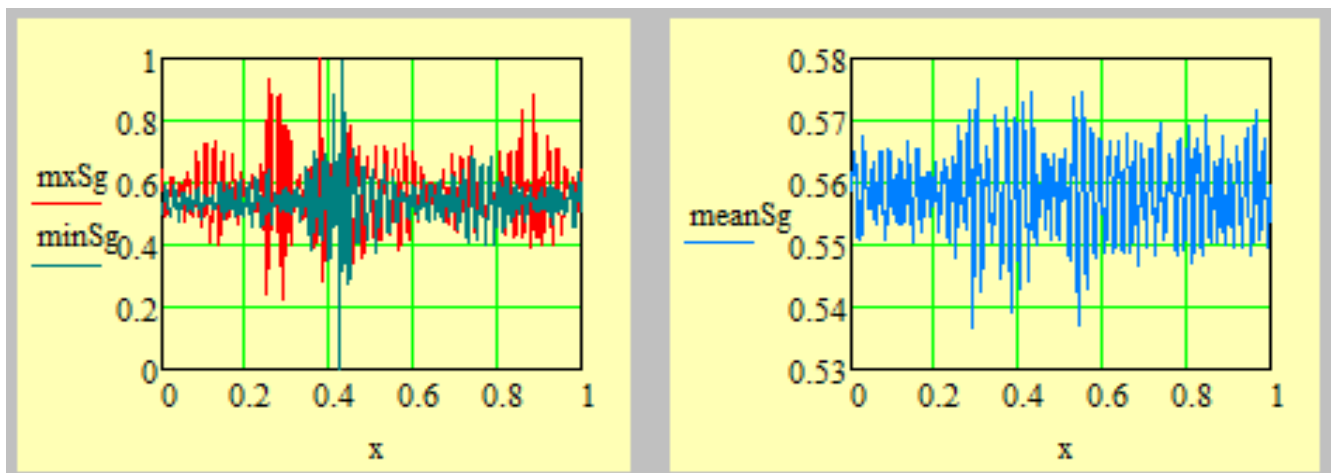


а

б

Рисунок 37. Распределение максимальных значений ТД. Слева на рисунке (а) показаны распределения максимальных, средних и минимальных значений по всей совокупности столбцов исходной матрицы измерений. Ввиду того, что среднее значение принимает малые значения, то это распределение выделено на отдельном рисунке справа (б)

На рисунке 37 (а, б) показаны распределения экстремальных значений ТД по всем 55 столбцам. Максимальные и минимальные значения выделены соответственно красным и зеленым цветами. Распределение средних значений выделено синим цветом и ввиду малости их значений показано отдельно на правом рисунке. Максимальное и минимальные значения соответствуют столбцу матрицы под нулевым и 14-ым номером и явно видны на левом рисунке.



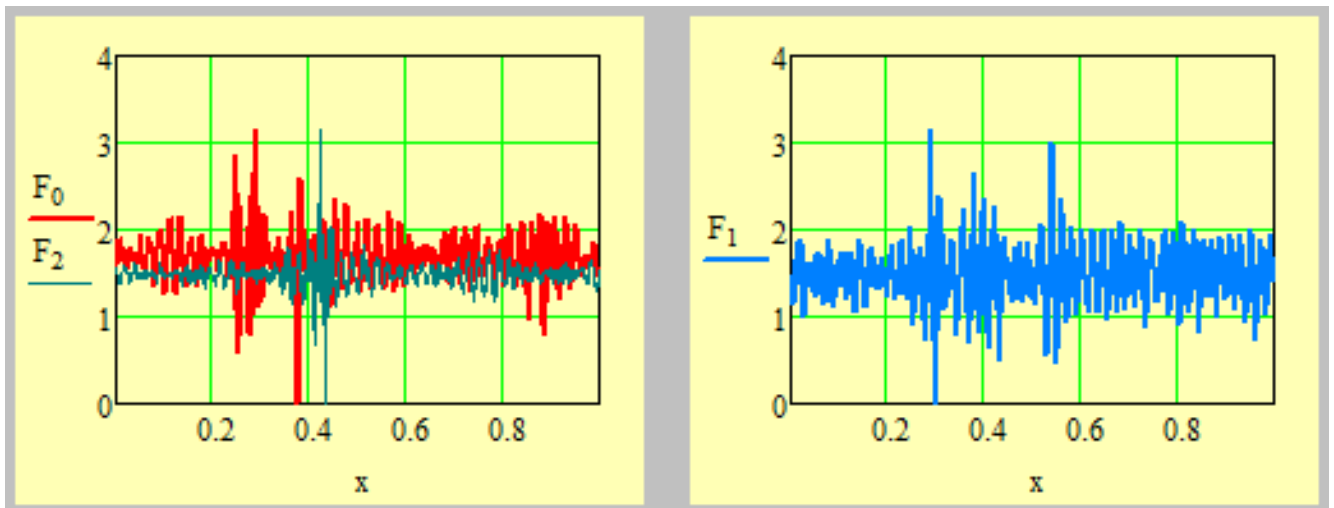
а

б

Рисунок 38. Наиболее характерные сигналы, выделенные по экстремумам ТД и подлежащие дальнейшей аппроксимации

На рисунке 38 (а, б) показаны три наиболее характерных сигнала, выделенных по экстремальным точкам ТД и подлежащих аппроксимации. Непосредственная аппроксимация таких сигналов с высокой точностью практически невозможна, однако расчёт их аргументов $Fp(t)$, допускающих строгое разложение в ряд Фурье, позволяет решить поставленную задачу. Для дальнейших целей удобно использовать в качестве независимой переменной нормированную на единицу переменную $x_j = j/N$.

На рисунке 39 показаны все три функции аргументов, подлежащих аппроксимации. На левом рисунке (а) красным и зелёным цветом соответственно показаны функции $F_{0,2}(t)$ для максимальных и минимальных значений, а на правом рисунке (б) показана функция $F_1(t)$ для распределения средних значений, показанная на прежнем рисунке 38 справа.



а

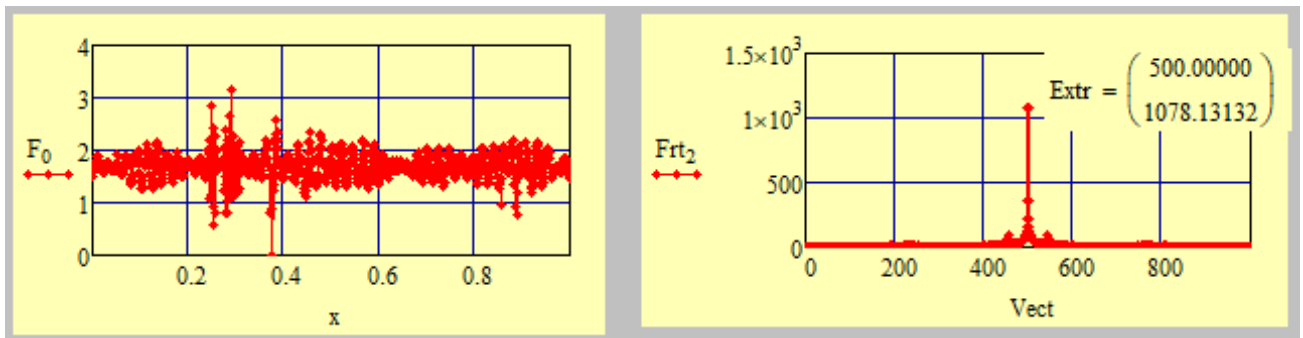
б

Рисунок 39. Функции аргументов $Fp(t)$, выделенные теми же цветами, что и на прежнем рисунке, и подлежащие аппроксимации

Эти три функции строго периодические (нетрудно заметить, что все они лежат в интервале $[0, \pi]$) и поэтому к ним применимо разложение (13). Для более точных расчетов применим к ним метод Неортогонального комбинированного Фурье анализа сглаженных сигналов (НОКФАСС) [35]. Суть этого комбинированного метода состоит в том, что весь спектр частот сдвигается к центру на угол π и из всего избыточного спектра частот используется только их малая часть, расположенная справа от резонансной частоты.

На рисунке 40 объяснена суть НОКФАСС. Слева (а) показана функция $F_0(t)$, а справа – (б) её Ф-спектр. Резонансная частота располагается ровно посередине на $\frac{N}{2} = 500$. Для целей аппроксимации достаточно взять безразмерную полосу частот [500-650].

Так как спектр периодической функции известен, и приемлемая полоса частот для аппроксимации определена, то дальнейшие действия осуществляются по стандартному МНК.

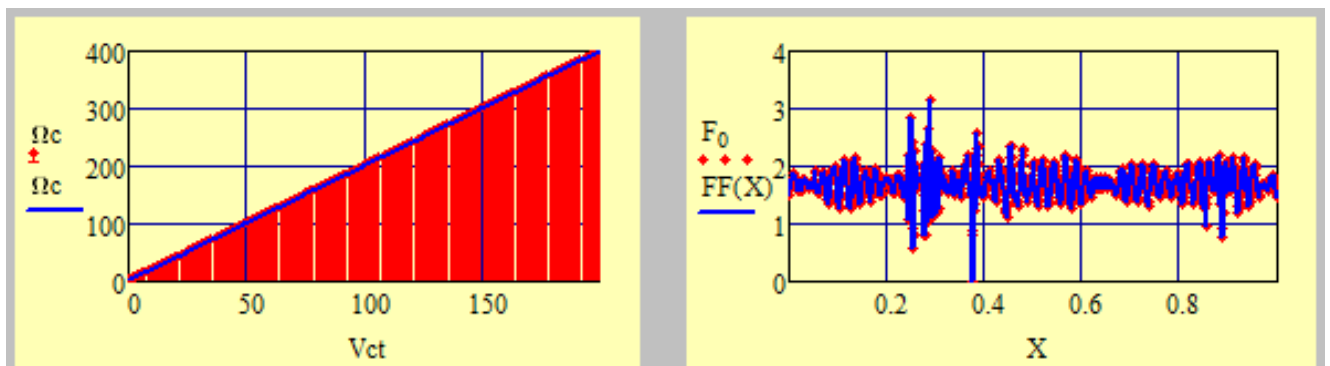


а

б

Рисунок 40. Слева (а) показан аргумент $F_0(t)$, соответствующий максимальному распределению. Справа (б) – А-преобразование, сдвинутое на заданный угол. Для целей аппроксимации достаточно взять набор частот от центральной резонансной частоты до 650

На рисунке 41 слева (а) показан укороченный спектр частот, применимый для целей аппроксимации. Он расположен в полосе [2, 400]. Справа (б) показана аппроксимация функции $F_0(t)$. Точность аппроксимации весьма высокая: относительная ошибка меньше 0,2%.



а

б

Рисунок 41. Слева (а) показан укороченный спектр. Справа (б) показана аппроксимация распределения $F_0(t)$. Относительная ошибка не превышает 0,2%

$$RelErr(K) = \left[\frac{stdev(F(t) - Yft(t, K))}{mean|F(t)|} \right] \cdot 100\% \quad (14)$$

Более точные значения приведены в таблице 5.

На рисунке 42 показано распределение модуля амплитуд $Amd_k = \sqrt{Ac_k^2 + As_k^2}$ слева (а), и распределение фаз, вычисляемое по формуле $\arctg(As_k/Ac_k)$ для функции $F_0(t)$ справа (б). Заметим, что распределение фаз практически равномерное, так как последовательность ранжированных амплитуд (ПРА), выделенная сплошной синей линией на правом рисунке, практически совпадает с отрезком прямой линии.

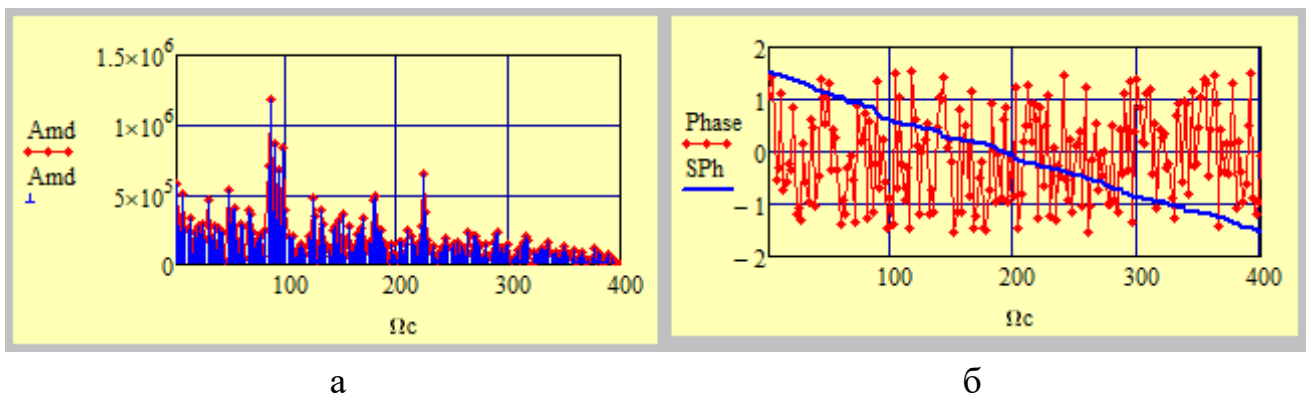


Рисунок 42. Слева (а) показано распределение модуля амплитуд, справа (б) показано распределение фаз. Голубая линия выделяет последовательность ранжированных амплитуд (ПРА). Её близость к отрезку прямой показывает, что распределение фаз – равномерное

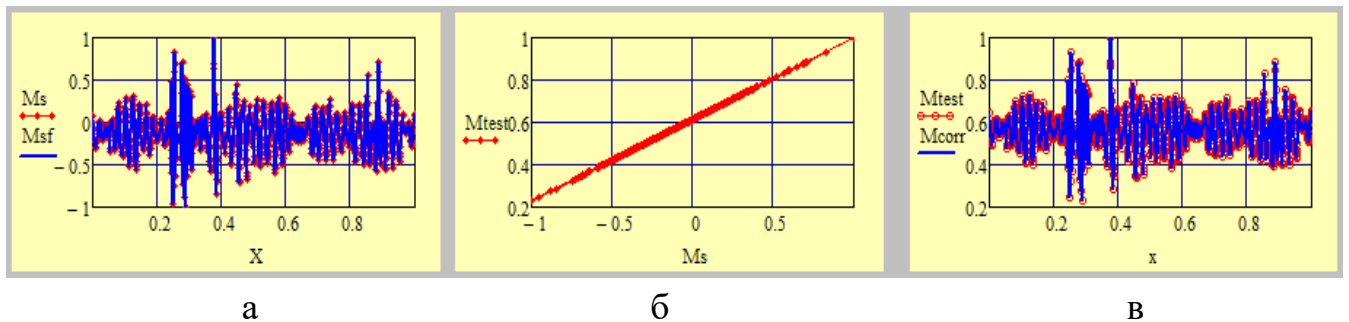


Рисунок 43. Переход от функции $\cos(F_0(t))$ (рисунок (а)) к исходной функции распределения максимумов (рисунок (в)) через линейное преобразование (12). Это показано на центральном рисунке (б)

На рисунке 43 (а, б, в) проиллюстрирован переход от функций аргумента тригонометрической функции $F_0(t)$ к исходной функции распределения максимумов, расположенных на правом рисунке вместе с её аппроксимирующей функцией. Для нахождения окончательных параметров а и в используются

выражения (12) и (15), приведённые ниже. Эти параметры представлены в таблице 5.

$$Ex(t) = a \cos(Yft(t)) + b \quad (15)$$

Так как новый подход был подробно объяснен на примере аппроксимации функции $F_0(t)$, нет необходимости дублировать метод, используемый для других функций $F_{1,2}(t)$. В данном случае приводятся только окончательные результаты аппроксимации этих функций, необходимые для сравнительного анализа, с сохранением по возможности прежних настроек вычислительной программы.

На рисунке 44 слева (а) показан укороченный спектр частот, применимый для целей аппроксимации. Он расположен в той же полосе $[2, 400]$. Справа (б) показана аппроксимация функции $F_1(t)$. Точность аппроксимации весьма высокая: относительная ошибка меньше 0,2%.

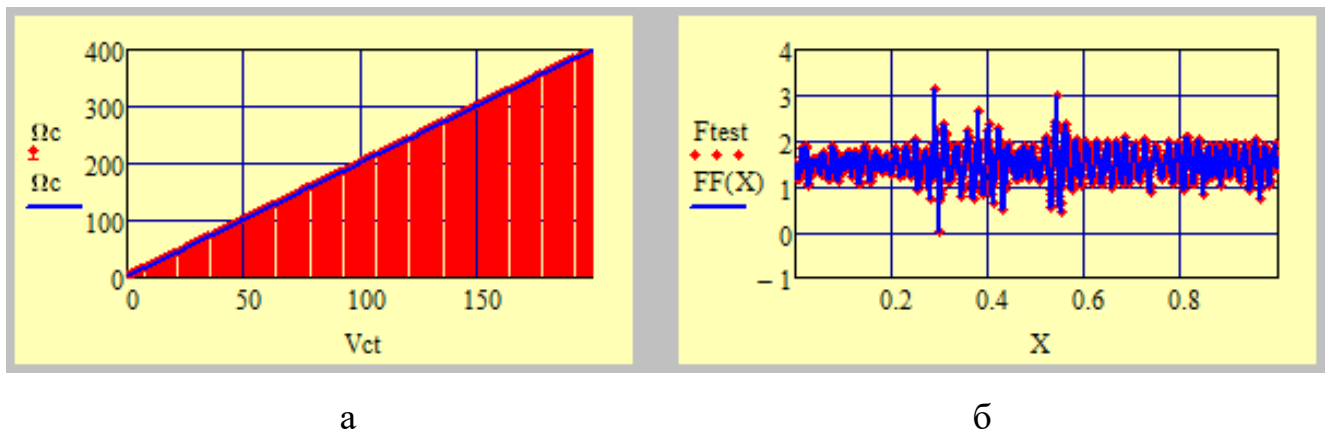
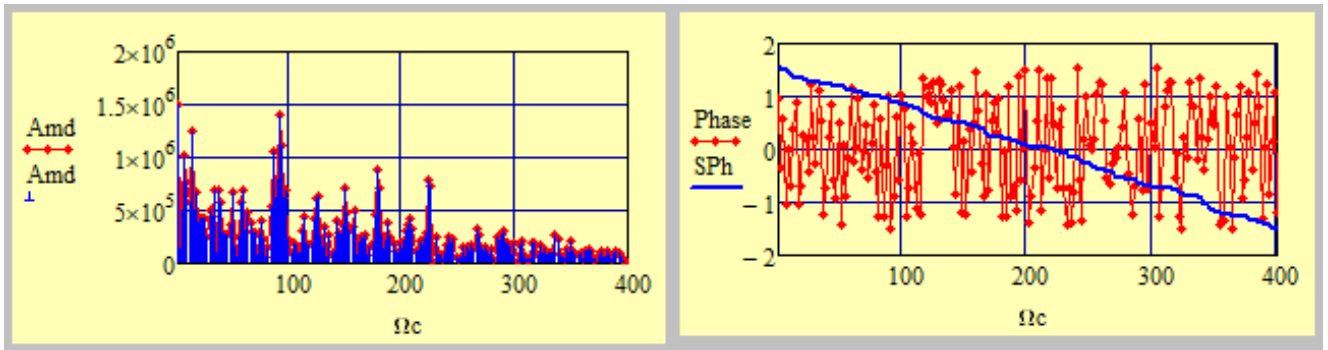


Рисунок 44. Слева (а) показан укороченный спектр. Справа (б) показана аппроксимация распределения $F_1(t)$. Относительная ошибка не превышает 0,2%.



а

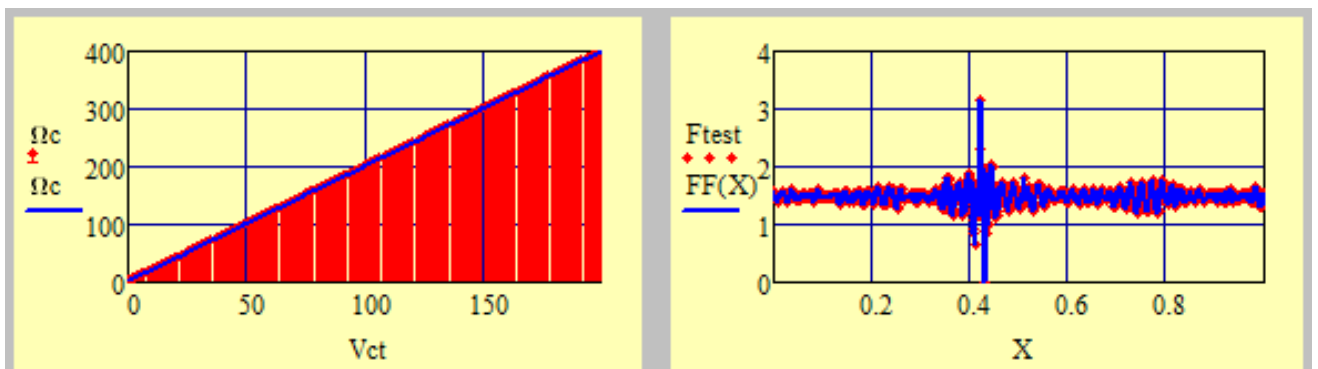
б

Рисунок 45. Слева (а) показано распределение модуля амплитуд, справа на рисунке (б) показано распределение фаз. Это АЧХ относится к функции $F_1(t)$. Голубая линия выделяет последовательность ранжированных амплитуд (ПРА). Её близость к отрезку прямой показывает, что распределение фаз – равномерное

На рисунке 45 показано распределение модуля амплитуд $Amd_k = \sqrt{Ac_k^2 + As_k^2}$ слева (а) и распределение фаз, вычисляемое по формуле $Phase_k = \arctg(As_k/Ac_k)$ для функции $F_1(t)$ справа (б). Заметим, что распределение фаз, как и в первом случае, практически равномерное, так как последовательность ранжированных амплитуд (ПРА), выделенная сплошной синей линией на правом рисунке, как и ранее, практически совпадает с отрезком прямой линии.

Переход к исходному усредненному сигналу и соответствующие параметры a и b , осуществляющие этот переход по формуле (12) приведены в таблице 5.

Аналогичным образом для полноты картины приводим 4 рисунка для аргумента $F_2(t)$.

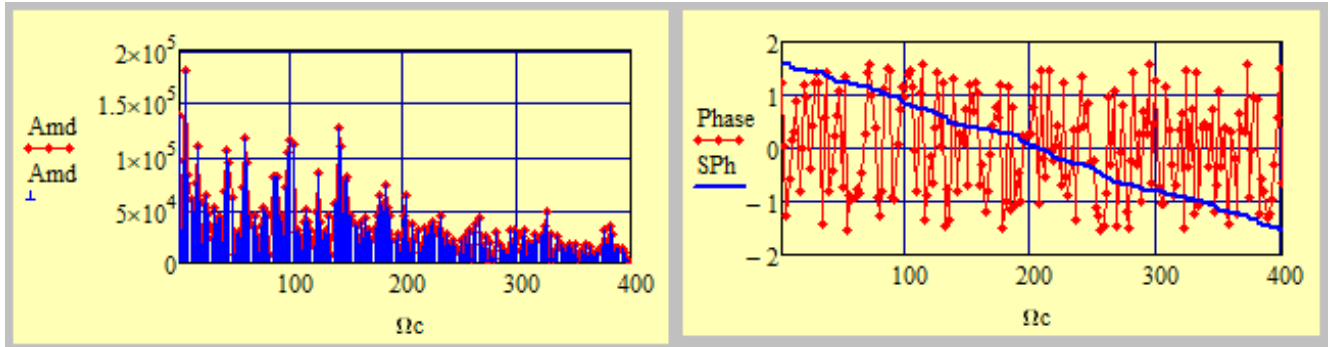


а

б

Рисунок 46. Слева (а) показан укороченный спектр. Справа (б) показана аппроксимация распределения $F_2(t)$. Относительная ошибка не превышает 0,2%

На рисунке 46 слева (а) показан укороченный спектр частот, применимый для целей аппроксимации [2, 400]. Как и для прежних случаев, он расположен в полосе [2-11, 13-28, 30-41, 43-400]. Справа (б) показана аппроксимация функции $F_2(t)$. Точность аппроксимации, как и ранее, меньше 0,2%.



а

б

Рисунок 47. На рисунке слева (а) показано распределение модуля амплитуд, справа на рисунке (б) показано распределение фаз. Это АЧХ относится к функции $F_2(t)$. Голубая линия выделяет последовательность ранжированных амплитуд (ПРА). Её близость к отрезку прямой показывает, что распределение фаз – равномерное

На рисунке 47 показано распределение модуля амплитуд $Amd_k = \sqrt{Ac_k^2 + As_k^2}$ слева (а) и распределение фаз, вычисляемое по формуле $Phase_k = \arctg(As_k/Ac_k)$ для функции $F_2(t)$ справа (б). Заметим, что распределение фаз, как и в первом случае, практически равномерное, так как последовательность ранжированных амплитуд (ПРА), выделенная сплошной синей линией на правом рисунке, как и ранее, практически совпадает с отрезком прямой линии.

Общий вывод, который следует из предварительного анализа рисунков 42-45 таков: усеченные спектры для всех трех функций $F_p(t)$ одинаковы и расположены в интервале [2-11, 13-28, 30-41, 43-400]. Основные отличия для всех трех $F_p(t)$ лежат в распределениях модулей амплитуд (рисунок 42 (а), рисунок 45 (а) и рисунок 47 (а), соответственно).

Совершенно аналогичным образом обрабатываются данные по гравиметру CG-6. По ТД определяются следующие колонки. Вторая для распределения максимумов, а минимальная совпадает с нулевой колонкой. Поэтому экстремальные файлы представлены следующими рисунками:

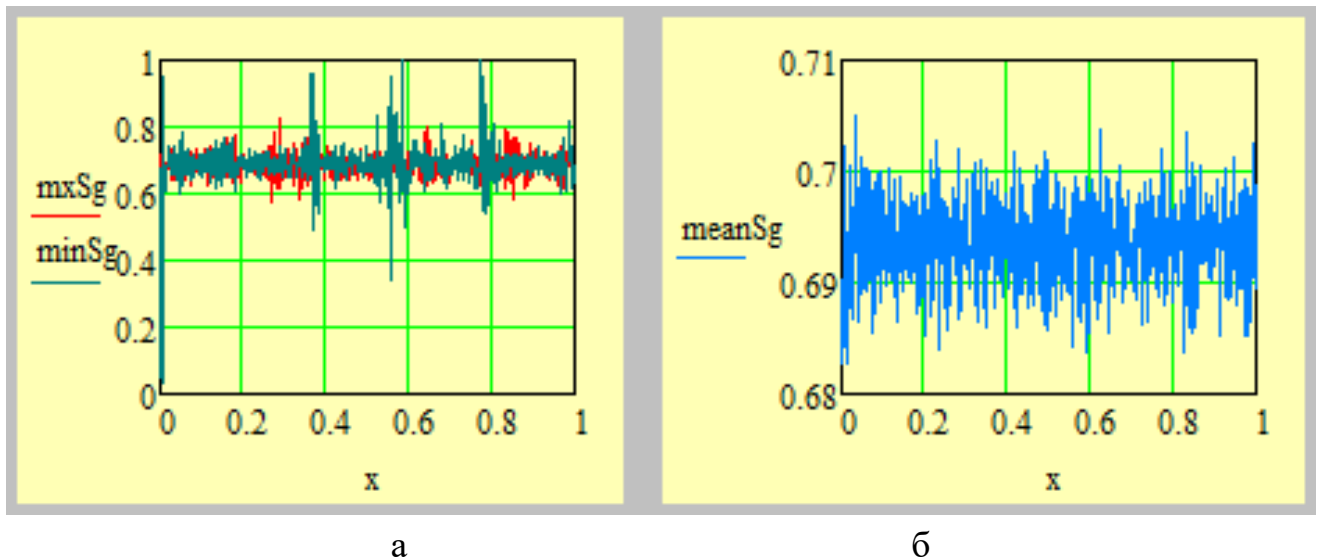


Рисунок 48. Распределение максимальных значений ТД. Слева на рисунке (а) показаны распределения максимальных, средних и минимальных значений по всей совокупности столбцов исходной матрицы измерений. Ввиду того, что среднее значение принимает малые значения, то это распределение выделено на отдельном рисунке справа

На рисунке 48 (а, б) показаны три наиболее характерных сигнала для гравиметра SCINTREX CG-6, выделенных по критерию ТД и подлежащих аппроксимации. Сохраняются те же обозначения для аргументов $Fp(t)$, допускающих строгое разложение в ряд Фурье, что позволяет решить поставленную задачу. Как и ранее, удобно использовать в качестве независимой переменной нормированную на единицу переменную $x_j = j/N$.

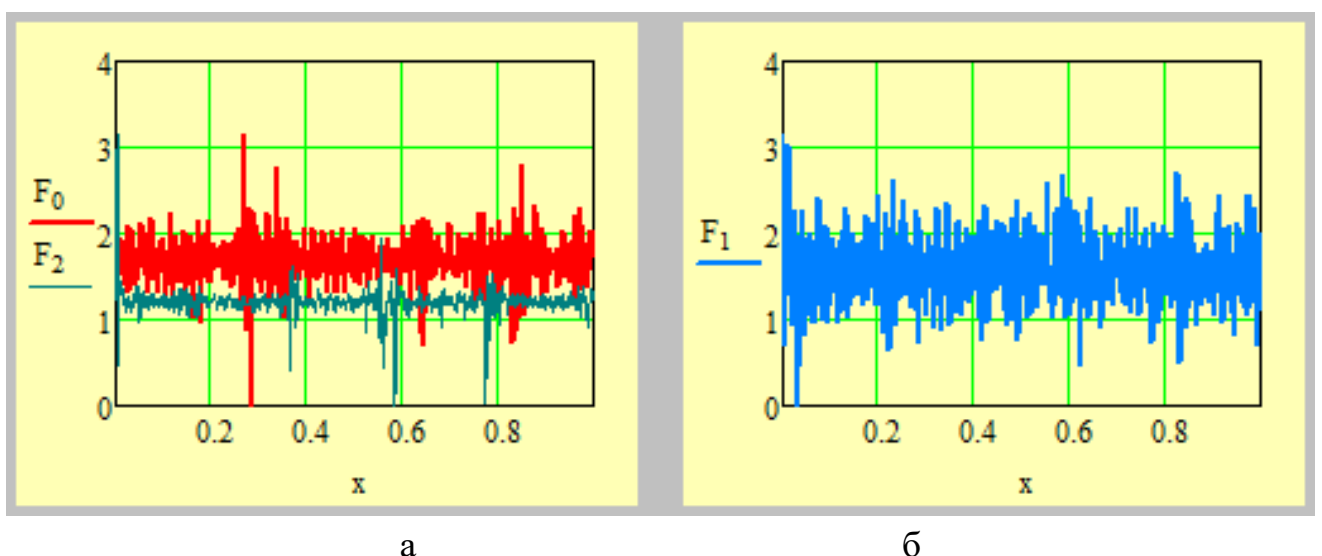
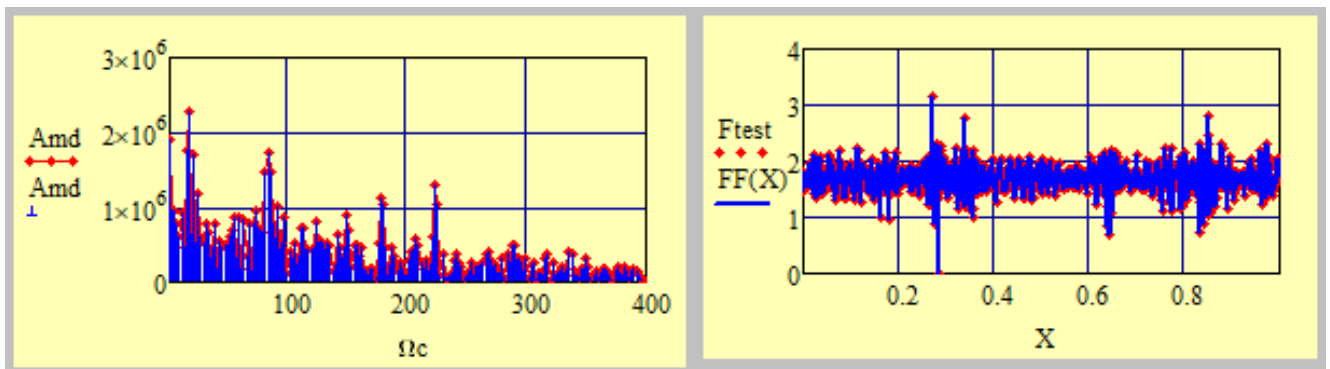


Рисунок 49. Функции аргументов $Fp(t)$, выделенные теми же цветами, что и на прежнем рисунке, и подлежащие аппроксимации

На рисунке 49 показаны все три функции аргументов для гравиметра SCINTREX CG-6, подлежащих аппроксимации. На левом рисунке (а) красным и зелёным цветом соответственно показаны функции $F_{0,2}(t)$ для максимальных и минимальных значений, а на правом рисунке (б) показана функция $F^1(t)$ для средней функции, изображенная на прежнем рисунке справа. Заметим, что все они автоматически приводятся к интервалу $[0, \pi]$.

Так как усеченный спектр для второго гравиметра также сохраняется, то приведем только аппроксимацию функции $F_0(t)$ и распределение модуля амплитуд. Фазовые распределения также носят равномерный характер.

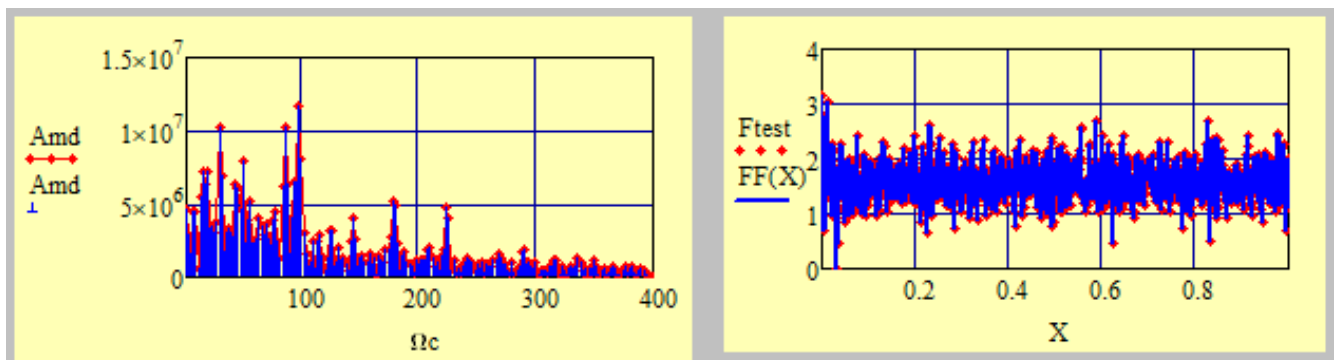


а

б

Рисунок 50. Распределение модуля амплитуд слева (а) и аппроксимация функции $F_0(t)$ справа (б). Распределение фаз, как и для первого гравиметра, практически равномерное

Рисунок 50 показывает распределение модуля амплитуд слева (а) и аппроксимацию функции $F_0(t)$ справа (б). Распределение фаз, как и для первого гравиметра, практически равномерное.



а

б

Рисунок 51. Распределение модуля амплитуд слева (а) и аппроксимация функции $F_1(t)$ справа (б). Распределение фаз, как и для первого гравиметра, практически равномерное

На рисунке 51 показано распределение модуля амплитуд слева (а) и аппроксимация функции $F_1(t)$ справа (б). Распределение фаз, как и для первого гравиметра, практически равномерное.

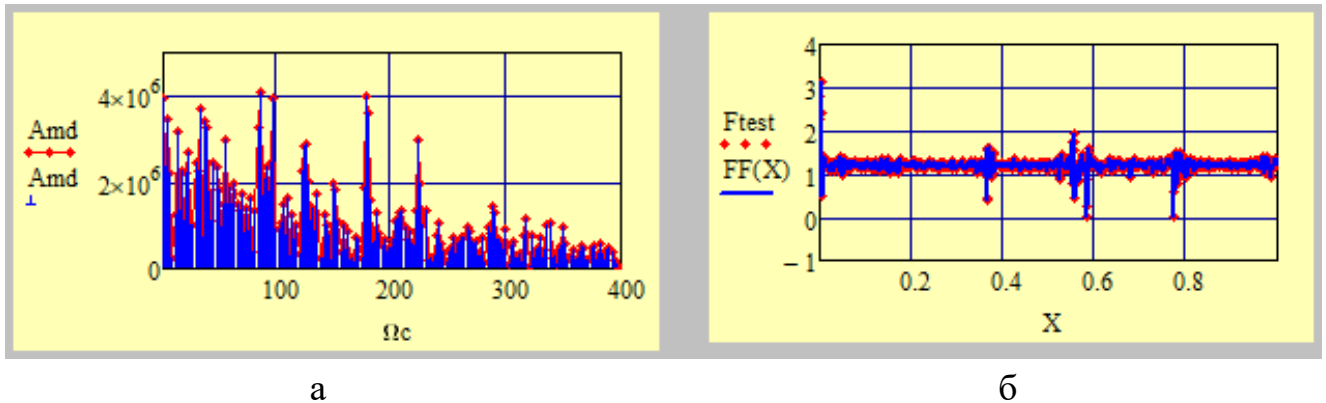


Рисунок 52. Распределение модуля амплитуд слева (а) и аппроксимация функции $F_2(t)$ справа (б). Распределение фаз, как и для первого гравиметра, практически равномерное

На рисунке 52 показано распределение модуля амплитуд слева (а) и аппроксимация функции $F_2(t)$ справа (б). Распределение фаз, как и для первого гравиметра, практически равномерное.

Основные параметры аппроксимации аргументов функций $F_p(t)$, полученные для гравиметров ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6, приведены соответственно в таблицах 5 и 6.

Таблица 5

Основные параметры аппроксимации, использованные для аппроксимации аргументов функций $F_p(t)$, – гравиметр ГНУ-КВ

Function	F_{res}	Ph_0	RelErr(%)	K	a	b
$F_0(t)$	1078,131	0,1041	0,183	400	0,38594	0,61406
$F_1(t)$	950,547	0,1038	0,176	400	0,0021	0,55684
$F_2(t)$	944,062	0,5810	0,114	400	0,4955	0,4955

Основные параметры аппроксимации, использованные для аппроксимации аргументов функций $Fp(t)$, – гравиметр CG-6

Function	F_{res}	Ph_0	RelErr(%)	K	a	b
$F_0(t)$	1075,869	0,035	0,315	400	0,1266	0,70176
$F_1(t)$	1006,841	0,95054	0,364	400	0,0112	0,6938
$F_2(t)$	762,871	0,9103	0,241	400	0,4840	0,5161

5.4. Результаты

В результате проведенных исследований впервые предложен новый оригинальный подход к построению математической модели временного поведения системы флуктуаций гравиинерциальных измерений, основанный на простом и универсальном преобразовании исходного сигнала, позволяющий преобразовать его в другой цифровой сигнал, имеющий строгую периодичность равную 2π , используя при этом разложении модифицированное Фурье-преобразование, которое справедливо для любого сигнала, в котором промоделированы частота и фаза, что может успешно применяться при решении задачи разложения любой случайной функции.

Такой подход значительно приближает нас к пониманию построения математической модели временного поведения системы флуктуаций вариации гравиинерциальных измерений для изучаемого региона, а также позволит выяснить, какие физические процессы продуцируют зарегистрированный данный временной ряд, учитывающий влияние случайных «гостевых» процессов не до конца изученной природы, порожденных внешними случайными факторами. Это позволяет количественно охарактеризовать изменение системы со временем, понять происходящие в ней процессы и, в конечном итоге, построить близкую к идеальной ее теоретической модели.

Глава 6. Гравиметрический мониторинг для параметризации процессов техногенной деформации земной коры при разработке месторождений с использованием взрывных технологий (на примере Курской магнитной аномалии)

6.1. Постановка задачи

Оценка и прогнозирование геомеханического состояния скальных и полускальных породных массивов является одной из ключевых задач инженерной геологии и горного дела. Актуальность этой проблемы многократно возрастает в районах с интенсивной техногенной нагрузкой, к которым, безусловно, относится регион Курской магнитной аномалии (КМА) – крупнейшего в мире железорудного бассейна [28]. Эксплуатация гигантских месторождений, таких как Лебединский карьер, сопряжена с масштабными горными работами, включая проведение массовых взрывов, которые создают значительные динамические нагрузки на докембрийский кристаллический фундамент [12]. Подобные воздействия могут провоцировать развитие опасных геодинамических процессов, включая горные удары, обрушения бортов карьеров и индуцированную сейсмичность, что представляет серьезную угрозу для безопасности персонала и эффективности горных работ. В связи с этим разработка методов предиктивного мониторинга, способных выявлять и картировать зоны потенциальной нестабильности, является первостепенной задачей [30].

6.2. Ограничения методов оценки геомеханического состояния

Традиционные методы геомеханической оценки, такие как инженерно-геологическое бурение, лабораторные испытания керна и стандартные геофизические исследования, предоставляют ценную информацию, но зачастую характеризуются существенными ограничениями. Они, как правило, дают осредненные, статические характеристики массива и не позволяют выявить локальные зоны концентрации напряжений, повышенной трещиноватости или скрытой тектонической активности, которые и определяют риски устойчивости. Более того, эти методы не способны в полной мере охарактеризовать

динамическую реакцию массива на внешние воздействия, которая является ключевым показателем его текущего напряженно-деформированного состояния. Таким образом, существует разрыв между статическим описанием свойств пород и необходимостью понимания их динамического поведения в реальных условиях эксплуатации месторождений.

6.3. Концептуальная основа метода: параметризация динамического отклика гравиметрического сигнала

В настоящей работе предлагается и апробируется инновационный подход к детальной оценке динамических свойств геологической среды, который призван восполнить указанный пробел. Центральная гипотеза исследования заключается в том, что высокоточный кварцевый гравиметр ГНУ-КВ, традиционно используемый для измерения статических аномалий гравиинерциальных измерений, может быть перепрофилирован в качестве высокочувствительного датчика для регистрации низкочастотных микросейсмических колебаний грунта [5, 6]. Данный подход основан на принципе эквивалентности, согласно которому чувствительная астазированная маятниковая система прибора, разработанная для реакции на мельчайшие изменения гравиинерциальных измерений, с такой же высокой точностью реагирует на инерционные ускорения, вызванные движением грунта.

Теоретической основой исследования является концепция параметризации вариаций гравиинерциальных измерений, подробно изложенная в работе «Параметризация вариаций гравиинерциальных измерений на основе использования НОКФАСС-метода» (Нигматуллин и др.), а также фундаментальная работа по гравиметрии Торге [45]. Суть подхода заключается не в простом наблюдении геофизических явлений, а в их параметризации – извлечении из данных наблюдений максимального набора наиболее существенных параметров, которые количественно характеризуют отклик изучаемой системы на внешнее воздействие. Анализ отклика геологической среды на контролируемое возмущение (взрыв малой мощности) позволяет получить уникальную информацию о ее способности передавать, рассеивать и поглощать упругую энергию. Эти параметры напрямую связаны с такими фундаментальными геомеханическими свойствами,

как жесткость, трещиноватость, флюидонасыщенность и внутреннее трение массива [34]. Переход от статической характеристики («из чего состоит порода?») к динамическому зондированию («как порода ведет себя под нагрузкой?») является ключевым для перехода от описательной геологии к предиктивной геомеханике.

6.4. Цели и задачи практического исследования

Основной целью исследования является установление и интерпретация корреляционных связей между параметрами динамического отклика гравиметрического сигнала и конкретными геологическими объектами (литологическими разностями, тектоническими нарушениями), выделенными на крупномасштабной геологической карте (рисунок 53).

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Экспериментально валидировать набор статистических и фрактальных параметров (энергия, импульсивность, сложность, «память» системы) в качестве диагностических индикаторов геомеханического состояния докембрийских кристаллических пород.

2. Установить эмпирические корреляционные связи между характерными «сигнатурами» данных параметров и конкретными геологическими объектами (литологическими разностями, стратиграфическими контактами, зонами тектонических нарушений), выделенными на исследуемом участке КМА.

3. Продемонстрировать, что данный микромеханический анализ предоставляет прямое физическое объяснение макромасштабным сейсмическим и гидрогеологическим аномалиям, наблюдаемым при промышленных взрывах в том же регионе, как это задокументировано в работе Горбуновой и др. [12].

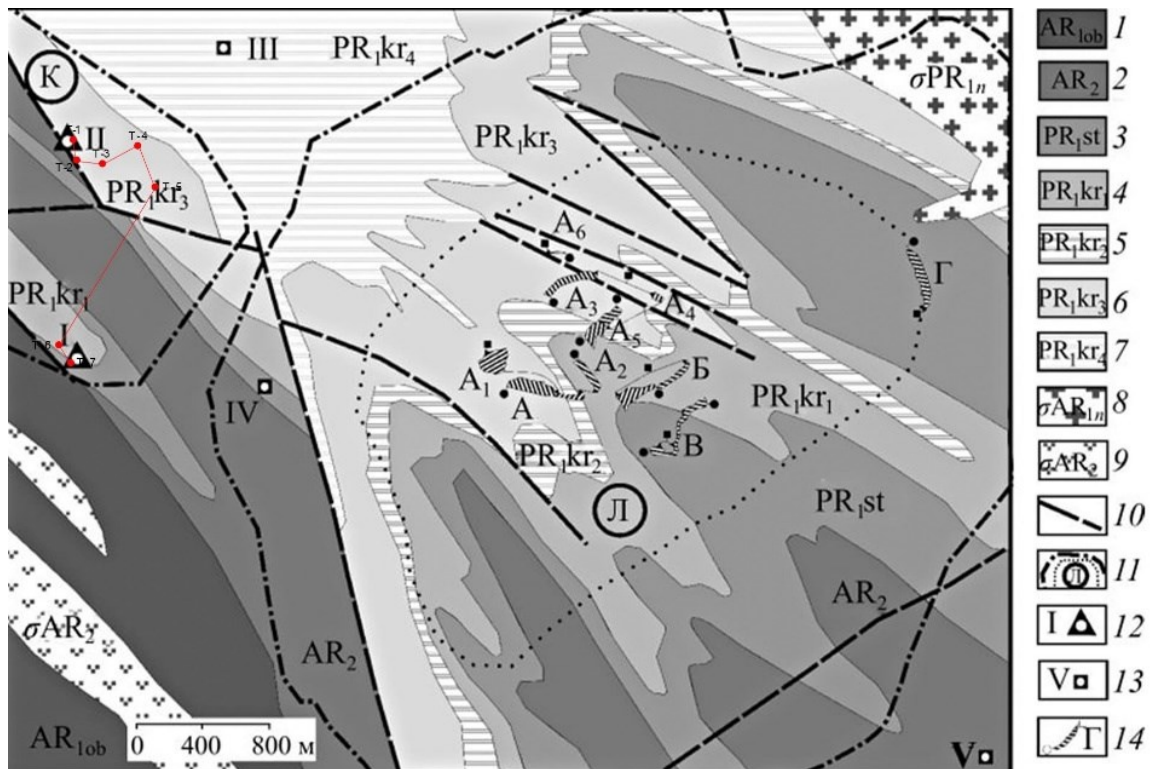


Рисунок 53. Профиль на тектонической схеме участка работ: Т1-Т7 – точки пунктов измерений на профиле; 1 – отложения обоянской серии нижнего архея (плагииграниты, гнейсы); 2 – отложения михайловской серии верхнего архея (амфиболиты, актинолиты); 3-7 – отложения курской серии нижнего протерозоя: 3 – отложения 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

6.5. Геолого-структурная характеристика района исследований

Исследуемый участок расположен в пределах Воронежской антеклизы – крупной положительной структуры Восточно-Европейской платформы, вмещающей уникальные по запасам месторождения железистых кварцитов КМА

[12]. Геологический разрез представлен сложнодислоцированными и метаморфизованными породами кристаллического фундамента архейского (AR) и нижнепротерозойского (PR1) возраста.

Основной структурой, которую пересекает измерительный профиль, является сложная, вероятно, опрокинутая синклинальная складка. В ее крыльях обнажаются более древние архейские породы (AR2), а ядро сложено более молодыми нижнепротерозойскими отложениями курской серии (PR1st, PR1kr). Территория расчленена системой разрывных нарушений. Наиболее значимый из них имеет северо-западное простирание и пересекается профилем в непосредственной близости от точки наблюдения Т-4, представляя собой важнейшую зону механической ослабленности массива.

6.5.1. Стратиграфия, литология и механические контрасты

Геологическое строение участка предопределяет наличие резких контрастов физико-механических свойств пород, что является ключевым фактором, формирующим сложный геофизический отклик. Профилем наблюдений пересекаются ключевые подразделения курской серии, в основном коробковская свита (PR1kr), которая характеризуется ритмичным чередованием пачек с контрастными механическими свойствами.

– Железистые кварциты (подсвиты PR1kr1, PR1kr3): чрезвычайно плотные, жесткие и хрупкие силикатно-магнетитовые и гематит-магнетитовые кварциты. В условиях интенсивных тектонических деформаций эти породы испытывали хрупкое разрушение с образованием густой сети трещин. Предполагается, что они действуют как эффективные проводники упругой энергии.

– Сланцевые пачки (подсвиты PR1kr2, PR1kr4): относительно пластичные, менее плотные и податливые кварц-биотитовые и гранат-биотитовые сланцы. Эти слои деформировались преимущественно пластически и, как ожидается, выступают в роли демпферов, поглощающих и рассеивающих сейсмическую энергию.

– Контакты и зоны ослабления: контакты между этими литологически различными пачками являются поверхностями механического ослабления, вдоль которых могли концентрироваться напряжения и развиваться сдвиговые деформации.

Таким образом, геологическая среда представляет собой заранее подготовленную «геомеханическую лабораторию». Интенсивная тектоническая история создала структуру (таблица 7), в которой высококомпетентные «балки» (кварциты) чередуются с мягкими «демпферами» (сланцами) и пересекаются уже существующими «зонами разрушения» (разломами). Эта унаследованная структурная неоднородность является главным фактором, контролирующим распространение сейсмической энергии от современных взрывов.

Таблица 7

Стратиграфические подразделения и их предполагаемые геомеханические свойства на исследуемом участке

Условное обозначение	Геологический возраст	Подразделение	Литологическая характеристика	Предполагаемые геомеханические свойства
AR2	Архей	Обоянская серия (нерасчлененная)	Комплекс метаморфических пород (гнейсы, амфиболиты, кристаллические сланцы)	Высокая жесткость, но гетерогенность
PR1st	Нижний протерозой	Стойленская свита	Метапесчаники, гравелиты, филлитоподобные сланцы	Умеренная жесткость, анизотропия
PR1kr1	Нижний протерозой	Коробковская свита, подсвита 1	Силикатно-магнетитовые и магнетитовые кварциты	Очень высокая плотность и жесткость, хрупкое поведение
PR1kr2	Нижний протерозой	Коробковская свита, подсвита 2	Кварц-биотитовые, часто углистые сланцы	Относительно низкая плотность, пластичное/диссипативное поведение
PR1kr3	Нижний протерозой	Коробковская свита, подсвита 3	Гематит-магнетитовые, магнетитовые и карбонат-магнетитовые кварциты	Высокая плотность и жесткость, хрупкое поведение
PR1kr4	Нижний протерозой	Коробковская свита, подсвита 4	Гранат-биотитовые и мусковит-биотитовые сланцы	Низкая жесткость, пластичное/диссипативное поведение

6.6. Аппаратурно-методический комплекс

6.6.1. Принцип динамического гравиинерциального измерения

В основе метода лежит нестандартное применение кварцевого гравиметра ГНУ-КВ. Вместо измерения статических значений, прибор используется в режиме регистрации свободных колебаний его чувствительного элемента – астазированного кварцевого маятника [5]. Выбор данного прибора обоснован его высокой чувствительностью к малейшим вертикальным ускорениям (порог чувствительности порядка 0,006 мГал), портативностью и надежностью в полевых условиях. В отличие от стационарных и абсолютных гравиметров, ГНУ-КВ позволяет проводить экспрессные измерения и обеспечивает запись непрерывного временного ряда, что критически важно для мониторинга динамических процессов.

Полевые работы проводились вдоль заранее спланированного профиля из 7 пунктов наблюдения (Т-1 – Т-7), заложенного перпендикулярно простиранию ключевых геологических структур, описанных в разделе выше. На каждом пункте выполнялось два идентичных по длительности цикла измерений (5 минут, частота дискретизации 5 замеров в секунду):

1. Пассивная регистрация: запись естественного микросейсмического фона.
2. Активная регистрация: запись отклика геологической среды на инициирующее воздействие – взрывной источник малой мощности, расположенный на удалении от профиля.

6.6.2. Методы параметризации геомеханического отклика

Для количественной оценки изменений в характере колебаний был применен комплекс статистических и фрактальных метрик, позволяющих охарактеризовать различные аспекты динамического отклика геологической среды.

– Энергетический отклик (среднеквадратичное значение, RMS): интегральная мера полной энергии сигнала, рассчитываемая по формуле:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}. \text{ Изменение RMS после воздействия характеризует способность}$$

среды передавать (рост RMS) или поглощать и рассеивать (падение RMS) упругую энергию.

– Импульсный отклик (эксцесс): мера «островершинности» распределения амплитуд сигнала, рассчитываемая по формуле Фишера: $g_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3$. Высокие положительные значения эксцесса являются ключевым индикатором хрупких микромеханических процессов. Они указывают на наличие в сигнале редких, но мощных импульсных всплесков, которые интерпретируются как акустические эмиссии, генерируемые при микротрещинообразовании, росте трещин и схлопывании пор. Резкий рост эксцесса свидетельствует о том, что порода «трещит».

– Сложность системы (энтропия Шеннона): мера информационной неопределенности или хаотичности сигнала, рассчитываемая как $H(X) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i)$, где $p(x_i)$ вероятность появления значения амплитуды. Увеличение энтропии свидетельствует о переходе системы в более сложное, неупорядоченное состояние, что физически интерпретируется как результат многократного рассеяния и переотражения упругой энергии на структурных неоднородностях массива.

– Память и стабильность системы (показатель Хёрста, H): показатель, оценивающий наличие «долгой памяти» и фрактальный характер временного ряда. Он характеризует степень персистентности (трендовости) или антиперсистентности (возврата к среднему) процесса [36, 42].

6.6.3. Расчет показателя Хёрста

Шаг 1: Подготовка ряда и создание профиля

1. Среднее значение ряда (x_{avg}): $x_{avg} = \left(\frac{1}{N}\right) * \text{sum}(x_i \text{ for } i = 1 \text{ to } N)$
2. Создание профиля $Y(k) = \text{sum}(x_i - x_{avg} \text{ for } i = 1 \text{ to } k)$

Шаг 2: Сегментация и удаление локального тренда

Для каждого сегмента j подбирается своя аппроксимирующая прямая $Y_{fit_{j(i)}}$:

$$Y_{fit_{j(i)}} = a_j * i + b_j$$

Шаг 3: Вычисление флуктуации $F(n)$

1. Среднеквадратичное отклонение для одного сегмента j (локальная флуктуация):

$$F_{j(n)} = \text{sqrt} \left(\left(\frac{1}{n} \right) * \text{sum} \left(\left(Y_{j(i)} - Y_{fit_{j(i)}} \right)^2 \text{ for } i = 1 \text{ to } n \right) \right)$$

2. Итоговая флуктуация $F(n)$ для масштаба n :

$$F(n) = \left(\frac{1}{N_s} \right) * \text{sum} \left(F_{j(n)} \text{ for } j = 1 \text{ to } N_s \right)$$

Где $N_s = \text{floor} \left(\frac{N}{n} \right)$ – количество полных сегментов.

Шаг 4: Определение показателя Хёрста H

1. Логарифмирование степенного закона: $\log(F(n)) = H * \log(n) + C$

2. Показатель Хёрста H находится как угловой коэффициент (тангенс угла наклона) прямой, аппроксимирующей точки $(\log(n), \log(F(n)))$.

$0 < H < 0,5$: антиперсистентный процесс. Система стабильна, обладает отрицательной обратной связью и стремится вернуться к среднему значению.

$H \approx 0,5$: случайный процесс (броуновское движение), где будущее не зависит от прошлого.

$0,5 < H < 1,0$: персистентный процесс. Система нестабильна, обладает положительной обратной связью (тренд, скорее всего, продолжится).

Переход показателя Хёрста через критическое значение $0,5$ является мощным индикатором фундаментальной смены динамического режима системы.

6.7. Картирование геомеханического отклика массива

Результаты статистической обработки временных рядов, полученных на всех 7 пунктах профиля, демонстрируют значительные и систематические вариации отклика геологической среды на инициирующее воздействие. На основе расчетов (таблица 8) выявлена четкая дифференциация отклика массива вдоль профиля, что позволяет судить о скрытых плотностных и структурных неоднородностях среды (латеральная изменчивость).

Таблица 8

Сводные результаты изменения динамических параметров сигнала вдоль профиля (на основе уточненных расчетов)

Точка	Геологическая позиция	Параметр	Значение «До»	Значение «После»	Изменение (%)	Возможная физическая интерпретация
T-1	PR _{1kr1} (монокристаллические кварциты)	RMS	227,27	258,36	+13,7	Эффективная передача упругой энергии (упругий отклик)
		Энтропия	3,738	3,879	+3,8	Незначительный рост хаотичности
		Хёрст	0,331	0,327	-1,4	Сохранение стабильной структуры сигнала
T-2	Контакт PR _{1kr1} / PR _{1kr3}	RMS	240,63	229,02	-4,8	Частичная диссипация энергии на контакте
		Экссесс	0,595	0,057	-90,4	Сглаживание импульсов («размазывание» сигнала)
		Хёрст	0,359	0,342	-4,7	Стабильный режим
T-3	PR _{1kr3} (железистые кварциты)	RMS	243,86	244,16	+0,1	Без изменений по энергии
		Энтропия	3,280	3,664	+11,7	Рост структурной сложности (дезорганизация)
T-4	Зона разлома в PR _{1kr3}	RMS	267,07	229,55	-14,0	Активное поглощение энергии рыхлой зоной
		Экссесс	0,350	0,233	-33,2	Отсутствие хрупкого треска, пластическая деформация
		Хёрст	0,336	0,397	+18,0	Смена тренда, уплотнение структуры отклика

Точка	Геологическая позиция	Параметр	Значение «До»	Значение «После»	Изменение (%)	Возможная физическая интерпретация
Т-5	PR _{1kr2} (сланцевая пачка)	RMS	265,62	244,10	-8,1	Диссипация в пластичных сланцах
		Энтропия	3,886	3,777	-2,8	Стабильная структура
Т-6	Контакт PR _{1kr2} / PR _{1kr3}	RMS	256,16	217,90	-14,9	Сильное затухание волны
		Центроид	0,225	0,188	-16,5	«Красное смещение» (уход в НЧ область)
		Хёрст	0,407	0,497	+22,2	Фазовый переход: от антиперсистентности к стохастике
Т-7	PR _{1kr1} (железистые кварциты)	RMS	225,72	225,79	0,0	Полное восстановление или отсутствие влияния

Зона 1. Упругий отклик компетентных блоков (Т-1, Т-7) (рисунок 54). В пунктах наблюдения, пространственно приуроченных к монолитным железистым кварцитам, массивом демонстрируется поведение, характерное для классической упругой среды.

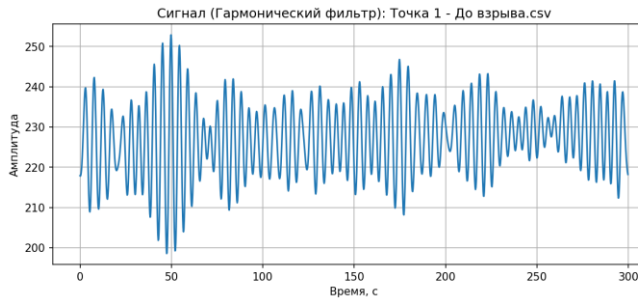
– В точке Т-1 зафиксировано возрастание энергетических параметров сигнала (RMS +13,7%) при одновременном сохранении его структурной организации (вариация показателя Хёрста минимальна и составляет -1,4%). Указанный факт свидетельствует о функционировании плотных кварцитов в качестве волновода, осуществляющего эффективную трансмиссию энергии взрывного воздействия при отсутствии существенной диссипации либо пластических деформаций.

– В точке Т-7 наблюдается полная инвариантность сигнала (изменение RMS 0,0%), что указывает на высокую степень стабильности данного геологического блока.

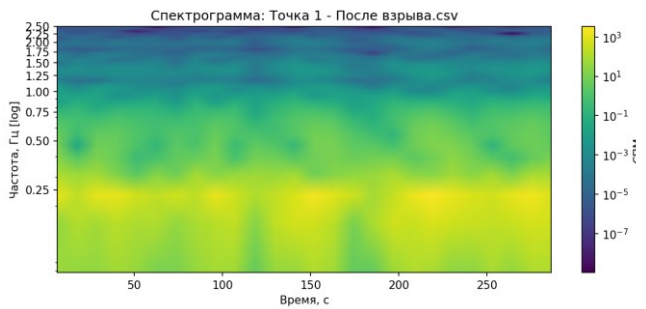
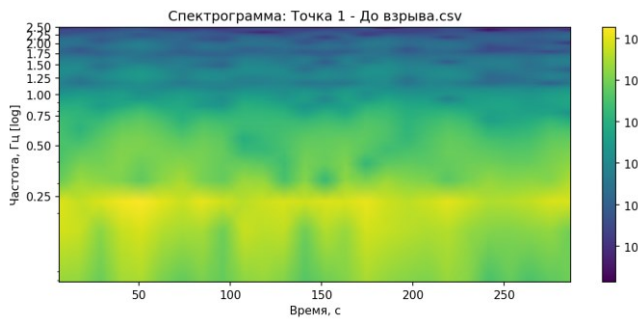
Состояние ДО
(Точка 1 – до взрыва)

Состояние ПОСЛЕ
(Точка 1 – после взрыва)

Временная область сигнала



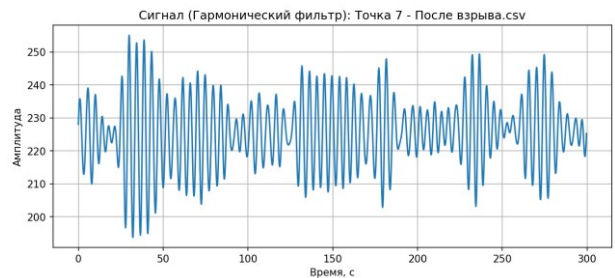
Частотно-временное распределение (спектрограмма)



Состояние ДО
(Точка 7 – до взрыва)

Состояние ПОСЛЕ
(Точка 7 – после взрыва)

Временная область сигнала



Частотно-временное распределение (спектрограмма)

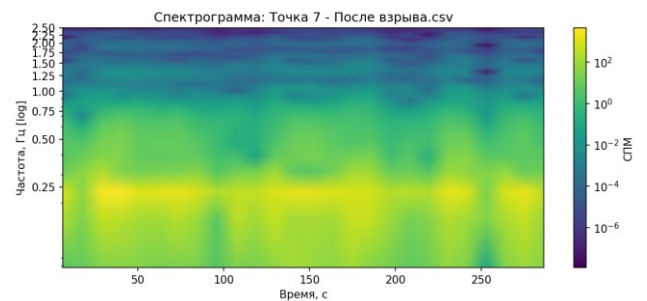
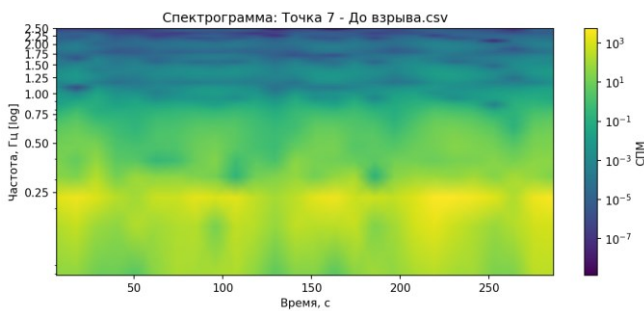


Рисунок 54. Временное и частотное представление замеров на точках профиля Т-1 и Т-7

Зона 2. Диссипативные неоднородности (Т-2, Т-5) (рисунок 55). Участки геологических контактов и сланцевых пачек проявляют свойства зон абсорбции энергии.

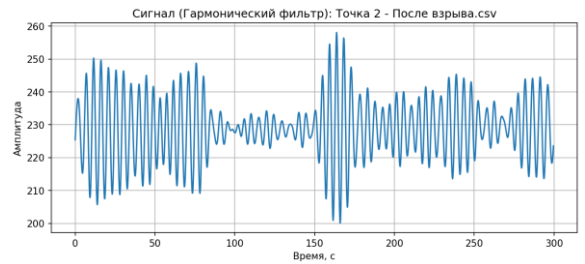
– В точке Т-2 (контакт подсвет) фиксируется падение энергетических показателей (RMS -4,8%) и, что является наиболее показательным, коллапс эксцесса (-90,4%). Это подразумевает, что среда в зоне контакта функционирует как фильтр низких частот, нивелируя острые амплитудные пики и трансформируя ударное воздействие в квазистационарный фон.

– В точке Т-5 (сланцы) также регистрируется потеря энергии (RMS -8,1%), что подтверждает демпфирующие характеристики пластичных пород.

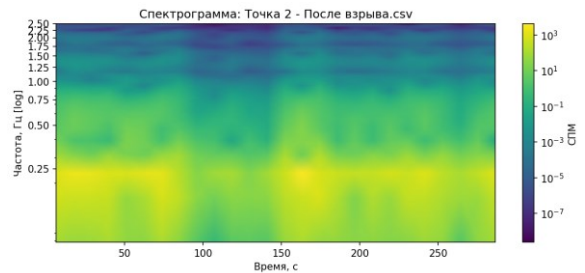
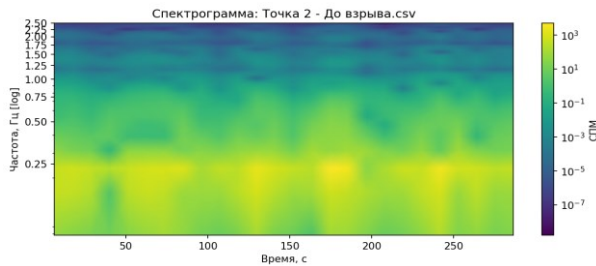
Состояние ДО
(Точка 2 – до взрыва)

Состояние ПОСЛЕ
(Точка 2 – после взрыва)

Временная область сигнала



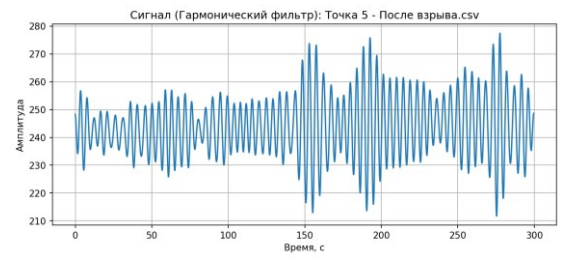
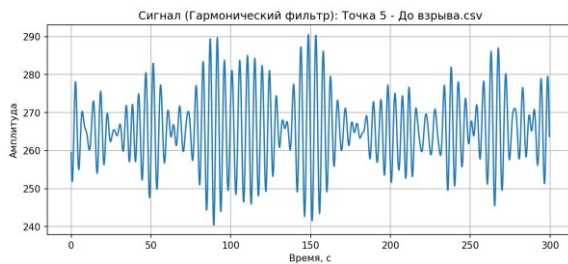
Частотно-временное распределение (спектрограмма)



Состояние ДО
(Точка 5 – до взрыва)

Состояние ПОСЛЕ
(Точка 5 – после взрыва)

Временная область сигнала



Частотно-временное распределение (спектрограмма)

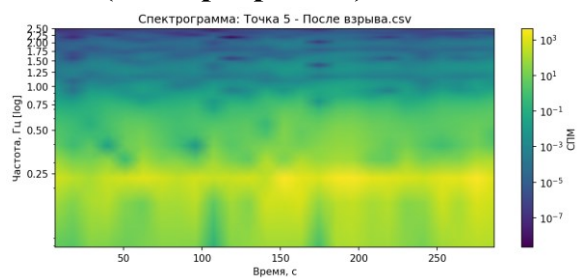
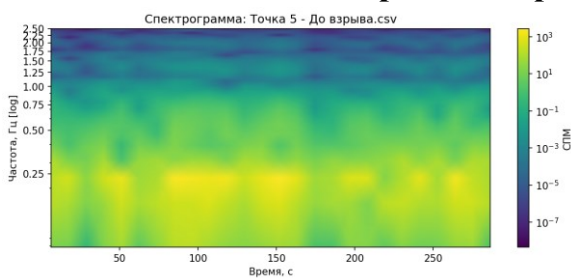


Рисунок 55. Временное и частотное представление замеров на точках профиля Т-2 и Т-5

Зона 3. Сигнатура зоны разуплотнения (разлом, Т-4) (рисунок 56). Отклик, регистрируемый в зоне тектонического нарушения (Т-4), кардинально отличается от реакции монолитных блоков. Наблюдаются следующие феномены:

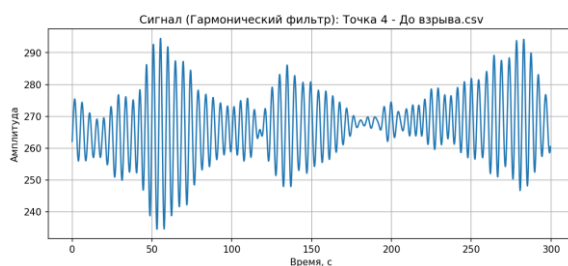
1. Максимальная абсорбция энергии (RMS -14,0%), сопоставимая исключительно с показателями критической зоны Т-6.

2. Отсутствие возрастания эксцесса, что свидетельствует об отсутствии генерации новых микротрещин в момент прохождения волны. Вышеизложенное позволяет интерпретировать зону разлома как область, характеризующуюся пониженной плотностью и высокой пористостью, заполненную дезинтегрированным материалом. Подобная среда функционирует как демпфер («подушка»), гасящий энергию за счет внутреннего трения частиц, а не посредством упругой деформации. Возрастание показателя Хёрста (+18%) указывает на уплотнение спектра реакций, вероятно, обусловленное закрытием (схлопыванием) части микропор.

Состояние ДО
(Точка 4 – до взрыва)

Состояние ПОСЛЕ
(Точка 4 – после взрыва)

Временная область сигнала



Частотно-временное распределение (спектрограмма)

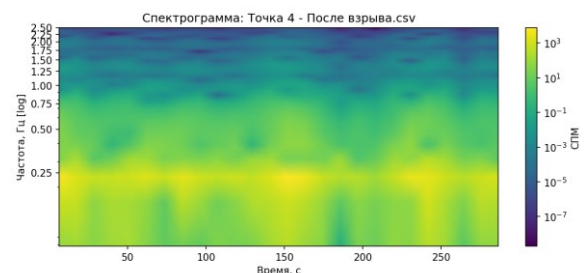
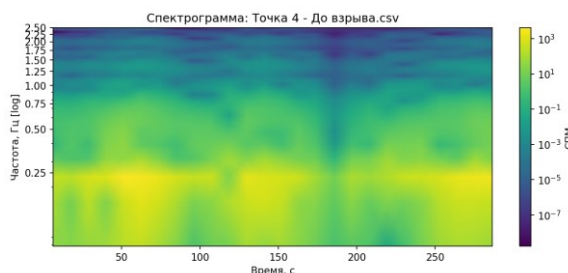


Рисунок 56. Временное и частотное представление замера на точке профиля Т-4

Зона 4. Идентификация фазового перехода в критическое состояние (Т-6) (рисунок 57). Результат наивысшей значимости получен в точке Т-6. В данной локации зафиксирован комплекс признаков, индицирующих неустойчивое состояние массива:

1. Спектральный анализ позволяет отметить смещение АЧХ в низкочастотную область на 16,5% (с 0,225 до 0,188 Гц). Данный феномен является физическим признаком снижения эффективной жесткости системы.

2. Значение показателя Хёрста возросло с 0,407 (антиперсистентный, устойчивый процесс) до 0,497 (стохастический процесс, «белый шум»). Это представляет собой фундаментальную трансформацию. Системой были утрачены внутренние связи, обеспечивающие возврат к равновесному состоянию (память ряда нивелирована, $H \approx 0,5$). Такой переход от детерминированного хаоса к полной стохастичности является надежным предвестником потери макроскопической устойчивости [53, 62, 72, 94]. Была выявлена скрытая аномалия – участок массива, находящийся в предельно напряженном состоянии, обнаружение которого посредством традиционных статических методов представлялось бы невозможным.

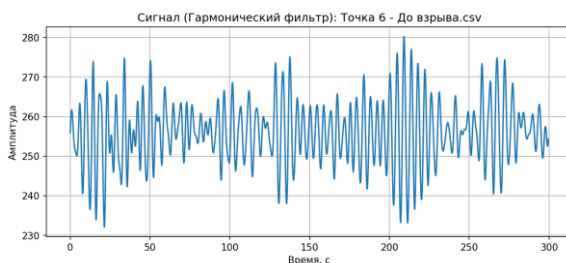
Состояние ДО

(Точка 6 – до взрыва)

Состояние ПОСЛЕ

(Точка 6 – после взрыва)

Временная область сигнала



Частотно-временное распределение (спектрограмма)

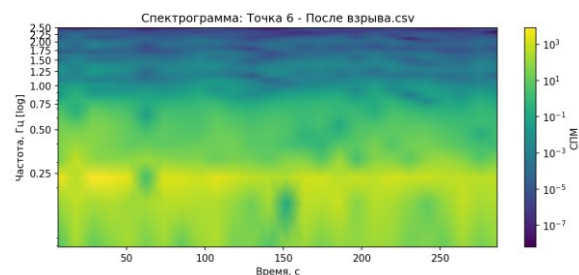
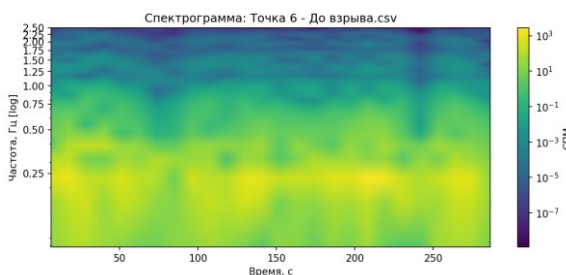


Рисунок 57. Временное и частотное представление замера на точке профиля Т-6

6.8. Результаты

Главным научным результатом является демонстрация возможности использования гравиметра ГНУ-КВ для прямого детектирования латеральных неоднородностей плотности и механических свойств без бурения.

Традиционная гравиразведка видит статическую аномалию плотности. Показанный динамический метод видит «механический импеданс» среды.

- Там, где массив плотный и упругий (Т-1), мы видим рост RMS (передача энергии).
- Там, где массив разуплотнен (разлом Т-4), мы видим резкое падение RMS (поглощение).
- Там, где структура массива нарушена до критического состояния (Т-6), мы видим сдвиг показателя Хёрста и АЧХ.

Таким образом, расчеты позволили разделить понятие «ослабленная зона» на два генетических типа:

1. Статическая зона разуплотнения (Т-4): работает как пассивный демпфер, поглощает энергию. Безопасна с точки зрения горных ударов, но опасна возможными просадками.
2. Динамически неустойчивая зона (Т-6): характеризуется потерей системной памяти (Хёрст \rightarrow 0,5) и снижением жесткости. Это потенциальный очаг техногенной сейсмичности.

6.8.1. Практическое значение для оценки геотехнических рисков

Полученные результаты имеют важное практическое значение, представляя собой новый неинвазивный инструмент для:

- Картирования зон с различным геомеханическим откликом при проектировании и эксплуатации объектов горной промышленности (карьеров, шахт) и гражданского строительства.
- Идентификации и мониторинга потенциально нестабильных участков в бортах карьеров и откосах. Отслеживание эволюции показателя Хёрста во времени может служить системой раннего предупреждения о приближении массива к

критическому состоянию (возможному началу процесса разрушения горного массива).

Понимание динамической реакции различных участков массива позволяет оптимизировать параметры взрывов для минимизации сейсмического воздействия на окружающую среду и повышения эффективности дробления.

6.8.2. Основные выводы

Проведенное исследование продемонстрировало высокую эффективность предложенного метода для детального картирования геомеханических свойств сложнопостроенных скальных массивов.

1. Нестандартное использование гравиметра ГНУ-КВ в качестве высокочувствительного датчика микросейсмических колебаний доказало свою состоятельность для экспресс-оценки геомеханического состояния породных массивов в полевых условиях.

2. Выявлены уникальные, физически обоснованные сочетания изменений статистических параметров сигнала (RMS, эксцесс, энтропия, показатель Хёрста), которые позволяют с высокой достоверностью идентифицировать и характеризовать различные по своим механическим свойствам геологические объекты: монолитные упругие блоки, диссипативные зоны, динамически активные тектонические разломы и участки в критическом напряженном состоянии.

3. Зона разрывного нарушения, пересеченная в районе пункта Т-4, однозначно идентифицируется как геомеханически ослабленный и динамически активный элемент массива. Участок в районе пункта Т-6 идентифицирован как находящийся в метастабильном, близком к критическому состоянию, что делает его наиболее вероятной зоной для инициирования разрушения при дальнейших техногенных нагрузках.

6.8.3. Направления дальнейших исследований и перспективы развития: от диагностики к прогнозированию

Несмотря на высокую эффективность предложенного метода в обнаружении аномалий, важно отметить его объективные ограничения. Во-первых, измерения

проводятся дискретно (в отдельных точках профиля), что затрудняет построение непрерывной объемной модели состояния массива без использования дополнительных математических методов интерполяции. Во-вторых, гравиметр ГНУ-КВ в силу своей конструкции регистрирует преимущественно низкочастотные колебания. Это означает, что высокочастотные сигналы, возникающие на начальных этапах образования микротрещин, могут остаться незамеченными. Поэтому для получения полной картины разрушения необходимо использовать данный метод в комплексе с высокочастотными сейсмоакустическими технологиями.

Если текущее исследование успешно решает задачу диагностики состояния массива, то конечной целью является прогноз. Сигналы, полученные в ходе эксперимента, особенно в зоне разлома (точка Т-4), имеют сложную и нестабильную природу. Это показывает, что простых статистических показателей недостаточно для построения надежных прогностических моделей. Для точного понимания того, как техногенная нагрузка влияет на среду, необходимо объединять данные гравиметрического, сейсмического и гидрогеологического мониторинга. Кроме того, в будущих исследованиях следует сосредоточиться на применении более совершенных методов моделирования, таких как процедура оптимального линейного сглаживания (ПОЛС) и неортогональный комбинированный Фурье анализ сглаженных сигналов (НОКФАСС) [35, 38, 83]. Эти методы специально разработаны для анализа сложных сигналов и могут стать основой для создания полноценной модели прогноза поведения массива при взрывных работах.

Заключение

Разработанный программно-аппаратный комплекс на базе модернизированного гравиметра ГНУ-КВ обеспечивает непрерывный высокоточный мониторинг гравиинерциальных измерений. В отличие от дорогостоящих зарубежных аналогов, данное решение является экономически эффективным инструментом 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).

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

В качестве основных рекомендаций и перспектив дальнейшей разработки темы целесообразно:

- Масштабирование сети наблюдений в сейсмически активных регионах для накопления статистики и расширения репрезентативности экспериментальных данных.
- Внедрение прямых цифровых датчиков положения индикатора гравиметра, развитие алгоритмов распознавания аномальных сигналов и интеграция гравиметрических данных с другими геофизическими методами для создания комплексной системы раннего выявления геодинамических изменений.

Применение для безопасности горных работ

Особую важность результаты приобретают в контексте мониторинга геодинамической безопасности. Установленная связь между фрактальными свойствами сигнала и состоянием массива горных пород позволяет рассматривать разработанную технологию как основу для создания будущих систем прогнозирования нештатных ситуаций в режиме реального времени (на пример, горных ударов). Непрерывный анализ спектральных и фрактальных метрик позволит фиксировать ранние стадии потери устойчивости массива еще до наступления критических сейсмических событий.

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 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 к моделированию вариаций 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 чёткая 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 вариаций 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.

Список литературы

1. Абрамов Д.В., Дорожков В.В., Конешов В.Н. Особенности построения и использования наземного сейсмогравиметрического комплекса // Сейсмические приборы. – 2010. Т. 46, № 4. – С. 5–13.
2. Абрамов Д.В., Дробышев М.Н., Конешов В.Н. Оценка влияния сейсмических и метеорологических факторов на точность измерений относительным гравиметром // Физика Земли. – 2013. – № 4. – С. 105–110.
3. Белов А.П., Ерохин А.М., Лобанов А.М., Мухаметзянов А.Р. Некоторые аспекты изучения низкочастотных колебаний гравиметра ГНУ-КВ для решения ряда геофизических задач // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 49-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. – Екатеринбург. – 2023. – С. 41–44.
4. Белов А.П., Ерохин А.М., Мухаметзянов А.Р. Оценка достоверности и статистической значимости результатов колебаний индикатора кварцевого гравиметра ГНУ-КВ // XVI Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле». Тезисы докладов. – М. – 2023. – Т. 5. – С. 249–252.
5. 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.
6. 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.

7. Бендат, Дж., Пирсол, А. Прикладной анализ случайных данных. Москва: Мир. – 1986.
8. Бережной Д.В., Бирляцев Е.В., Бирляцева Т.Е., Кипоть В.Л., Рыжов В.А., Тумаков Д.Н., Хромченков М.Г. Анализ спектральных характеристик микросейсм как метод изучения структуры геологической среды. Казань: КГУ. – 2008. – С. 360-386.
9. 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. – С. 249-252.
10. Буллен К.Е. Плотность Земли // Под ред. В.Н. Жаркова. Москва: Мир. – 1978. – С. 308-340.
11. Визильтер Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий. Физматкнига. – 2010.
12. Горбунова Э. М., Петухова С. М., Иванов А. Г. Сейсмический и гидрогеологический мониторинг параметров массового взрыва в Лебединском карьере Курской магнитной аномалии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 4. – С. 24–36. – DOI: 10.15372/FTPRP120230403.
13. Горитов А.Н. Предварительная обработка изображений в системах технического зрения. – 2018. – 53 с.
14. Гравиметр ГНУ-КВ // Геодезическое оборудование [Электронный ресурс]. – URL: <https://tigeo.ru/catalog/gravimetr-gnu-kv> (дата обращения: 18.03.2025).
15. Гравиметры наземные узкодиапазонные с кварцевой чувствительной системой класса В ГНУ-КВ // All-pribors.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/50841-12-gnu-kv?ysclid=mp1hd35q2k647235593> (дата обращения: 18.03.2025).
16. Долгаль А.С., Костицын В.И. Гравиразведка: способы учета влияния рельефа местности. Учебное пособие. Перм. гос. ун-т. Пермь. – 2010 – 88 с.

17. Дробышев М.Н., Конешов В.Н. Оценка предельной точности гравиметра CG-5 Autograv // Сейсмические приборы. – 2013. – Т. 49. – № 2. – С. 39–43.

18. Евдокимов Ю. К., Нигматуллин Р. Р., Денисов Е. С. Распределенные измерительные среды и системы. Фрактальная обработка сигналов // Фрактальная радиоэлектроника: в 2 томах / Гильмутдинов А. Х., Никитов С. А., Шахтурин Д. В., Ушаков П. А.; под редакцией доктора технических наук А. Х. Гильмутдинова – Москва: ФИЗМАТЛИТ. – 2024. 447 с.

19. Езекиэл, М. Методы анализа корреляций и регрессий линейных и криволинейных / М. Езекиэл, К.А. Фокс. – Пер. с англ. Л.С. Кучаева; ред.: Н.К. Дружинина. – Москва : Статистика. – 1966. – 558 с.

20. Ерохин А.М. Анализ естественных низкочастотных колебаний в диапазоне 0,05-2 Гц // материалы XI практического семинара ПАО «НК «Роснефть» по геологическому сопровождению бурения горизонтальных скважин, октябрь 2023 г.

21. Ерохин А.М. Анализ естественных низкочастотных колебаний грунтов периода 10-20 секунд для прикладных задач геологии // Тезисы доклада на VIII Международной научно-практической конференции «Геофизические исследования и работы в скважинах на нефть и газ – 2023», 19-25 августа 2023 г. Краснодарский край, Туапсинский р-н, с. Ольгинка.

22. 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. – М. – 2023. – Т. 1. – С. 217–220.

23. 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. – М. – 2023. – С. 87–91.

24. Зотов Л.В., Балакирева Е.Ю. Исследование вариаций коэффициента гравитационного поля J2 методом ССА // Труды 4-й тектонофизической конференции ИФЗ РАН. – 2016. – С. 495-501.

25. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. Требования к высокоточным сетям. Абсолютные измерения ускорения силы тяжести баллистическими гравиметрами, Москва: ЦНИИГАиК. – 2001 г.

26. Конешов В.Н., Дробышев Н.В., Сермягин Р.А., Разинькова Е.П. Результаты оценки абсолютных гравиметрических измерений на фундаментальном гравиметрическом пункте «Ледово» и гравиметрической сети России первого класса // Физика Земли. – 2023. – № 6. – С. 199–206. – DOI 10.31857/S0002333723060091.

27. Кузьмин, В.И., К89 Гравиметрия: учеб. пособие, Новосибирск: СГГА. – 2011. – 193 с.

28. Курская магнитная аномалия // Википедия: свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Курская_магнитная_аномалия (дата обращения: 08.10.2025).

29. Лобанов А.М. Гравиразведка (краткий курс), МГРИ – РГГРУ. – 2017. – 79 с.

30. 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 SINC VU.

31. Лобанов А.М., Каххоров У.Х., Гарбацевич В.А. Опыт регистрации инфранизкочастотных гравиинерциальных колебаний. Троицк, ИЗМИРАН 2012.

32. Лобанов А.М., Романов В.В. Перспективы гравиметрии при изучении динамически нестабильных природных объектов. // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 7. – С. 42-46.

33. Метод параметрической подгонки (MATLAB) // MathWorks [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/fit.html> (дата обращения: 20.12.2024).

34. Николаевский В.Н. Изменения сейсмических волн из-за присутствия газа в пластах. // Геофизика. – 2014. – №3. – С. 14-20.

35. 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. – г. Бишкек, 2024. – С. 222–224.

36. 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. – г. Бишкек. – 2024. – С. 225–227.

37. 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.

38. 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.

39. 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 OHOXJB.

40. Общее устройство гравиметра // Studfiles [Электронный ресурс]. – URL: <https://studfile.net/preview/7868284/page:3> (дата обращения: 18.03.2025).
41. Прошкина З.Н., Валитов М.Г., Колпащикова Т.Н., Наумов С.Б. Оценка влияния гидродинамики на приливные вариации силы тяжести в зоне перехода от континента к Японскому морю // Физика Земли. – 2021. – № 1. – С. 109–121.
42. Распределения показателя Херста нестационарного маркированного временного ряда / Д.С. Кириллов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2013. – № 11. – 16 с.
43. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений / Пер. с англ. А.Л. Петросяна и Н.И. Фроловой; под ред. Е.Ф. Саваренского. - Москва: Мир. – 1979. – 388 с.
44. Смит Д., Уильямс Д. Введение в цифровую точность: принципы и практика. – 77 с.
45. Торге В. Гравиметрия / В. Торге. – Пер. с англ.: Г.А. Шануров; ред.: А.П. Юзефович. – Москва: Мир, 1999. – 428 с.
46. Трофимов В.В., Макачук Т.А., Барабанова М.И. [и др.] Информационные системы и цифровые технологии. Практикум. Ч. 1 : учебное пособие. – М. : ИНФРА-М. – 2021. – 212 с. ISBN 978-5-16-109660-4.
47. Утемов Э.В. Курс лекций по гравиразведке : учебное пособие для дисциплины «Гравиразведка» (уровень бакалавриат) по направлению 05.03.01 Геология. – Казань : Казанский федеральный университет. – 2020. – 77 с.
48. Федер Е. Фракталы / пер. с англ. Ю. А. Данилова, А. Шукурова. – М. : Мир, 1991. – 260 с. : ил. – ISBN 5-03-001712-7.
49. Чечкин С.А. Основы геофизики. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – ISBN 5-286-00436-9.
50. Шубников В.Г., Беляев С.Ю. Подавление шума и оценка различий в изображениях: учеб. пособие. – СПб.: СпбГУ. – 2013. – 58 с.
51. Юзефович А.П., Огородова Л.В. Гравиметрия : учебник для вузов. – М.: Недра. – 1980. – 320 с.

52. Almeida L.B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 1994. – Vol. 42. – P. 3084–3091.
53. Arecchi F.T., Meucci R., Puccioni G., Tredicce J.R. Experimental evidence of subharmonic bifurcations, multistability, and turbulence in a Q-switched gas laser // *Physical Review Letters*. – 1982. – Vol. 49. – P. 1217–1220.
54. Barnes P.R., Van Dyke J.W. The effects of electromagnetic interference on electronic equipment // *Proceedings of the IEEE*. – 1993. – Vol. 81, No. 3. – P. 384–392.
55. Baum C.F. Tests for stationarity of a time series // *Stata Technical Bulletin*. – 2001. – Vol. 10, iss. 57. – URL: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:tsj:stbull:y:2001:v:10:i:57:sts15> (дата обращения: 26.11.2023).
56. Birkelo B., Duclos M., Artman B., Schechinger B., Witten B., Goertz A., Weemstra K., Hadidi M.T.A. A passive low-frequency seismic survey in Abu Dhabi // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2010.
57. Bhattacharyya A., Singh L., Pachori R.B. Fourier-Bessel series expansion based empirical wavelet transform for analysis of non-stationary signals // *Digital Signal Processing*. – 2018. – Vol. 78. – P. 185–196.
58. Bonvalot S. Mesures et traitement de gravimétrie terrestre. – École d'été du GRGS, 2010.
59. Bradski G., Kaehler A. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. – Sebastopol, CA : O'Reilly Media, 2008.
60. Carrion-i-Silvestre J.L., Sansó A. A guide to the computation of stationarity tests // *Empirical Economics*. – 2006. – Vol. 31, iss. 2. – P. 433–448. – DOI 10.1007/s00181-005-0023-8.
61. Chaudhary P.K., Gupta V., Pachori R.B. Fourier-Bessel representation for signal processing: A review // *Digital Signal Processing*. – 2023. – Vol. 135. – Art. 103938.

62. Chen J., Chau K., Chan C., Jiang Q. Subharmonics and chaos in switched reluctance motor drives // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2002. – Vol. 17. – P. 73–78.
63. Cohen L. *Time-Frequency Analysis*. – Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall PTR, 1995. – xv, 299 p. – ISBN 0135945321.
64. Cowles M., Davis C. On the origins of the .05 level of statistical significance // *American Psychologist*. – 1982. – Vol. 37. – No. 5. – P. 553–558. – DOI 10.1037/0003-066X.37.5.553.
65. De Souza U.B., Escola J.P.L., da Cunha Brito L. A survey on Hilbert-Huang transform: Evolution, challenges and solutions // *Digital Signal Processing*. – 2022. – Vol. 120. – Art. 103292.
66. Hlubina P., Luňáček J., Ciprian D., Chlebus R. Windowed Fourier transform applied in the wavelength domain to process spectral interference signals // *Optics Communications*. – 2008. – Vol. 281. – P. 2349–2354.
67. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.C., Tung C.C., Liu H.H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 1998. – Vol. 454. – P. 903–995.
68. Imanishi Y. Comment on “Incessant excitation of the Earth’s free oscillations” by Nawa et al. // *Earth, Planets and Space*. – 1998. – Vol. 50, No. 10. – P. 883–885.
69. Kemaq Q. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis // *Applied Optics*. – 2004. – Vol. 43. – P. 2695–2702.
70. Kosicka E., Kozłowski E. The use of stationary tests for analysis of monitored residual processes // *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*. – 2015. – Vol. 17. No. 4. – P. 604–609. – DOI 10.17531/ein.2015.4.17.
71. Kumar A. Wavelet signal processing: A review for recent applications // *International Journal of Engineering and Techniques*. – 2020. – Vol. 6. – P. 1–7.
72. Lauterborn W., Cramer E. Subharmonic route to chaos observed in acoustics // *Physical Review Letters*. – 1981. – Vol. 47. – P. 1445.

73. Li M., Liu Y., Zhi S., Wang T., Chu F. Short-time Fourier transform using odd symmetric window function // *Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics*. – 2022. – Vol. 1. – P. 37–45.
74. Lima L.R., Neri B. A test for strict stationarity // *Uncertainty Analysis in Econometrics with Applications* / ed. by V.-N. Huynh, V. Kreinovich, S. Sriboonchitta, K. Suriya. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2013. – P. 17–30.
75. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. 3rd ed. – Burlington, MA : Academic Press, 1999.
76. Mertins A. *Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications*. – Chichester : Wiley, 1999.
77. Müller J., Naeimi M., Gitlein O., Timmen L., Denker H. A land uplift model in Fennoscandia combining GRACE and absolute gravimetry data // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. – 2012. – Vols. 53–54. – P. 54–60. – DOI 10.1016/j.pce.2010.12.006.
78. Nigmatullin R.R., Alexandrov V.S., Agarwal P., Jain S., Ozdemir N. Description of multi-periodic signals generated by complex systems: NOCFASS – new possibilities of the Fourier analysis // *Numerical Algebra, Control and Optimization*. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – DOI 10.3934/naco.2022008.
79. Nigmatullin R.R., Osokin S.I., Baleanu D., Al-Amri S., Azam A., Memic A. The first observation of memory effects in the infrared (FT-IR) measurements: Do successive measurements remember each other? // *PLoS ONE*. – 2014. – Vol. 9, No. 4. – Art. e94305.
80. Nigmatullin R.R., Litvinov A.A., Osokin S.I. Quasi-Reproducible Experiments: Universal Fitting Function for Quantitative Description of Complex Systems Data // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2024. – Vol. 45, No. 8. – P. 3956–3971.
81. Nigmatullin R.R. Recognition of nonextensive statistic distribution by the eigen-coordinates method // *Physica A*. – 2000. – Vol. 285. – P. 547–565.
82. Nigmatullin R.R., Rybin A.K., Nepeina K.S., Kaznacheev P.A. NOCFASS: Quantitative description of the seismic noise-like signals in the earthquake-prone areas //

Measurement. – 2021. – Vol. 185. – Art. 110020.
– DOI 10.1016/j.measurement.2021.110020.

83. Okubo S. Advances in gravity analyses for studying volcanoes and earthquakes // Proceedings of the Japan Academy, Series B, Physical and Biological Sciences. – 2020. – Vol. 96, No. 2. – P. 50–69. – DOI 10.2183/pjab.96.005. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7030974/> (accessed: 31.01.2025).

84. Peng, Z.K.; Peter, W.T.; Chu, F.L. A comparison study of improved Hilbert–Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing. *Mech. Syst. Signal Process.* 2005, No. 19, pp. 974–988.

85. Peter G., Moose R.E., Wessells C.W. The National Geodetic Survey absolute gravity program // NOAA Technical Report NOS 130 NGS 43. – Rockville, MD : National Geodetic Survey, 1989.

86. Portnoff M. Time-frequency representation of digital signals and systems based on short-time Fourier analysis // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing.* – 1980. – Vol. 28. – P. 55–69.

87. Qian S., Chen D. Discrete Gabor transform // *IEEE Transactions on Signal Processing.* – 1993. – Vol. 41. – P. 2429–2438.

88. Qian S., Chen D. Joint time-frequency analysis // *IEEE Signal Processing Magazine.* – 1999. – Vol. 16. – P. 52–67.

89. Saadat R., Sotanpour A. Atmospheric pressure effect on gravity data for Tehran's base station // *EGU General Assembly.* – 2008.

90. Sejdić E., Djurović I., Stanković L. Fractional Fourier transform as a signal processing tool: An overview of recent developments // *Signal Processing.* – 2011. – Vol. 91. – P. 1351–1369.

91. Su X., Tao R., Kang X. Analysis and comparison of discrete fractional Fourier transforms // *Signal Processing.* – 2019. – Vol. 160. – P. 284–298.

92. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications.* – London : Springer, 2010.

93. Vallée M., Ampuero J.P., Juhel K., Bernard P., Montagner J.-P., Barsuglia M. Observations and modeling of the elastogravity signals preceding direct seismic waves // *Science*. – 2017. – Vol. 358, No. 6367. – P. 1164–1168. – DOI 10.1126/science.aao0746.
94. Wilden I., Herzel H., Peters G., Tembrock G. Subharmonics, biphonation, and deterministic chaos in mammal vocalization // *Bioacoustics*. – 1998. – Vol. 9. – P. 171–196.
95. Wu Z., Huang N.E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method // *Advances in Adaptive Data Analysis*. – 2009. – Vol. 1. – P. 1–41.
96. Yan R., Gao R.X., Chen X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications // *Signal Processing*. – 2014. – Vol. 96. – P. 1–15.
97. Yao J., Krolak P., Steele C. The generalized Gabor transform // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 1995. – Vol. 4. – P. 978–988.
98. Zayed A.I. Hilbert transform associated with the fractional Fourier transform // *IEEE Signal Processing Letters*. – 1998. – Vol. 5. – P. 206–208.
99. Zhao Z., Tao R., Li G., Wang Y. Clustered fractional Gabor transform // *Signal Processing*. – 2020. – Vol. 166. – Art. 107240.
100. Zhou Z., Shan X.M., Zhang L., Fu R.S., Liang H., Quan H. The gravity tide of Kunming and Xiaguan based on the HHT // *Chinese Journal of Geophysics*. – 2008. – Vol. 51, No. 3. – P. 836–844.

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 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. Спасибо вам за терпение и знания, которыми вы щедро делились на протяжении всего пути.

Отдельное спасибо хочу сказать моему коллеге и товарищу А.Р. Мухаметзянову за плодотворное сотрудничество, совместный научный поиск и надежное плечо в решении сложных задач.

Также выражаю благодарность сотрудникам ИФЗ РАН М.Н. Дробышеву и В.Н. Конешову за неоценимую помощь в организации экспериментальных работ и предоставление возможности проведения исследований на базе фундаментального гравиметрического пункта «Ледово».