

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	19
1.1. Природа временных вариаций гравиинерциальных измерений: приливные колебания, сезонные и атмосферные эффекты, сейсмические и вулканические влияния	19
1.1.1. Приливные колебания	19
1.1.2. Сезонные и атмосферные эффекты.....	20
1.1.3. Сейсмические влияния на гравитационное поле.....	21
1.1.4. Вулканические влияния на гравитационное поле	22
1.1.5. Микросейсмы и длиннопериодные компоненты.....	22
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.....	24
1.2.1. Значение длиннопериодных компонентов для прогноза сейсмических событий.....	27
1.2.2. Необходимость регистрации инфранизкочастотных колебаний.....	28
1.2.3. Трудности разделения гравитационных и инерционных эффектов	28
1.3. Современные подходы к оцифровке и анализу данных	29
1.3.1. Оцифровка аналоговых измерений.....	29
1.3.2. Анализ гравиметрических данных.....	30
1.4. Обзор современного оборудования гравиметрических исследований	32
1.4.1. Гравиметры и их типы	32
1.4.2. Гравиметр для съемки CG-6 Autograv™	34

1.4.3. Гравиметр Burris Gravity Meter™	36
1.4.4. Гравиметр LaCoste Romberg (принцип нулевой длины пружины и системы обратной связи)	38
1.4.5. Гравиметр ГНШ-МА	41
1.4.6. Гравиметры GT-2A, GT-2A/1	43
1.4.7. Гравиметрический комплекс морской набортный ГМН-КМ.....	47
1.4.8. Гравиметр наземный с кварцевой чувствительной системой и компьютерным управлением ГНУ-КВК.....	49
1.4.9. Гравиметр наземный кварцевый ГНУ-КВ	50
1.5. Обоснование выбора гравиметра ГНУ-КВ	51
Глава 2. Аппаратура и методика эксперимента.....	53
2.1. Описание гравиметра ГНУ-КВ и его модернизация.....	53
2.2. Модернизация прибора	56
2.3. Система сбора данных и оцифровка сигнала.....	59
2.4. Алгоритм распознавания видеоизображения	61
2.5. Предварительная подготовка и обработка инструментальных данных	63
Глава 3. Современные методы параметризации вариаций гравиинерциальных измерений	68
3.1. Спектральный анализ вариаций гравиинерциальных измерений.....	69
3.2. Применение метода НОКФАСС для обработки и анализа вариаций гравиинерциальных измерений.....	72
3.3. Расчет показателя Хёрста (R/S-анализ)	75
Глава 4. Феноменологический метод моделирования и анализа вариаций гравиинерциальных измерений.....	80
4.1. Постановка задачи	80
4.2. Фундаментальный гравиметрический пункт «Ледово».....	82

4.3. Используемые приборы в процессе эксперимента.....	82
4.4. Процедура измерений	83
4.5. Спектральный анализ	86
4.6. Обобщенные корреляционные методы	88
4.7. Критерии выбора модели аппроксимации	90
4.8. Рассмотренные модели аппроксимации и графическое представление результатов.....	92
4.8.1. Полиномиальная модель 2-й степени	93
4.8.2. Полиномиальная модель 3-й степени	93
4.8.3. Полиномиальная модель 4-й степени	94
4.8.4. Модели на основе разложения Фурье	95
4.8.5. Экспоненциальные модели.....	97
4.9. Анализ рассмотренных моделей	98
4.9.1. Полиномиальные аппроксимации.....	99
4.9.2. Фурье-аппроксимации.....	99
4.9.3. Экспоненциальные аппроксимации.....	99
4.10. Метод ПОЛС	102
4.11. Результаты.....	107
Глава 5. Применение модифицированного преобразования Фурье для моделирования вариаций гравиинерциальных измерений.....	108
5.1. Постановка задачи	109
5.2. Описание гравиметрических данных	110
5.3. Алгоритм обработки данных	111
5.4. Результаты	122
Заключение.....	123

Список литературы.....	126
Благодарности.....	137

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 разработки комплекса методов параметризации и алгоритмов автоматизированной оцифровки связана с задачами непрерывной регистрации, обработки и моделирования вариаций гравиинерциальных измерений при геофизическом мониторинге.

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 подтверждены 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 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 могут быть 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.

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, 5 глав, заключения и списка литературы из 100 наименований. Работа изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка и 6 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. В заглавии опубликованной версии: «модификационного».

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; опубл. 20.01.2023. – 400 МБ; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50134398>.

2. А. с. № 2023611110 Российская Федерация. Система управления «Автоплан» (СУ «Автоплан») [Текст] / **А. М. Ерохин (RU)**, Н. С. Цындра (RU), К. В. Венедиктов (RU), А. Е. Раков (RU), Н. С. Самохвалов (RU); Общество с ограниченной ответственностью «Петровайзер Софт» (RU). – Заявка № 2022682466; зарегистрир. 22.11.2022; опубл. 17.01.2023. – 200 МБ; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50133973>.

3. А. с. № 2024619583 Российская Федерация. Цифровая платформа «Эволюция» (ЦП «Эволюция») [Текст] / Т. Н. Нестерова (RU), А. А. Макаров (RU), Д. Ю. Сапрыкин (RU), Д. А. Кудрявцев (RU), А. В. Пономарев (RU), П. В. Семенов (RU), **А. М. Ерохин (RU)** [и др.]; Общество с ограниченной ответственностью «Петровайзер Софт» (RU). – Заявка № 2024617764; зарегистрир. 11.04.2024; 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. В работе Прошкиной и соавторов для выделенных приливных волн рассчитаны амплитудные и фазовые параметры, а также погрешности их оценки [41]. 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). 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.

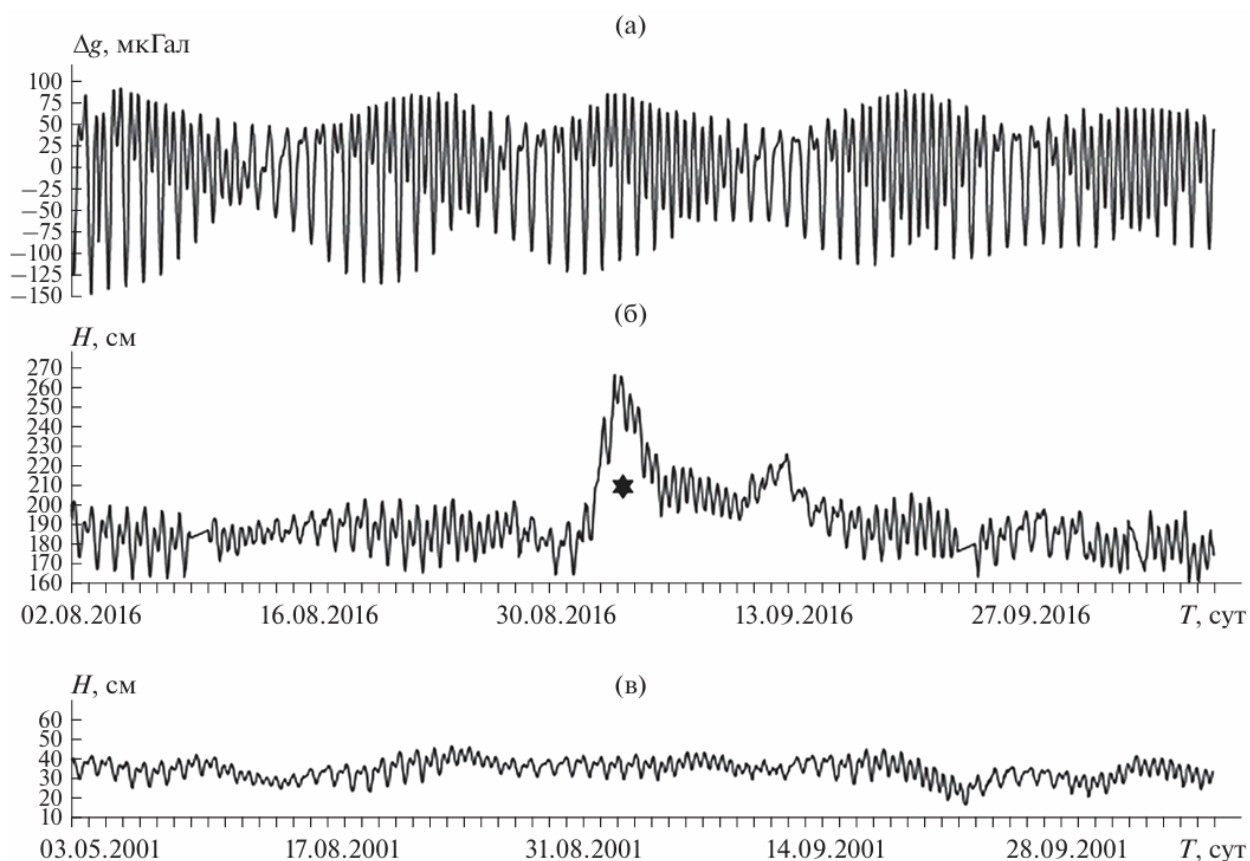


Рисунок 1. Фрагменты записи приливных вариаций силы тяжести (а), уровнемерных наблюдений в порту Посыет (б) и в бухте Витязь (в). Звёздочкой отмечен эффект прохождения тайфуна Лайнрок [41]

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. В отчёте Национальной геодезической службы США приведена оценка, согласно которой изменения влажности приповерхностного слоя, особенно после длительных дождей или засух, могут вызывать изменения силы тяжести до 12 мкГал по абсолютной величине [85, с. 5]. 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].

Интерпретация слабых спектральных пиков в гравиметрических записях требует сопоставления данных разных станций и проверки возможных локальных помех. В комментарии Иманиши [68] рассмотрены ограничения интерпретации спектров, представленных Nawa и соавторами, и поставлено под сомнение отнесение ряда пиков к свободным колебаниям Земли. Сравнение спектров на рисунке 2 иллюстрирует необходимость такой проверки.

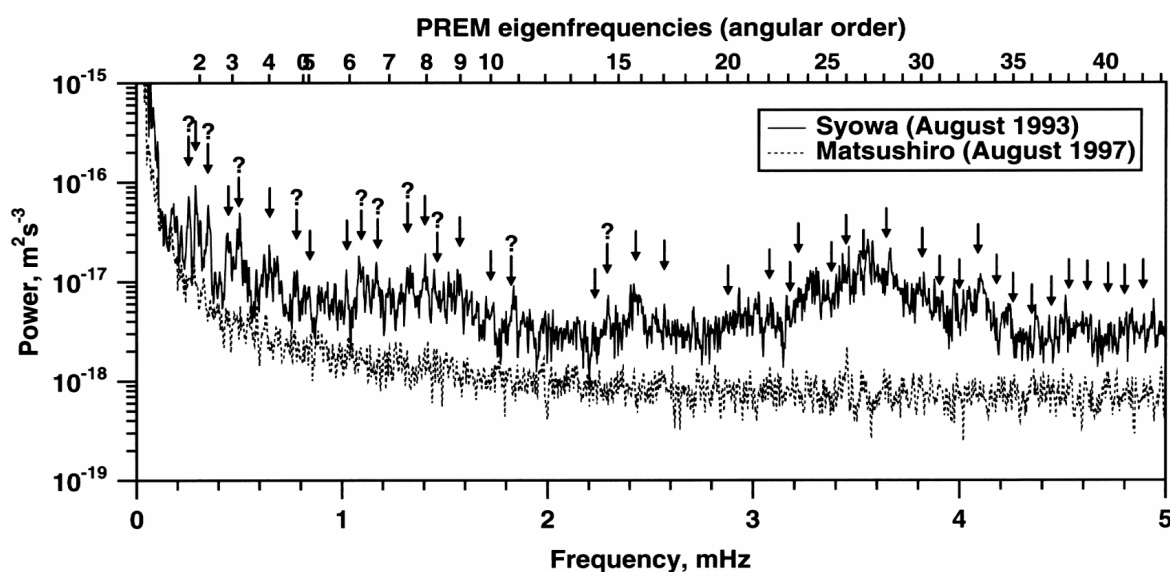


Рисунок 2. Усредненные спектры для сверхпроводящих гравиметров на двух станциях, Syowa (сплошная линия) и Matsushiro (пунктирная линия). Стрелки указывают на местоположение частот, измеренных Nawa et al. (1998). Знаки «?» указывают на частоты, которые не были идентифицированы как фундаментальные сфероидальные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

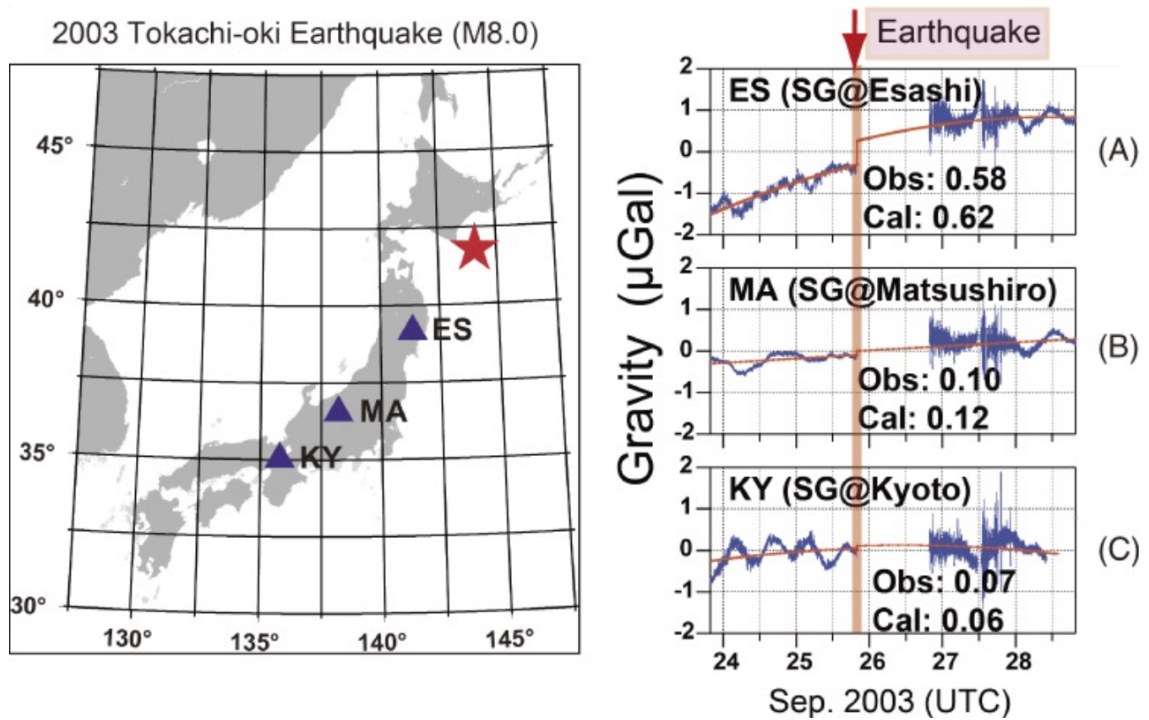


Рисунок 3. Региональные изменения гравитации, зафиксированные массивом сверхточных гравиметров (SGs) (перерисовка оригинальных данных из статьи Imanishi et al. (2004)). Единицы измерения – микрогалл (μGal).

(Слева) Эпицентр (красная звезда) землетрясения Токати-оки 2003 года и расположение станций SG (треугольники): ES – Эсаси, MA – Мацусиро, KY – Киото. (Справа) Данные о гравитации (синие линии), зафиксированные SG в связи с землетрясением Токати-оки в 2003 году. Единицы – μGal . (A) Эсаси, (B) Мацусиро, (C) 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].

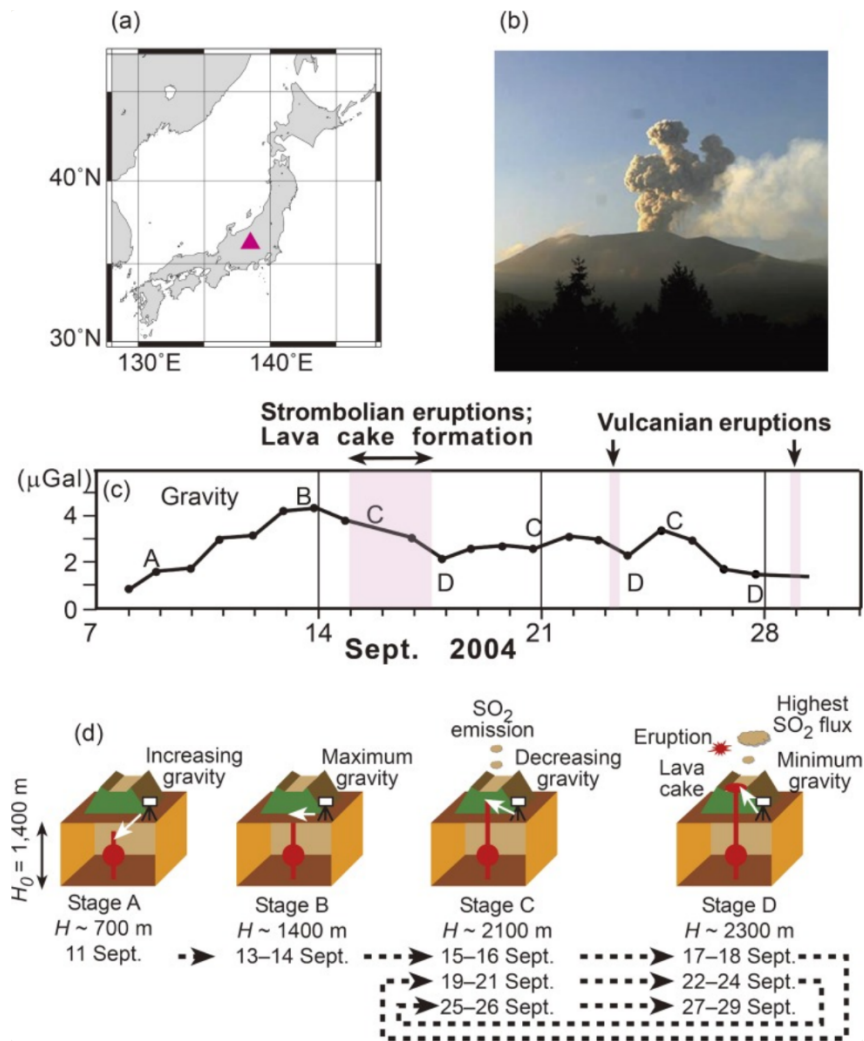


Рисунок 4. (a) Местоположение наблюдаемого вулкана (пурпурный треугольник) на карте Японии. (b) Фотография извержения вулкана. (c) Изменения силы тяжести (в μGal) в сентябре 2004 года. Стрелками обозначены фазы вулканической активности: Strombolian eruptions и lava cake formation – стромболианские извержения и формирование лавовой «шапки», Vulcanian eruptions – вулканские извержения. (d) Стадии магматических процессов под вулканом: Стадия А (11 сентября): рост силы тяжести. Глубина магмы: ~ 700 м. Стадия В (13-14 сентября): максимальная сила тяжести. Глубина: ~ 1400 м. Стадия С (15-16, 19-21, 25-26 сентября): эмиссия SO_2 , снижение силы тяжести. Глубина: ~ 2100 м. Стадия D (17-18, 22-24, 27-29 сентября): извержение, формирование лавовой шапки, максимальный поток SO_2 . Минимальное значение силы тяжести. Глубина: ~ 2300 м. Обозначения: $H_0 = 1400$ м – 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 силы тяжести 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 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 микросейсмы, 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 сопровождают 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 зеркальца и визирного устройства). Для долговременного мониторинга критически важно перевести такие аналоговые наблюдения в цифровую форму. В совместных работах автора с коллегами [21, 22, 30] описан подход, включающий видеозапись положения индикатора гравиметра и последующее программное

определение его координаты на кадрах. 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: при предварительной обработке гравиметрических записей рассчитывают приливную составляющую и получают остаточный ряд. Такие операции поддерживает программа Tsoft, разработанная в Королевской обсерватории Бельгии¹. Влияние атмосферного давления учитывают отдельно [89].

¹ Van Camp M., Vauterin P. Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides // Computers & Geosciences. — 2005. — Vol. 31, no. 5. — P. 631–640. — DOI 10.1016/j.cageo.2004.11.015.

– Спектральный анализ: для выявления присутствующих периодических компонентов строятся спектры и периодограммы (например, с помощью БПФ). Для оценки спектральной плотности мощности применяется также метод Уэлча, основанный на усреднении модифицированных периодограмм отдельных сегментов записи [94].

– Временнó-частотные методы: для анализа сигналов с изменяющимися характеристиками используются оконные и другие локальные частотно-временные представления, включая преобразования Габора [63, 66, 69, 73, 86, 87, 88, 97]. Вейвлет-методы и их приложения рассмотрены в [71, 75, 84, 96]. Эмпирическое модовое разложение и преобразование Гильберта–Хуана представлены в [65, 67, 95]; пример их применения к приливным гравиметрическим данным приведен в [100].

– 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. Для анализа флуктуаций с удалением тренда (DFA) влияние разрывов записи, выбросов и неоднородности сегментов на оценку масштабных характеристик исследовано в [62].

– Машинное обучение: примером применения нейросетевых методов к слабым геофизическим сигналам является работа А. Licciardi и соавторов. Предложенная ими модель глубокого обучения PEGSNet использует эластогравитационные сигналы, зарегистрированные широкополосными

сейсмометрами, для оценки местоположения и отслеживания изменения магнитуды уже начавшегося крупного землетрясения до прихода Р-волн².

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 продвинутое 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

Способы гравиметрических наблюдений различают по определяемой величине: при абсолютных измерениях находят значение ускорения силы тяжести, при относительных — его приращение относительно исходного пункта [47, с. 27–28].

При интерпретации гравиметрических данных отдельно рассматривается влияние рельефа местности. Способы его учета изложены А.С. Долгалем и В.И. Костицыным [16]. Этот вопрос следует отличать от рассматриваемой далее параметризации временных вариаций измерений.

Относительные измерения силы тяжести

Для относительных наблюдений используют, в частности, пружинные гравиметры. Отклик чувствительной системы выражается в смещении груза или в величине воздействия, необходимого для восстановления исходного положения.

² Licciardi A., Bletery Q., Rouet-Leduc B., Ampuero J.-P., Juhel K. Instantaneous tracking of earthquake growth with elastogravity signals // *Nature*. — 2022. — Vol. 606. — P. 319–324. — DOI 10.1038/s41586-022-04672-7.

Приращение силы тяжести определяют по отсчётам с учётом калибровки прибора [47, с. 35–39].

Исторические измерения и современная точность

Маятниковые измерения основаны на связи периода колебаний с ускорением силы тяжести. В баллистическом методе регистрируют перемещение свободно падающего тела и соответствующие интервалы времени. Повышение точности требует многократных наблюдений и обработки их результатов [47, с. 28–34].

Принципы действия гравиметров

В статических гравиметрах сила тяжести уравнивается другой силой. Упругие системы различаются характером движения чувствительного элемента: поступательным перемещением груза либо поворотом рычага маятника. Для их изготовления применяют, в частности, кварц и металл [47, с. 35–37].

Различия гравиметров

Чувствительность зависит от устройства упругой системы. При астазировании геометрия подвеса способствует увеличению отклонения маятника в ответ на малое изменение силы тяжести. Этот принцип показан на рисунке 5 [47, с. 37–38].

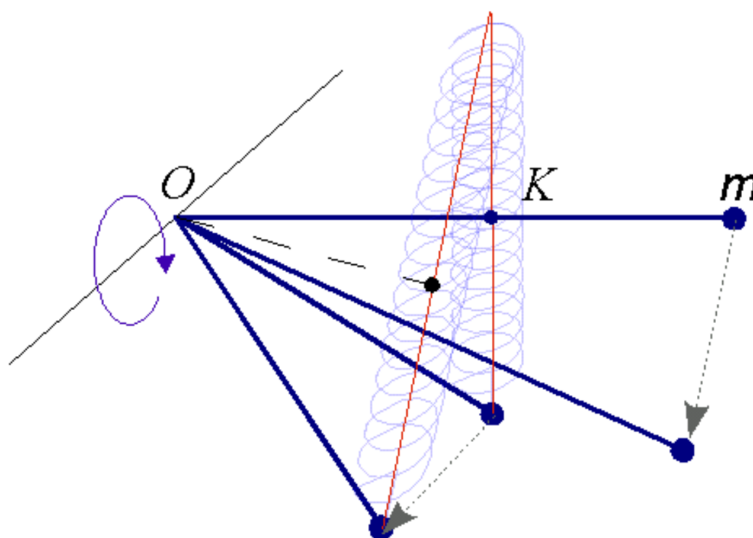


Рисунок 5. Принцип астазирования чувствительной системы гравиметра.

Источник: Э.В. Утемов [47, с. 38, рис. 12]

1.4.2. Гравиметр для съемки SCINTREX CG-6 Autograv™

Далее описание прибора, его основных характеристик и областей применения приведено по техническому буклету производителя Scintrex «CG-6 Autograv Survey Gravity Meter»³. 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™⁴

³ Scintrex. CG-6 Autograv Survey Gravity Meter: технический буклет [Электронный ресурс]. URL: https://scintrexltd.com/wp-content/uploads/2026/09/CG-6-Brochure_R6.pdf (дата обращения: 21.09.2026).

⁴ <https://scintrexltd.com/product/cg-6-autograv-gravity-meter/>

Особенности системы

Согласно указанному техническому буклету Scintrex, CG-6 допускает работу при температуре от -40 до $+45$ °C. Корпус защищён от пыли и воды. Для полевых измерений предусмотрены сокращённое время установления отсчёта, работа без арретирования датчика и электронное сопровождение установки по уровню.

Результаты и команды отображаются на наклонном экране с подсветкой. Прибор оснащён GPS-приёмником, связью Bluetooth и памятью 4 ГБ. Две сменяемые без отключения питания батареи обеспечивают до 24 часов работы при 25 °C.

Для кварцевого датчика заявлены повторяемость 5 мкГал, дрейф без коррекции менее 200 мкГал/сутки и остаточный дрейф менее 20 мкГал/сутки. Типичный скачок отсчёта после ударного воздействия до 20 g составляет менее 5 мкГал. При обработке учитываются приливы, наклон, дрейф и 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, алмазоносными 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™

Приведённые ниже сведения о конструкции гравиметра Burris, дрейфе его чувствительной системы и электронных уровнях изложены по работе G. Jentzsch, описывающей исполнение прибора с системой UltraGrav.⁵

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)

⁵ Jentzsch G. The automated Burris gravity meter — a new instrument using an old principle // Proceedings of the Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements, St. Petersburg, Russia, 20–23 August 2007. — 2008. — P. 21–28.

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

Перечень областей применения приведён по материалам производителя ZLS Corporation.⁶

- 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.

⁶ ZLS Corporation. Burris Gravity Meter [Электронный песцупс]. URL: <https://www.zlscorp.com/burris-gravity-meter> (дата обращения: 21.09.2026).

- 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)

История развития и характеристики систем обратной связи гравиметров LaCoste & Romberg и Burris рассматриваются по работе G. Jentzsch⁷. 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

⁷ Jentzsch G. The automated Burris gravity meter — a new instrument using an old principle // Proceedings of the Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements, St. Petersburg, Russia, 20–23 August 2007. — 2008. — P. 21–28.

системой электростатической обратной связи типа КСВ, разработанной в Ганноверском университете, что привело к преобразованию множества гравиметров.

Период интегрирования 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.

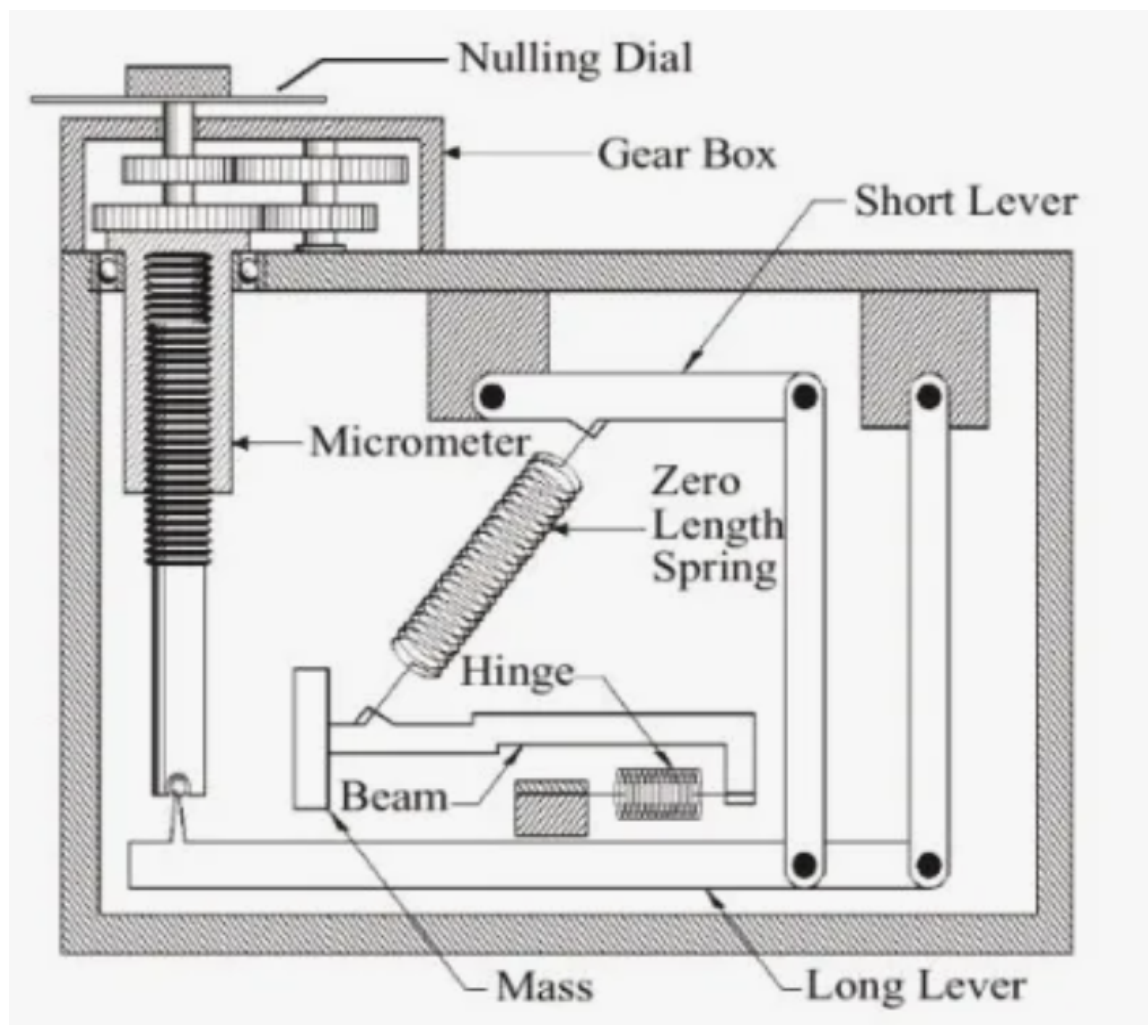


Рисунок 7. Схема механизма гравиметра LaCoste & Romberg с пружиной нулевой длины. Источник: руководство по гравиметрам моделей G и D, редакция 03.2001.⁸

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

⁸ <https://pe2bz.philpem.me.uk/Detect-Sense/-%20Gravity/Site-001-Manual/G&D-MeterManual/gdmanual.pdf>

Система обратной связи гравиметра Burris (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™ Источник фотографии: ZLS Corporation, страница Burris Gravity Meter⁹

⁹ <https://www.zlscorp.com/>

1.4.5. Гравиметр ГНШ-МА

Описание гравиметра ГНШ-МА, его областей применения, эксплуатационных особенностей и технических характеристик приведено по материалам каталога GeoGet¹⁰.

Внешний вид гравиметра ГНШ-МА приведен на рисунке 9.

Области применения

В каталоге GeoGet к направлениям применения ГНШ-МА отнесены поисково-разведочные и картировочные работы, инженерные обследования и региональные гравиметрические исследования. В перечень также включены вулканологические, сейсмологические и метеорологические наблюдения.



Рисунок 9. Гравиметр ГНШ-МА. Источник изображения: технический буклет «Гравиметр ГНШ-МА», размещённый на сайте GeoGet, л. 1.¹¹

Общие сведения

При относительных гравиметрических наблюдениях сопоставляют отсчёты, полученные на исходном и исследуемом пунктах. Реакцию упругой системы

¹⁰ Гравиметр ГНШ-МА // GeoGet [Электронный ресурс]. URL: <https://geoget.ru/content/view/208/441/> (дата обращения: 21.09.2026).

¹¹ <https://geoget.ru/images/stories/GNH-MA-00.jpg>

переводят в приращение силы тяжести с использованием калибровочного коэффициента [47, с. 35–39].

По каталожному описанию GeoGet, в ГНШ-МА (рисунок 9) применяется датчик с металлической пружиной, а регистрация и обработка измерительной информации выполняются электронными средствами. Характеристики этой модели приведены ниже отдельно от общих принципов относительных измерений.

Достоинства

По данным каталога GeoGet, управление ГНШ-МА и запись результатов выполняются электронными средствами. Информация выводится на ЖК-индикатор либо дополнительный графический экран; предусмотрено дистанционное управление по Wi-Fi. Датчик, органы управления, питание и GPS-приёмник объединены в переносной комплект.

Чувствительный элемент размещён в термостате. В каталоге указан рабочий интервал температур от -40 до $+45$ °C, а влияние атмосферного давления и магнитного поля характеризуется соответствующими коэффициентами. При обработке вводятся поправки, связанные с наклоном прибора, приливами и температурой.

Воздействие ударов и вибраций уменьшается средствами цифровой фильтрации. Программная коррекция долговременных изменений отсчёта обеспечивает заявленный в каталоге остаточный дрейф менее 0,02 мГал/сутки.

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 /°C (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

Сведения о назначении, принципе действия, составе и технических характеристиках гравиметров GT-2A и GT-2A/1 приведены по описанию типа средств измерений, регистрационный номер 57554-14.

Назначение средства измерений

При съёмке с движущегося носителя — самолёта или морского судна — эти гравиметры определяют разность значений ускорения свободного падения. Назначение моделей GT-2A и GT-2A/1 приведено в описании типа № 57554-14.

Описание средства измерений

Датчик GT-2A/GT-2A/1 содержит пробную массу на плоских пружинах в постоянном магнитном поле. Оптический узел со светодиодами и фотодиодами определяет её положение. Через усилитель сигнал поступает в измерительную обмотку; мерой разности ускорений служит напряжение на последовательно включённом прецизионном резисторе. После преобразования в цифровой код оно передаётся в компьютер.

Чувствительный элемент размещён в центральном приборе ГИ-1 (ГИ-1/1) на платформе трёхосной гировертикали с интегральной коррекцией. Стабилизация при маневрировании носителя использует GPS-информацию. Комплект включает также поворотный стол СНД-1 с амортизатором, ПУИ-1 для управления, индикации и накопления данных и блок питания ЭП-5.

В ПУИ-1 используется промышленный компьютер: Intel Atom 1,6 ГГц, оперативная память 1 ГБ и накопитель 160 ГБ; обмен данными выполняется через RS-232. ЭП-5 обеспечивает подключение к источникам постоянного или переменного тока.

Авиационное исполнение GT-2A предусматривает получение результата после обработки координат носителя. Морское исполнение GT-2A/1 выдаёт результаты в реальном времени.

На рисунках 10–12 показаны основные блоки комплекса: центральный прибор ГИ-1 (ГИ-1/1), модуль управления и индикации ПУИ-1 и источник питания ЭП-5.



Рисунок 10. Внешний вид центрального прибора ГИ-1 (ГИ-1/1). Источник: описание типа гравиметров GT-2А, GT-2А/1 № 57554-14, рис. 1а, л. 2.



Рисунок 11. Внешний вид прибора управления и индикации ПУИ-1. Источник: описание типа гравиметров GT-2А, GT-2А/1 № 57554-14, рис. 1б, л. 3.



Рисунок 12. Внешний вид прибора питания ЭП-5. Источник: описание типа гравиметров GT-2A, GT-2A/1 № 57554-14, рис. 1в, л. 3.

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

Источник: описание типа гравиметров GT-2A, GT-2A/1 № 57554-14, табл. 2, л. 5–6.

1.4.7. Гравиметрический комплекс морской набортный ГМН-КМ

Назначение и технические характеристики комплекса приведены по техническому листу «Гравиметрический комплекс морской набортный ГМН-КМ», опубликованному GeoGet¹².

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

¹² Гравиметрический комплекс морской набортный ГМН-КМ: технический лист // GeoGet [Электронный ресурс]. URL: <https://geoget.ru/images/stories/GMN-KM.pdf> (дата обращения: 21.09.2026).

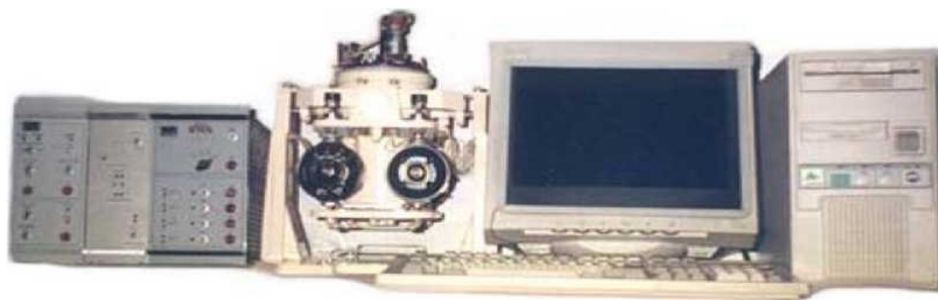


Рисунок 13. Гравиметрический комплекс морской набортный ГМН-КМ.
Источник изображения: технический лист «Гравиметрический комплекс морской набортный ГМН-КМ», размещённый на сайте GeoGet.¹³

Назначение

По техническому листу GeoGet, ГМН-КМ предназначен для набортных гравиметрических наблюдений в океане, на морском шельфе и в прибрежно-лиманных районах. Комплекс предусматривает автоматизированную регистрацию, отображение данных и получение результатов во время измерений.

Технические характеристики

- Диапазон измерения поля силы тяжести: 7000 мГал;
- Смещение нуля-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 морей и в прибрежно-лиманных зонах при предельных вертикальных возмущающих ускорениях до 25 Гал: 0,10–0,20 мГал.

¹³ <https://geoget.ru/images/stories/GMN-KM.jpg>

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

Описание назначения, чувствительной системы и технических характеристик прибора приведено по техническому листу «Гравиметр наземный с кварцевой чувствительной системой и компьютерным управлением ГНУ-КВК», опубликованному GeoGet¹⁴.

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. Источник изображения: технический лист «Гравиметр ГНУ-КВК», размещённый на сайте GeoGet.¹⁵

Назначение

По техническому листу GeoGet, ГНУ-КВК рассчитан на гравиметрическую съёмку масштабов 1:50 000–1:100 000 и крупнее, а также на наблюдения за геологической средой, сейсмоопасными зонами и инженерными объектами. Кварцевая чувствительная система снабжена электрической индикацией, позволяющей контролировать положение маятника, остаточный наклон и температуру.

¹⁴ Гравиметр наземный с кварцевой чувствительной системой и компьютерным управлением ГНУ-КВК: технический лист // GeoGet [Электронный ресурс]. URL: <https://geoget.ru/images/stories/GNU-KVK.pdf> (дата обращения: 21.09.2026).

¹⁵ Гравиметр наземный с кварцевой чувствительной системой и компьютерным управлением ГНУ-КВК: технический лист // GeoGet [Электронный ресурс]. URL: <https://geoget.ru/images/stories/GNU-KVK.pdf> (дата обращения: 21.09.2026). https://geoget.ru/images/stories/GMN_KM.jpg

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

Сведения о назначении прибора и приведённые ниже технические характеристики изложены по каталожному описанию ГНУ-КВ, опубликованному GeoGet¹⁶.

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. Источник изображения: описание типа ГНУ-КВ № 50841-12 [15, рис. 1, л. 2].

Назначение

По каталожному описанию GeoGet, ГНУ-КВ применяют при создании опорных гравиметрических сетей и выполнении региональных съёмок. Прибор рассчитан на полевую эксплуатацию, в том числе в труднодоступной местности.

¹⁶ Гравиметр наземный кварцевый ГНУ-КВ: каталожное описание // GeoGet [Электронный ресурс]. URL: <https://geoget.ru/images/stories/GNU-KV.pdf> (дата обращения: 21.09.2026).

Для описанного в каталоге исполнения приведён рабочий интервал температур от -25 до $+40$ °С и указана устойчивость к вибрации с ускорением 20 м/с^2 на частоте 70 Гц .

Технические характеристики

- Диапазон измерений ускорений силы тяжести: $80\text{-}500 \text{ мГл}$;
- Диапазон изменений ускорений силы тяжести с перестройкой: $6000\text{-}7000 \text{ мГл}$;
- Средняя квадратическая погрешность единичного измерения: $0,02 \text{ мГл}$;
- Чувствительность при измерениях силы тяжести: $<0,001 \text{ мГл}$;
- Остаточное смещение нуля-пункта: $0,2 \text{ мГл/день}$;
- Время измерений на пункте: 3 минуты ;
- Масса гравиметра и электронного блока с аккумулятором: 5 кг ;
- Габаритные размеры (высота $\times$ диаметр): $450 \times 210 \text{ мм}$.

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 $0,006 \text{ мГал}$, то есть $\sim 6 \text{ мкГал}$ [40]. Практическая чувствительность индикатора составляет $\sim 3 \text{ -- } 10 \text{ мкГал}$, что позволяет регистрировать даже мельчайшие изменения гравиинерциальных измерений [20]. Важной причиной выбора ГНУ-КВ стала его портативность и неприхотливость: прибор массой около $4,5 \text{ кг}$ 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].

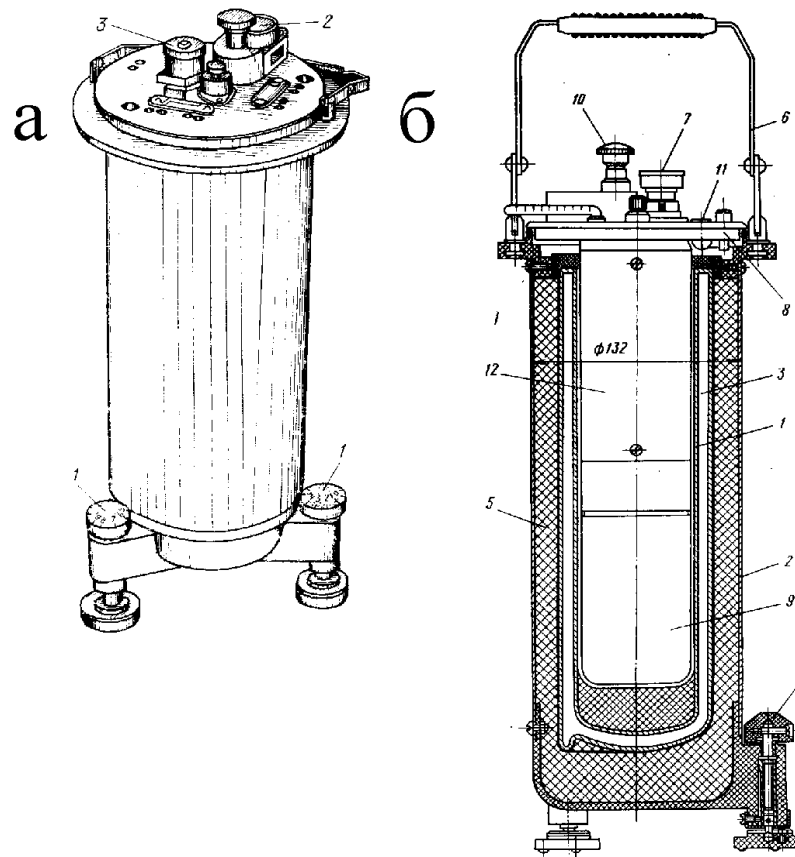


Рисунок 16. Схема устройства астазированного кварцевого гравиметра по принципу сейсмографа Голицына: а – внешний вид гравиметра: 1 – установочные винты; 2 – отсчётное микрометрическое устройство; 3 – окуляр; б – разрез гравиметра: 1 – средняя часть гравиметра; 2 – внешний кожух; 3 – сосуд Дьюара; 4 – 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 [40]

В кварцевой чувствительной системе изменение силы тяжести вызывает поворот маятника. Его отклик определяется действием главной пружины и кручением нити подвеса; астазирование повышает чувствительность к малым изменениям силы тяжести. Для компенсационного отсчёта используют измерительную пружину с микрометрическим устройством, а положение маятника контролируют оптически по индексу [47, с. 37–38]. 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. Для иллюстрации устройства чувствительной системы астазированного кварцевого гравиметра на рисунке 17 приведена принципиальная схема прибора ГАК-7Т [40].

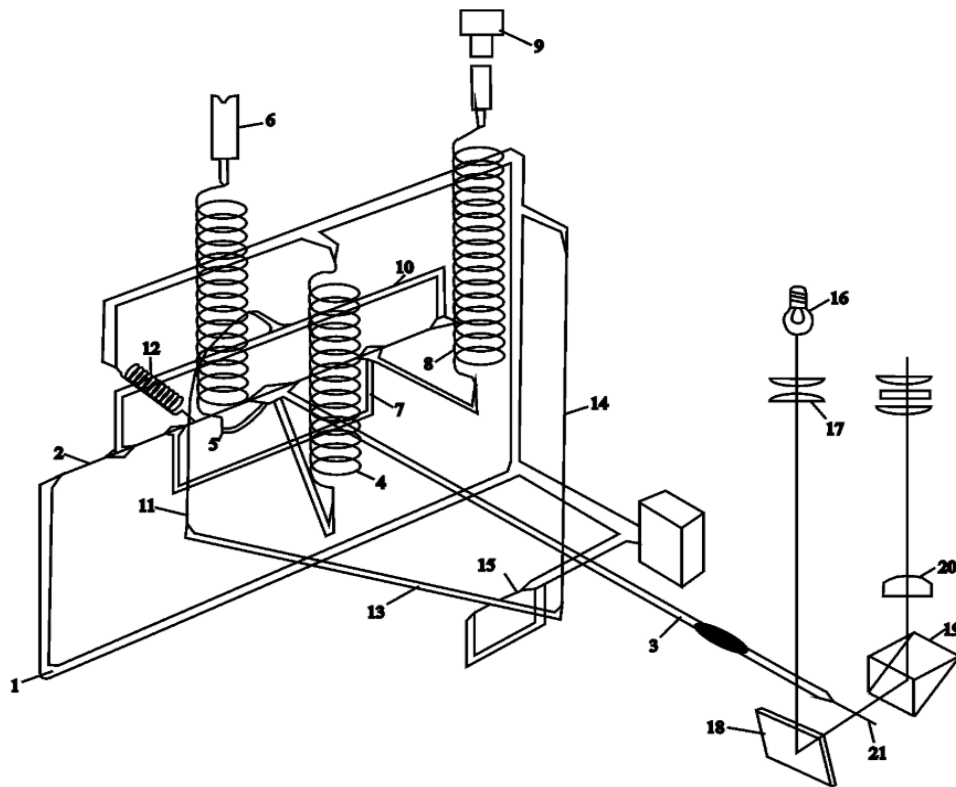


Рисунок 17. Принципиальная схема гравиметра ГАК-7Т: 1 – кварцевая рамка; 2 – тонкая кварцевая нить; 3 – маятник; 4 – рычаг с главной астазирующей пружиной; 5 – диапазонный рычаг с диапазонной пружиной; 6 – диапазонный винт; 7 – измерительная рамка; 8 – рычаг с измерительной пружиной; 9 – микрометрический 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 стержёнок на конце маятника [40]

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]. Общие принципы формирования цифровых изображений и представления видеосигнала в виде последовательности кадров изложены в [44].

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 0,05-0,5 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 микрометров [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)
[30]

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, оснащённом постаментом для длительных гравиметрических наблюдений. Такое размещение обеспечивает минимизацию посторонних колебаний и дрейфа нуля прибора за счёт стабильной температуры и изоляции от вибраций. Перед началом съёмки гравиметр оставляется в покое на $\sim 3-5$ 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.

Система сбора данных обеспечивает регистрацию видеоизображения индикатора гравиметра и его преобразование в численный временной ряд. В ранних совместных исследованиях применялась схема, при которой сначала сохранялась видеозапись эксперимента, а затем выполнялось программное распознавание положения индикатора на выбранных кадрах [22, 30].

Ранние этапы разработки и применения алгоритма видеооцифровки отражены в совместных публикациях [9, 22, 30]. После опубликования работы [30] автор самостоятельно продолжил развитие алгоритма и его программной реализации, выполнив последовательные доработки для непрерывной обработки поступающих кадров.

Представленный в диссертации потоковый вариант является результатом этого дальнейшего развития. В отличие от обработки предварительно сохранённого видеофайла, он обеспечивает получение численных отсчётов непосредственно в процессе наблюдения и последовательное дополнение

временного ряда без ожидания завершения видеозаписи. Ниже приведены параметры видеорегистрации и описание преобразования изображений в численные отсчёты.

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 съемки 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 $30 \text{ кадров/с} \cdot 7200 \sim 216000$ 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 в десять раз 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

Ранние результаты по видеооцифровке показаний гравиметра представлены в совместных работах [9, 22, 30]. После публикации работы [30] автором выполнено дальнейшее развитие алгоритма и его программной реализации для потокового получения численных отсчётов непосредственно в процессе наблюдения. Описание общих этапов распознавания ниже сохраняет ссылки на соответствующие совместные публикации. Общие методы обработки и анализа изображений изложены в работах [11, 59, 92]. Алгоритм определяет координату индикатора на каждом выбранном кадре и формирует последовательность его смещений относительно первоначального положения. При переходе от пиксельных координат к физическим единицам используется калибровка системы. Основные этапы алгоритма приведены ниже:

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. Методы повышения контраста, пространственной фильтрации и выделения границ цифровых изображений рассмотрены в работе Р. Гонсалеса и Р. Вудса [12]. Методы бинаризации изображений для систем технического зрения рассмотрены А.Н. Горитовым [13].

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. В потоковом режиме по мере обработки поступающих кадров формируется и дополняется 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.

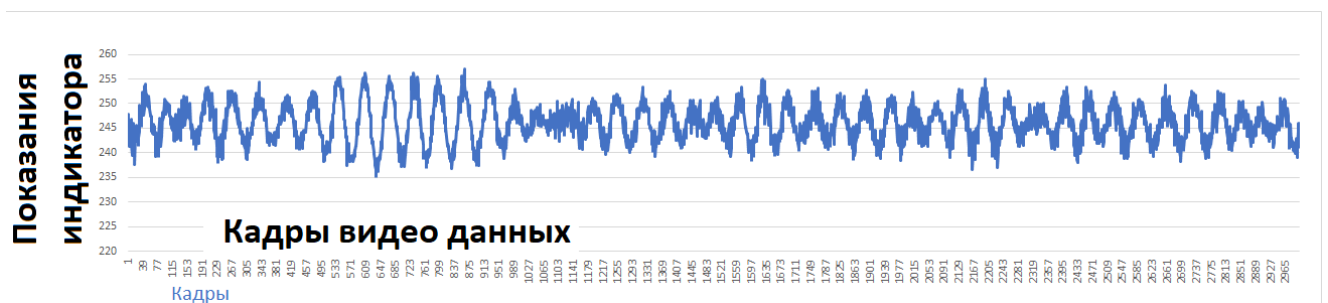


Рисунок 19. Пример оцифрованного сигнала гравиметра (фрагмент). По оси абсцисс отложены кадры видеоданных, по оси ординат – смещение индикатора маятника (в делениях шкалы или пикселях) [30]

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 условных единицах, а также очистка временного ряда от шумов и артефактов. Погрешности и искажения видеотракта рассматриваются в [34].

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). Результаты сопоставления экспериментального распределения с нормальной моделью опубликованы в совместной работе [6] и рассмотрены в подразделе 3.1.

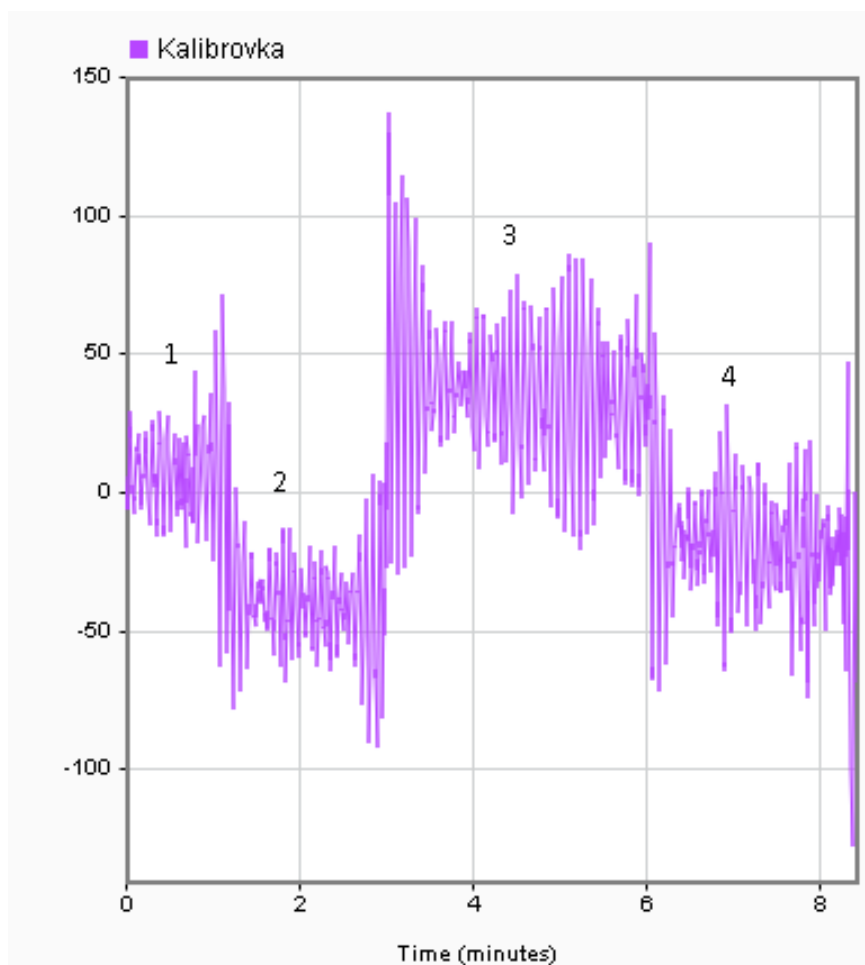


Рисунок 20. График колебаний индикатора ГНУ-КВ при проведении эксперимента по калибровке. Числами 1, 2, 3, 4 отмечены периоды с различным положением калибровочного винта [5]

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 $\sim 0,1\text{--}0,2$ 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 $0,05\text{--}0,1$ мГал при частоте дискретизации 5 Гц. Для улучшения соотношения сигнал/шум применялись фильтры сглаживания [28]. 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. 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 $0,05\text{--}0,5$ 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: результаты сопоставления экспериментального распределения с нормальной моделью опубликованы в совместной работе [6] и рассмотрены в подразделе 3.1. 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 понимания процессов их подготовки, а также построению моделей миграции вещества магмы и вариаций плотности в вулканах.

В изложении О.В. Чумака параметризация рассматривается как компактное описание данных средствами выбранной модели [50]. В настоящем исследовании эта задача решается для временных рядов гравиинерциальных измерений: определяются параметры для сопоставления записей и восстановления выделенных компонент сигнала.

В литературе рассматриваются различные способы построения такого описания. Представления сигналов на основе функций Фурье–Бесселя обобщены в обзоре [61]; сочетание разложения Фурье–Бесселя с эмпирическим вейвлет-преобразованием предложено в [57]. Эти работы относятся к методической базе анализа сигналов и не являются источниками экспериментальных результатов настоящей диссертации.

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 гравиинерциальных 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.

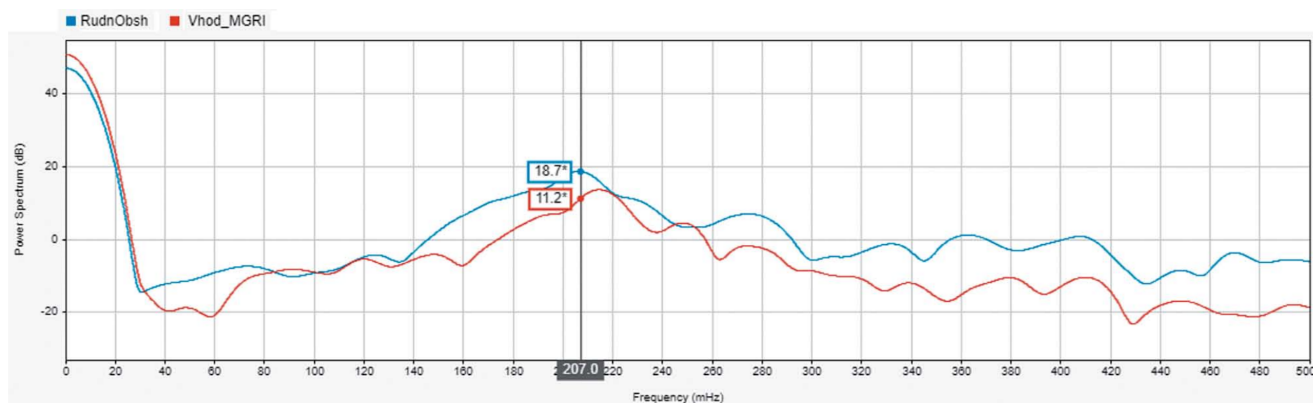


Рисунок 21. Амплитудно-частотное представление замеров, где частота от 0 до 0,5 Гц [5]

Для рассматриваемой экспериментальной выборки выполнено сопоставление эмпирического распределения с нормальной моделью. Далее приведены показатели качества этой аппроксимации.

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. Сопоставление экспериментальных распределений с нормальной моделью выполнено в совместной работе [6]. В таблице 1 этой работы [6] при шагах интервала выборки 1, 2, 4 и 8 максимальное среднеквадратичное отклонение значений функций вероятностей составляет соответственно 0,025; 0,026; 0,027 и 0,027. При шаге 16 приведено значение 0,040 [6, с. 40]. Материалы сопоставления функций распределения, представленные на рисунке 22, опубликованы в совместной работе: А.П. Белов, А.М. Лобанов, В.Н. Утесинов, А.М. Ерохин, К.В. Венедиктов [6].

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

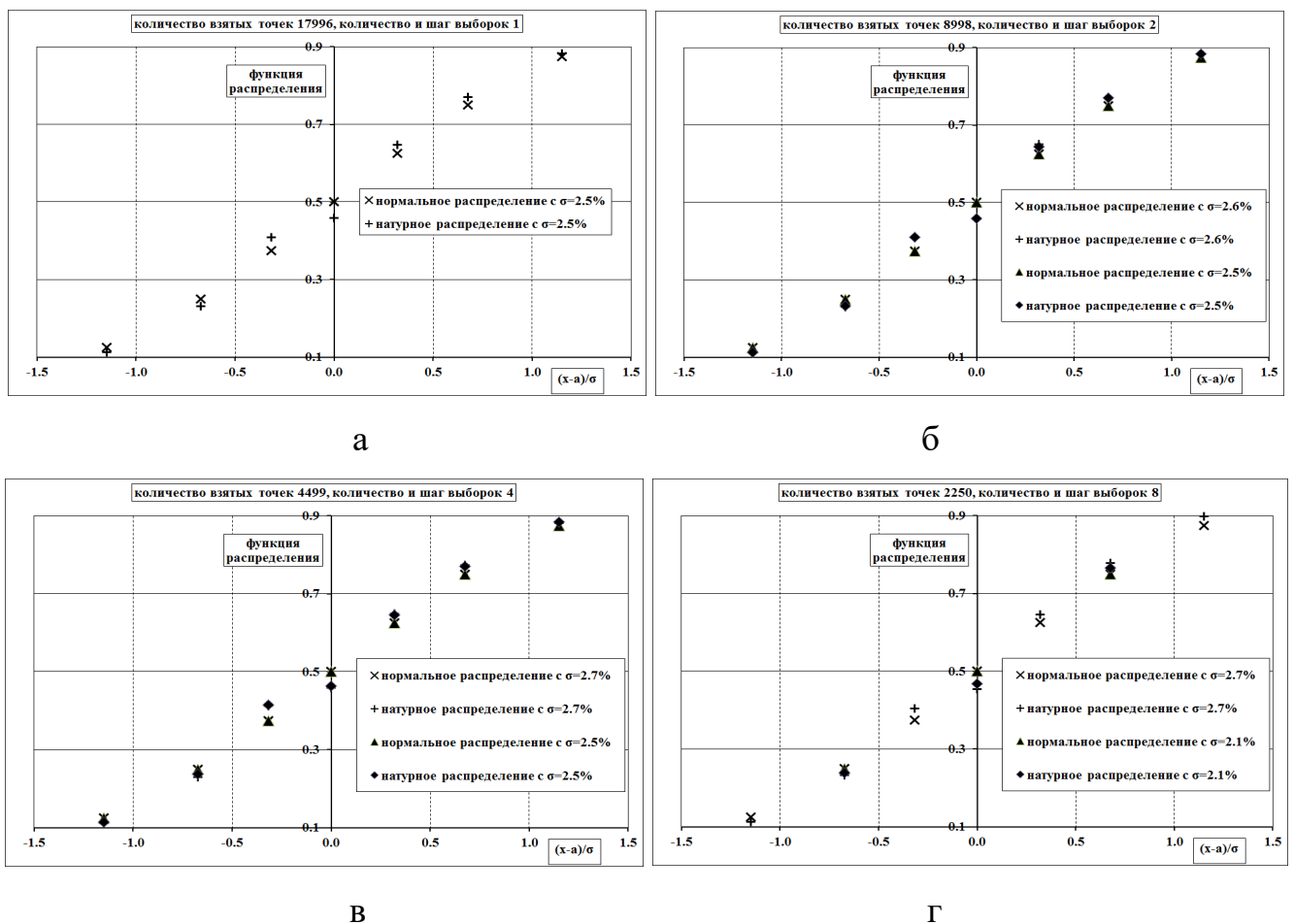


Рисунок 22. Сравнение функций нормального и натурального распределений для максимального и минимального значений ΔM [6]

Коэффициент детерминации для всех результатов составил не менее 99%. Это подтверждает высокую достоверность и корректность применяемых методологических подходов [4, 6].

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 гравиметрических 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, 35]. 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].

Математические основания метода НОКФАСС и используемые свойства спектрального представления изложены в [78, 82]. 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:

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

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 из матрицы данных (пусть эта колонка будет тридцатой, т.е. $s = 30$). Исходный сигнал выбранной колонки и его полный F-спектр показаны на рисунке 23.

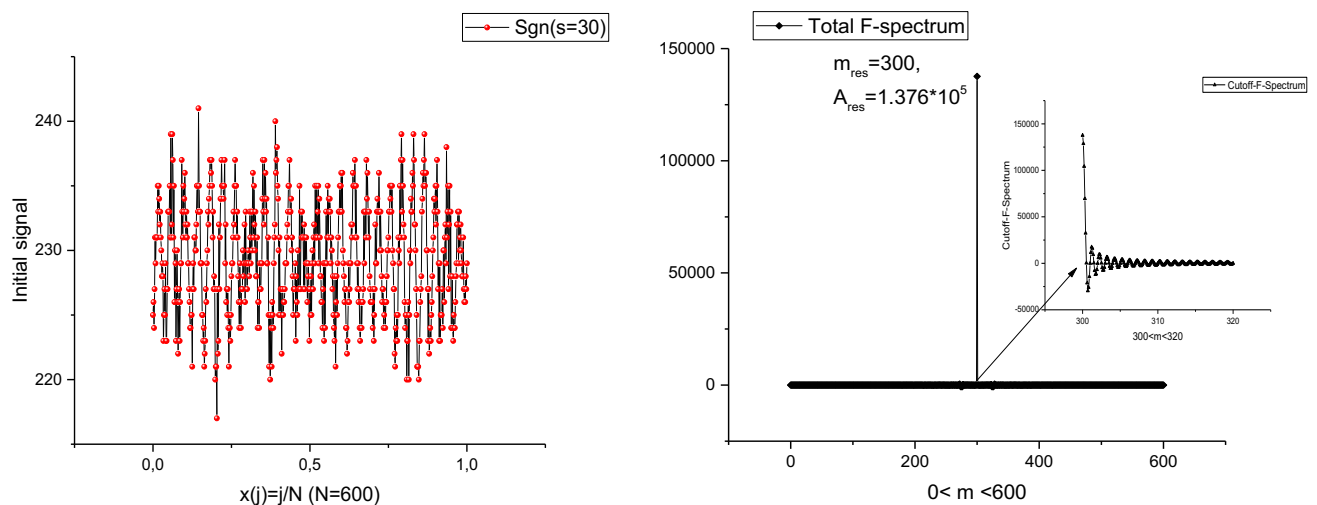


Рисунок 23. Слева изображен исходный сигнал, справа – его полный F-спектр, используемый в НОКФАСС. Резонансная частота перекрывает остальные частоты примерно в 100 и 1000 раз [35]

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

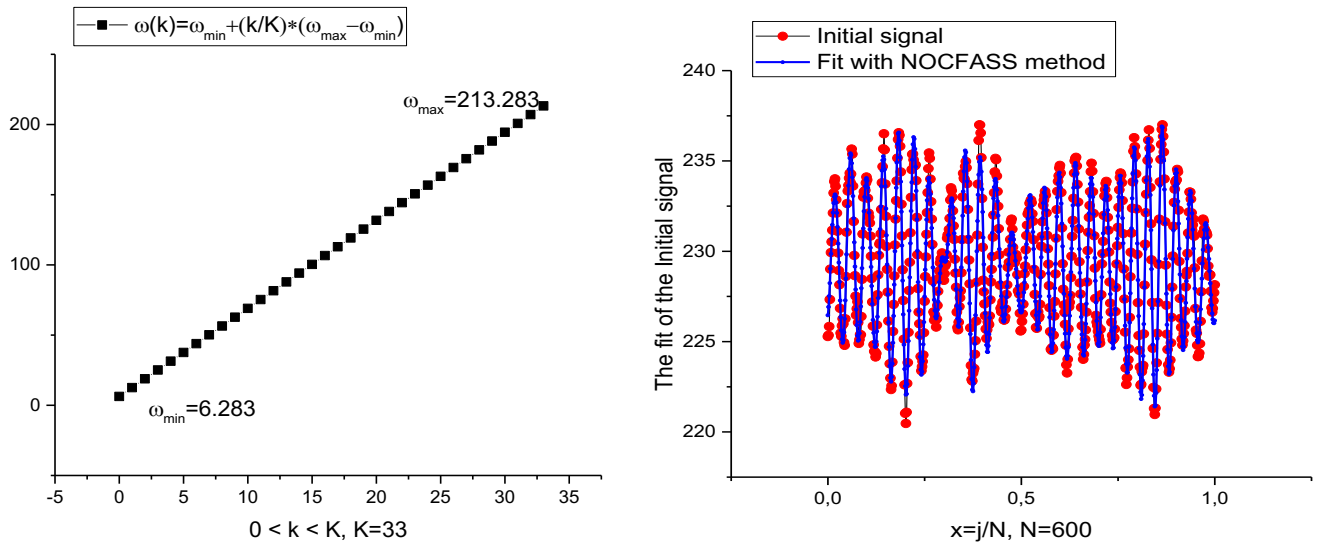


Рисунок 24. Слева показан усечённый НОКФАСС-спектр, справа – аппроксимация исходного сигнала. Точность аппроксимации 0,01% [35]

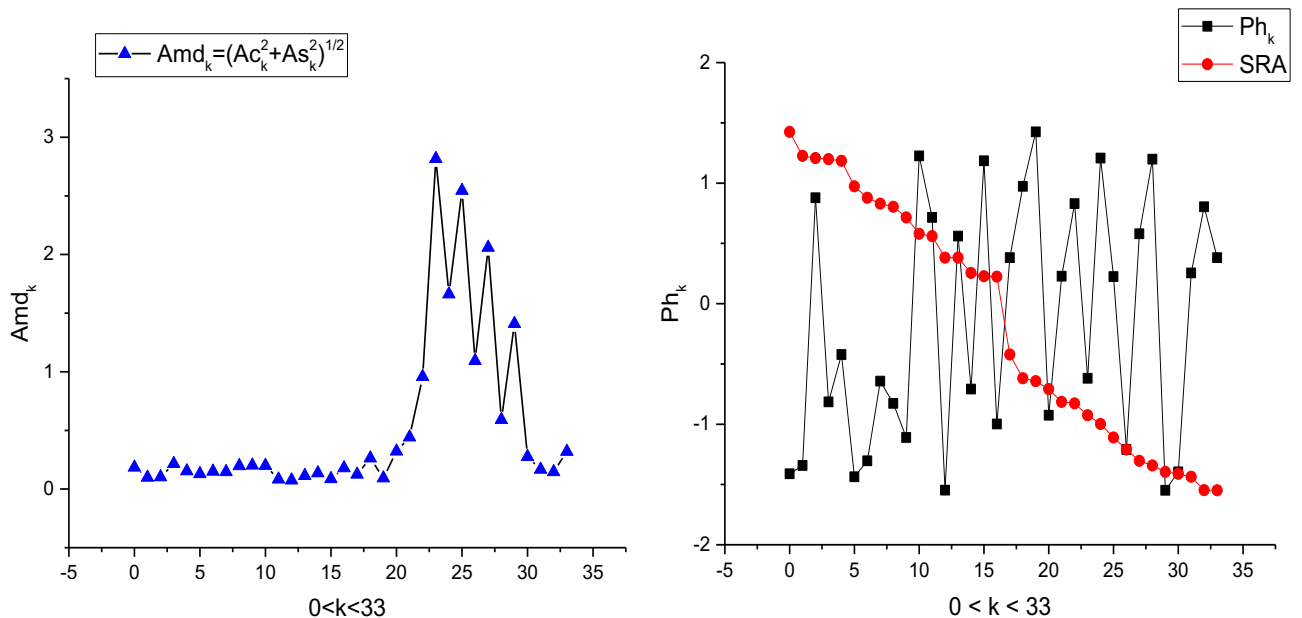


Рисунок 25. Слева показана зависимость модуля амплитуды Amd_k (см. выражение (1)) и фазы Ph_k , которые в конечном счете образуют искомую АЧХ. Если сравнить исходное число точек ($N = 600$) со сжатием данных в методе НОКФАСС, то для воспроизведения исходной кривой, показанной на рисунке 24 (справа), требуется существенно меньше параметров, входящих в выражение (1). К ним можно добавить ещё пару параметров, включая константу $A0 = 229,335$ (из выражения (1)) и величину относительной ошибки аппроксимации $\epsilon = 0,012 \%$ [35]

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 эта 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.

R/S-анализ применяется для исследования масштабных свойств временных рядов. Метод нормированного размаха изложен у Е. Федера [48] и О.В. Чумака [50]. В настоящей работе он используется для оценки изменения отношения R/S при варьировании длины анализируемых сегментов.

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, 36], 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.

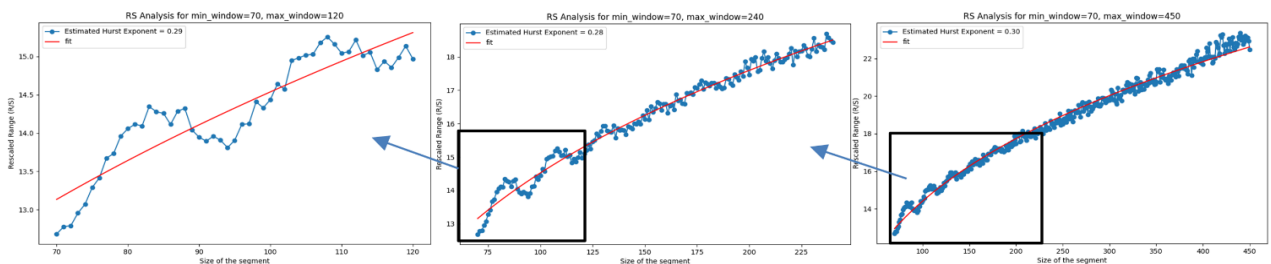


Рисунок 26. Поведение R/S отношения для окон в интервалах от 70 до 120, от 70 до 240, от 70 до 450 [36]

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. Зависимость оценок показателя Хёрста от длины выборки рассмотрена в [42]. Влияние конечной длины записи и примеси белого шума на выявление долговременной памяти исследовано на модельных рядах в [72].

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.

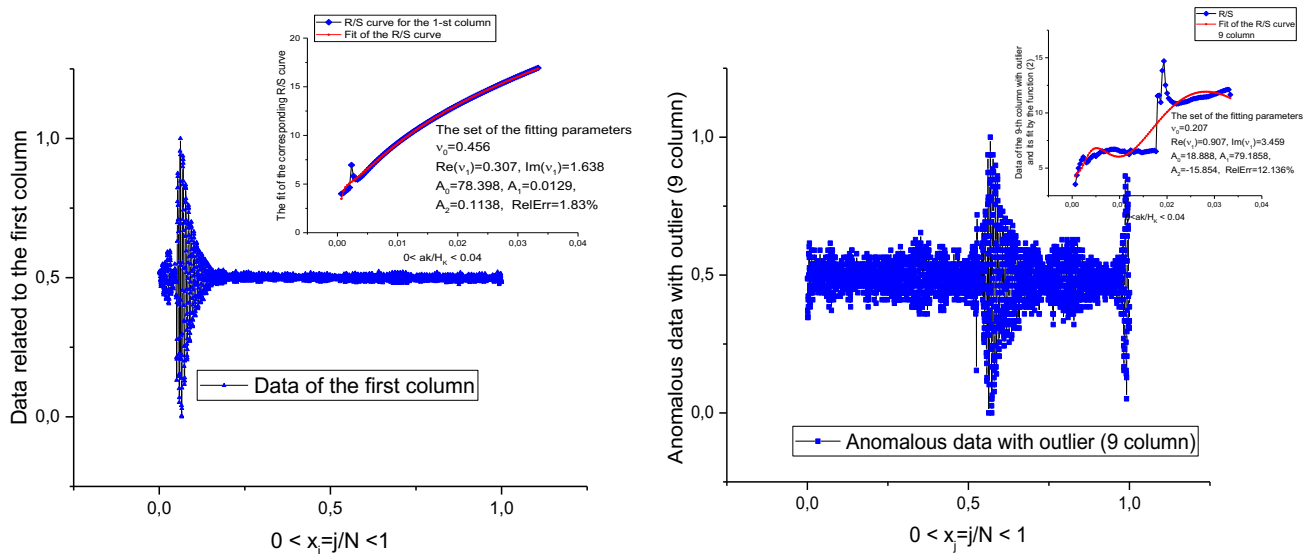


Рисунок 27. Слева показана первая колонка; на малом рисунке справа – R/S -кривая и её аппроксимация функцией (3). Аппроксимационные параметры, включая ошибку аппроксимации (1,83 %), приведены в центре рисунка. Справа на центральном рисунке показана аномальная 9-я колонка и её аппроксимация на малом рисунке справа. Аппроксимационные параметры по кривой (3) также приведены в центре рисунка. Сравнение ошибок аппроксимации показывает, что для аномальной колонки она возрастает до 13 % [36]

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 проведённого 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.

В совместной работе [38] описано использование гравиметров CG-5 и CG-6 с емкостным считыванием малых перемещений чувствительной системы. Компьютерная обработка позволяет автоматически регистрировать показания и вводить поправки.

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 [38].

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.

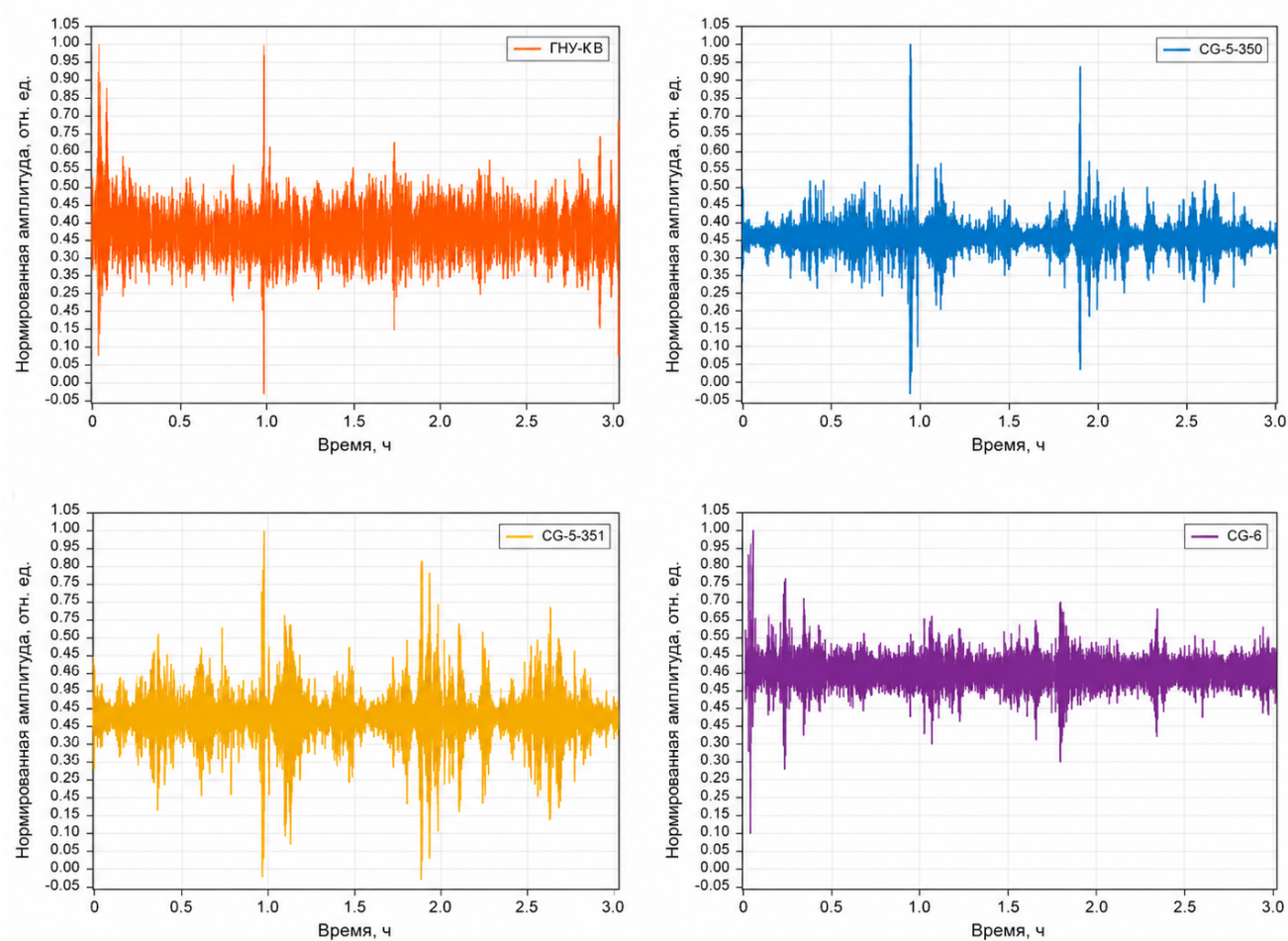


Рисунок 28. Результаты измерений (исходные кривые) вариаций гравиинерциальных измерений для всех четырех гравиметров: ГНУ-КВ, SCINTREX CG-5-350, SCINTREX CG-5-351, SCINTREX CG-6 [38]

Результаты расчета коэффициентов корреляции Пирсона между временными рядами гравиметров приведены в таблице 2 [38].

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.

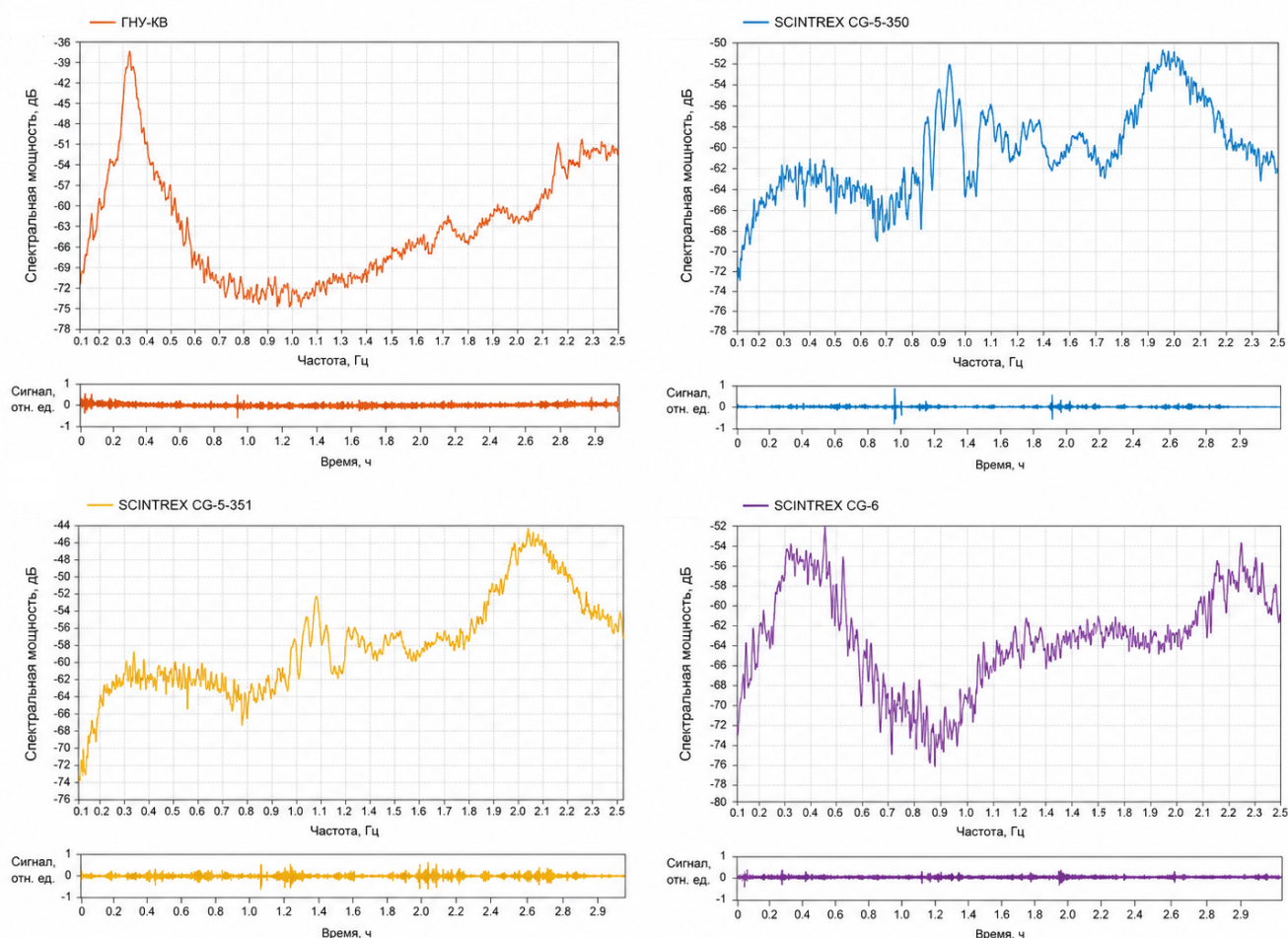


Рисунок 29. Результаты анализа спектральных характеристик исходных данных [38]

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.

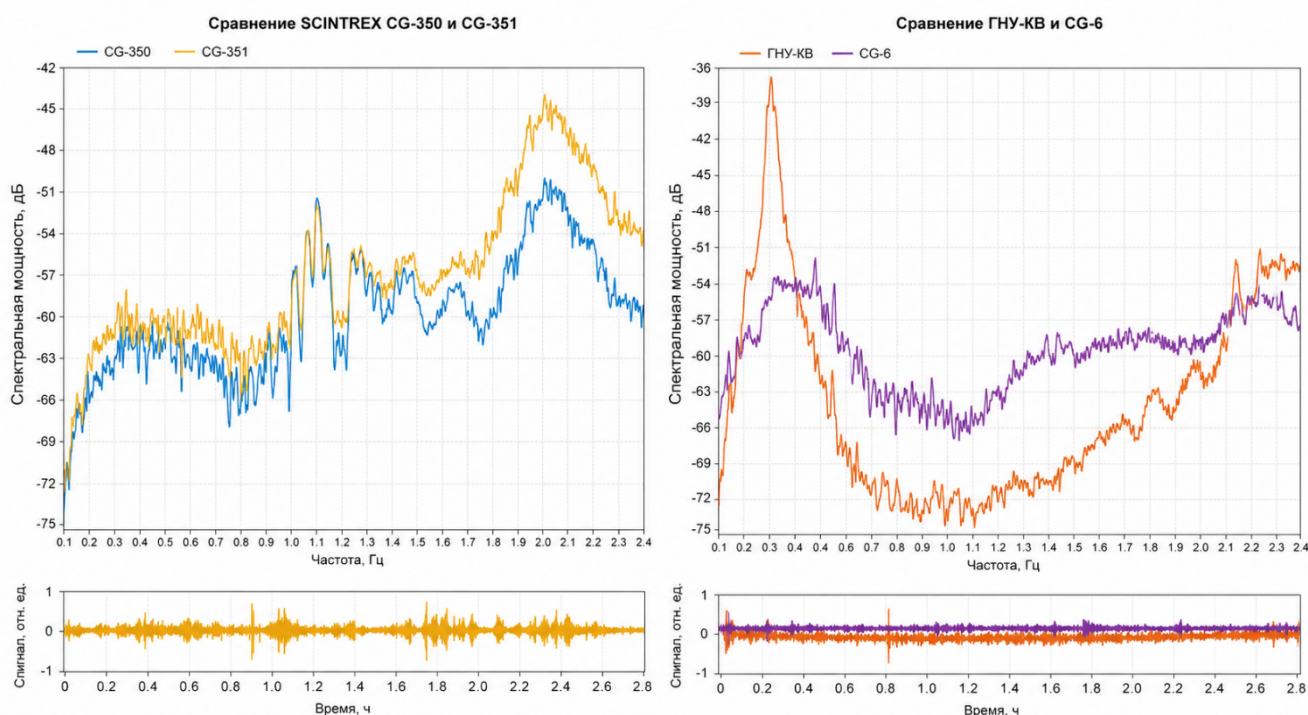


Рисунок 30. Сравнение АЧХ гравиметров SCINTREX CG-5-350 и SCINTREX CG-5-351 – слева; ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6 – справа [38]

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

$$\begin{aligned} Ext(y_1, y_2) &= \frac{Rg(y_1) + Rg(y_2)}{\max(y_1, y_2) - \min(y_1, y_2)}, \\ Rg(f) &= \max(f) - \min(f). \end{aligned} \quad (5)$$

Формула (6). Внутренняя корреляция

$$\begin{aligned} GPCF_p &= \frac{G_p(y_1, y_2)}{\sqrt{G_p(y_1, y_1) \cdot G_p(y_2, y_2)}}. \\ G_p(g, f) &= \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (gn(j) fn(j))^{mom_p} \right)^{1/mom_p}, \\ mom_p &= \exp\left(-r + 2 \frac{p}{P} r\right), \quad e^{-r} \leq mom_p \leq e^r, \quad p = 0, 1, \dots, P \end{aligned} \quad (6)$$

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 [38] видно, что только пары 6 и 10 соответствуют этим требованиям.

Таблица 3

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. Методы оценки параметров по данным с

погрешностями и статистические аспекты линейной и нелинейной аппроксимации рассмотрены в [53].

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.

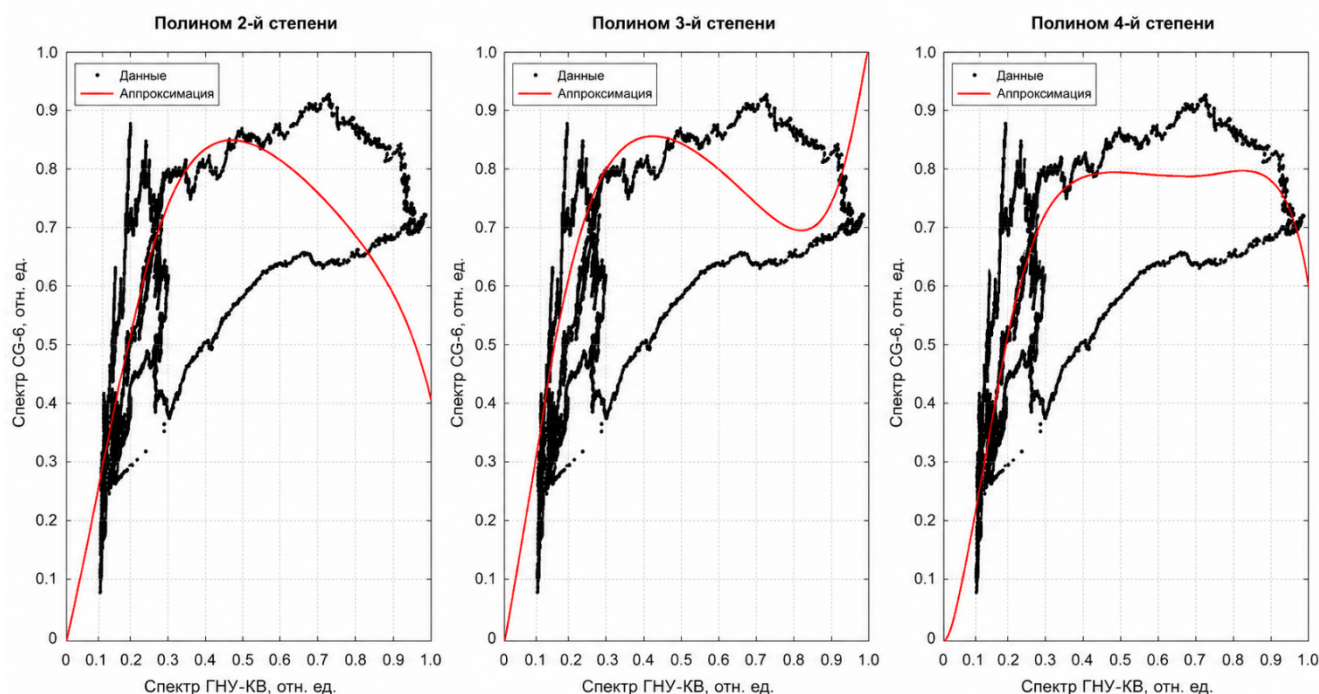


Рисунок 31. Аппроксимация зависимости «спектр ГНУ-КВ – спектр CG-6» полиномиальными моделями: слева – полином 2-й степени; посередине – полином 3-й степени; справа – полином 4-й степени [38]

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 гармоники 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 CG-6» моделями Фурье для различного числа гармоник представлены на рисунке 32.

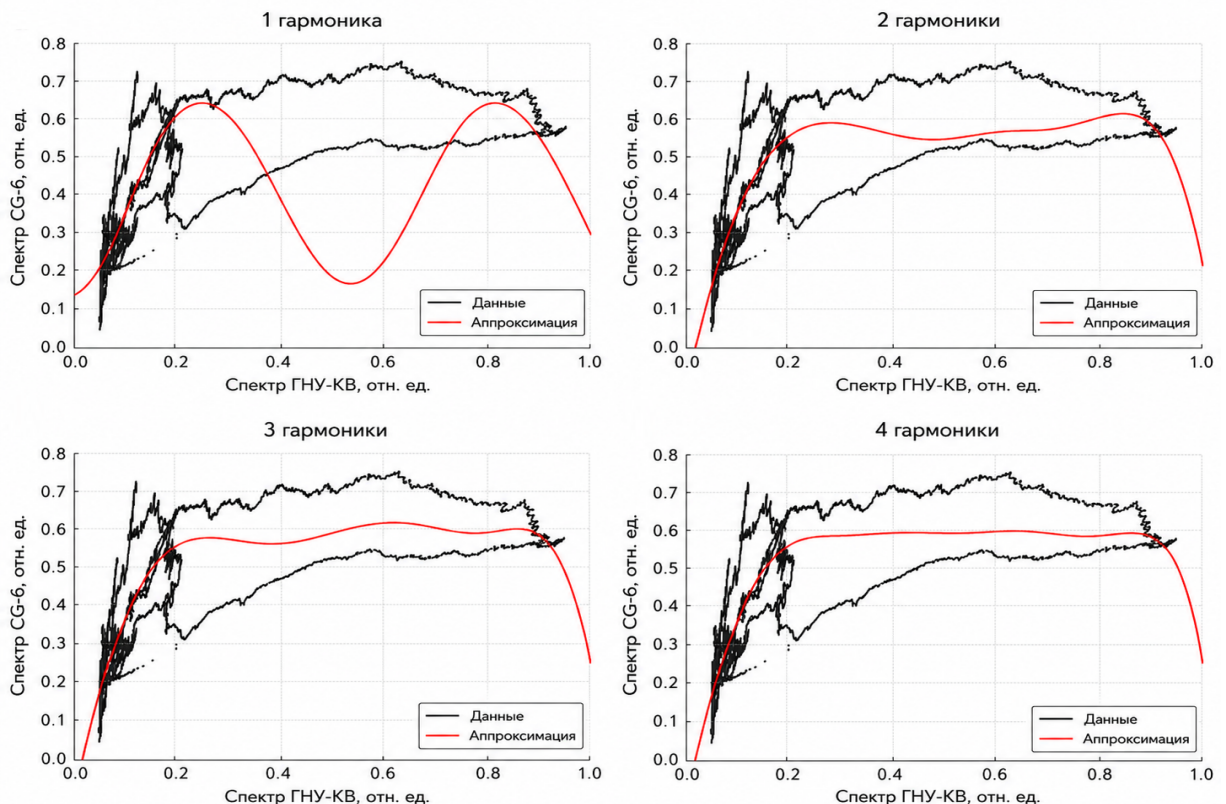


Рисунок 32. Аппроксимация зависимости «спектр ГНУ-КВ – спектр CG-6» моделями Фурье: 1 гармоника, 2 гармоник, 3 гармоник, 4 гармоник [38]

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.

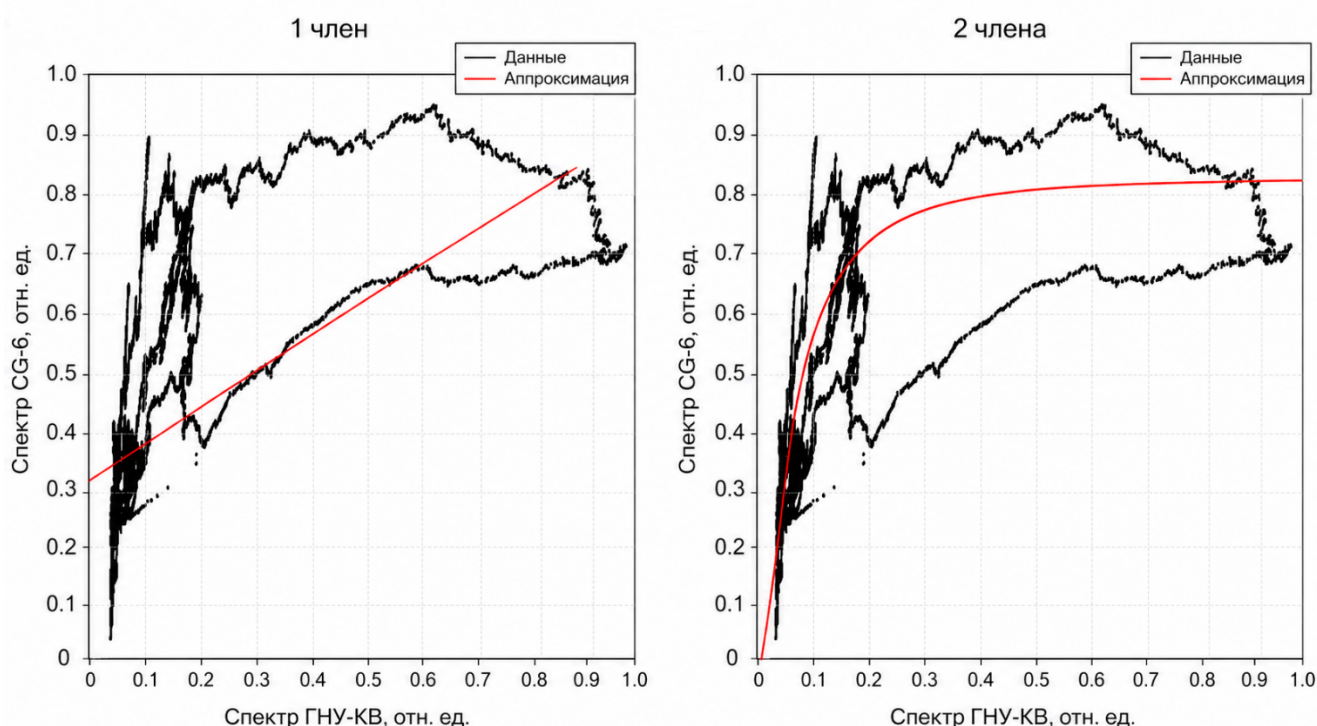


Рисунок 33. Аппроксимация зависимости «спектр ГНУ-КВ – спектр СГ-6» экспоненциальными моделями [38]

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 [38].

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:

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

Здесь y_j , Y_{sm_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 ($w \rightarrow 0$) $Y_{sm_j} \approx y_j$, 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.

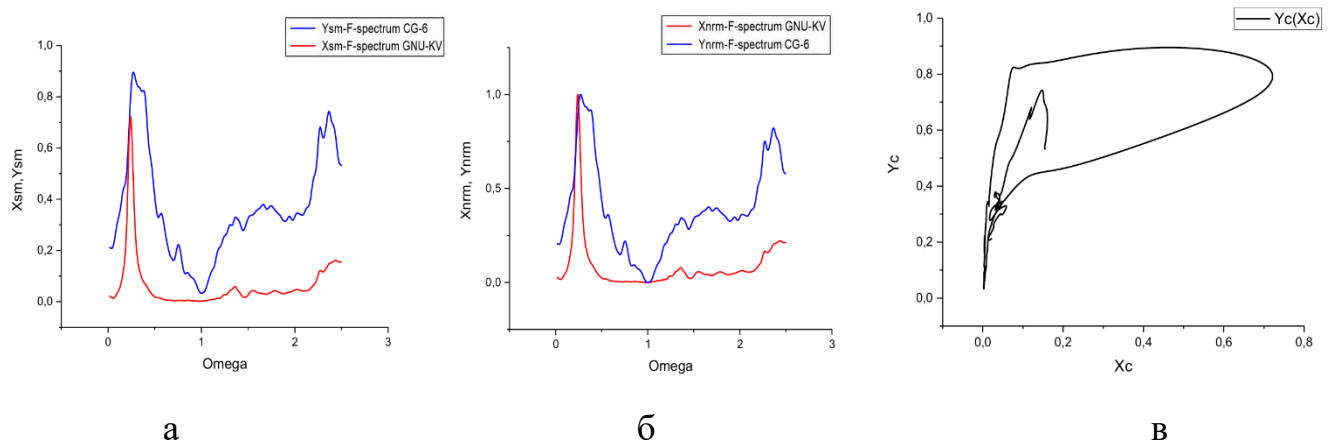


Рисунок 34. Результаты применения ПОЛС к исходным данным [38]

На рисунке 34 графики показывают результат применения ПОЛС к исходным данным, показанных ранее на рисунке 29. Отличие центрального рисунка (б) от рисунка слева (а) состоит в том, что на центральном рисунке оба спектра от гравиметров X (ГНУ-KV) 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).

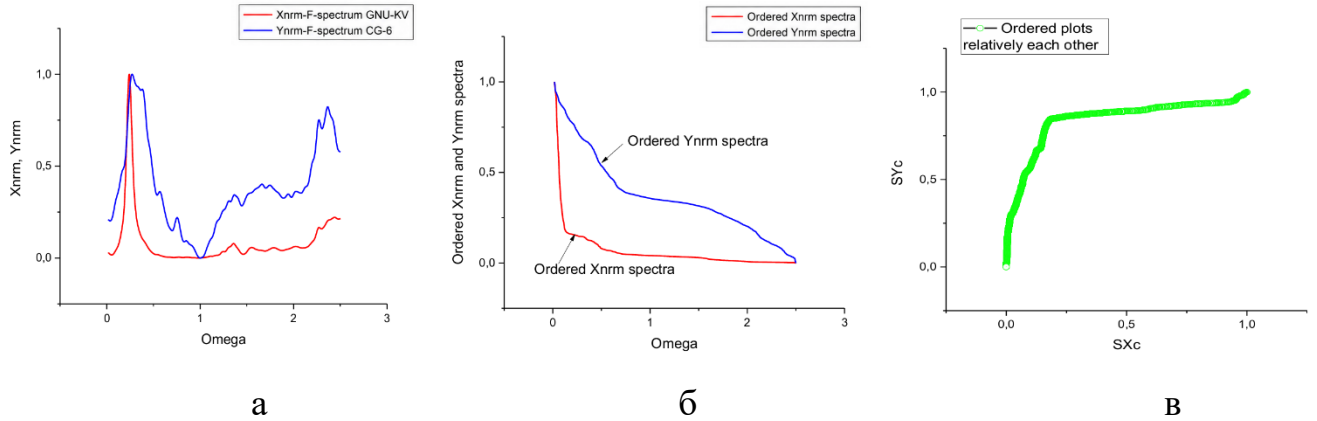


Рисунок 35. Упорядоченные амплитуды сглаженных Ф-спектров [38]

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.

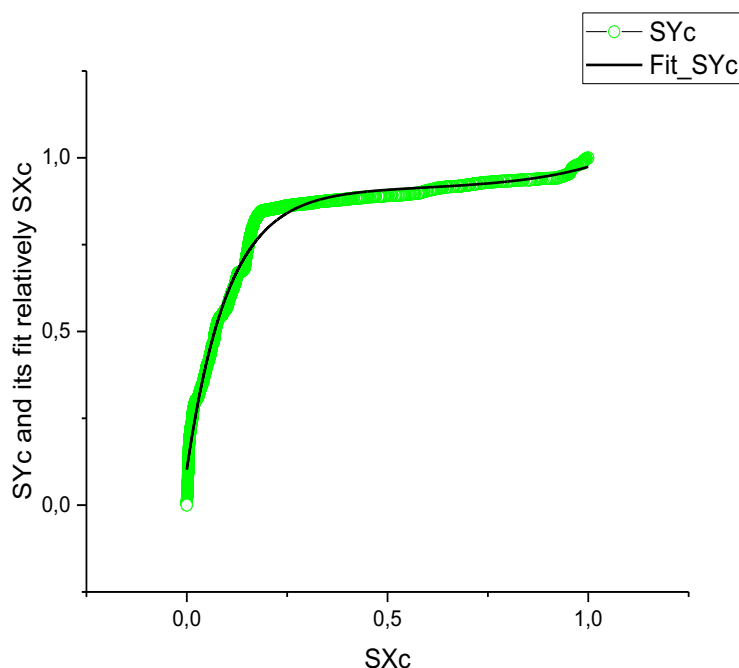


Рисунок 36. Аппроксимирующая кривая феноменологической модели [38]

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 [80] 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 квазипроизводимыми 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

Постановка задачи и математическое представление сигнала в данном подразделе излагаются по совместной работе [39, с. 89–90].

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.

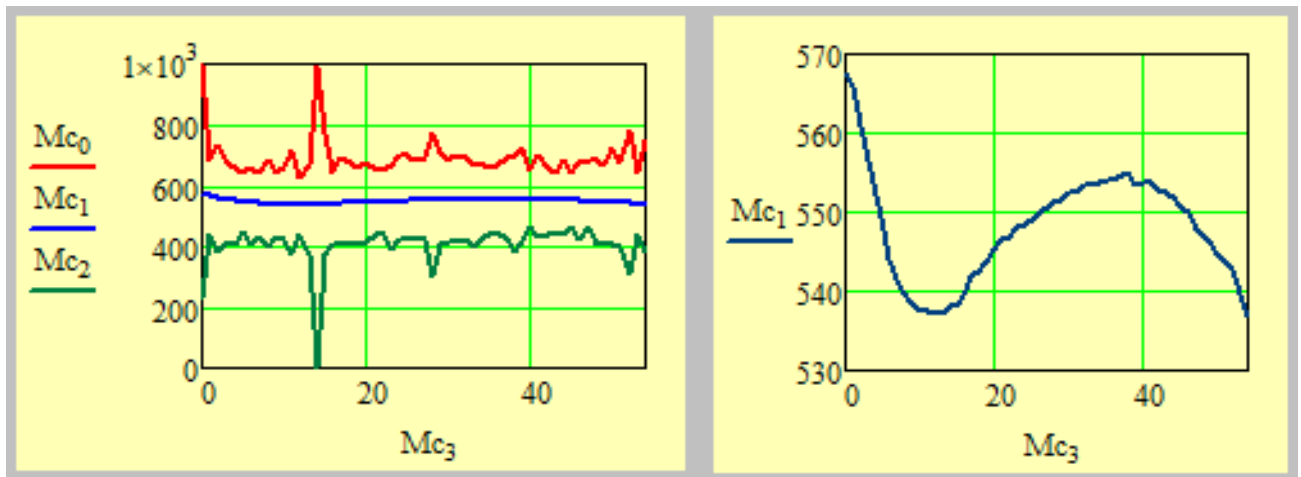
Гравиметры нового поколения SCINTREX CG-6 оснащены блоками компьютерной обработки, которые позволяют вводить вычисленные поправки в показания прибора в режиме реального времени, существенно снизив влияние помех и обеспечив точность измерений порядка 0,001 мГал. Автоматическое снятие показаний и непрерывная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

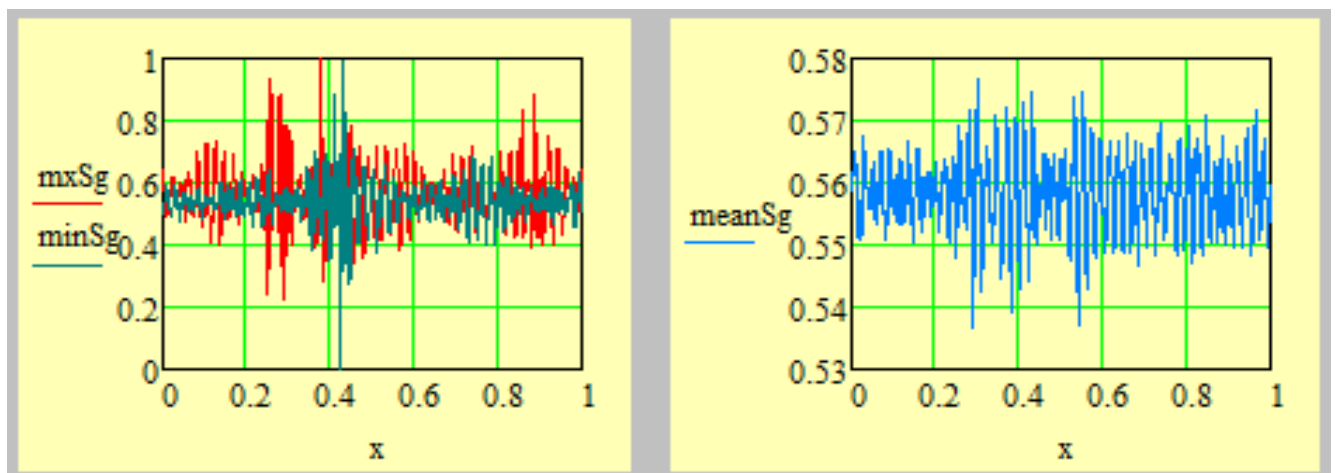


а

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) [39]

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 [39]

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.

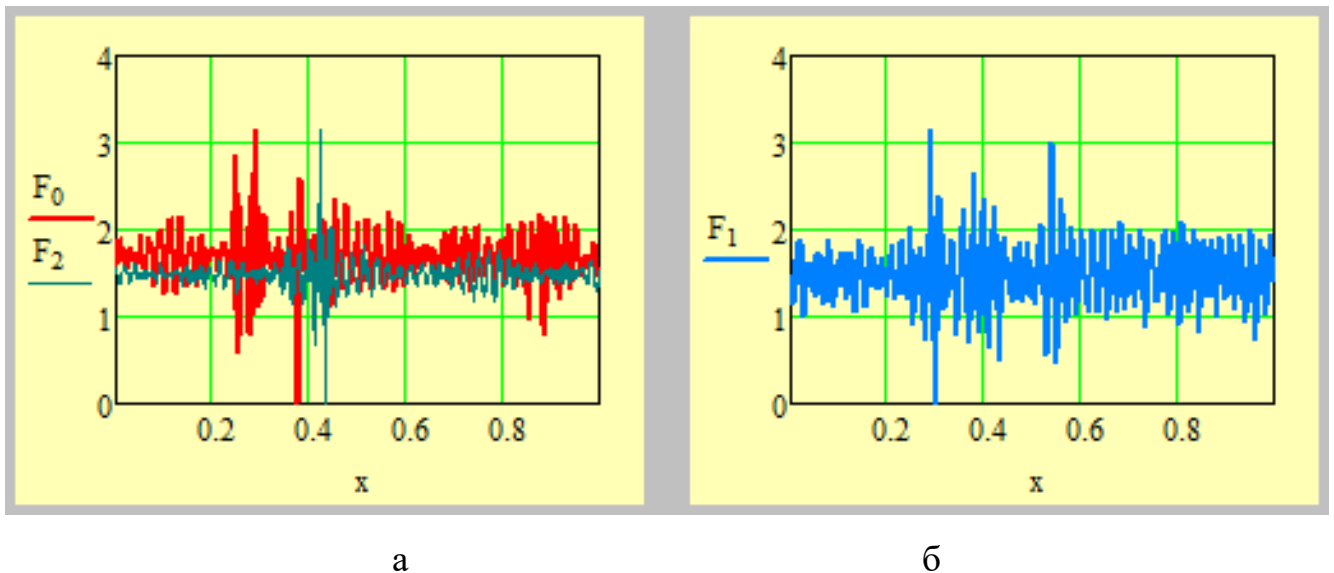


Рисунок 39. Функции аргументов $Fp(t)$, выделенные теми же цветами, что и на прежнем рисунке, и подлежащие аппроксимации [39]

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.

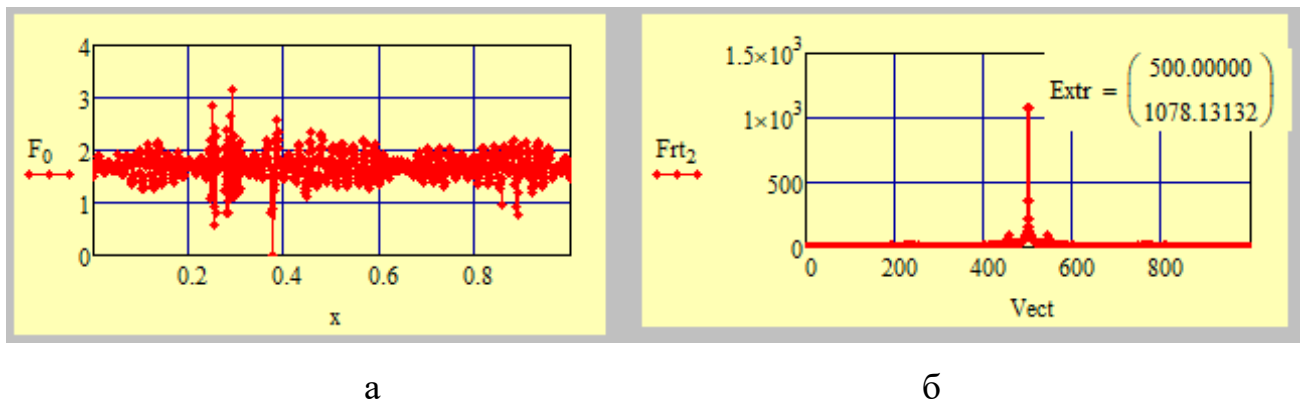


Рисунок 40. Слева (а) показан аргумент $F_0(t)$, соответствующий максимальному распределению. Справа (б) – А-преобразование, сдвинутое на заданный угол. Для целей аппроксимации достаточно взять набор частот от центральной резонансной частоты до 650 [39]

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%.

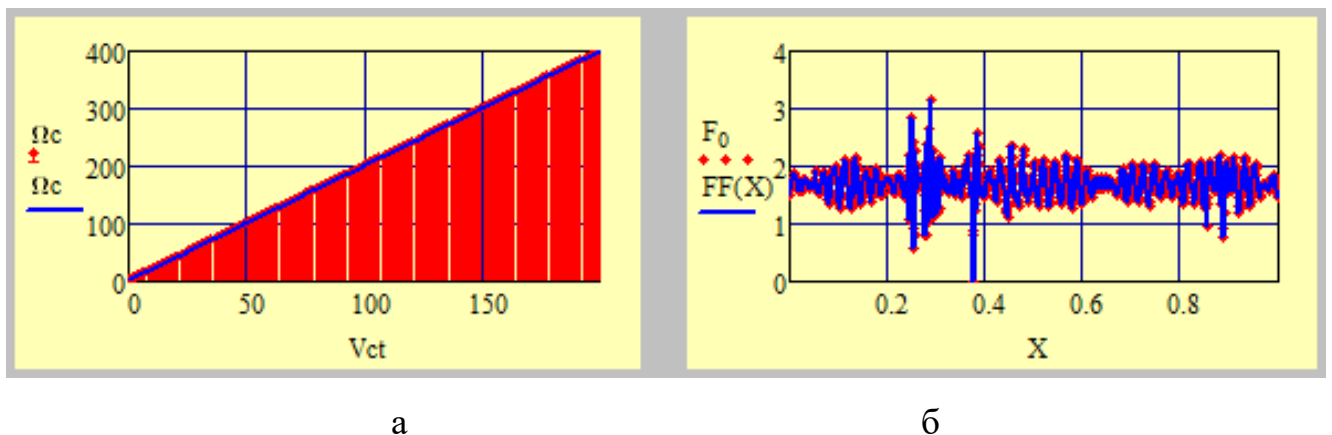
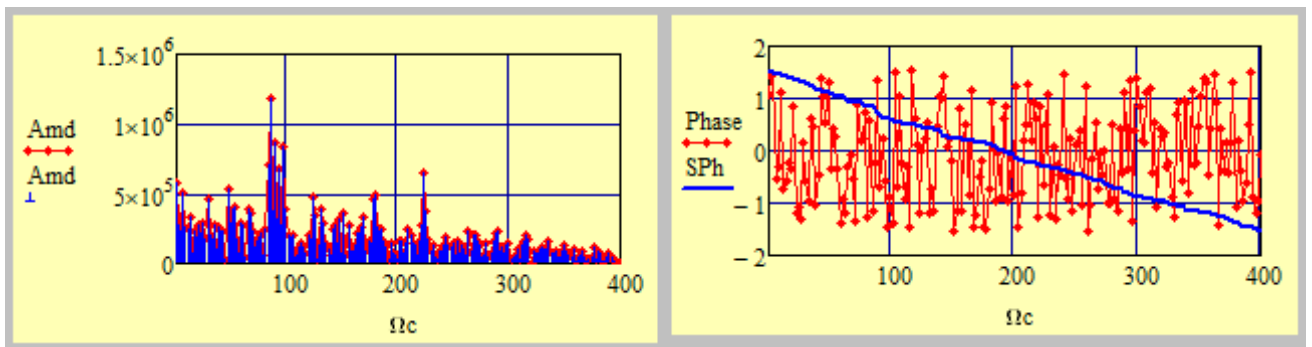


Рисунок 41. Слева (а) показан укороченный спектр. Справа (б) показана аппроксимация распределения $F_0(t)$. Относительная ошибка не превышает 0,2% [39]

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

Более точные значения приведены в таблице 5.

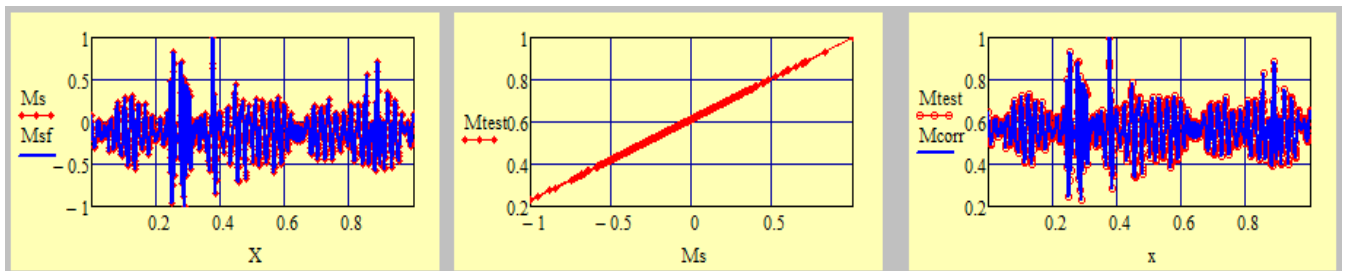
На рисунке 42 показано распределение модуля амплитуд $Amd_k = \sqrt{Ac_k^2 + As_k^2}$ слева (а), и распределение фаз, вычисляемое по формуле $\arctg(As_k/Ac_k)$ для функции $F_0(t)$ справа (б). Заметим, что распределение фаз практически равномерное, так как последовательность ранжированных амплитуд (ПРА),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



а

б

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 [39]



а

б

в

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) [39]

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 б 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 $F_I(t)$. Точность аппроксимации весьма высокая: относительная ошибка меньше 0,2%.

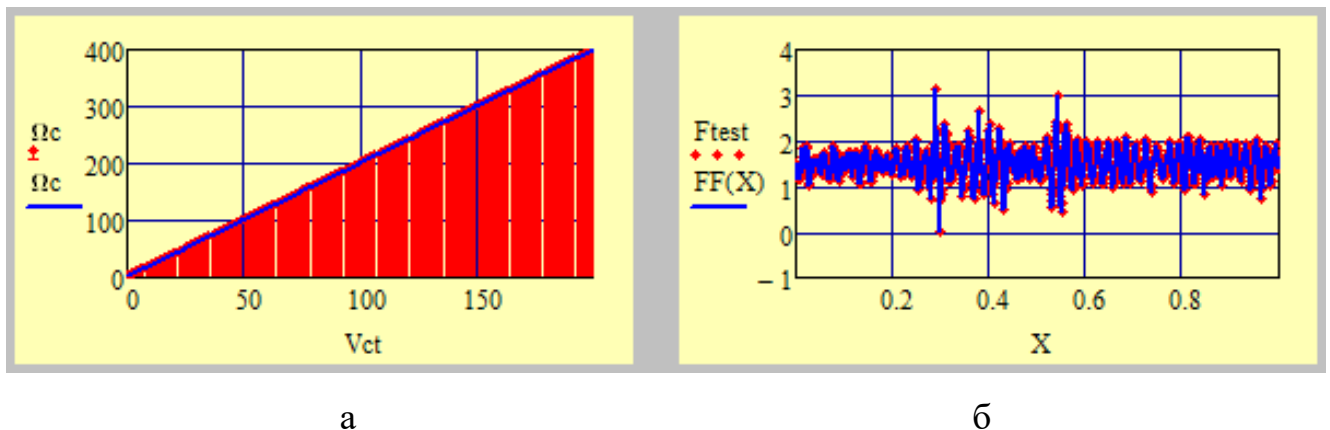
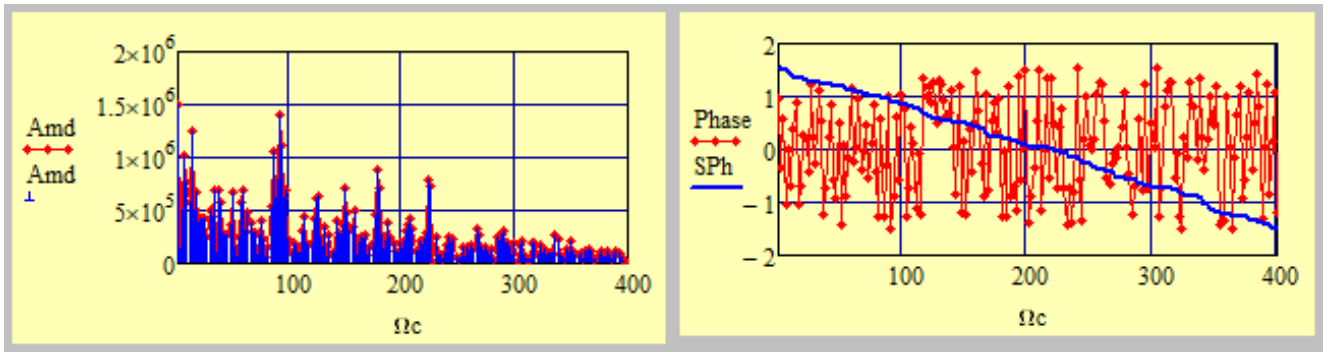


Рисунок 44. Слева (а) показан укороченный спектр. Справа (б) показана аппроксимация распределения $F_I(t)$. Относительная ошибка не превышает 0,2%.

[39]



а

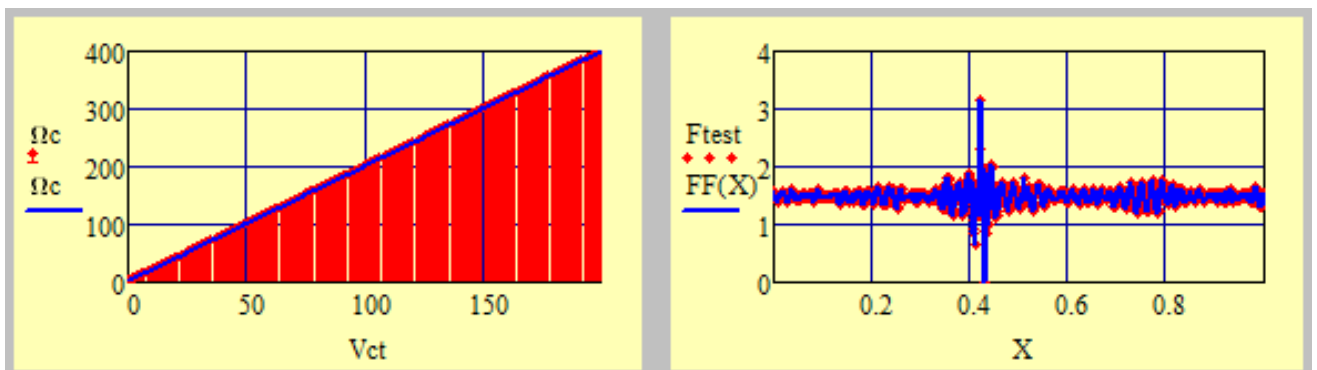
б

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 [39]

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% [39]

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%.

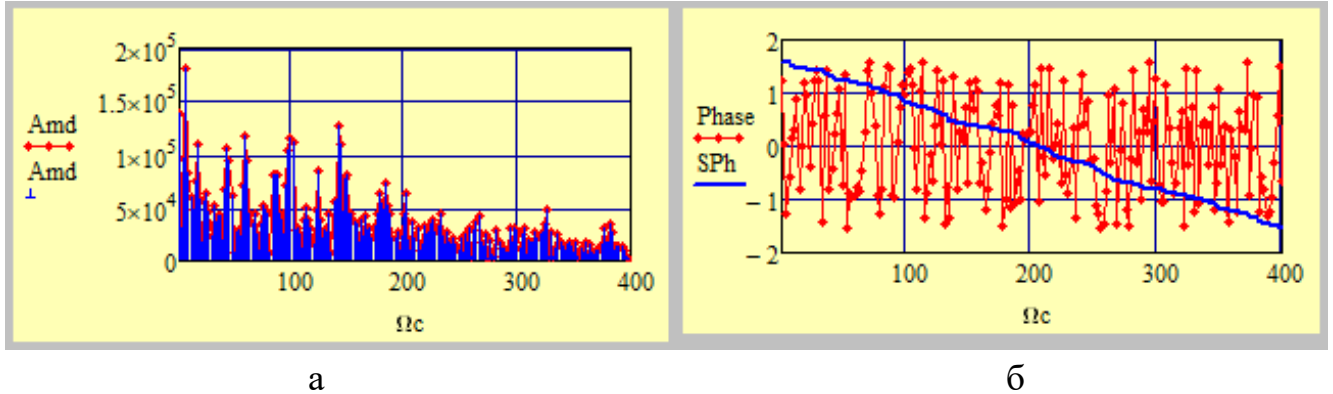
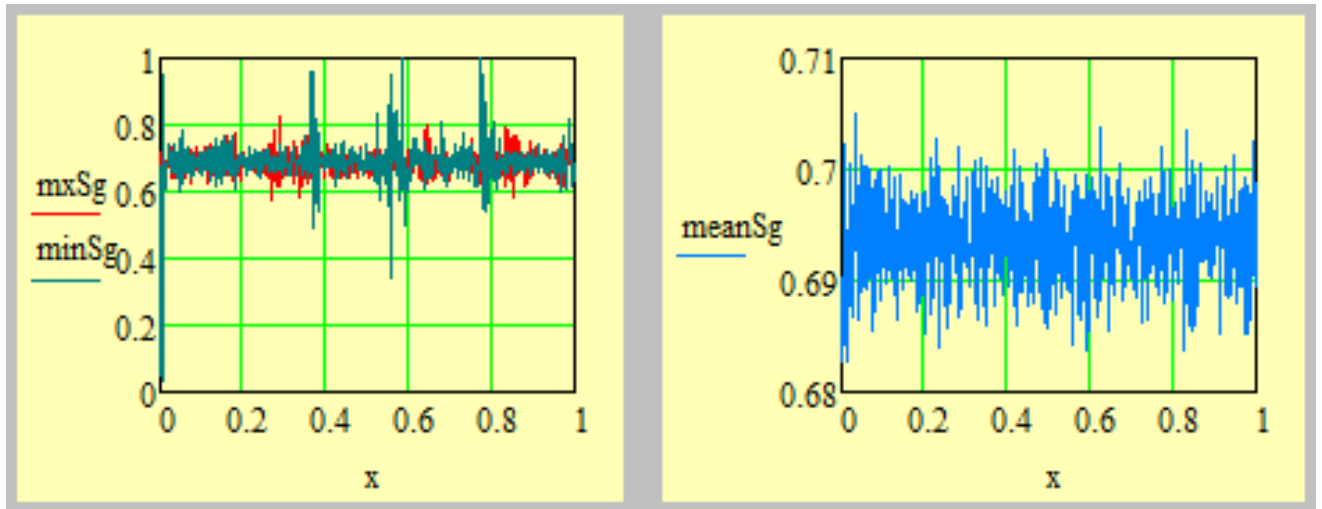


Рисунок 47. На рисунке слева (а) показано распределение модуля амплитуд, справа на рисунке (б) показано распределение фаз. Это АЧХ относится к функции $F_2(t)$. Голубая линия выделяет последовательность ранжированных амплитуд (ПРА). Её близость к отрезку прямой показывает, что распределение фаз – равномерное [39]

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 41-46 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:

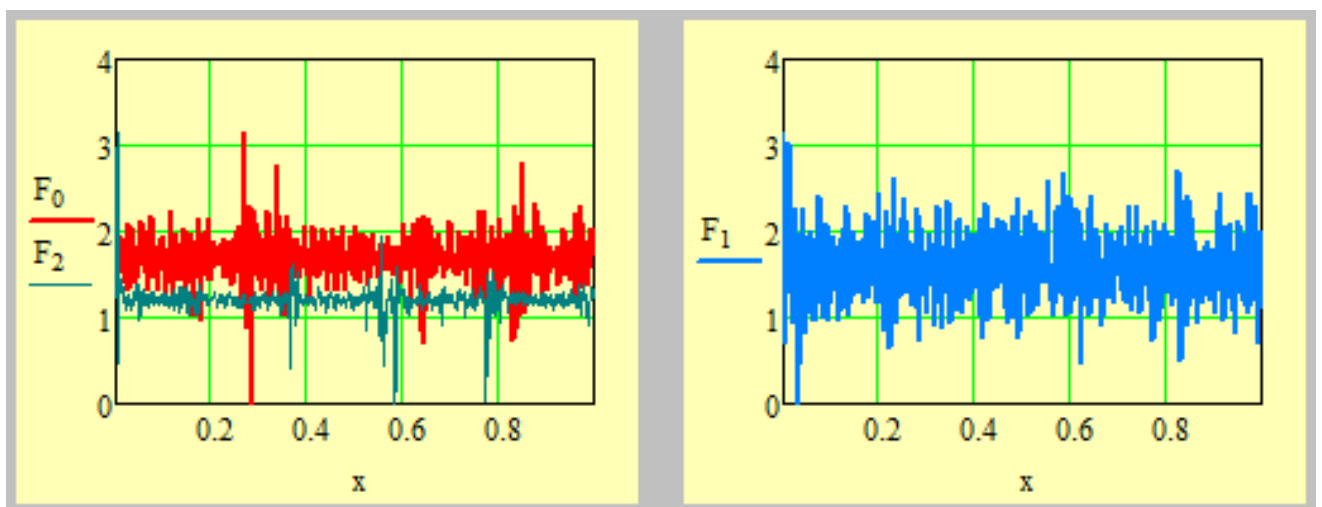


а

б

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 [39]

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 $x_j = j/N$.



а

б

Рисунок 49. Функции аргументов $Fp(t)$, выделенные теми же цветами, что и на прежнем рисунке, и подлежащие аппроксимации [39]

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 $F^l(t)$ 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.

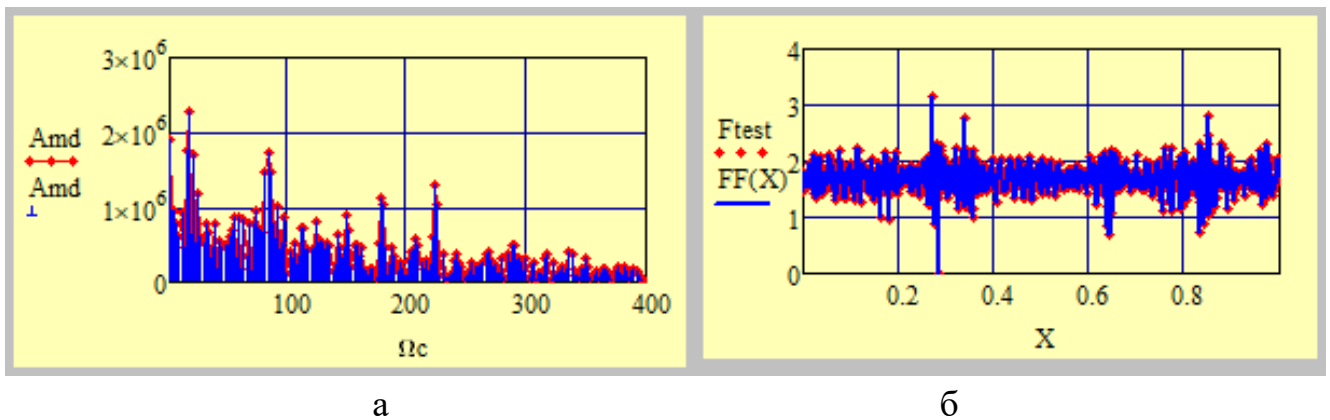


Рисунок 50. Распределение модуля амплитуд слева (а) и аппроксимация функции $F_0(t)$ справа (б). Распределение фаз, как и для первого гравиметра, практически равномерное [39]

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.

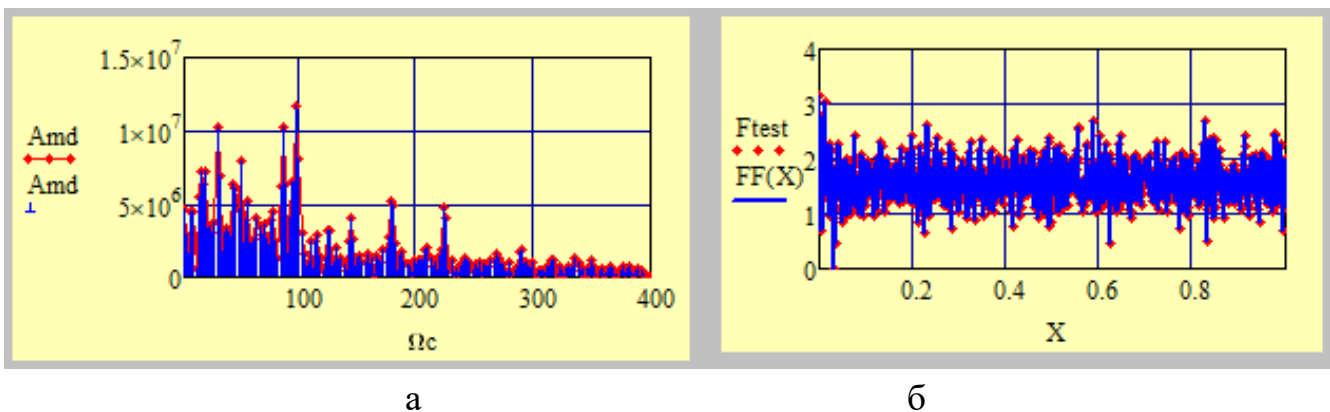


Рисунок 51. Распределение модуля амплитуд слева (а) и аппроксимация функции $F_1(t)$ справа (б). Распределение фаз, как и для первого гравиметра, практически равномерное [39]

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.

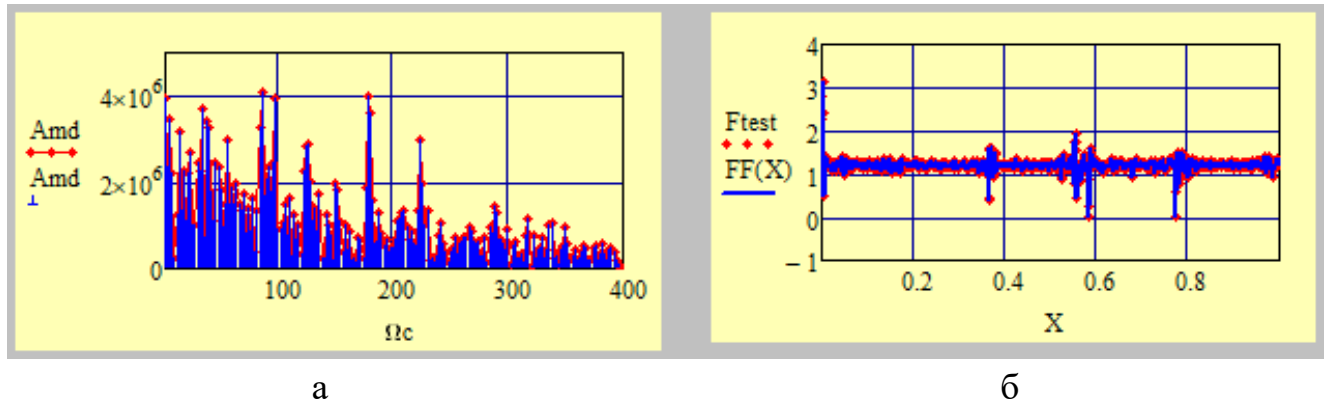


Рисунок 52. Распределение модуля амплитуд слева (а) и аппроксимация функции $F_2(t)$ справа (б). Распределение фаз, как и для первого гравиметра, практически равномерное [39]

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 $F_p(t)$ [39], 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 $F_p(t)$, – 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.

Заключение

Разработанный программно-аппаратный комплекс на базе модернизированного гравиметра ГНУ-КВ обеспечивает непрерывный высокоточный мониторинг гравиинерциальных измерений. Данное решение является инструментом для непрерывной цифровой регистрации и анализа временных вариаций гравиинерциальных измерений.

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.

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% [6]. Результаты сопоставления экспериментального распределения с нормальной моделью опубликованы в совместной работе [6] и рассмотрены в

подразделе 3.1. 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).

– Экспериментальные исследования на фундаментальном гравиметрическом пункте «Ледово» позволили выполнить сравнительный анализ данных гравиметров различных типов и проверить предложенные методы параметризации и моделирования временных рядов.

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 // Материалы XI Международной научной конференции молодых ученых. — 2024. — С. 16–19.
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., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В. [и др.]. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий. – М.: Физматкнига, 2010.
12. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с. – ISBN 978-5-94836-331-8.
13. Горитов А.Н. Предварительная обработка изображений в системах технического зрения // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – Т. 21, № 4-1. – С. 53–58. – DOI 10.21293/1818-0442-2018-21-4-1-53-58.
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., Гравиметрия: учеб. пособие, Новосибирск: СГГА. –2011. – 193 с.

28. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / пер. с англ. под ред. А.А. Бритова. – 2-е изд. – М.: Бином-Пресс, 2006. – 656 с. – ISBN 5-9518-0149-4.

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. Метрологическое обеспечение видеоинформационных систем / В.П. Дворкович, А.В. Дворкович. – М.: Техносфера, 2015. – 784 с. – ISBN 978-5-94836-419-3.

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. В заглавии опубликованной версии: «модификационного».

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. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. Цифровые изображения: от получения до обработки. — Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. — 202 с. — ISBN 978-985-6744-80-1.
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. Чумак О.В. Энтропии и фракталы в анализе данных. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2011. – 164 с. – ISBN 978-5-93972-852-2.
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. Aster R.C., Borchers B., Thurber C.H. Parameter Estimation and Inverse Problems. – 2nd ed. – Academic Press, 2013. – 360 p. – ISBN 978-0-12-385048-5.
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 Z., Ivanov P.Ch., Hu K., Stanley H.E. Effect of nonstationarities on detrended fluctuation analysis // Physical Review E. – 2002. – Vol. 65, No. 4. – Art. 041107. – DOI 10.1103/PhysRevE.65.041107.

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. Kemao Q. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis // *Applied Optics*. – 2004. – Vol. 43. – P. 2695–2702.
70. Kosicka E., Kozłowski E., Mazurkiewicz D. The use of stationary tests for analysis of monitored residual processes // *Eksplotacja 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. Lennartz S., Bunde A. Eliminating finite-size effects and detecting the amount of white noise in short records with long-term memory // *Physical Review E*. – 2009. – Vol. 79, No. 6. – Art. 066101. – DOI 10.1103/PhysRevE.79.066101.

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. 3959–3974.
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. Welch P.D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. – 1967. – Vol. 15, No. 2. – P. 70–73. – DOI 10.1109/TAU.1967.1161901.
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.

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