

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
(ВлГУ)»**

На правах рукописи



Малышева Дарья Алексеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ПОВЫШЕНИЯ
ТОЧНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 1.6.9 «Геофизика»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор

Конешов В.Н.

Владимир - 2023

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1 Анализ работы гравиметрической аппаратуры и существующих методов измерения при выполнении наземной гравиметрической съемки.....	12
1.1 Обзор аппаратуры для гравиметрических наземных измерений.....	12
1.1.1 Краткая история совершенствования отечественных гравиметров.....	14
1.1.2 Чувствительная система современных гравиметров и ее особенности.....	16
1.1.3 Современные относительные гравиметры типа Autograv CG-5....	19
1.2 Общие характеристики методики гравиметрических работ.....	23
1.2.1 Общие положения методики наземной гравиметрической съемки.....	25
1.2.2 Высокоточная государственная гравиметрическая сеть.....	27
1.3 Аппаратные погрешности, влияющие на точность выполнения гравиметрической съемки.....	30
Выводы по материалам главы 1.....	35
Глава 2 Методические приемы повышения точности относительных гравиметрических наблюдений с помощью использования сейсмической информации.....	37
2.1 Взаимосвязь сейсмических и гравиметрических данных.....	37
2.2 Оценка влияния сейсмических событий на показания гравиметра.....	41
2.3 Возможность учёта влияния высокочастотного микросейсмического воздействия на гравиметрические измерения.....	51
2.3.1 Синхронизация данных гравиметра и сейсмостанции.....	51
2.3.2 Математическая модель формирования измерительной информации гравиметра	53

2.3.3 Оценка учёта сейсмического воздействия на гравиметрические измерения.....	56
2.4 Возможность оценки пункта гравиметрических измерений на пригодность к проведению высокоточной гравиметрической съёмки с использованием сейсмической информации.....	59
2.4.1 Возможность оценки гравиметрического пункта на пригодность в качестве опорного при проведении высокоточной гравиметрической съёмки с помощью использования сейсмической информации.....	59
2.4.2 Предварительная региональная оценка уровня микросейсмического шума в предполагаемом районе работ.....	62
2.4.3 Оценка пригодности каждого гравиметрического пункта съёмки по точностным характеристикам, используя сейсмическую информацию при проведении высокоточной гравиметрической съёмки.....	68
2.5 Снижение влияния зарегистрированного сейсмического воздействия на результаты в гравиметрических рядах.....	71
Выводы по материалам главы 2.....	74
Глава 3 Методические приемы по учету влияния метеорологических факторов на точность гравиметрической съёмки при её выполнении	76
3.1. Оценка влияния изменения атмосферного давления на результаты гравиметрических измерений.....	76
3.1.1 Учет изменения атмосферного давления.....	77
3.1.2 Оценка влияния проходящих массивных атмосферных фронтов на гравиметрические измерения	80
3.2. Оценка влияния изменения окружающей температуры на гравиметрические измерения.....	81
3.2.1 Оценка влияния перепада температуры на гравиметрические измерения при смене пункта наблюдений	81
3.2.2 Исследования скорости смещения нуля-пункта прибора CG-5..	89

3.3 Оценка влияния уровня влажности на высокоточные гравиметрические измерения.....	97
Выводы по материалам главы 3.....	104
Глава 4 Практическая реализация разработанных методических приемов для проведения высокоточных гравиметрических измерений.....	106
4.1 Предложения по улучшению методических приемов наземной гравиметрической съемки.....	106
4.1.1 Дополнения по составу оборудования при проведении наземной гравиметрической съемки.....	106
4.1.2 Рекомендации по использованию информации от дополнительного оборудования при оценке результатов гравиметрических измерений.....	107
4.1.2.1 Предварительная подготовка оборудования и оценка микросейсмической обстановки в точке опорного гравиметрического пункта и будущем районе работ.....	108
4.1.2.2 Использование информации от дополнительного оборудования при оценке результатов гравиметрических измерений с помощью относительных гравиметров.....	108
4.2 Практические результаты высокоточных наземных измерений с помощью относительных гравиметров CG-5 в европейской части России.....	110
Выводы по материалам главы 4.....	115
Заключение.....	116
Список используемой литературы.....	117

Введение

Актуальность темы исследования. В настоящее время высокоточные относительные гравиметрические измерения необходимы для решения многих прикладных задач в геофизике. К ним относятся: изучение глубинного строения земной коры, изучение изменения гравитационного поля Земли во времени, редуцирование результатов геодезических измерений на поверхности эллипсоида, региональные и детальные геологические исследования, поиск и разведка месторождений полезных ископаемых и др. Огромное практическое значение имеет изучение глубинного строения Земли, так как достоверно установлена связь между строением земной коры и размещением месторождений полезных ископаемых, а значение силы тяжести на земной поверхности тесным образом связано со строением земной коры. Повышение точности измерений современных гравиметров позволяют значительно расширить область их применения. Так, например, в последнее время получил большое распространение гравиметрический мониторинг с помощью относительных гравиметров при разработке нефтегазовых месторождений. Для этого требуется выполнение крупномасштабной наземной гравиметрической съемки, погрешность которой должна не превышать 0,05 мГал. В будущем эта погрешность должна быть уменьшена, что позволит отслеживать изменения аномалий силы тяжести на нефтегазовых месторождениях. Вышеперечисленные задачи решаются с помощью регулярных наземных наблюдений в рамках гравиметрического мониторинга, с привязкой к измерениям в опорных пунктах сети первого класса. Данные измерений, полученные с помощью относительных гравиметров, содержат результаты влияния множества внешних факторов, что не позволяет получать требуемую точность, полученную с помощью баллистических гравиметров на опорных точках. Целесообразно уменьшать погрешность относительных гравиметрических измерений до погрешностей баллистических гравиметров, лежащих в пределах от 8 до 15 мкГал. В связи с этим возникает необходимость совершенствования существующих и

разработки новых методических приемов, при проведении долговременных высокоточных измерений, которые позволят оценить влияние внешних факторов и выполнять измерения на гравиметрических пунктах с требуемой точностью.

Степень разработанности темы исследований. В нашей стране гравиметрические измерения выполняются уже более ста лет. Наиболее весомый вклад в отечественное гравиметрическое приборостроение внесли сотрудники Института физики Земли Российской академии наук, Всесоюзного научно-исследовательского института геофизических методов разведки Министерства геологии СССР и Пермского государственного национального университета (О.Ю. Шмидт, П.М. Никифоров, Г.А. Гамбурцев, Е.И. Попов, К.Е. Веселов, А.К. Маловичко, В.И. Костицын, С.Г. Бычков и др). Эти ведомства, а, следовательно, и специалисты, преследовали разные цели, такие как изучение фигуры Земли, поиск полезных ископаемых, но они всегда решали задачу повышения точности выполнения гравиметрической съемки. Если раньше гравиметрическая наземная съемка требовала точности на уровне 0,5-0,7 мГал, то в настоящее время требуется крупномасштабная съемка с точностью первых десятков мкГал. Сейчас отсчетная инструментальная точность наиболее распространенных относительных гравиметров достигает 1 мкГал. Эта величина соизмерима с возникающими при измерениях инерциальными помехами, погрешность которых может быть на несколько порядков больше. Следовательно, для того чтобы в полной мере реализовать точностные характеристики гравиметра, необходимо учесть и компенсировать возникающие помехи.

Цель диссертационной работы – дополнить и уточнить методические приемы выполнения наземных гравиметрических измерений, которые позволят повысить точность на опорных пунктах, а также пунктах наземных гравиметрических съемок.

Для достижения поставленной цели потребовалось создать необходимые условия проведения наблюдений и определить состав комплекса геофизической аппаратуры. Данный комплекс должен обеспечивать высокоточные геофизические наблюдения, а разработанные и получившие совершенствование методические

приемы - повышение точности определения значения силы тяжести. Основным прибором комплекса был выбран относительный гравиметр CG-5 Autograv.

Гравиметр регистрирует сумму гравитационных и инерционных ускорений. Гравитационные ускорения возникают вследствие тяготения Земли и центробежной силы, вызванной ее суточным вращением. Инерционные ускорения обусловлены колебаниями поверхности Земли, вызванными, в частности, антропогенными воздействиями и землетрясениями. При проведении гравиметрических работ инерционные ускорения являются помехой, которую необходимо учесть. Помимо этого, необходимо учитывать множество других параметров, например, влияние метеофакторов или «недоучтенных» приливных явлений.

Исходя из этого, в диссертационной работе решались следующие **задачи**:

- 1) разработка методических приемов, позволяющих оценить погрешность гравиметрических измерений используя сейсмические данные;
- 2) учета влияния сейсмических событий на гравиметрические измерения в пункте наблюдения;
- 3) совершенствование методических приемов учёта метеорологического воздействия на гравиметрические измерения;
- 4) получение экспериментальной оценки влияния возмущающих внешних факторов на относительные наземные гравиметрические наблюдения.

Научная новизна.

1. Определена и обоснована структура комплекса геофизической аппаратуры, необходимого и достаточного для высокоточной наземной гравиметрической съемки.

2. Проведена оценка влияния изменения окружающей температуры на высокоточные гравиметрические измерения при транспортировке гравиметра во время смены пункта наблюдения, а также влияние резких скачков внешней температуры на точность наземной гравиметрических измерений.

3. Проведена оценка изменения скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра в экстремальных условиях высокой влажности на пункте измерения.

4. Усовершенствован методический прием, учитывающий влияние сейсмического воздействия на полученные ряды гравиметрические данные.

Методология и методы исследования. Работа выполнялась в несколько этапов. Первоначально проводился выбор необходимых технических средств, определялись и создавались условия для наблюдений. Затем проводились исследования приборов, используемых в экспериментальных работах, в частности была доработана математическая модель формирования его измерительной информации, учитывающая влияние сейсмического воздействия. Подготовительная работа позволила выполнить высокоточные геофизические наблюдения. Экспериментальная часть исследований выполнялась в сейсмогравиметрической обсерватории «Запольское» (ВлГУ) – гравиметрическом пункте 1 класса, входящим в Гравиметрическую сеть РФ, и на фундаментальном гравиметрическом пункте «Ледово».

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Комплекс методических приемов повышения точности относительных гравиметрических наблюдений с использованием сейсмической информации.

2. Комплекс методических приемов учета влияния метеорологических факторов на точность измерений при выполнении долговременной гравиметрической съемки.

3. Рекомендации к структурному облику программно-аппаратного комплекса геофизического оборудования, позволяющего выполнять гравиметрические измерения с точностью единиц мкГал.

Практическая значимость работы.

1. Полученные результаты могут быть положены в основу создания программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего высокоточные гравиметрические измерения на опорных гравиметрических пунктах и рядовых пунктах в ходе выполнения гравиметрической съемки;

2. Предложены следующие методические рекомендации по использованию комплекса геофизической аппаратуры:

– при проведении высокоточных гравиметрических измерений необходимо иметь информацию о произошедших землетрясениях, чтобы учитывать время затухания колебаний основания, на котором установлен гравиметр и величину возможной погрешности. Землетрясения магнитудой более 8 оказывают воздействия на гравиметрические измерения в течении 48 часов, а с магнитудой до 8 – в течении 1-9 часов в зависимости от удаленности эпицентра;

– целесообразно применение сейсмометров с частотой опроса не ниже 6 Гц для формирования корректной сейсмической поправки;

– термостатирование чувствительной системы гравиметра позволяет выполнять высокоточные гравиметрические измерения продолжительностью до двух суток без учёта нелинейной составляющей дрейфа нуля-пункта гравиметра;

– при выполнении высокоточных гравиметрических измерений необходимо учитывать, что погрешность, вызванная перепадом температуры, имеет квадратичную зависимость и достигает 0.1–0.2 % в случае высокой (более 10 °С) температурной разницы опорного и полевого пунктов.

3. В ходе выполнения 58 контрактов ИФЗ РАН повышена точность гравиметрических измерений на европейской части России до среднеквадратической погрешности 15,8 мкГал при использовании предложенных методических приемов и геофизического комплекса.

4. Полученные результаты диссертационной работы использованы ВлГУ при выполнении Государственного оборонного заказа №1820187150192452655002294/ВлГУ (шифр «Рашпиль-ВлГУ»), головным исполнителем которого был ИФЗ РАН.

Теоретические и практические результаты диссертационной работы стали важной частью исследований по грантам РФФИ:

- №13-05-97527 р-центр-А;
- №14-05-97504 р-центр-А;
- №20-05-00524А.

В настоящее время результаты диссертационной работы используются при выполнении гранта РНФ №22-17-20035.

Личный вклад. Основные результаты работы получены лично автором. Автор принимал участие в разработке структуры комплекса геофизической аппаратуры. Автором усовершенствованы методические приёмы оценки влияния сейсмических и метеорологических факторов на относительные высокоточные гравиметрические измерения. Автор лично выполнял экспериментальные геофизические наблюдения в сейсмогравиметрической обсерватории "Запольское" (ВлГУ) и на территории Владимирской области. Автор лично выполнял обработку и интерпретацию полученных сейсмических и гравиметрических данных, в том числе результатов гравиметрических измерений в ряде пунктов на территории европейской части России.

Апробация результатов. Результаты выполненной работы доложены на следующих конференциях:

1. XIV Международная конференция молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях», Бишкек, Киргизия, 27-29 апреля 2022 г.

2. XV Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2022), Владимир-Суздаль, 28-30 июня 2022 г.

3. 49-я сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей», Екатеринбург, Россия, 23-27 января 2023 г.

4. XV Международная конференция молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях», Бишкек, Киргизия, 26-28 апреля 2023 г.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 9 — в трудах и тезисах конференций, и прочих изданиях. А также имеется 1 патент на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации 127 страниц текста с 61 рисунком и 6 таблицами. Список литературы содержит 117 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., профессору В.Н. Конешову за помощь на всех этапах выполнения работы. Автор благодарит сотрудников лаборатории гравиинерциальных измерений (№ 601) ИФЗ РАН М.Н. Дробышева, Н.В. Дробышева, Д.В. Абрамова, П.С. Михайлова и других сотрудников. Автор также благодарит к.т.н. заведующего кафедрой общей и прикладной физики Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых – В.В. Дорожкова.

Глава 1 Анализ работы гравиметрической аппаратуры и существующих методов измерения при выполнении наземной гравиметрической съемки

В нашей стране гравиметрические измерения выполняются уже более ста лет. Наиболее весомый вклад в отечественное гравиметрическое приборостроение внесли сотрудники Института физики Земли Российской академии наук и Всесоюзного научно-исследовательского института геофизических методов разведки Министерства геологии СССР (О.Ю. Шмидт, П.М. Никифоров, Г.А. Гамбурцев и др). Эти ведомства, а, следовательно, и специалисты, преследовали разные цели, такие как изучение фигуры Земли, поиск полезных ископаемых, но они всегда решали задачу повышения точности выполнения гравиметрической съемки. В настоящее время отсчетная инструментальная точность наиболее распространенных относительных гравиметров достигает 1 мкГал. Эта величина не только соизмерима с возникающими при измерениях инерциальными помехами, но и может быть на несколько порядков меньше их. Следовательно, для того чтобы в полной мере реализовать точностные характеристики гравиметра, необходимо учесть и компенсировать возникающие помехи. Решению этой задачи и посвящена данная диссертация. В ней рассмотрены условия возникновения и компенсации этих помех, обусловленных сейсмическими и метеорологическими факторами.

1.1 Обзор аппаратуры для гравиметрических наземных измерений

В настоящее время созданы скважинные, морские, донные и авиационные гравиметры, но наибольшее распространение получили наземные гравиметры. Наземные гравиметры разделяются на абсолютные и относительные.

Абсолютные гравиметры серийно выпускаются как у нас в стране, так и за рубежом. Наибольшее распространение получили абсолютные баллистические гравиметры, представленные на рисунке 1.1.



Гравиметр FG5

A10

ГАБЛ-ПМ

Рисунок 1.1 – Варианты абсолютных баллистических гравиметров

Принцип работы таких баллистических гравиметров заключается в измерении пути и времени свободного падения тела в вакууме. Этот принцип позволяет использовать естественные стандарты длины и времени. Перемещение падающего тела измеряется интерферометрическим методом. Мерой длины служит длина волны лазера. Например, в гравиметре ГАБЛ-ПМ в качестве осветительной системы интерферометра используется стандарт длины на базе твердотельного лазера (в качестве активной среды использовался алюмоиттриевый гранат легированный ионами неодима), стабилизированного по йоду, с рабочей длиной волны 532 нм [15]. Мерой интервалов времени являются сигналы прецизионного рубидиевого стандарта частоты. Приборы, основанные на абсолютном методе измерений, характеризуются отсутствием дрейфа нуля, что позволяет проводить измерения вне связи с опорной гравиметрической сетью.

Баллистические гравиметры предназначены для высокоточного определения абсолютного значения ускорения силы тяжести и необходимы при решении ряда задач геодезии и геофизики, таких как создание пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), государственной фундаментальной гравиметрической сети (ГФГС), эталонных гравиметрических и геодинамических полигонов и полевых гравиметрических пунктов первого и второго классов.

Относительные измерения наиболее распространены, потому что приборы для относительного определения силы тяжести более просты и надежны в эксплуатации. Рассмотрим основные этапы становления и совершенствования

отечественных относительных гравиметров, а также особенности чувствительной системы современных гравиметров.

1.1.1 Краткая история совершенствования отечественных гравиметров

Первый вариант макета советского гравиметра был изготовлен в 1938 году. Основой служила металлическая кольцевая пружина. Первый советский гравиметр серийного выпуска (модель ГКМ-5 (1946)) – позволил определять приращения силы тяжести с точностью около 1 мГал. В 1949 году в нем было уже сконструировано астазирующее устройство и оптическое отсчетное приспособление. Этот гравиметр получил название ГКА (гравиметр кольцевой астазирванный). При астазировании повышается чувствительность упругой системы, благодаря чему малые изменения силы тяжести вызывают сравнительно большие отклонения рычага от положения равновесия. Вращением микрометра рычаг приводится в исходное положение. Визуально эти смещения заметить невозможно, а оптическое устройство (с использованием микроскопа) позволяет достичь увеличения в несколько сотен раз.

В 1955 году в ИФЗ под руководством и непосредственным участием Ю.Д. Буланже [18] был изготовлен кварцевый гравиметр ГАЭ1, а в последующие годы были созданы гравиметры ГАЭ2 и ГАЭ3. В 1960 году разработан ГМТ – гравиметр металлический термостатированный, не имеющий термометра, а в **1965 г.** в ИФЗ АН СССР разработан автоматизированный гравиметр АМГ. В том же году был создан широкодиапазонный гравиметр ГАГ-2 (гравиметр астазирванный геодезический) оригинальной конструкции, использованный для фундаментальных гравиметрических связей при создании опорной сети. С его помощью, впервые, ставилась задача определения изменения силы тяжести во времени. Далее в 1970 году ИФЗ изготовил стационарный кварцевый гравиметр «СКГ», предназначенный для регистрации приливных изменений ускорения силы тяжести при изучении внутреннего строения Земли.

Параллельно, во ВНИИГеофизике, была разработана целая серия кварцевых астазированных гравиметров: ГАК-3М, ГАК-4М, ГАК-7Т, «Дельта», ГНУ-К1, ГНУК-В [22]. В СССР серийно выпускались гравиметры узкодиапазонные (ГНУ) и широкодиапазонные (ГНШ) с кварцевой астазированной системой [17]. Они характеризовались высокой точностью измерений силы тяжести, компактностью, простотой в обращении, высокой производительностью. В конце восьмидесятых годов во ВНИИГеофизике был создан компьютеризированный гравиметр ГНУ-КВК. Его внешний вид представлен на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Внешний вид гравиметра ГНУ-КВК

Использование микропроцессора типа MICRO-PC 63112 PC ("Octagon Systems", США) обеспечивало управление компенсационным приводом от индикатора маятника и обработку информации (фильтрация, вычисление ошибок и т.д.), ее долговременное хранение, вычисление различных поправок и определение приращения силы тяжести. Через интерфейс PS-232 осуществлялась связь с персональным компьютером [94]. Этот прибор содержал все лучшее, что на тот момент было в отечественном гравиметрическом приборостроении. Заводом «Нефтекип» была выпущена небольшая серия этих приборов для опробования в полевых условиях геофизическими партиями. Но, к сожалению, в связи с развалом

СССР и реформированием геологоразведочной отрасли серийный выпуск этих приборов был прекращен, оснастка ликвидирована, специалистов изготовления гравиметров в отрасли не осталось. Аналогичная картина и на предприятии Министерства обороны РФ, на котором выпускались относительные наземные гравиметры ГАГ-2 и ГАГ-3.

В настоящее время экспериментальная составляющая гравиметрии в России резко отстала от теоретических разработок. Появление новых зарубежных наземных относительных гравиметров, в том числе и в России по импортным поставкам, с чувствительностью до $0,1 \text{ нм/с}^2$ и с автоматической цифровой регистрацией открывают новые возможности по повышению точности измерений и выделению из них геофизических процессов, а также позволяют ставить научные опыты по повышению эффективности исследования природных объектов и расширению сферы использования гравиметрической разведки.

1.1.2 Чувствительная система современных гравиметров и ее особенности

Основными приборами проведения наземных полевых измерений являются относительные гравиметры, в большинстве своем, основанные на статическом методе. Статический метод измерений силы тяжести подразумевает сравнение ее с какой-либо другой эталонной силой, постоянной во времени и противоположной по направлению. Все статические гравиметры, которые нашли практическое применение, построены по принципу пружинных весов, т. е. в них в качестве эталонной силы используется сила упругой деформации твердого тела. В течение десятилетий в процессе конструирования гравиметров использовались либо кварцевые пружины, либо металлические, но в большинстве современных систем используются пружины только из плавленого кварца. Во-первых, кварцевые пружины более стабильны. Их деформация в широких пределах, вплоть до поломки, практически соответствует закону Гука с минимальной остаточной деформацией. Во-вторых, кварцевые пружины в гораздо меньшей степени

подвержены воздействию электромагнитного поля, изменяющего показания прибора. Тем не менее, пружины гравиметров не обладают идеальной упругостью. При нагрузке, действующей на пружину некоторое время, проявляется упругое последствие, размеры которого зависят от основной деформации и коэффициента остаточной деформации. Например, при транспортировке, вследствие резких толчков, пружина подвергается перегрузке, и нагрузка может выйти за пределы работы закона Гука. Тогда у металлических пружин появляется неупругая деформация, а кварцевые пружины могут просто оборваться. Также стабильность упругих свойств пружин нарушается необратимыми структурными изменениями материала, из которого они состоят. Это объясняется свойствами ползучести и усталости материала. Пружина с течением времени ослабевает, и понижается предел упругой деформации. Все это в конечном итоге приводит к тому, что отсчет по прибору с течением времени изменяется или, как принято говорить, происходит смещение нуля-пункта (нулевого положения системы относительно отсчетной шкалы). Характер этого смещения является основным показателем качества гравиметра. Идеальным случаем будет тот, когда смещение невелико и происходит равномерно во времени. Но даже минимальные смещения эталонной массы (груза) визуальным образом невозможно заметить невооруженным глазом. Эффект поступательного смещения груза выражается в долях микрометра, а при вращательном движении – в долях дуговой секунды. Для того, чтобы зафиксировать это малейшее смещение в гравиметрах применяются специальные устройства – индикаторы малых перемещений. Изменение величины упругой реакции пружины в ответ на изменение силы тяжести называется механической чувствительностью системы.

Общая чувствительность гравиметра зависит от механической чувствительности и чувствительности индикатора малых перемещений. При измерении система должна находиться в состоянии равновесия, т. е. сумма всех внешних и внутренних сил, действующих на систему, или сумма их моментов должна быть равна нулю [77,93,110]. Поэтому основное уравнение равновесия гравиметра записывается в следующем виде:

$$M_1(x) + g M_2(x) = 0, \quad (1)$$

где $gM_2(x)$ – сила тяжести или ее момент; $M_1(x)$ – упругая сила или ее момент; x – поступательное или угловое смещение, реакция пружинных весов на изменение силы тяжести.

В общем случае момент M_1 является функцией аргументов деформации x и температуры T , а момент M_2 функцией аргументов x , T , давления p и угла β наклона системы к горизонту. Тогда уравнение равновесия гравиметра запишется выражением:

$$M_1(x, T) + g M_2(x, T, p, \beta) = 0, \quad (2)$$

Продифференцировав по переменной x формулу (1), находим выражение для механической чувствительности, которое называется основным уравнением гравиметра (3).

$$\frac{\partial x}{\partial g} = - \frac{M_2(x)}{\frac{\partial M_1(x)}{\partial x} + g \frac{\partial M_2(x)}{\partial x}} \quad (3)$$

Если гравиметры основаны на вращательном перемещении груза, то моменты силы или сами силы, а также их производные являются функциями угла поворота x . Моменты сил могут изменяться различным образом, в зависимости от конструкции измерительной системы. Изменения в разных направлениях может приводить к различному смещению x [9,26,82]. Например, один из моментов может уменьшаться, а второй увеличиваться или оставаться постоянным. В таком случае чувствительность при различных значениях x будет принимать разные значения и будет возрастать, с уменьшением знаменателя в правой части уравнения. А при знаменателе в правой части (3), близком к нулю, система придет в состояние неустойчивого равновесия и тогда малые изменения силы тяжести будут провоцировать значительные перемещения груза, которые сможет зафиксировать даже грубый датчик малых перемещений.

1.1.3 Современные зарубежные относительные гравиметры типа Autograv CG-5

За рубежом наибольших успехов в наземном гравиметрическом приборостроении добилась компанией Scintrex Ltd. Ей была создана целая линейка наземных относительных гравиметров: CG-1, CG-3, CG-5, CG-6. Наибольшее распространение в мире, и в том числе и в России, получил наземный гравиметр CG-5 Autograv [83].

Внешний вид гравиметра показан на рисунке 1.3. Технические характеристики отображены в таблице 1.1.



Рисунок 1.3 – Относительный автоматизированный гравиметр
Autograv CG-5

Таблица 1.1 - Технические характеристики гравиметра CG-5

№	Наименование	Характеристики
1.	Тип датчика	плавленный кварц с электростатической компенсацией
2.	Точность измерения	1 мкГал
3.	Стандартное отклонение	< 5 мкГал

Продолжение таблицы 1.1

4.	Рабочий диапазон	8000 мГал, без переустановки
5.	Остаточный долговременный дрейф (статический)	менее 0,02 мГал в день
6.	Диапазон автоматической компенсации наклона	+/- 200 угловых секунд
7.	Скачок измерений	типично: меньше 5 мкГал для удара 20 G
8.	Автоматическая коррекция	Прилив, наклон прибора, температура, шумоподавление, сейсмический фильтр
9.	Размеры	30×21×22 см
10.	Вес с аккумуляторами	8 кг
11.	Емкость батарей	2×6 Ач (10 В), литиевые аккумуляторы
12.	Потребление	4,5 Вт при 25 ⁰ С
13.	Рабочая температура	от -40 до +45 ⁰ С
14.	Температурный коэффициент	0,2 мкГал/ ⁰ С (обычно)
15.	Коэффициент атмосферного давления	0,15 мкГал/кПа (обычно)
16.	Коэффициент магнитного поля	1 мкГал/Гаусс (обычно)
17.	Память	Flash- технология, 1 Мб (стандартно), расширяется до 12 Мб
18.	Часы реального времени	внутренние: выдают день, месяц, год, часы, минуты, секунды
19.	Цифровой вход	Последовательный интерфейс RS-232 и USB
20.	Дисплей	¼ VGA 320×240
21.	Клавиатура	27 клавиш

Наземные гравиметры компании Scintrex Ltd имеют кварцевую неастирированную измерительную систему [29, 81]. Измерение проводится методом компенсации: сила тяжести, действующая на эталонную массу, уравновешивается кварцевой пружиной и небольшим по величине электростатическим полем, возникающим между грузом и специальной клеммой, расположенной ниже него. Под действием силы тяжести груз отклоняется от начального положения и к нему прилагается возвратный потенциал электростатического поля, приводящий груз в исходное положение.

Противоположно направленная электростатическая сила, приложенная для компенсации изменения силы тяжести, численно и равна этому изменению. Таким образом, напряжение в цепи обратной связи является мерой изменения силы тяжести (рисунок 1.4).

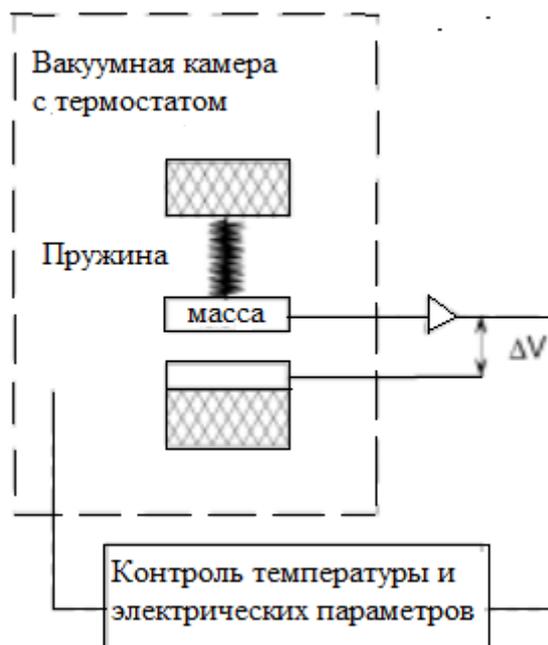


Рисунок 1.4 – Структурная схема механической чувствительной системы современного относительного гравиметра CG-5

Гравиметр CG-5 автоматизирован, показание получается путем постоянного осреднения замеров, снимаемых с частотой 6 Гц. Оператор управляет прибором используя клавиши на верхней панели. Результаты отдельных измерений отображается на дисплее непосредственно в мГал. Очень высокую разрешающую способность имеет «емкостной» датчик малых перемещений, что позволяет убрать необходимость применять астазирование в данной схеме. Поскольку нет необходимости постоянно удерживать рычага с грузом в положении, близком к неустойчивому равновесию, отпадает необходимость и в перестройке диапазона, как следствие отсутствует диапазонная пружина или рычажная система. В процессе изготовления измерительной системы среднее положение пружины датчика регулируется таким образом, чтобы соответствовать относительному приращению

силы тяжести в Торонто, равному 4200 мГал, по отношению к экваториальному значению. Гравиметр является широкодиапазонным. Ширина диапазона измерений в 8000 мГал позволяет измерять приращения силы тяжести в любой точке земного шара без перестройки [30]. Заявленный срок эксплуатации пружины в нормальном режиме составляет 10 лет, после чего возможна потеря упругих свойств, обусловленных старением пружины. Однако опыт показывает, что при бережном отношении к приборам аппаратура может служить гораздо дольше установленных сроков.

В конструкции гравиметра предусмотрена система пассивного закрытого теплоизолирующего слоя и активного термостата для защиты от перепадов температуры. Сигнал об изменении температуры поступает от чувствительного датчика, расположенного в месте теплового контакта с главной пружиной. Остаточное влияние температурной разницы корректируется с помощью математической поправки в программном обеспечении гравиметра. Также имеется механизм для защиты от перепадов атмосферного давления - вакуумная камера. Вводом соответствующей поправки в гравиметр можно учитывать линейный долговременный дрейф нуль-пункта системы, а также влияние угла отклонения системы от вертикали и лунно-солнечного прилива. Остаточный дрейф нуль-пункта учитывается методическим путем, аналогично остальным гравиметрам, т. е. последующим вводом поправки за смещение нуль-пункта на этапе текущей обработки данных измерений. Чувствительность датчика данной модели гравиметра Autograv CG-5 к изменению силы тяжести составляет 1 мкГал (восьмой знак после запятой ускорения свободного падения). Среднеквадратическая погрешность измерений на стенде в неподвижном режиме, характеризующая повторяемость отсчетов, составляет 5 мкГал. В ходе гравиметрических измерений относительная погрешность сухопутного относительного гравиметра CG-5 составляет примерно 0,00002 %, без учета возмущающих ускорений [32,83]. Все это позволяет использовать Autograv CG-5 как для подробных полевых исследований, так и для крупномасштабных региональных или детальных гравиметрических съемок.

К сожалению, в России сухопутные гравиметры с такой отсчетной погрешностью не производятся. Поэтому принято решение для эксперимента в диссертационной работе использовать именно относительные гравиметры Autograv CG-5.

Но, несмотря на высокие технические параметры современных гравиметров, реальная точность гравиметрических съемок не достигла «микрогального» уровня. Это обусловлено тем, что для эффективного использования современных «микрогальных» гравиметров необходимо изменить и улучшить прежние стандартные подходы в методике полевых гравиметрических съемок.

1.2 Общие характеристики методики гравиметрических работ

При проведении гравиметрической съемки возможно выполнение нескольких типов работ, каждый из которых обеспечивается своей аппаратурой. Первый вид – топогеодезические работы, необходимые для планово-высотной привязки гравиметрических пунктов и для формирования детальной модели рельефа земной поверхности в пределах участка работ, если это того требует. Второй вид работ – собственно гравиметрические измерения на каждом пункте сети наблюдений.

В данной диссертационной работе *влияние погрешностей геодезической аппаратуры и топогеодезической съемки при ее использовании детально не рассматривалась.*

Любая гравиметрическая съемка выполняется по определенной методике измерений, для каждого типа работ она различна, но имеет общую цель. Цель любой методики – это устранение тех или иных отрицательных свойств или особенностей измерительной аппаратуры [23].

В диссертационной работе использовались измерения силы тяжести с помощью относительных гравиметров. Особенностью относительных измерений является определение приращения силы тяжести (ускорения свободного падения) между отдельными пунктами измерений и заданной опорной точкой или

несколькими такими точками. Полное значение силы тяжести на опорной точке предполагается известным и стабильным в течение длительного периода времени.

Инструментальной особенностью относительных гравиметров является наличие нуль-пункта, то есть смещения нуля измерительной шкалы прибора. В связи с этим все полевые измерения начинают и заканчивают на пунктах с известным значением силы тяжести («метод замкнутых петель») [97,107,109]. В случае учета нелинейности дрейфа нуль-пункта необходимо выполнять наблюдения на нескольких пунктах с известной силой тяжести или использовать другой способ, предложенный в данной диссертации.

Рассмотрим более детально методику относительных гравиметрических измерений. Под методикой гравиметрических работ понимают выбор метода и аппаратуры, осуществление комплекса операций для изучения поля силы тяжести с такой точностью, которая обеспечила бы выявление ожидаемых аномалий и решение поставленной геофизической задачи [13,22,24,44].

По технологии работ гравиметрическую съемку подразделяют на полевые (наземные), морские, воздушные, подземные и скважинные гравиметрические, а также вариометрические наблюдения. В данной работе рассмотрена только наземная гравиметрическая съемка.

По решаемым геофизическим задачам и масштабу съемок различают региональные съемки, проводимые на суше и море в масштабах 1:200 000 и крупнее. Они предназначены для получения сведений о глубинном строении крупных территорий. Выполняются и детальные (поисково-разведочные) съемки, обеспечивающие построение карт в масштабах от 1:100 000 до 1:10 000 и направленные на выявление перспективных структур, а также поиск, разведку и уточнение границ непосредственно самих месторождений, вплоть до их прогноза, в частности, их нефтегазоносности [10,63,84]. *В настоящее время наземные гравиметрические съемки имеют погрешности, лежащие в пределах от 0,05 мГал до 0,1 мГал.*

1.2.1 Общие положения методики наземной гравиметрической съемки

Основным методом гравиметрической разведки является наземная гравиметрическая съемка, проводимая с помощью гравиметров. Полевые гравиметрические съемки бывают автомобильными, пешеходными и авиадесантными, но последний метод осуществлялся с помощью вертолета и больше практиковался в прошлом веке. В зависимости от масштаба съемки и способа транспортировки гравиметров наблюдения могут выполняться в нескольких десятках пунктов за одну смену.

По характеру расположения точек наблюдения на исследуемой площади гравиметрическая съемка разделяется на профильную (маршрутную) и площадную. Маршрутную съемку выполняют по отдельным профилям (маршрутам), которые задают «вкрест» предполагаемого простираения изучаемых объектов. Ее чаще применяют при топографических и поисковых работах.

Самым популярным и основным видом гравиметрических съемок является площадная съемка, при которой весь район исследований практически равномерно покрывают гравиметрическими наблюдениями. Точки наблюдения задают как правило по системе профилей, которые выбирают прямолинейными и направленными «вкрест» предполагаемого простираения изучаемых объектов. Профили имеют протяженность в 5—10 раз превышающую поперечные размеры искомым объектов (рисунок 1.5). Расстояния между профилями d должны быть, по крайней мере, в 3 раза меньше продольных размеров L разведываемых структур и объектов ($d < 0,3L$) для того, чтобы аномалия гравитационного поля от них фиксировалась на трех и более соседних профилях. В дальнейшем это позволяет по аномалиям в плане установить простираение искомым объектов. Шаг по профилю Δx , то есть расстояние между соседними точками наблюдения, задают, исходя из поперечных размеров разведываемых объектов и структур l , и он должен составлять $\Delta x < 0,3l$, что необходимо для получения четкого аномального гравиметрического эффекта не менее чем на трех точках каждого профиля.

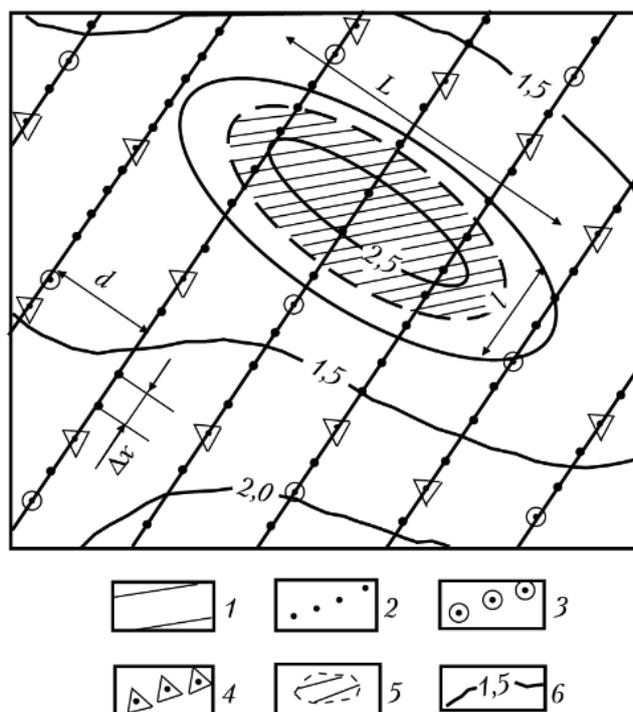


Рисунок 1.5 – Схема расположения точек наблюдения и карта аномалии при гравиметрической съемке: 1 — профили; 2—4 — рядовые, опорные и контрольные точки наблюдения; 5 — предполагаемое простираение искомого геологического объекта; 6 — изоаномалы Δg

Площадная съемка может быть равномерной, т.е. расстояния между профилями и пунктами наблюдения по профилю примерно одинаковы и применяется если изучаемые структуры или объекты изометричны в плане, или неравномерной, если они вытянуты. Масштаб гравиметрической съемки определяется, прежде всего, густотой точек наблюдения и предельными расстояниями между ними. Максимальное расстояние между пунктами наблюдения, соответствующее расстоянию между профилями, не должно превышать 1 см результирующей карты, и это определяет масштаб съемки. Например, при съемке масштаба 1:100 000 расстояния между профилями на местности должны составлять примерно 1 км. Густота сети определяется требованиями инструкции по гравиметрической съемке.

Следует отметить, что с появлением точной измерительной аппаратуры требования к точности работ существенно возросли. В настоящее время реально

достижимая на практике среднеквадратическая погрешность определения наблюдаемых значений при масштабах съемки 1:50 000 и 1:5 000 не превышает $\pm 0,02 - 0,03$ мГал, а для съемок крупнее 1:10 000 - не более $\pm 0,01 - 0,02$ мГал [76].

1.2.2 Высокоточная государственная гравиметрическая сеть

При выполнении гравиметрических съемок создают сеть опорных пунктов – то есть гравиметрических пунктов повышенной точности, служащую для учета смещения нуль-пункта в рядовых рейсах и передачи абсолютного значения Δg на рядовые пункты. Полевую опорную сеть привязывают к государственной опорной сети I и II классов, где известно абсолютное значение силы тяжести.

Высокоточная государственная гравиметрическая сеть представляет собой совокупность закрепленных на местности и «гравиметрически» связанных между собой пунктов, на которых выполняют относительные или абсолютные измерения ускорения силы тяжести и осуществляют определение высот и координат этих пунктов. Она подразделяется на государственную фундаментальную гравиметрическую сеть (ГФГС) и государственную гравиметрическую сеть 1 класса (ГГС-1).

По современным требованиям средняя квадратичная погрешность измерения силы тяжести составляет – на пунктах ГФГС – 0,008-0,010 мГал, на пунктах 1 класса – 0,03 мГал [31,48,49].

ГФГС является высшим звеном гравиметрической сети России и служит для определения и уточнения гравиметрической системы страны, ее связи с мировой и зарубежными гравиметрическими системами, для метрологического обеспечения гравиметрических сетей низших классов и гравиметрических съемок России. Одним из пунктов этой сети является фундаментальный гравиметрический пункт «Ледово» (ИФЗ РАН), на котором, в том числе, проводились экспериментальные измерения, описанные в данной диссертации.

Для обеспечения максимально возможной точности измерений и долговременной сохранности фундаментальный пункт «Ледово» разместили в

капитальном здании, рассчитанном на длительную эксплуатацию. Для наблюдений создали наиболее благоприятные условия (устранение внешних влияний, например, температурных, вибрационных и др.) и применили наиболее совершенную аппаратуру и методы измерений.

На каждом фундаментальном пункте выполняют абсолютные и относительные измерения ускорения силы тяжести, а также определение координат и высот пунктов. Кроме того, на пунктах ГФГС определяют уровень грунтовых и подземных вод и влагонасыщенности почвы. Информацию о гидрологическом режиме получают либо от специализированных организаций, либо выполняют эти наблюдения самостоятельно вблизи от пункта наблюдения.

Пункты ГФГС служат исходными при развитии гравиметрических сетей низшего класса.

Основной научной задачей, решаемой с помощью ГФГС, является изучение изменений гравитационного поля во времени, а также развитие гравиметрических сетей низшего класса.

С этой целью на фундаментальных пунктах (ФП), размещаемых в различных геолого-тектонических регионах, систематически выполняются абсолютные и относительные определения ускорения силы тяжести с максимально возможной на данный момент точностью.

Повторные определения (в соответствии с инструкцией по развитию высокоточной гравиметрической сети России) на пунктах ГФГС должны осуществляться по мере необходимости, но не реже чем один раз в 5-8 лет, либо после сильных землетрясений, извержений вулканов, или других явлений в районе ФП, способных вызвать изменение ускорения силы тяжести.

ГГС-1 предназначена для распространения с требуемой точностью принятой гравиметрической системы на всю территорию страны. Одним из таких пунктов является созданный гравиметрический пункт 1 класса - «Запольское», расположенный на территории загородного полигона Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. Марка гравиметрического пункта «Запольское», изображённая на рисунке 1.6, привязана

с точностью до первых сантиметров по координатам и высоте и с точностью первых мкГал к фундаментальному пункту Москвы - «Ледово». На постаменте гравиметрического пункта «Запольское» выполнены необходимые измерения с помощью баллистических и относительных гравиметров [1].

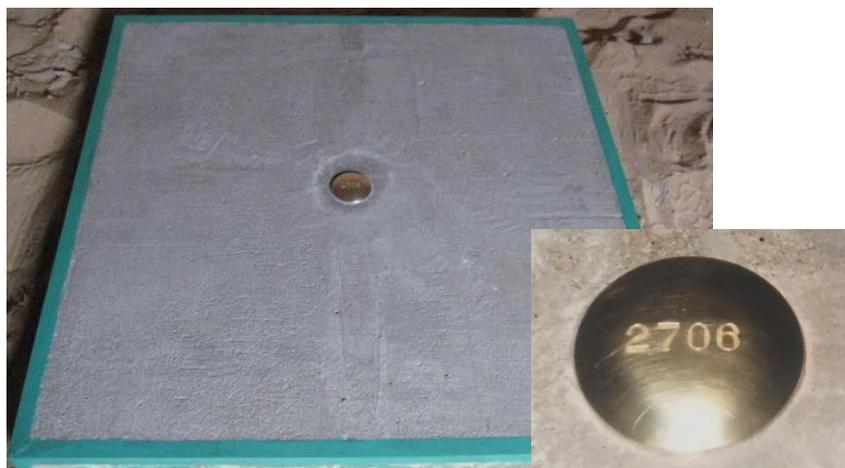


Рисунок 1.6 – Фото центрального постаmenta геофизической обсерватории и марка гравиметрического пункта первого класса «Запольское»

Полевую гравиметрическую сеть привязывают к государственной гравиметрической сети либо создается для ее проведения опорный пункт с помощью баллистических гравиметров. Проведение съемки в условном уровне разрешено инструкцией только для отдельных профилей длиной менее 20 км, а также площадных съемок масштабов 1:25 000 и крупнее на площадях менее 70 км² без перспектив их наращивания. В этом случае для крупномасштабной съемки должна быть повышена точность до 0,1 мГал и лучше.

Рядовая сеть — сеть гравиметрических пунктов (ГП), значения силы тяжести на которых определяются в процессе гравиметрической съемки. Рядовые пункты располагаются между пунктами опорной сети. При выполнении наземной гравиметрической съемки использовать один прибор нельзя, так как проводятся относительные измерения. Для улучшения точности измерений необходимо использовать комплекс относительных гравиметров из двух или трех однотипных приборов, чтобы оценить внутреннюю сходимость внутри комплекса этих

гравиметров. Отдельно погрешность съемки оценивается по среднеквадратической погрешности разностей показаний комплекса гравиметров в точках пересечения профилей.

1.3 Аппаратные погрешности, влияющие на точность выполнения гравиметрической съемки. Комплекс геофизической аппаратуры.

Основные положения методики гравиметрических съемок в системе бывшего Министерства Геологии, ныне Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России), были разработаны в 50-70-х годах прошлого века. Они соответствовали техническому уровню гравиметрических измерений того времени и до сих пор не изменились, хотя с тех пор существенно повышена инструментальная точность гравиметров, появились новые технические средства для метрологических исследований и разработана методика эталонирования высокоточных гравиметров [Веселов, 1980]. Особенно актуальной стала проблема метрологического обеспечения в последние годы в связи со значительным (на порядок) повышением инструментальной точности гравиметров. Если раньше гравиметрическая наземная съемка требовала точность на уровне 0,5-0,7 мГал [46,47], то в настоящем времени требуется крупномасштабная съемка с точностью 0,1 мГал и лучше [86], что вынуждает улучшать методику и результат измерений наземной гравиметрической съемки. *При проведении некоторых съемок требуемая погрешность должна достигать 0,05 мГал. В будущем эта погрешность должна быть уменьшена, что позволит лучше отслеживать высокие частоты аномалий. Целесообразно ее уменьшать до погрешностей баллистических гравиметров, лежащих в пределах от 8 до 15 мкГал.*

Многолетний накопленный опыт [8,10,51,57,65,75,79,87] наземных гравиметрических измерений позволяет определить виды погрешностей гравиметрических измерений и предложить пути уменьшения влияния или минимизации этих погрешностей. Учет этих погрешностей позволяет сформулировать ряд предложений в методику наземной гравиметрической съемки.

Погрешности, возникающие при гравиметрических измерениях можно разделить на две группы [48,21].

Во-первых, на погрешности, вызванные внешними факторами, воздействующими на измерительную систему гравиметра.

Во-вторых, на погрешности измерений, возникающие в результате временного изменения силы тяжести на точке измерения. К ним относятся лунно-солнечные приливные эффекты, изменение масс атмосферы над точкой измерения, приводящее к изменению давления, а также сейсмические и микросейсмические события.

Первая группа погрешностей тесно связана с конкретным прибором, а вторая группа не зависит от прибора и должна быть измерена, вычислена с высокой точностью и в виде поправки введена в показания гравиметра.

Методика проведения гравиметрической съемки подразумевает учет многих составляющих, влияющих на результат измерения.

На рабочий режим упругой системы гравиметра влияют различные внешние и внутренние факторы (рисунок 1.7).

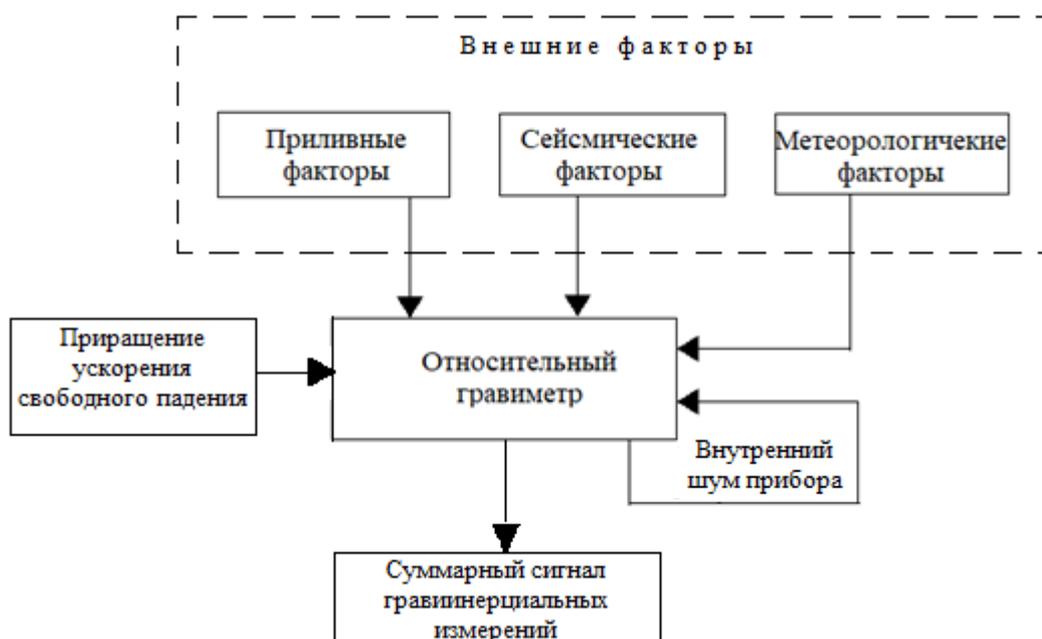


Рисунок 1.7 – Факторы, влияющие на функционирование относительного гравиметра

Внутренние факторы определяются качеством изготовления самой системы и физическими характеристиками ее материалов. Внутренние факторы после изготовления системы уже невозможно изменить. Под внешним воздействием подразумевается воздействие на гравиметр окружающей среды. Изменения внешних условий нарушают стабильность работы упругой системы [55,59].

Дрейф нуля-пункта гравиметра. Рассматриваемые относительные гравиметры имеют одну особенность, не присущую маятниковым и баллистическим приборам – сползание нуля-пункта гравиметра (дрейф его нуля). Сползание нуля-пункта – это разность двух отсчетов, выполненных в разное время в одной и той же точке, в которые введены все необходимые поправки за влияние всех внешних факторов (лунно-солнечные вариации, влияние температуры, возможное влияние магнитных полей и т.д.). Как правило, сползание нуля-пункта обусловлено усталостью материала упругого элемента чувствительной системы гравиметра. Изменение деформации чувствительной системы возможно зависит от режима, в котором находится в данный момент и находился ранее упругий элемент. Чтобы рассчитать сползание нуля, исходное и конечное наблюдения в каждом гравиметрическом рейсе должны производиться на одном и том же пункте или на пунктах с известными значениями силы тяжести. Полученную разность отсчетов считают линейной и «разбрасывают» пропорционально времени измерения по всем пунктам [25,45,58,67]. Однако экспериментальные исследования показали, что не всегда такая зависимость является линейной [80,102]. От чего это зависит и как учитывать нелинейный дрейф нуля-пункта гравиметра будет рассмотрено в последующих разделах данной диссертационной работы.

Учет гравиметрического влияния рельефа местности. В ходе выполнения гравиметрической съемки и получения гравиметрических карт в аномалиях Буге обязательно должна быть учтена поправка за рельеф. Многие авторы [12,14,19,28,35,36,56,64] занимаются методиками учета рельефа, в том числе в Пермском горном институте. В данной диссертационной работе учет поправки за влияние рельефа детально не рассматривался.

Рассмотрим возможные погрешности, вызванные внешними факторами, воздействующими на измерительную систему гравиметра и измеряемые аппаратурой геофизического комплекса.

Влияние изменения температуры окружающей среды. Влияние температурных ударов. Как правило, относительный гравиметр содержит термостат с конкретным коэффициентом термостатирования. Возможности термостата не безграничны и колебания внешней температуры в той или иной степени действуют на чувствительный элемент гравиметра. В современных гравиметрах Autograv CG-5 применяется термостатирование системы. Один датчик отслеживает изменения внешней температуры на корпусе прибора, второй – вблизи упругой системы, а термостат поддерживает постоянную внутреннюю температуру. Следует помнить, что при нормальной теплоизоляции и естественном изменении температуры в рейсе внутренняя температура изменяется со скоростью, не превышающей нескольких десятых долей градуса в час. Любое температурное изменение на чувствительном элементе или тепловой удар дает погрешность гравиметрических измерений. Для того, чтобы обеспечить нормальный съем информации с чувствительного элемента, необходимо оценить влияние перепада температуры при смене пункта наблюдения, что позволит повысить точность измерений.

Учет изменения атмосферного давления. Одним из основных метеорологических факторов, влияющим на гравиметрические измерения является изменение атмосферного давления. Отсчетная погрешность приборов, используемых для измерения атмосферного давления на равнинной местности, составляет 1 мм.рт.ст при динамическом диапазоне в 80 мм.рт.ст.

Формула пересчета изменения давления в изменение ускорения силы тяжести (согласно Инструкции по эксплуатации сухопутного гравиметра CG-5) следующая:

$$dGp = 0,4 * dP \quad (4)$$

где dGp – изменение ускорения сил тяжести в мкГал, а dP – изменение давления в мм. рт. ст.

В этом случае отсчетная погрешность в 1 мм.рт.ст. приводит к погрешности 0,4 мкГал. В инструкции по работе с относительным гравиметром [83] не приведена оценка влияния давления на каждый относительный гравиметр из комплекса гравиметрической аппаратуры в отдельности. А также отсутствуют оценки переходных процессов при смене пунктов наблюдения.

Учет изменения влажности окружающей среды. В Инструкциях по эксплуатации относительных наземных гравиметров не приведены оценки по влиянию уровня влажности на погрешность гравиметрических измерений. В литературе [101] были проведены исследования по возможному влиянию изменения влажности на гравиметрические измерения, однако они не дали практического результата. В данной диссертации проведен дополнительный эксперимент по учету влажности.

Сейсмические события и микросейсмы. Различного рода сейсмические события оказывают влияние на гравиметрические измерения. Микросейсмические колебания воспринимаются корпусом гравиметра и, соответственно, передаются измерительной системе. Измеренный сигнал относительного гравиметра содержит помимо полезного сигнала сигналы инерциальных помех в виде микросейсмических колебаний. Обычно это малоамплитудные периодические колебания в диапазоне смещений 1–10 мкм и ускорений в десятые доли миллигал, имеющие период от сотых долей секунд до их десятков. Результаты прежних исследований отечественных гравиметров показали зависимость показаний приборов от периода и от амплитуды колебаний. При вибрациях в узких полосах частот свыше 30 Гц наблюдались резонансные явления – отклонения измерительной системы от исходного положения на величину, соответствующую приращению силы тяжести в десятые доли, а иногда и в первые единицы миллигал. В литературе [16,62,66,88,89,91,108] приводится такая оценка: при микросейсмах с периодом в доли или в первые единицы секунд возможны резонансные колебания измерительной системы гравиметра, приводящие к значительным искажениям

показаний и для получения достоверного полезного сигнала, необходимо учитывать сейсмическую составляющую. Амплитуды сейсмических и техногенных помех может достигать 1 мГал и более [82]. В настоящее время в методике проведения наземной гравиметрической съемки **отсутствуют рекомендации** по оценке точности измерений при микросейсмических и сейсмических событиях, что является неотъемлемым фактором при достижении требуемой точности. В данной диссертационной работе проводились многочисленные экспериментальные исследования совместно с использованием сейсмостанции UGRA. Эти исследования детально описаны в последующих главах.

Учет приливных явлений. Лунно-солнечные приливные явления, оказывающие периодическое воздействие на гравитационное поле Земли достаточно хорошо изучены. Теоретическое значение лунно-солнечного приливного воздействия на показания гравиметра можно вычислить по известным формулам. В ходе работы гравиметра данное воздействие, лежащее в пределах 240 мкГал, регистрируется и при обработке учитывается [7,74,112].

Выводы по материалам главы 1

1. Современные потребности гравиметрических измерений с погрешностью 1 мкГал обуславливают учет целого ряда факторов, которые ранее детально не рассматривались. Уменьшение погрешности позволяет выполнять более крупномасштабные гравиметрические съемки и решать ряд прикладных задач.

2. Высокая точность измерений современных гравиметров позволяют расширять область их применения. Так, например, в последнее время получил большое распространение гравиметрический мониторинг относительными гравиметрами при оценке, разработке и эксплуатации нефтегазовых месторождений.

3. В настоящее время созданы и серийно выпускаются гравиметры с потенциальной точностью порядка 1 мкГал, что существенно выше уровня помех,

влияющих на точность определения силы тяжести. Учет этих помех позволит приблизиться к потенциальной точности гравиметров при выполнении гравиметрических измерений.

4. Погрешности измерений, вызванные внешними факторами, такими как приливы, вариации атмосферного давления, скачки внешней температуры, сейсмические события и т.д., воздействующими на измерительную систему гравиметра необходимо рассчитывать индивидуально, учитывая особенности каждого прибора.

5. Погрешности измерений, обусловленные продолжительным изменением силы тяжести на точке измерения и не зависящие от конкретного гравиметра, должны быть измерены независимыми средствами, вычислены с высокой точностью и в виде поправок введены в показания гравиметра.

Глава 2 Методические приемы повышения точности относительных гравиметрических наблюдений с помощью использования сейсмической информации

При выполнении наземной гравиметрической съемки на измерения влияют ряд возмущающих факторов, один из них - это сейсмические события и микросейсмические колебания поверхности, на которой установлен относительный гравиметр. Сейсмические события, также, как и микросейсмические колебания, влияют на данные с гравиметра, в связи с этим, погрешность гравиметрических измерений увеличивается. Необходимо проанализировать это влияние и ввести ряд поправок для достижения требуемой точности измерений.

2.1 Взаимосвязь сейсмических и гравиметрических данных

В каждой точке поверхности Земли всегда присутствуют микросейсмические волны. Они непрерывно создают колебания как в верхних, так и более глубоких частях Земной коры, что дает возможность для получения информации об особенностях структуры и параметрах геологических объектов. Микросейсмическое поле создается разными источниками, от которых зависят его амплитудные и частотные характеристики. Можно выделить следующие частотные границы и источники, которые создают микросейсмическое поле. В диапазоне 0.001—0.01 Гц источником микросейсм предположительно являются изменения атмосферного давления. В диапазоне 0.01—(0.2—0.3) Гц основным источником считаются штормы в северных областях Атлантического и Тихого океанов. Выше 0.2—0.3 Гц в качестве доминирующего источника рассматривается локальная метеорологическая активность; выше 1 Гц существенное влияние оказывают искусственные источники (антропогенная деятельность) [16].

Многие исследователи [6,16,42,53,62,91,98,100,115] занимались изучением микросейсмических колебаний, возникающих в земной коре под воздействием атмосферных или сейсмических процессов в различном частотном диапазоне. В продолжении этой темы рассмотрим возможность сопоставления сейсмической и гравиметрической информации с целью повышения точности гравиметрических наблюдений.

При проведении долговременных гравиметрических измерений относительным гравиметром Autograv CG-5 регистрируется различный уровень помех. Для оценки величины стороннего шума в гравиметрических данных, используется среднеквадратическое отклонение (СКО). СКО является мерой «зашумленности» инерциального сигнала во временном диапазоне 0.17...57с (в частотном диапазоне 0,017 Гц – 6 Гц) при периоде регистрации 1 минута, и обусловлено как внутренними шумами прибора, так и внешними условиями наблюдения.

Рассмотрим пример долговременных измерений относительным гравиметром и наглядно увидим характер «зашумленности» в разные периоды. Ряд СКО за полугодовой период наблюдения с 06 июня по 10 декабря представлен на рисунке 2.1. Как видно из графика на рисунке 2.1 характер зашумленности измерений зависит от времени года. В летние месяцы измерения имеют наиболее стабильный характер. Это вызвано достаточно стабильными погодными условиями, обусловленными отсутствием мощных циклонов. Начиная с октября появляется активная циклоническая деятельность, которая приводит к мощным атмосферным фронтам, резким изменениям атмосферного давления, сильным штормам в прибрежных европейских морях и морским прибоем в акватории Мирового океана. В эти периоды наблюдается повышенная зашумленность гравиметрических измерений до 0,1 мГал, несмотря на то, что пункты наблюдения находятся в центральной части России и достаточно далеко от источников штормов и прибоев.

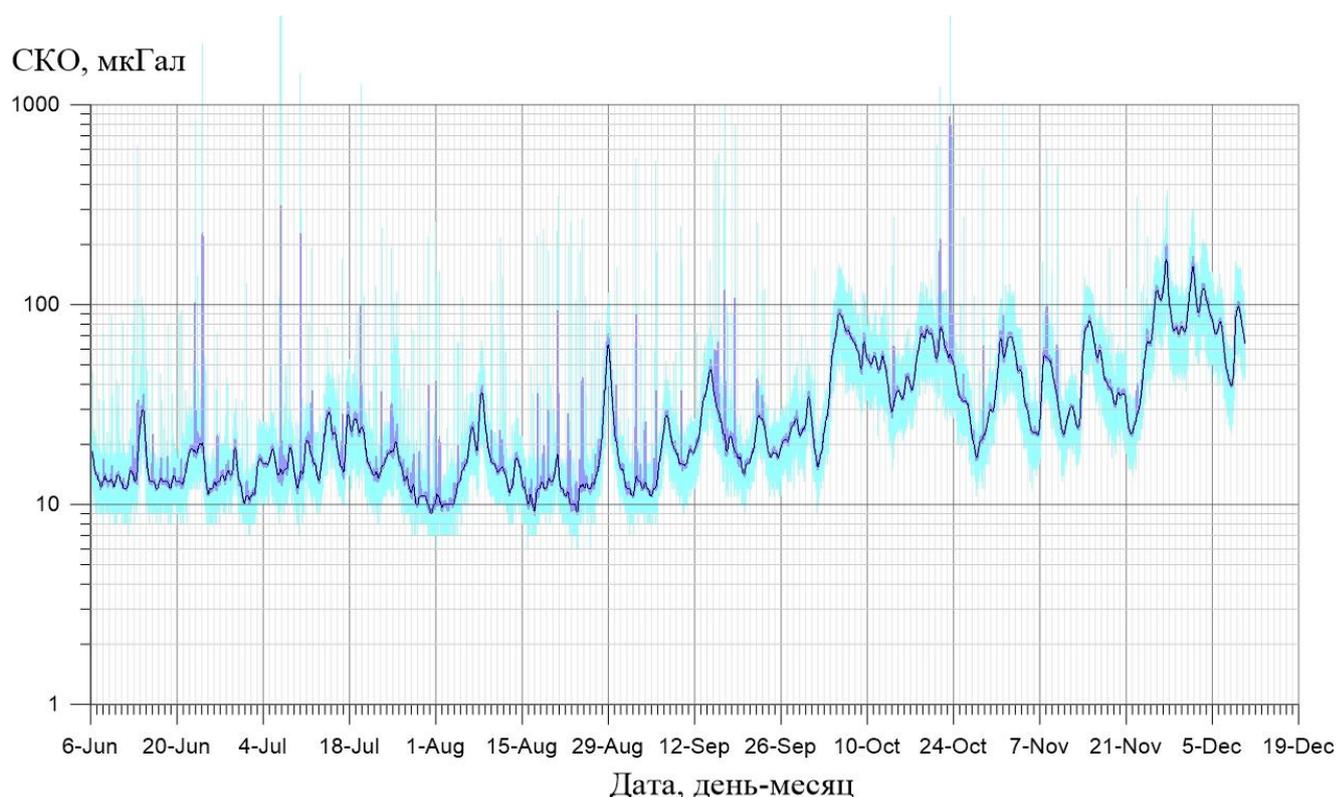


Рисунок 2.1 – Шумовая характеристика долговременных гравиметрических наблюдений (СКО)

Одновременно с гравиметром работала широкополосная цифровая автоматическая сейсмическая станция «UGRA» (рисунок 2.2), которая предназначена для проведения региональных и телесеизмических наблюдений в стационарных условиях. Сейсмостанция регистрировала сейсмическое воздействие. Основные параметры и характеристики станции соответствуют всем требованиям, предъявляемым Геофизической службой РАН к регистрирующей аппаратуре для мониторинга сейсмических явлений на Земле. Станция обеспечивает работу в автономном режиме с записью трех компонент реализаций сейсмических процессов в системе единого времени GPS. Частотный диапазон регистрации микросейсм 0,1 Гц – 10 Гц [92,96].



Рисунок 2.2 – Комплект сейсмической станции «UGRA»

В ходе экспериментальных исследований 27 ноября вертикальным каналом сейсмостанции был зафиксирован шторм у побережья Норвегии, спектр которого имеет максимум на частоте около 0,2 Гц (рисунок 2.3), что характерно для морского прибоя с периодом волны около 4–5 секунд.

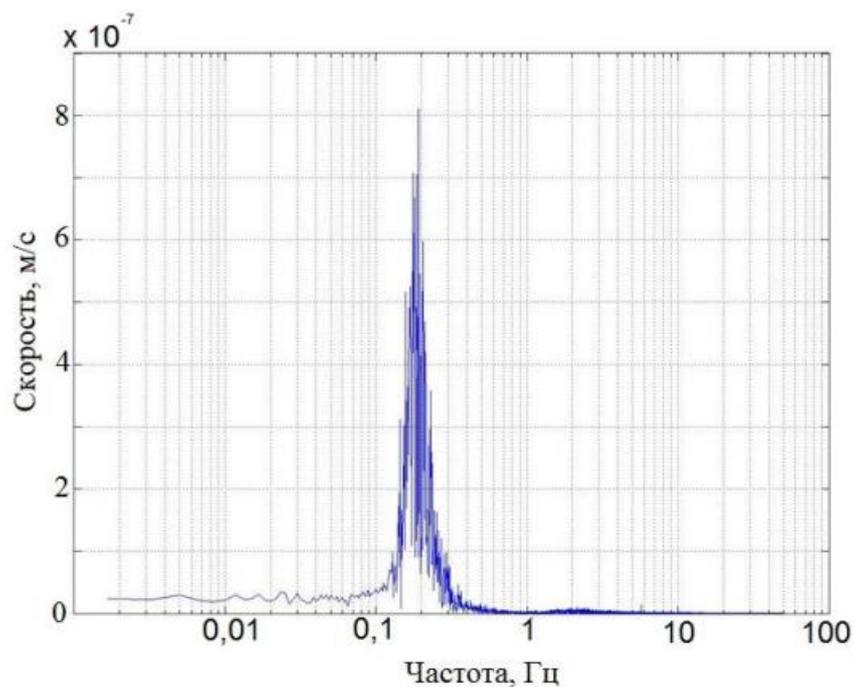


Рисунок 2.3 – Спектр сигнала вертикального канала сейсмостанции UGRA в условиях штормового воздействия 27 ноября

Следовательно, если гравиметр среагировал на микросейсмы, связанные с деятельностью циклонов и штормов, то, вероятно, имеется взаимосвязь информации в сейсмических и гравиметрических данных. А значит, гравиметрический сигнал содержит информацию о сейсмических данных и в более низком частотном диапазоне (меньше 0,1 Гц), чем может регистрировать сейсмостанция.

При выполнении производственных гравиметрических работ измерения на каждой точке выполняются ограниченное технологическим процессом время. Повышенный фон сейсмических данных можно рассматривать как погрешность гравиметрических измерений, что приводит к необходимости увеличения продолжительности наблюдений на каждом гравиметрическом пункте для сохранения уровня точности съемки. Также СКО измерений позволяет определить продолжительность наблюдений для получения значения приращения силы тяжести с заданной точностью.

2.2 Оценка влияния сейсмических событий на показания гравиметра

В периоды гравиметрических наблюдений основным сейсмическим возмущающим фактором являются землетрясения. Ежедневно на Земле происходят сотни землетрясений разной интенсивности, в разных точках планеты.

Например, рассмотрим реакцию приборов на землетрясение, произошедшее 26 мая 2019 года в 78 км к юго-востоку от Лагунас в Перу. Оно было зарегистрировано как сейсмометром, так и относительным гравиметром CG-5 Autograv, установленными постаменте в обсерватории «Запольское» на территории Владимирской области.

На рисунке 2.4 представлена сейсмограмма, полученная сейсмической станцией UGRA.

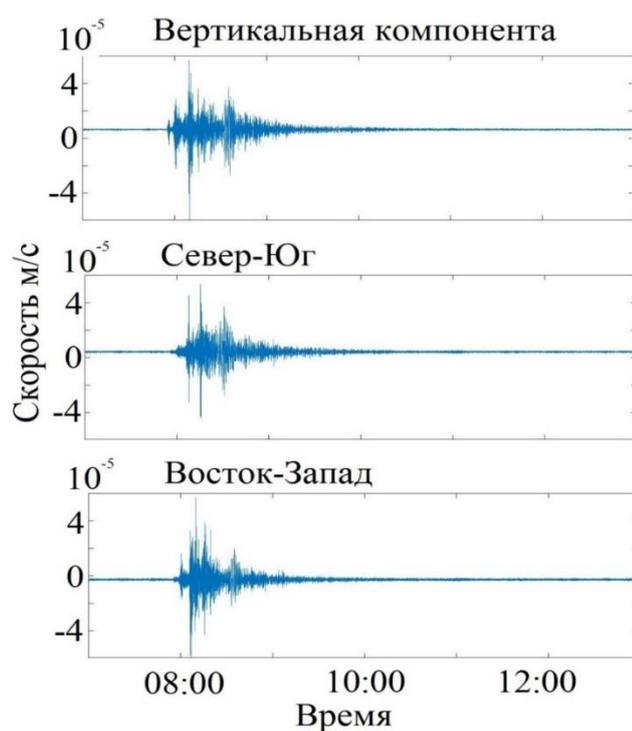


Рисунок 2.4 – Сейсмограмма землетрясения 26 мая 2019 года

На рисунке 2.5 представлены показания гравиметра, зарегистрировавшего реакцию земной коры на это землетрясение в точке наблюдений. Показания относительного гравиметра изображены линией (а), его СКО линией (б).

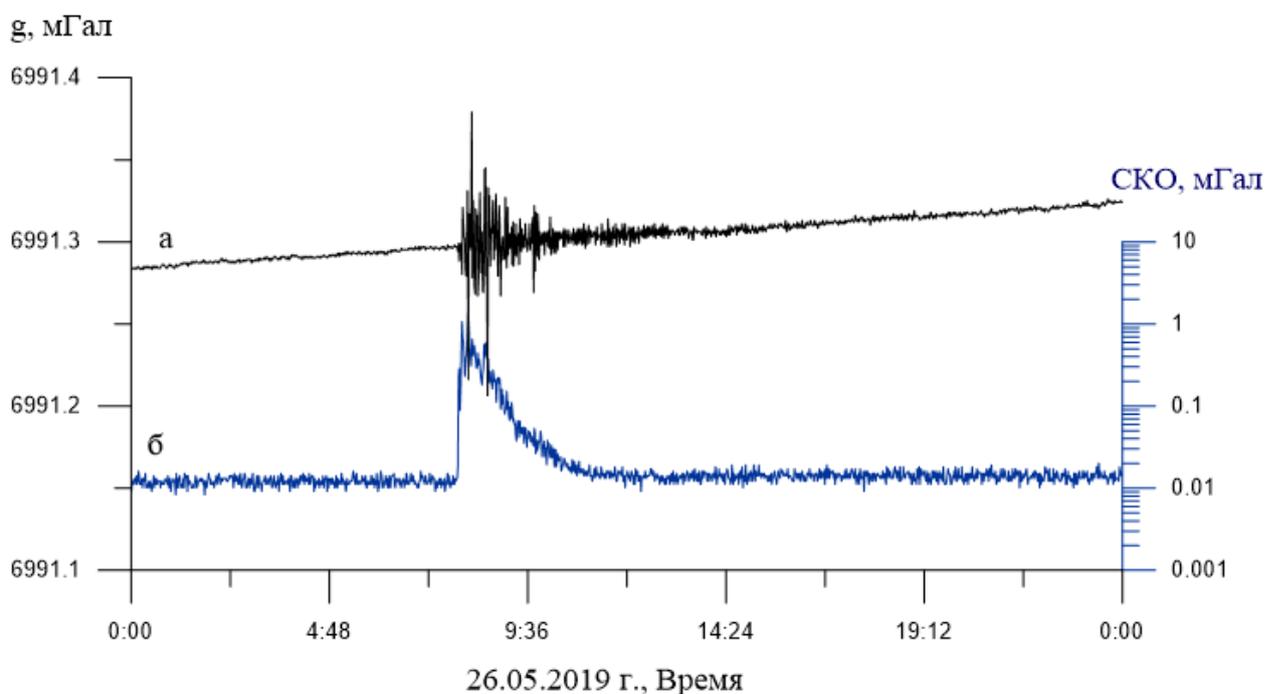


Рисунок 2.5 – Данные с гравиметра: показания относительного гравиметра (а); СКО измерений относительного гравиметра (б)

Из рисунка 2.5 хорошо видно, что к фоновому уровню СКО измерений гравиметра CG-5 добавляется значительная помеха, вызванная землетрясением. Из результатов определения СКО измерений гравиметра CG-5 на графике можно выделить моменты прихода продольной волны, отраженных продольных волн, поперечной волны и поверхностных волн. Полученные результаты согласуются с данными сейсмической станции UGRA.

Сопоставим полученные гравиметрические и сейсмические данные. Для этого рассчитаем погрешность гравиметрических измерений, и сравним ее с СКО, полученным по данным сейсмостанции.

Погрешность гравиметрического измерения (амплитуда) определялась путем компенсации дрейфа относительного гравиметра (вычитанием аппроксимирующей прямой). Затем выделялись пиковые значения полученного сигнала в окне, равном 5 минутам, с последующим сдвигом этого окна на шаг, равный 1 отсчету. Далее проводилась фильтрация полученных максимальных значений апериодическим звеном с постоянной времени 5 минут. Компенсация фазовых искажений осуществлялась путем повторения данной процедуры в обратном времени. Аналогичные действия проводились с минимальными значениями. Среднее значение модуля принято в качестве оценки погрешности измерения dg [2].

СКО по дифференцированным данным сейсмостанции высчитывается по алгоритму аналогичному алгоритму гравиметра.

На рисунке 2.6 представлены значения СКО, полученные по данным сейсмостанции UGRA и погрешность значений измерений гравиметра CG-5.

Характерно, что погрешность измерений гравиметра практически совпадает с СКО ускорений, зарегистрированных вертикальным каналом сейсмостанции UGRA.

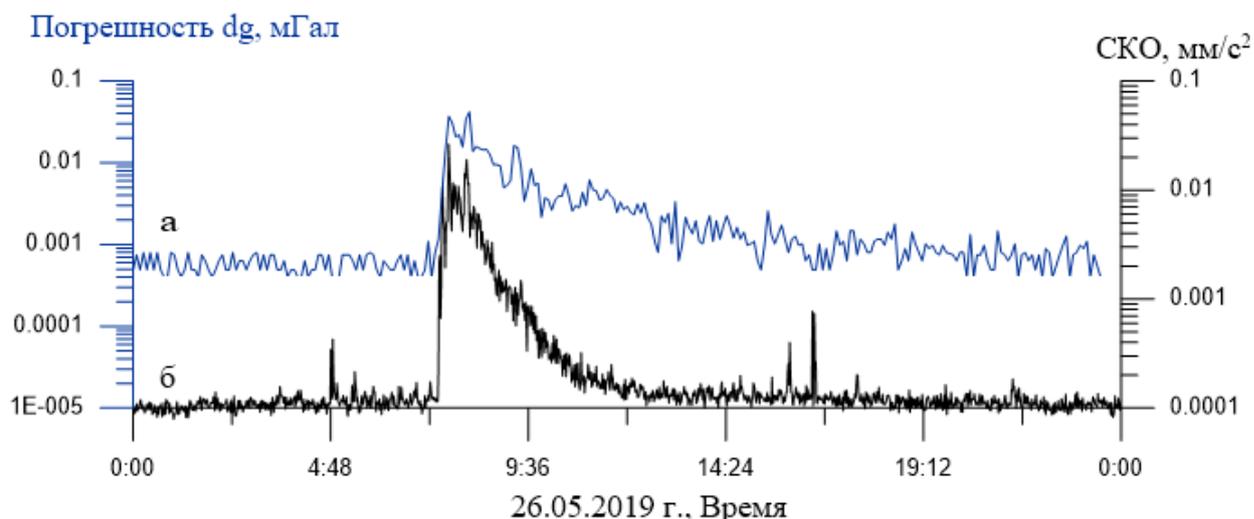


Рисунок 2.6 – Погрешность значений измерений гравиметра CG-5 Autograv (а) и СКО амплитуды вертикального ускорения по данным сейсмостанции UGRA (б)

Коэффициент корреляции СКО вычисленного гравиметром CG-5 Autograv и СКО вертикальных ускорений, вычисленных по данным сейсмостанции UGRA составляет 0,85, следовательно, СКО измерений гравиметра представляет собой в первую очередь реакцию гравиметра на внешние воздействия в виде землетрясения, и в меньшей степени, внутренний шум прибора.

Рассмотрим еще несколько сейсмических событий, которые отличаются мощностью и удаленностью землетрясения от точки наблюдения и сопоставим СКО, вычисленное по сейсмическим данным с погрешностью относительного гравиметра CG – 5.

На рисунке 2.7 представлен ряд погрешностей гравиметрических измерений во время землетрясения недалеко от Нематанаи в Папуа Новая Гвинея 14 мая 2019 года с магнитудой 7.6 и СКО, вычисленное по данным сейсмостанции. Характер колебаний, погрешность и СКО в целом аналогичны предыдущему рассмотренному землетрясению.

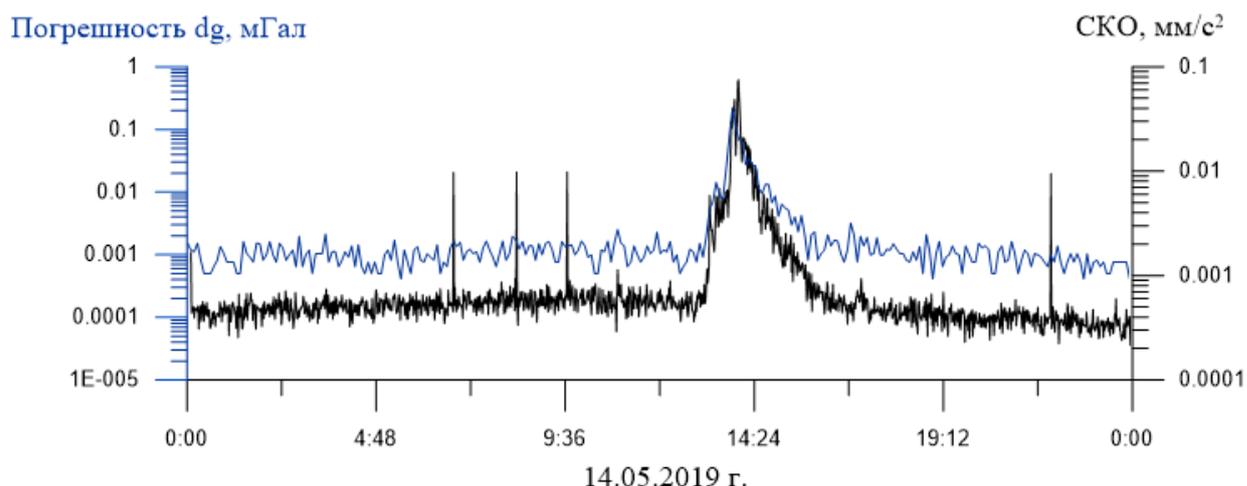


Рисунок 2.7 – Погрешность гравиметрического измерения и СКО по данным UGRA 14.05.2019 с 00:00 по 23:59: *слева* – погрешность; *справа* – стандартное отклонение; *землетрясения недалеко от Нематанаи, Папуа Новая Гвинея 12:58:25 M 7.6*

В период с 14 по 16 июля 2019 года произошло несколько сейсмических событий с магнитудой больше 6. На рисунке 2.8 приведены ряды погрешностей гравиметрических измерений и СКО по сейсмическим данным за период наблюдений.

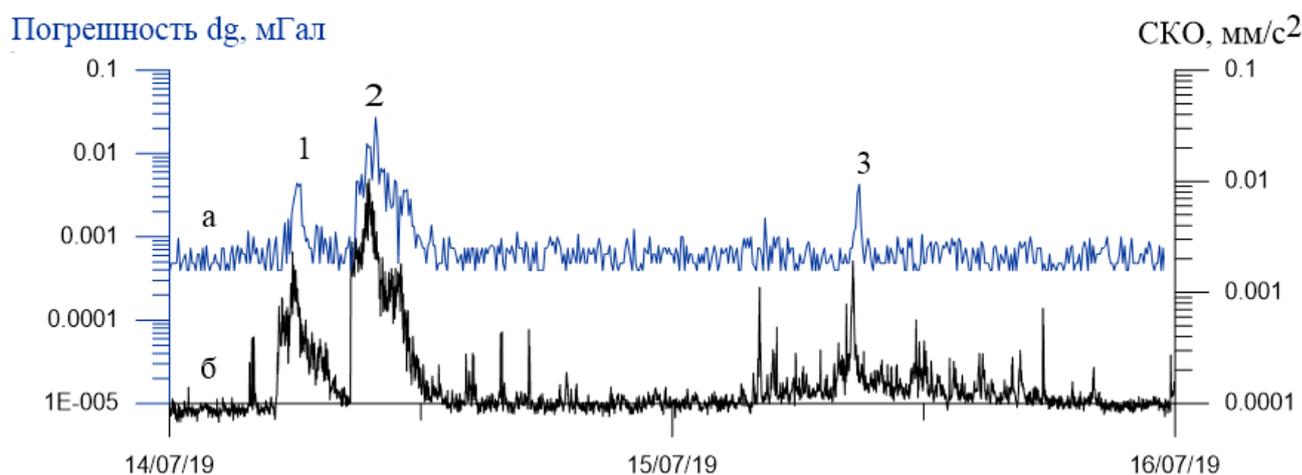


Рисунок 2.8 – Погрешность измерения CG_5 и СКО по данным сейсмостанции 14.07.2019 по 16.07.2019 г.: *а* – амплитуда погрешности; *б* – стандартное отклонение; *1* – землетрясение Брум (Австралия) 05:39:23 14.07.2019 *M* 6.6; *2* – землетрясение Лаивуи (Индонезия) 09:10:51 14.07.2019 *M* 7.2; *3* – землетрясение к северо-востоку от Кандриан (Папуа Новая Гвинея) 08:21:34 15.07.2019 *M* 6.3

Цифрами (1,2,3) обозначены зарегистрированные сейсмические события, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Зарегистрированные сейсмические события

№	Дата	Время (Гринвич)	Широта	Долгота	Глубина, км	Магни- туда	Регион
1	14.07.2019	05:39:23	18.224 Ю	120,358 В	10	6.6	Брум, Австралия
2	14.07.2019	09:10:51	0,587 Ю	128,029 В	19,4	7.2	Лаивуи, Индонезия
3	15.07.2019	08:21:34	5,971 Ю	149,488 В	42	6.3	Кандриан, Папуа Новая Гвинея

Таким образом, зарегистрированную гравиметрами реакцию поверхности Земли на сейсмическое воздействие в виде землетрясений можно рассматривать, как помеху, потому что погрешность гравиметрических измерений и вычисленное по данным сейсмостанции СКО имеют высокую корреляцию (больше 0,8) во всех выше представленных примерах.

Вместе с этим можно определить временной интервал, когда гравиметрические измерения будут связаны с повышенными погрешностями из-за реакции поверхности Земли на сейсмическое воздействие. Для этого сравним погрешность гравиметрических измерений с СКО.

На рисунке 2.9 представлены графики погрешности (а) и СКО гравиметрических измерений (б) после землетрясения в Чили 27 февраля 2010 года, магнитудой 8,8 (2). Из рисунка видно, что амплитуда погрешности измерений приходит к фоновому уровню примерно только через двое суток.

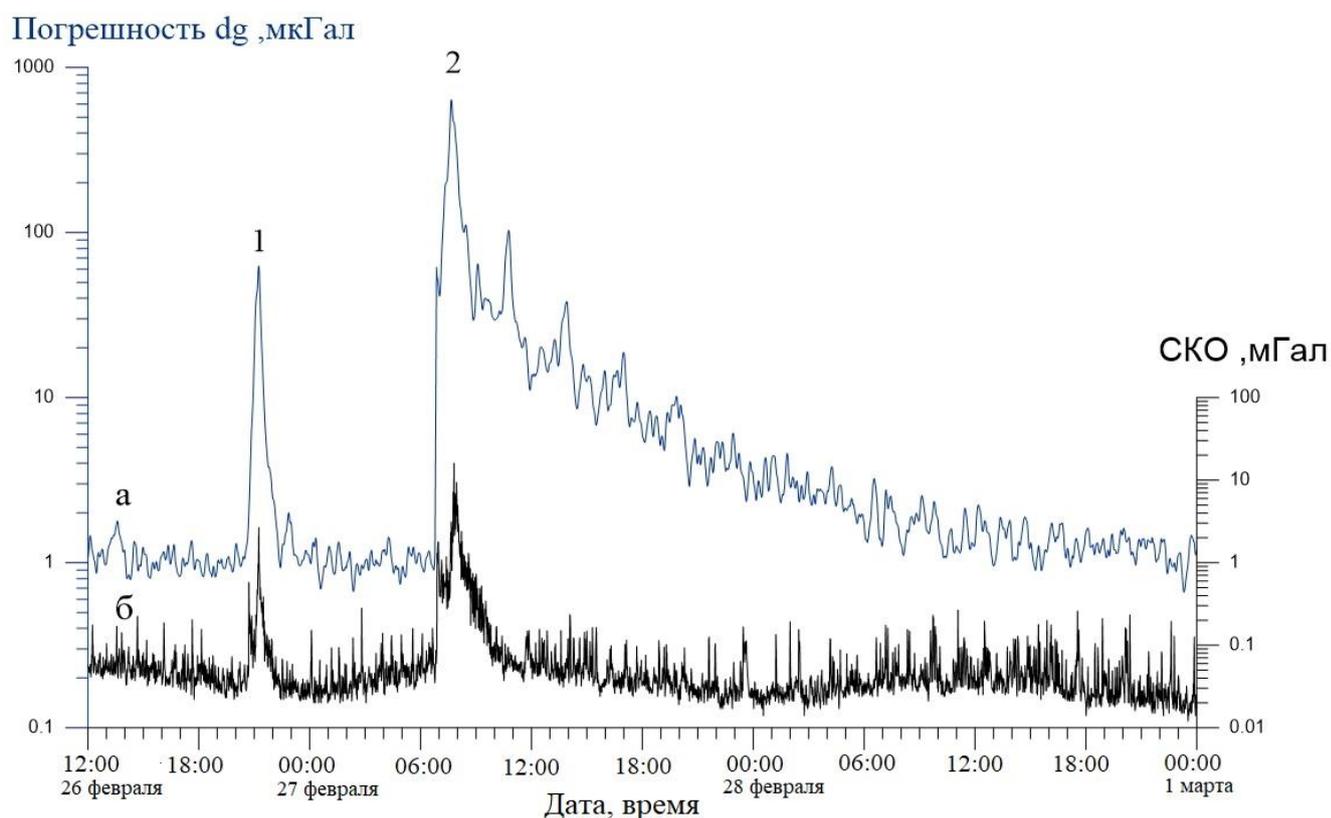


Рисунок 2.9 – Погрешность измерения и СКО по данным CG - 5 с 26.02.2010 по 01.03.2010 г.: *а* – погрешность; *б* – стандартное отклонение. *1* – землетрясение о. Хонсю (Япония) 20:31:37 26.02.2010 *M* 7.0; *2* – землетрясение Чили 06:34:14 27.02.2010 *M* 8.8.

На этом же рисунке также представлено землетрясение магнитудой 7,0, произошедшее 26 февраля 2010 года в 20 часов 31 минуту 27 секунд (1). Как видно из рисунка 2.9, процесс низкочастотного возмущения в этом случае заканчивается через 2 часа.

Каждое сейсмическое событие уникально и несет за собой ряд последствий. Так при землетрясении с магнитудой 9,0 в районе острова Хонсю 11 марта 2011 года (1) (рисунок 2.10) в течении суток после события зафиксировано 42 землетрясения магнитудой более 6,0 (2) ассоциированных с первоначальным событием. На рисунке 2.10 показаны ряды погрешностей гравиметрических измерений в частотном диапазоне с периодом от 1 до 5 минут (а) и от 6 Гц до 1 минуты (б).

Погрешность $dg, \text{мГал}$

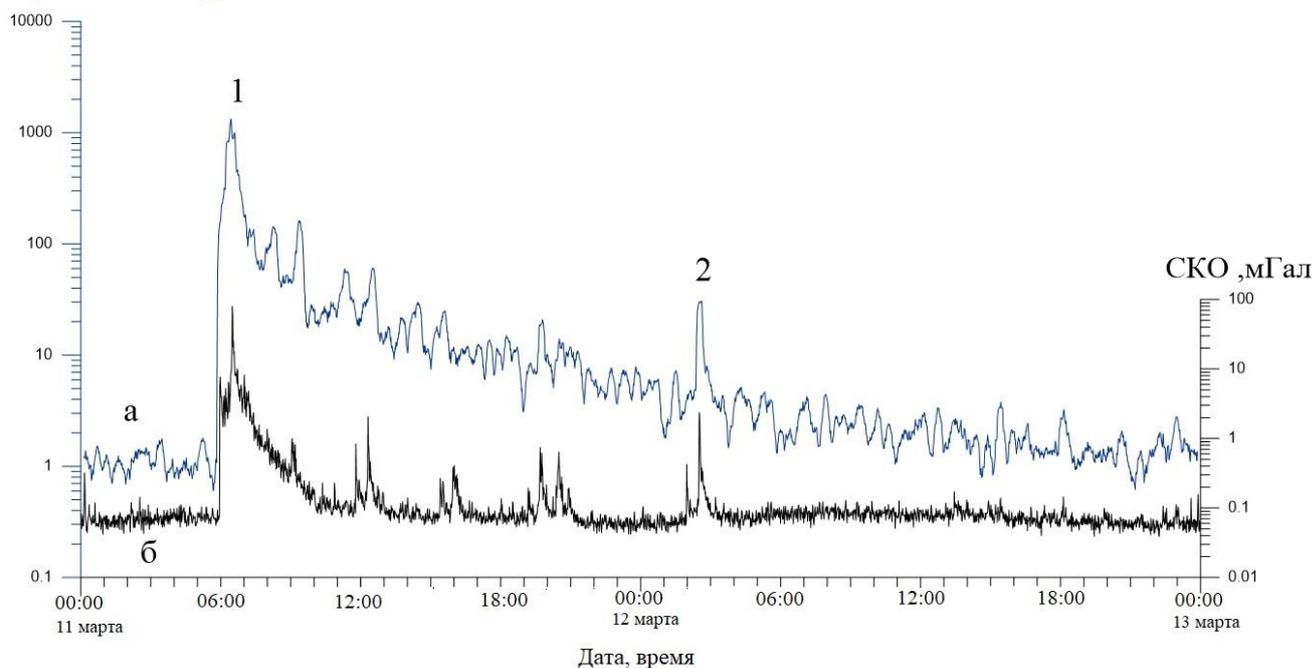


Рисунок 2.10 - Амплитуда погрешности измерения и СКО по данным CG_5 с 11.03.2011 по 13.03.2011 г.: *a* – амплитуда погрешности; *б* – стандартное отклонение; 1 – землетрясение о. Хонсю (Япония) 05:46:24 11.03.2011 *M* 9.0; 2 – землетрясение о. Хонсю (Япония) 01:47:15 12.03.2011 *M* 6.5

Рассмотрим еще один пример землетрясения с магнитудой 9,1, которое произошло в Японии (рисунок 2.11). На этом рисунке показана реакция двух относительных гравиметров и СКО их измерений.

Из приведенных графиков видно, что общее значение ускорений силы тяжести в точке наблюдений практически не изменяется, среднеквадратическое отклонение измерений принимает «обычные» значения через 2-3 суток.

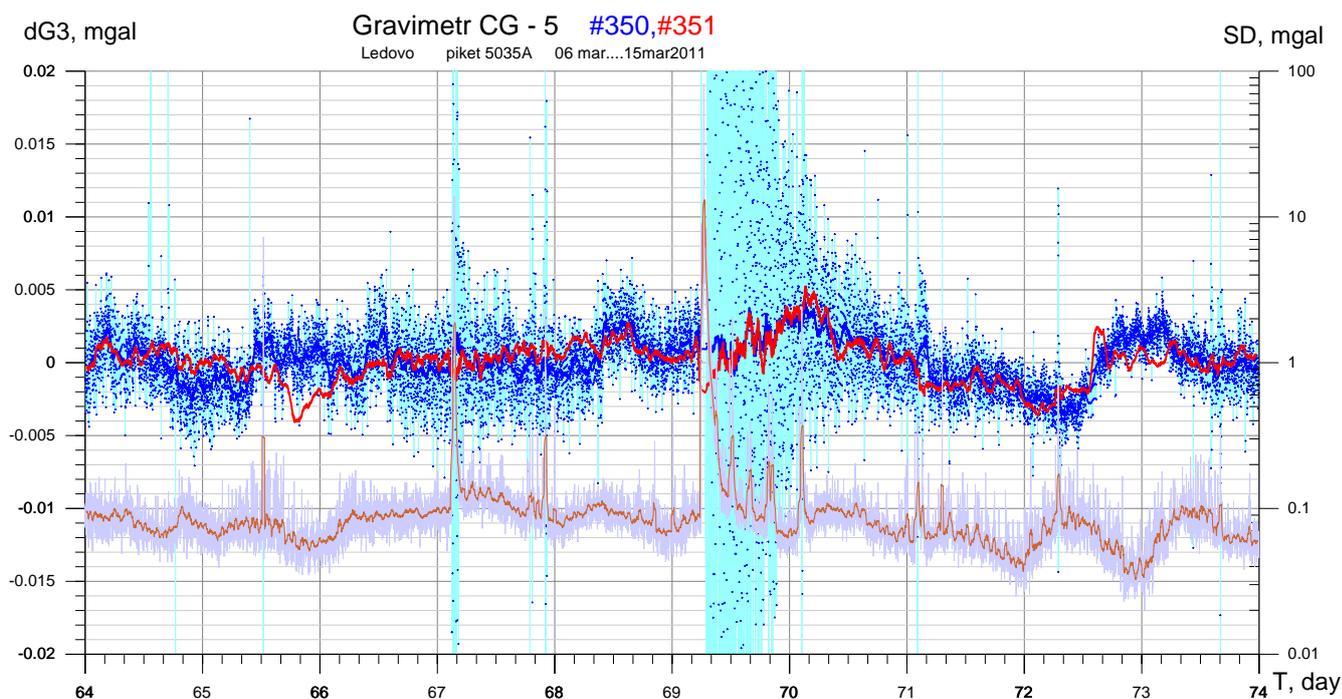


Рисунок 2.11 – Запись реакции относительных гравиметров на землетрясение в Японии с магнитудой 9,1

Максимальные значения мгновенных среднеквадратических отклонений гравиметрических измерений в момент сильных землетрясений могут достигать 80 мГал. Причина этой реакции вполне понятна – гравиметр ведет себя в момент землетрясений как вертикальный сейсмометр.

Следовательно, погрешность гравиметрических наблюдений, возникающая из-за сейсмических событий, зависит от многих факторов в частности от мощности и удаленности места события от точки наблюдения. Обобщая все рассмотренные примеры, сейсмические события можно разделить на несколько групп событий, вызывающих возрастание СКО измерений до 0.05 мГал, до 0.1 мГал, до 1 мГал, до 10 мГал и свыше 10 мГал. Эти группы отличаются не только величиной СКО измерений, но и временем, необходимым для возвращения величины погрешности к фоновому значению (временем переходного процесса), в чем мы убедились на примерах выше.

В первой группе при отклонении СКО от фонового значения равного 0,01 мГал до 0,05 мГал практически не наблюдается возрастания погрешности гравиметрических наблюдений.

Во второй группе величина погрешности возрастает до 3 мкГал и затухание происходит около 1 часа.

В третьей группе величина погрешности возрастает до 20 мкГал и время затухания до 5 часов.

В четвертой группе величина погрешности возрастает до 0.1 мГал и время затухания до 9 часов.

В пятой группе величина погрешности возрастает до 1 мГал и время затухания до 48 часов. В эту группу входят мощные землетрясения магнитудой более 8,0, что представляет наибольший интерес.

Разделение по группам приведено в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Группы событий, вызывающих возрастание СКО измерений

№ группы	СКО, мГал	Погрешность, мкГал	Время переходного процесса
1	до 0,05		
2	0,05-0,1	3	1 час
3	0,1-1	20	5 час
4	1-10	100	9 час
5	Свыше 10	1000	до 48 часов

Полученные результаты долговременных гравиметрических наблюдений и приведенные выше примеры позволяют сделать основной практический вывод – при выполнении высокоточной наземной гравиметрической съемки оператор, имея *информацию о произошедшем землетрясении и о величине СКО, должен учитывать время затухания колебания почвы и основания, на котором установлен относительной гравиметр, а также величину возможной погрешности измерения в конкретной точке съемки.*

2.3 Возможность учёта влияния высокочастотного микросейсмического воздействия на гравиметрические измерения

Гравиметр измеряет реакцию опоры (постамент), на которой он установлен. Следовательно, он фиксирует суммарный сигнал, состоящий из ускорений силы тяжести и сейсмического воздействия на его месте установки. Оценка этого воздействия позволит определить зависимость показаний гравиметра CG-5 Autograv от уровня сейсмического шума.

Исходя из того, что гравиметр фильтрует сейсмическое воздействие, оказываемое на его чувствительный элемент, простым математическим усреднением, можно сделать вывод о возможном искажении полезного сигнала в области высоких частот. *Следовательно, использование стандартной программы осреднения отсчетов гравиметра, используемого его математическим обеспечением, нецелесообразно.* Возможность применения данных, полученных с помощью сейсмической станции может позволить устранить искажения в области высоких частот. Для этого сейсмические данные необходимо привести к виду, который возможно будет использовать при учёте высокочастотных помех в гравиметрических измерениях.

2.3.1 Синхронизация данных гравиметра и сейсмостанции

В эксперименте использовались данные с относительного гравиметра CG-5 и сейсмостанции «UGRA». Приборы были установлены в пункте «Запольское» и располагались на одном постаменте (рисунок 2.12).

Для возможности учёта сейсмического влияния на гравиметрические измерения необходимо синхронизировать по времени сейсмические и гравиметрические данные. Также необходимо, чтобы у этих данных была одинаковая дискретность. Дискретность сигнала гравиметра при проведении эксперимента была равна 5 секундам. В течении этого времени гравиметр 2

секунды регистрирует 6 Гц отсчёты, а 3 секунды подготавливает следующее измерение. Сейсмическая станция за 5 секунд регистрирует 500 значений.

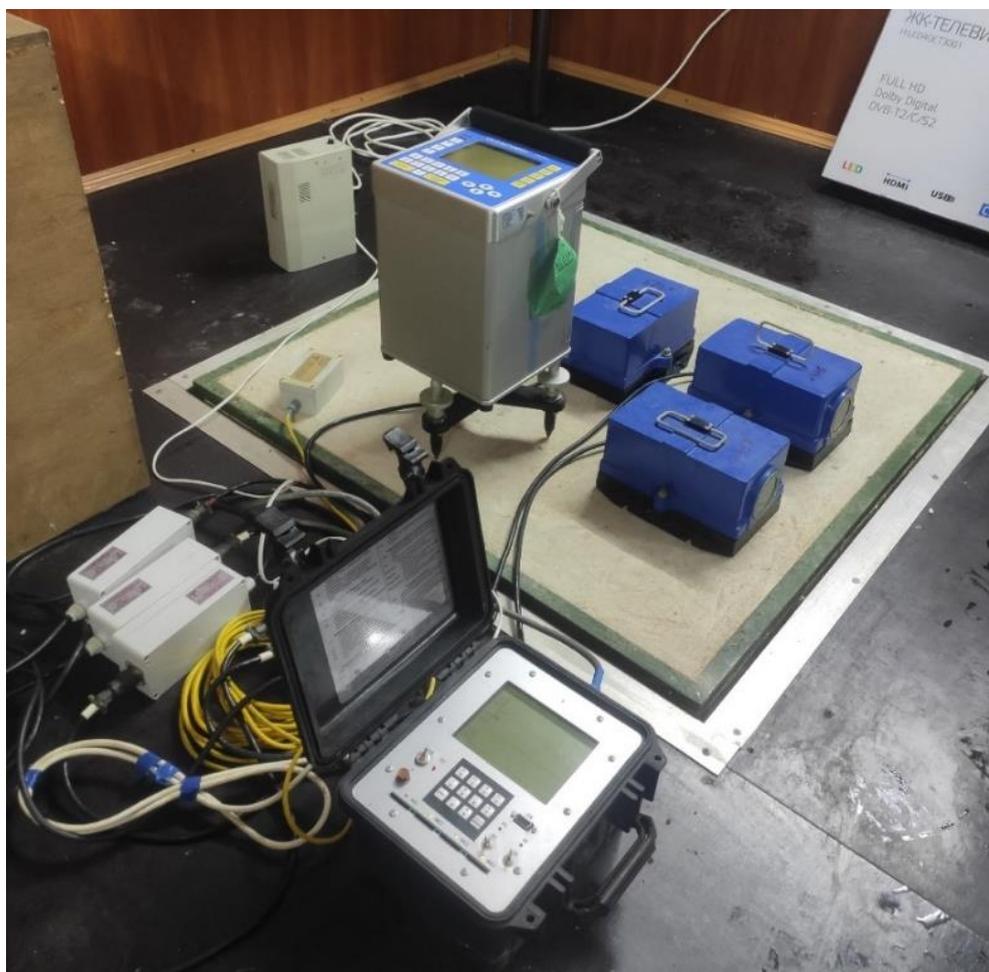


Рисунок 2.12 – Расположение гравиметра CG-5 и сейсмостанции UGRA при проведении эксперимента

Для синхронизации сигналов по времени, необходимо определить временные рамки массива сейсмических данных, которые соответствуют данному гравиметрическому отсчету. Возьмем первое значение массива сейсмических данных, которое соответствует времени 19:15:07. Время начала массива соседних отсчетов гравиметра при этом будет –19:15:02, 19:15:12. Далее последовательно будем смещать сейсмические данные на один отсчет. Продолжительность смещения - 500 отсчетов, что соответствует 5 секундам.

Таким образом, наибольшая корреляция ($\sim 0,8$) между гравиметрическими и сейсмическими рядами наблюдается при смещении сейсмических данных на ~ 100 отсчетов (~ 1 секунда) (рисунок 2.13).

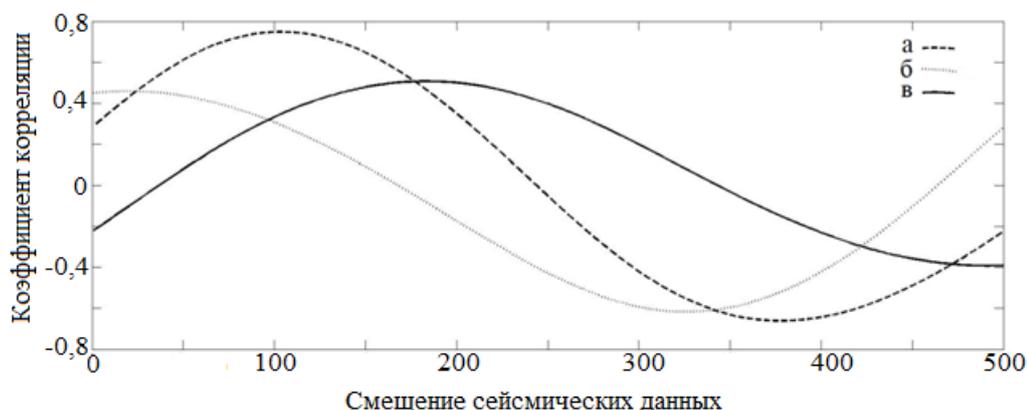


Рисунок 2.13 – Значение коэффициента корреляции между сейсмическими данными (первое значение массива соответствует времени 19:15:07) и значениями гравиметра, время начала массива соответствует:

а) 19:15:07; б) 19:15:02; в) 19:15:12

2.3.2 Математическая модель формирования измерительной информации гравиметра

После того, как гравиметрические и сейсмические ряды синхронизированы, необходимо путем дифференцирования значения скоростей сейсмических данных преобразовать в ускорения и далее сделать обработку сейсмических данных с помощью фильтра, аналогичного фильтру гравиметра. Чтобы создать такой фильтр нужно представлять математическую модель работы гравиметра, входными данными которой будут являться сейсмические данные.

При создании математической модели работы гравиметра учитывались две главные составляющие: математическая модель чувствительного элемента и математическая модель обрабатывающей системы гравиметра.

В качестве математической модели чувствительного элемента гравиметра маятникового типа использовалось колебательное звено второго порядка. Это звено описывается следующей формулой

$$W(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1}, \quad (5)$$

где: k - коэффициент передачи;

T - постоянная времени;

ξ - коэффициент затухания;

p - алгебраизованный оператор дифференцирования (символ дифференцирования, тождественно равный « d/dt »).

Математическую модель гравиметра можно представить в виде схемы (рисунок 2.14).

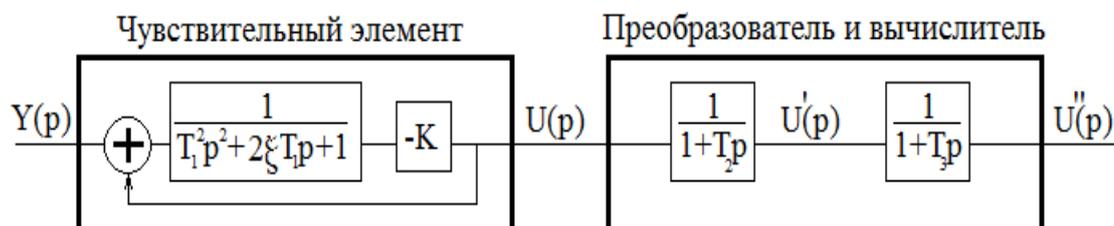


Рисунок 2.14 - Структурная схема математической модели формирования измерительной информации гравиметра CG-5 Autograv

Информация с чувствительного элемента поступает на преобразователь, с которого в виде дискретных единичных отсчётов значений приращения силы тяжести с частотой 6 Гц поступает в вычислитель. Преобразователь является фильтром низкой частоты с частотой среза 3 Гц. В вычислителе проводится операция осреднения за время накопления отсчётов, заданное оператором, а также вычисление среднего значения приращения силы тяжести и СКО, являющихся выходными данными гравиметра. Следовательно, общая частота среза гравиметра

определяется частотой регистрации, задаваемой оператором. Минимальный период регистрации равен 4 секундам, в этом случае максимальное значение частоты среза гравиметра равно 0,125 герца.

Сейсмическая станция «UGRA», используемая в эксперименте, регистрирует сейсмическую информацию с частотой 100 Гц в частотном диапазоне 10...0,05 Гц [37].

На рисунке 2.15 представлена передаточная характеристика используемых сейсмических датчиков СМЗ-ОС.

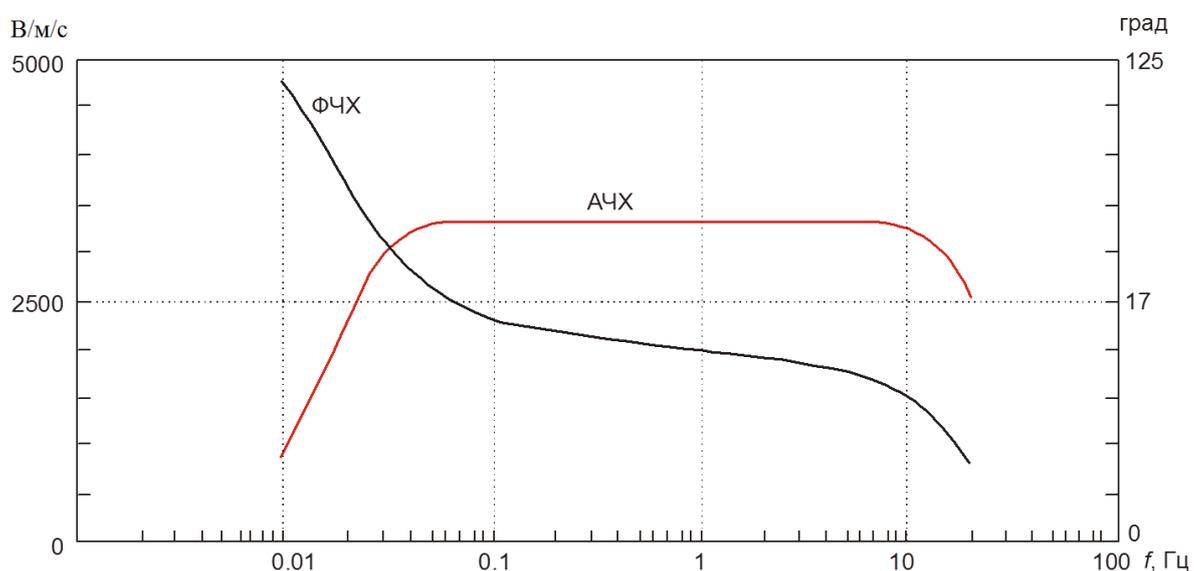


Рисунок 2.15 – Передаточные характеристики сейсмических датчиков: Амплитудно-частотная (АЧХ, левая шкала) и фазо-частотная (ФЧХ, правая шкала) характеристики

Из частотных характеристик сейсмических датчиков и модели гравиметра, следует, что гравиметр и сейсмическая станция могут регистрировать возмущающий сигнал в общей полосе пропускания (период 0,17–20 с). Значит можно получить смоделированный сигнал по сейсмическим данным для дальнейшей обработки гравиметрических данных.

2.3.3 Оценка учёта сейсмического воздействия на гравиметрические измерения

Проведем экспериментальные исследования по устранению сейсмической помехи с помощью фильтра внутри гравиметра и с помощью вычитания смоделированного сигнала. На одном из гравиметров была включена опция фильтрации сейсмических записей (гравиметр № 351), на другом эта опция была выключена (гравиметр № 350).

Отрезки полученных рядов гравиметрических наблюдений и их СКО представлены на рисунке 2.16 и включают в себя 85621 отсчет с дискретностью 4 сек (ряд почти 4 суток с 11:30 19.04.2019 по 00:19 23.04.2019 (UTC)).

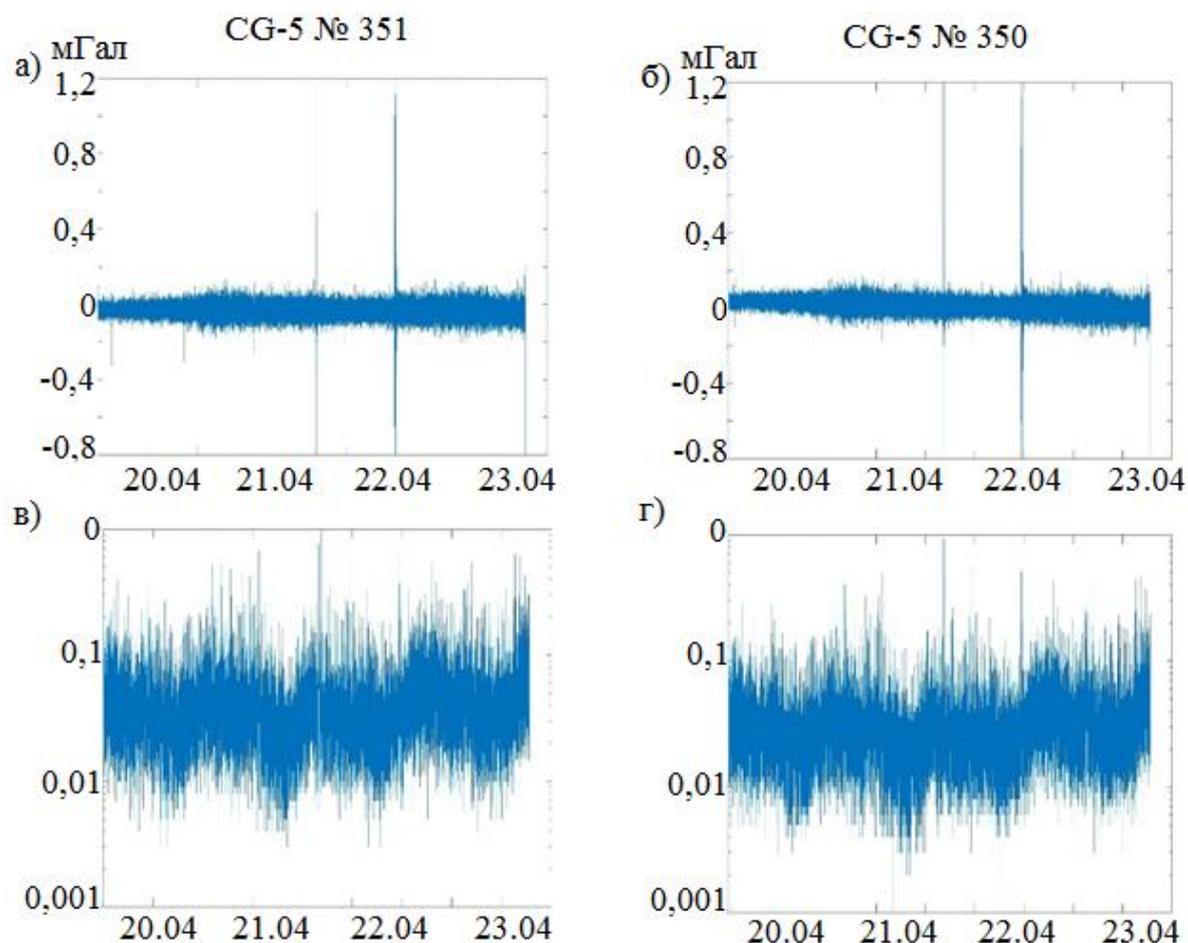


Рисунок 2.16 – Отрезки полученных рядов гравиметрических наблюдений, а) с включенным сейсмическим фильтром и б) без него. СКО гравиметрических наблюдений в) с включенным сейсмическим фильтром и г) без него

Эмпирическая оценка полученных рядов гравиметрических наблюдений показала, что встроенная в прибор функция фильтрации не оказывает заметного вклада в снижение высокочастотного шума.

После синхронизации сейсмических и гравиметрических данных и построения математической модели чувствительного элемента гравиметра проведем моделирование сигнала гравиметра на отрезке сейсмометрических данных. На рисунке 2.17 представлен фрагмент записи ускорений, измеренных гравиметром CG-5 Autograv и смоделированный сигнал математической модели гравиметра, рассчитанный по данным сейсмостанции за тот же временной период.

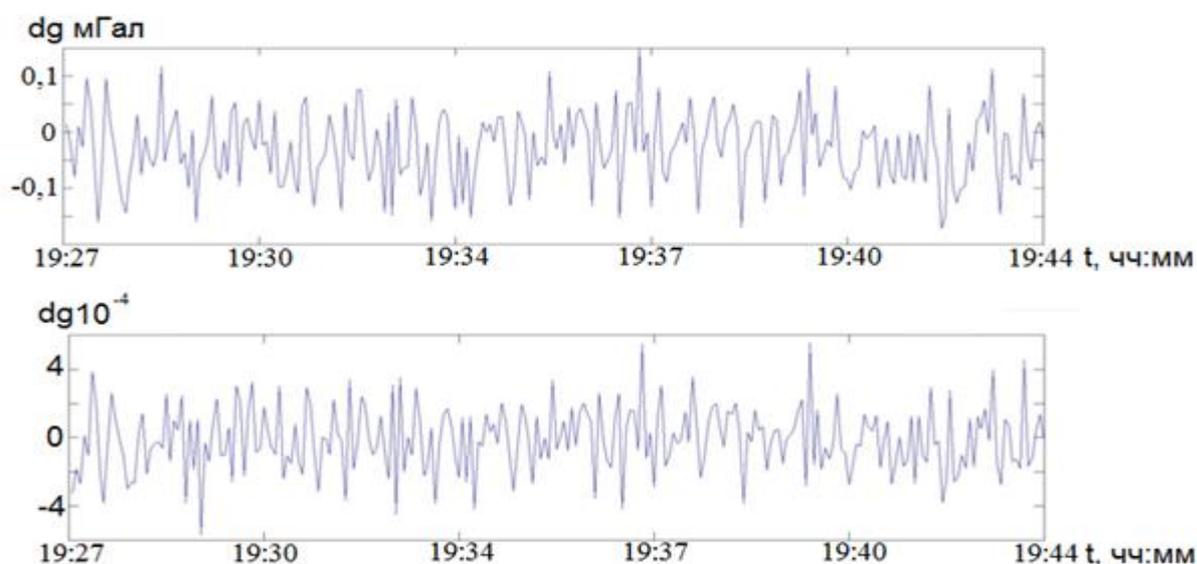


Рисунок 2.17 – Фрагмент записи ускорений: а) полученный с гравиметра CG-5 Autograv; б) полученный по данным сейсмостанции UGRA

Коэффициент корреляции между сигналами составил $\sim 0,94$, следовательно, возможно вычесть из измерений гравиметра полученный сигнал сейсмического воздействия после получения коэффициента передачи.

На рисунке 2.18 изображены гравиметрические данные, полученные гравиметром CG-5 Autograv (а) и эти же данные с учётом сейсмического воздействия (б).

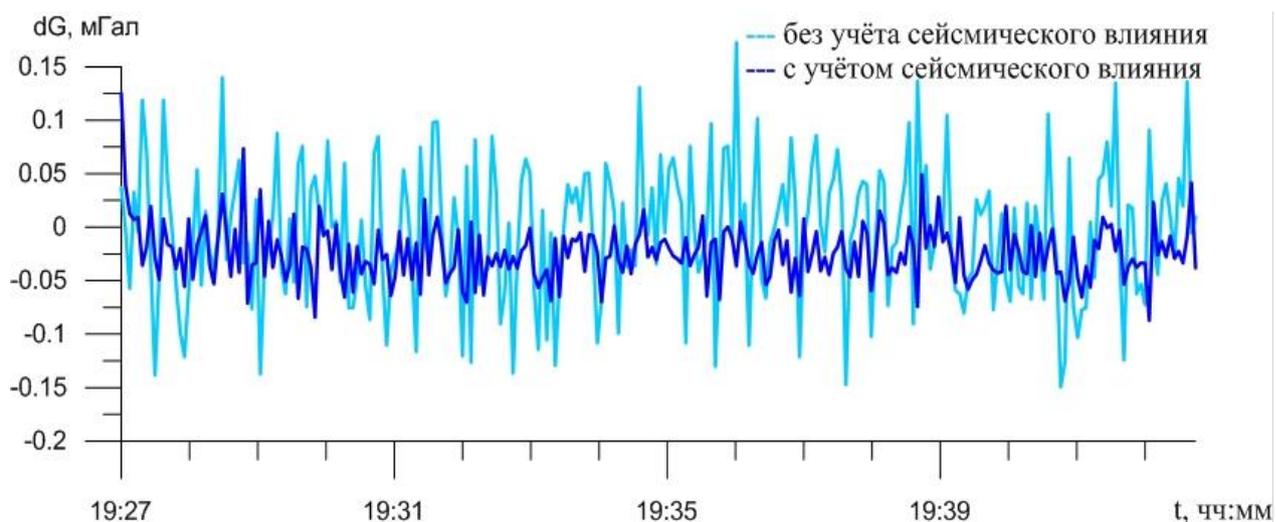


Рисунок 2.18 – Гравиметрические отсчёты, полученные гравиметром CG-5 Autograv и данные с учетом сейсмического воздействия

Чтобы оценить эффективность учета сейсмического влияния на гравиметрические данные построим спектры сигналов (рисунок 2.19). Из спектров видно, что приведённая амплитуда данных, полученных с гравиметра без учета сейсмического воздействия (рисунок 2.19 а), значительно выше амплитуды приведённых данных с учётом сейсмического влияния (рисунок 2.19 б).

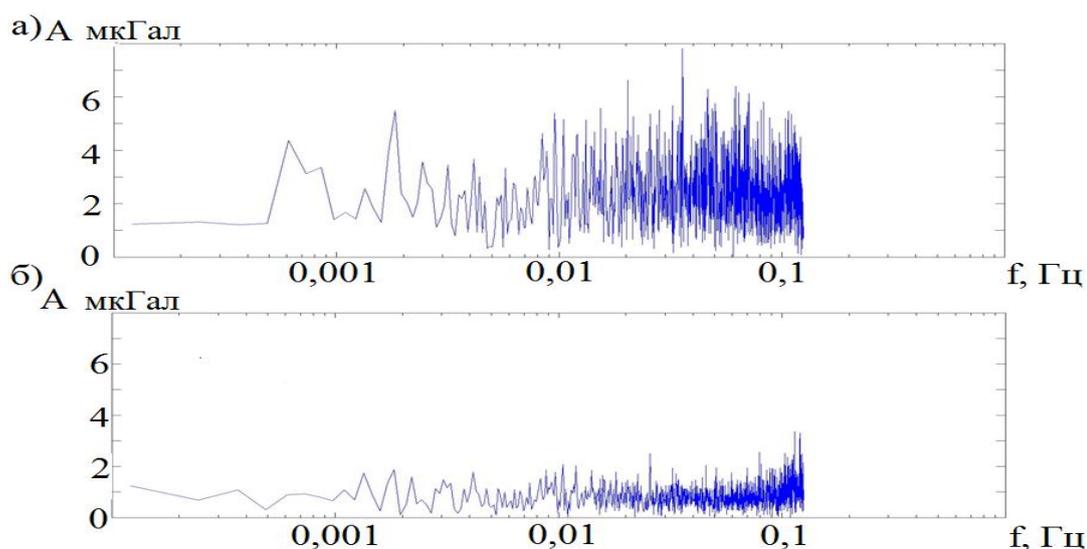


Рисунок 2.19 - Спектры сигнала гравиметра: а) – полученного гравиметром CG-5 Autograv без учёта сейсмического воздействия и б) – с учётом сейсмического воздействия

2.4 Варианты использования сейсмической информации при проведении гравиметрической съемки

Использование сейсмической информации необходимо как при проведении измерений в конкретных пунктах на гравиметрических профилях, так и при создании опорного гравиметрического пункта в районе работ. Покажем это на примере создания опорного гравиметрического пункта первого класса «Запольское».

2.4.1 Возможность оценки гравиметрического пункта на пригодность в качестве опорного при проведении высокоточной гравиметрической съемки с помощью использования сейсмической информации

Причин микросейсмического шума много и, как правило он не является белым и стационарным. Опыт выполнения гравиметрических измерений показал, что, как правило, его уровень носит региональный характер. Предсказать этот уровень сложно и необходимы предварительные сейсмические измерения. Погрешность гравиметрических измерений при проведении съемки включает в себя погрешность измерений при создании опорного гравиметрического пункта. Покажем это на примере. При выборе места расположения будущей геофизической обсерватории в разных точках исследуемой местности (полигона) выполнялись измерения микросейсмического шума, как это показано на рисунке 2.20.

Полученные временные ряды позволили построить для разных точек полигона (размером 4 гектара) спектральные характеристики по всем составляющим [108]. Пример спектров для выбранной точки приведен на рисунке 2.21.



Рисунок 2.20 – Пример оценки уровня сейсмического шума в разных точках полигона

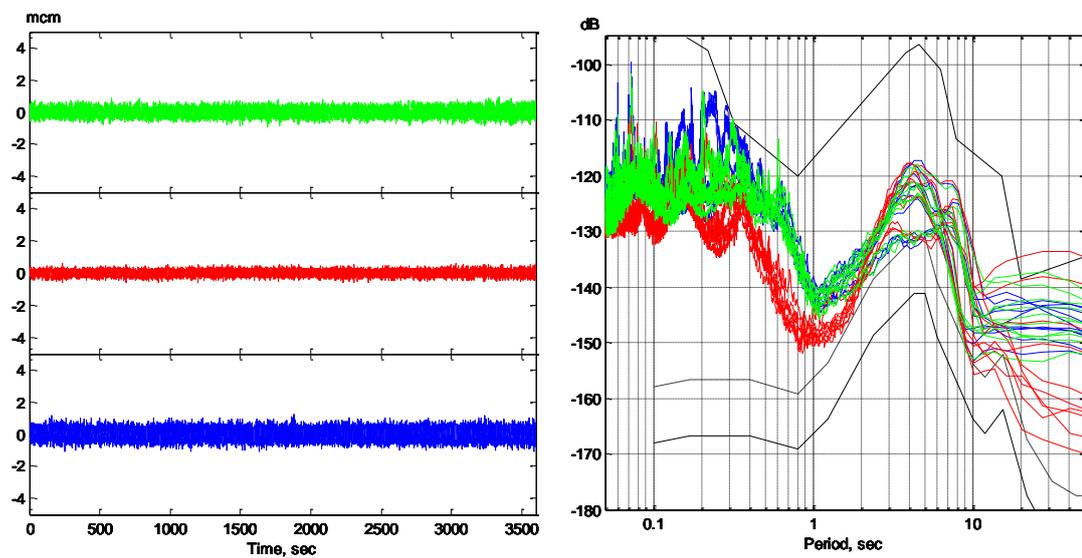


Рисунок 2.21 – Примеры записи микросейсмических колебаний по трем составляющим и их спектральные характеристики

Графики спектров показали, что уровень микросейсмических шумов находится в допустимых пределах и на ряде участков спектра достигает минимально достигнутого в ряде наблюдений уровень (пунктирная кривая).

Затем проводились сравнительные многосуточные гравиметрические наблюдения результатов регистраций суточного хода относительного гравиметра CG-5 в фундаментальном гравиметрическом пункте Москва-«Ледово» Государственной гравиметрической сети и на территории полигона кафедры «Общая и прикладная физика» Владимирского государственного университета «Запольское».

Один из результатов наблюдения на гравиметрическом пункте «Запольское» наглядно виден на графике значений ускорений силы тяжести, показанном на рисунке 2.22. Приведены единичные отсчеты относительного гравиметра CG-5 и осредненные значения с окном 61 минута, а также изменение атмосферного давления и несколько зарегистрированных сейсмических событий.

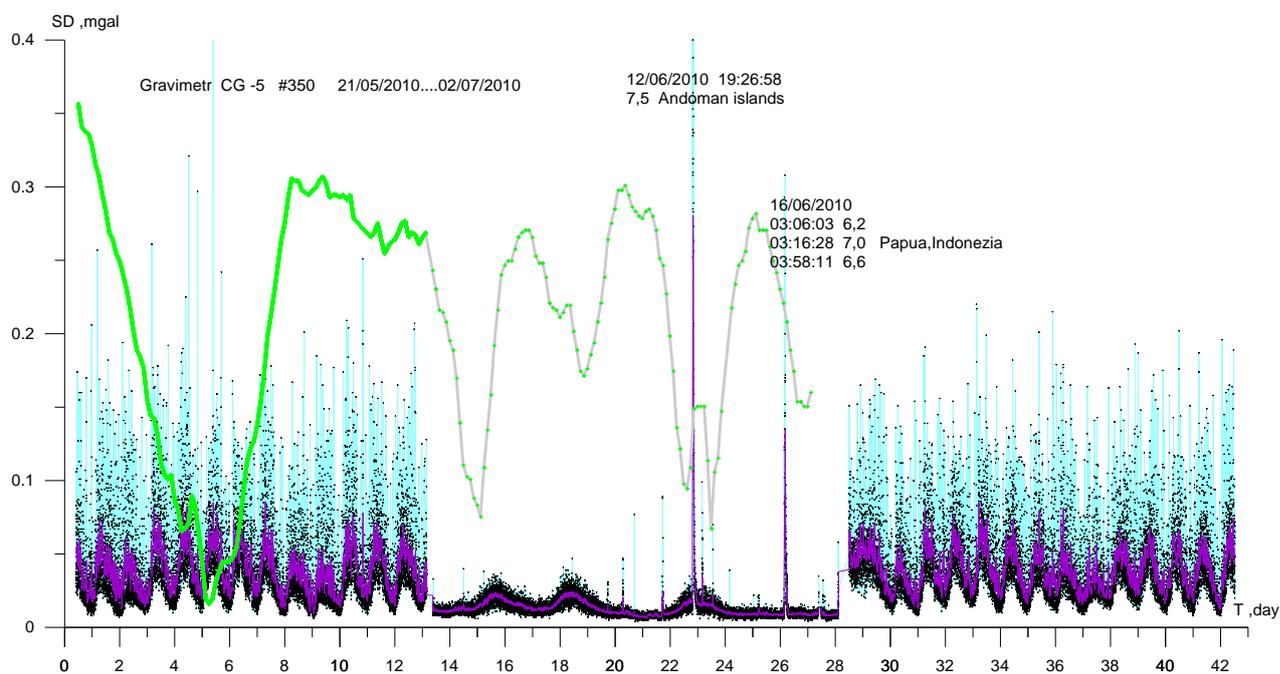


Рисунок 2.22 – Влияние сейсмического шума на гравиметрические наблюдения в обсерватории «Запольское» и «Ледово»: ■ – единичные отсчеты; — — осредненные значения с окном 61 минута; — — ход атмосферного давления в период измерений

Как видно из рисунка 2.22, уровень влияния сейсмического шума наблюдений гравиметрами CG-5 в обсерватории «Запольское» по отношению к наблюдениям на фундаментальном гравиметрическом пункте «Ледово» более, чем в 20 раз меньше. В этом случае наглядно выявляется «тонкая структура» многих геофизических явлений, сопровождающих гравиметрические измерения. В нашем случае на рисунке 2.22 салатовым цветом показано изменение атмосферного давления и легко проследить реакцию относительного гравиметра на это изменение в обсерватории «Запольское».

Следовательно, гравиметрический пункт «Запольское» можно считать сейсмически «тихим» местом, что в дальнейшем позволит увеличить точность будущей высокоточной гравиметрической съемки, используя этот пункт как опорный.

2.4.2. Предварительная региональная оценка уровня микросейсмического шума в предполагаемом районе работ

Перед проведением детальной гравиметрической съемки крупного масштаба целесообразно выполнить исследования уровня микросейсмических измерений в заданном районе работ. Покажем это примере проведенных региональных измерений на территории Владимирской области.

На территории Владимирского региона мониторинг распределения микросейсмической естественной природы (на частотах менее 1 Гц), так и техногенного происхождения и районирование микросейсм ранее не проводились. Как следует из опубликованной карты уровней микросейсм (на частоте 1 Гц) на территории Российской Федерации, полученной в результате исследований, проведенных Комплексной сейсмологической экспедицией Института физики Земли РАН (2004 год), – для Владимирской области исследования не проводились и данные по изучению микросейсм отсутствуют (рисунок 2.23) [11].



Рисунок 2.23 – Элемент карты распределения микросейсм на частоте 1 Гц для Центрального региона РФ (красным – выделена территория Владимирской области)

При этом Владимирский регион – территория планируемого и готовящегося строительства высокоскоростных магистралей (таких, как высокоскоростная железнодорожная магистраль «Москва-Казань») и автомагистралей, многих промышленных и гражданских объектов. Существующие и проектируемые магистрали и трассы проходят через различные геологические районы Владимирской области.

Вследствие этих причин в данной работе впервые выполнена оценка уровней микросейсм различного происхождения в ряде пространственно разнесенных точек, расположенных в разных природных районах территории Владимирского региона.

Для дальнейшей региональной оценки микросейсмического шума на территории выполняемых работ необходимо изучить геологическое строение территории и рельеф области. Территория Владимирского региона находится в центре Восточно - Европейской равнины, основная часть территории – слабо всхолмленная равнина с общим понижением от окраины Клинско - Дмитровской гряды (высоты до 271 метров) на севере, через Владимирское (Юрьево) Ополье (высота до 236 м), далее на юг к Мещерской низменности (преобладающая высота 120 метров) и на восток через Окско - Цнинский вал (до 184 метров) и Гороховецкий отрог (верхняя точка – 191 метров) к Балахнинской низменности (около 90 метров) и устью реки Клязьмы (67 метр).

Рельеф Владимирской области сформировался еще в доледниковый период. Но ледник, продвинувшийся с Кольского полуострова 10-15 тысяч лет назад, оказал на него очень сильное влияние. Он оставил осадочные породы, много валунов, глины, песка. В общих чертах это волнистая равнина, с некоторым уклоном к юго-востоку, местами слегка всхолмленная и равномерно изрезанная реками. Геологически Клинско - Дмитровская гряда состоит из коренных пород, покрытых песчано - глинистыми отложениями. Также невысокий (140 -180 метров) Окско - Цнинский вал, который уходит далеко за пределы региона.

Таким образом, во Владимирском регионе выделены шесть природных районов с различным геологическим строением и рельефом, таких как, Окско - Цнинский вал, Клинско - Дмитровская гряда, Клязьминская возвышенность, Нерльско - Клязьменская низина, Мещерская низменность, Ковровско - Касимовское плато.

Были выполнены комплексные полевые работы по регистрации микросейсмических процессов в ряде пространственно разнесенных точек в различных природных районах Владимирского региона с различным геологическим строением и рельефом. На рисунке 2.24 представлена карта природных районов Владимирской области. На карте отмечены точки проведения полевых экспедиционных работ по регистрации микросейсмических процессов. Точки измерений в различных районах выбирались исходя из условия удаленности

от источников техногенного воздействия, то есть в ненаселенных местах, вдали от автомобильных и железных дорог.

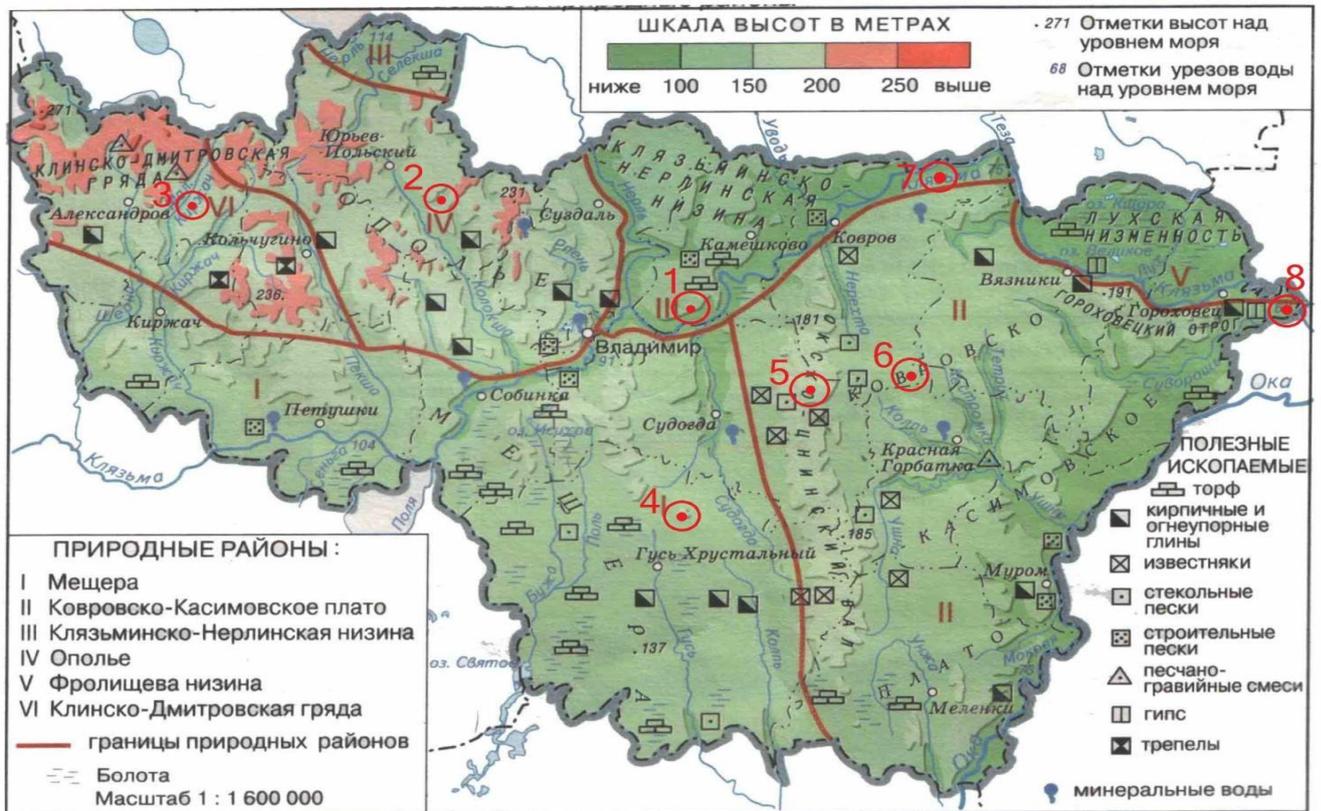


Рисунок 2.24 – Карта природных районов Владимирской области

В таблице 2.3 сведена информация о местоположении различных точек полевых измерений на карте природных районов Владимирского региона.

Таблица 2.3 - Расположение полевых измерений во Владимирской области

Порядковый номер точки измерений на карте	Районы Владимирской области и пункты измерений	Природные районы Владимирского региона
1	Камешковский район, экспериментальный полигон ВлГУ, геофизическая обсерватория	Нерльско- Клязьменская низина
2	Юрьев - Польский район, вблизи с. Федоровское	Ополье

Продолжение таблицы 2.3

3	Александровский район, вблизи с. Андреевское	Клинско - Дмитровская гряда
4	Гусь - Хрустальный район, вблизи д. Семеновка	Мещёра
5	Судогодский район, вблизи с. Языково	Окско -Цнинский вал
6	Ковровский район, пос. Восход	Ковровско - Касимовское плато
7	Ковровский район, д. Пантелеево	Нерльско - Клязьменская низина
8	Гороховецкий район, д. Хорошево	Вблизи Гороховецкого отрога

По результатам обработки и анализа выполненных измерений по регистрации микросейсмических процессов техногенного происхождения построены сравнительные спектры мощностей соответственно для компонент VE, VN, VZ (рисунок 2.25 а, 2.25 б, 2.25 в). Сравнительные спектры объединены на рисунке 2.25 для 8 точек измерений, указанных в таблице 2.3.

Анализируя спектр мощности, хорошо видно, что тише всего отклик среды на микросейсмическую активность наблюдается в районе Ковровско - Касимовского плато, а также на Окско - Цинском вале и на блоке в районе Гусь Хрустального. Примерно на одном уровне энергия микросейсм в районеКлинско-Дмитриевской гряды и Клязьменско - Нерлинской низины. Максимальная разность – порядка 50 дБ/Гц, что говорит о разном отклике блоков среды Владимирской области на техногенную составляющую активности микросейсм [68,69,71]. Предположительно отклик связан с геологической структурой в рамках не только осадочного чехла, но и коренных пород.

Наличие максимальной разности (порядка 50 дБ/Гц) только в восьми точках рассмотренного региона показала целесообразность выполнения исследований уровня микросейсмических шумов в заданном районе работ. А при выполнении высокоточной гравиметрической съемки данные о распределении микросейсмического шума по территории будут полезны при обработке экспериментальных данных.

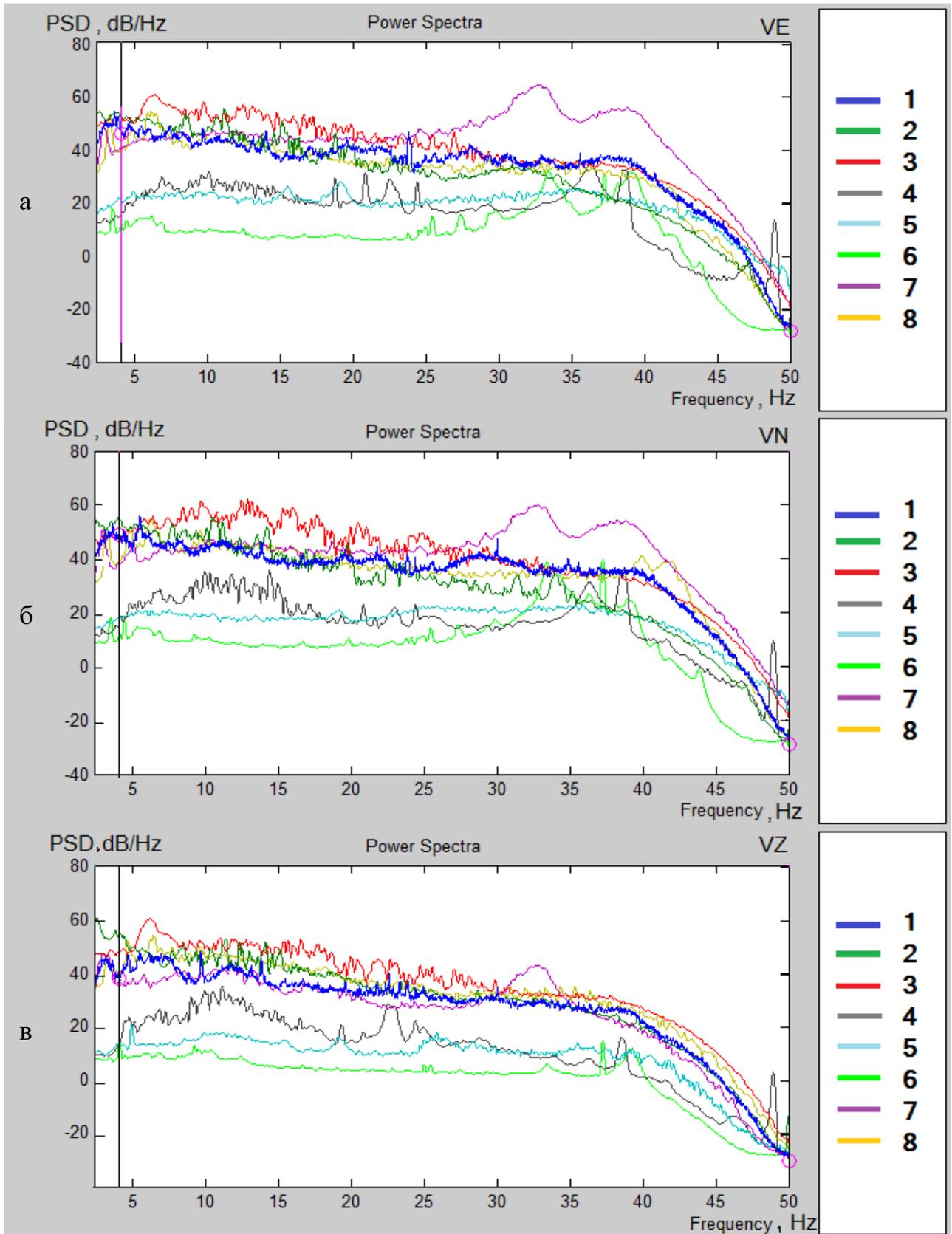


Рисунок 2.25 – Спектры мощностей соответственно для компонент VE (а), VN (б), VZ (в)

2.4.3 Оценка пригодности каждого гравиметрического пункта съемки по точностным характеристикам, используя сейсмическую информацию при проведении высокоточной гравиметрической съемки

Как уже было сказано, гравиметр и сейсмометр – приборы, действующие на одних физических принципах и имеющие общий частотный диапазон [81,83]. Их расположение на одном гравиметрическом пункте позволяет считать зарегистрированные инерционные помехи идентичными по происхождению [1,4,41]. Инерционное воздействие регистрируется обоими приборами и в промежутке совпадения их амплитудно-частотных характеристик, данные зарегистрированные сейсмической станцией можно использовать для оценки пригодности пункта измерения к проведению высокоточной гравиметрической съемки [5, 20,100].

На рисунке 2.26 а представлен фрагмент записи в виде дискретных единичных отсчетов гравиметра с частотой 6 Гц, которые поступают с чувствительного элемента на вход преобразователя, далее добавляются поправки, учитывающие изменения угла наклона и температуры [39,81]. В вычислителе из полученных значений приращения силы тяжести вычисляется среднее значение за время накопления отсчетов, заданное оператором (рисунок 2.26 б), и его среднеквадратическое отклонение (СКО) (рисунок 2.26 в).

Дискретные единичные отсчеты с чувствительного элемента гравиметра наиболее близки по частоте отсчетов к сейсмическим измерениям. Для проведения сравнения сейсмические данные были приведены к частоте 6 Гц путем математического осреднения.

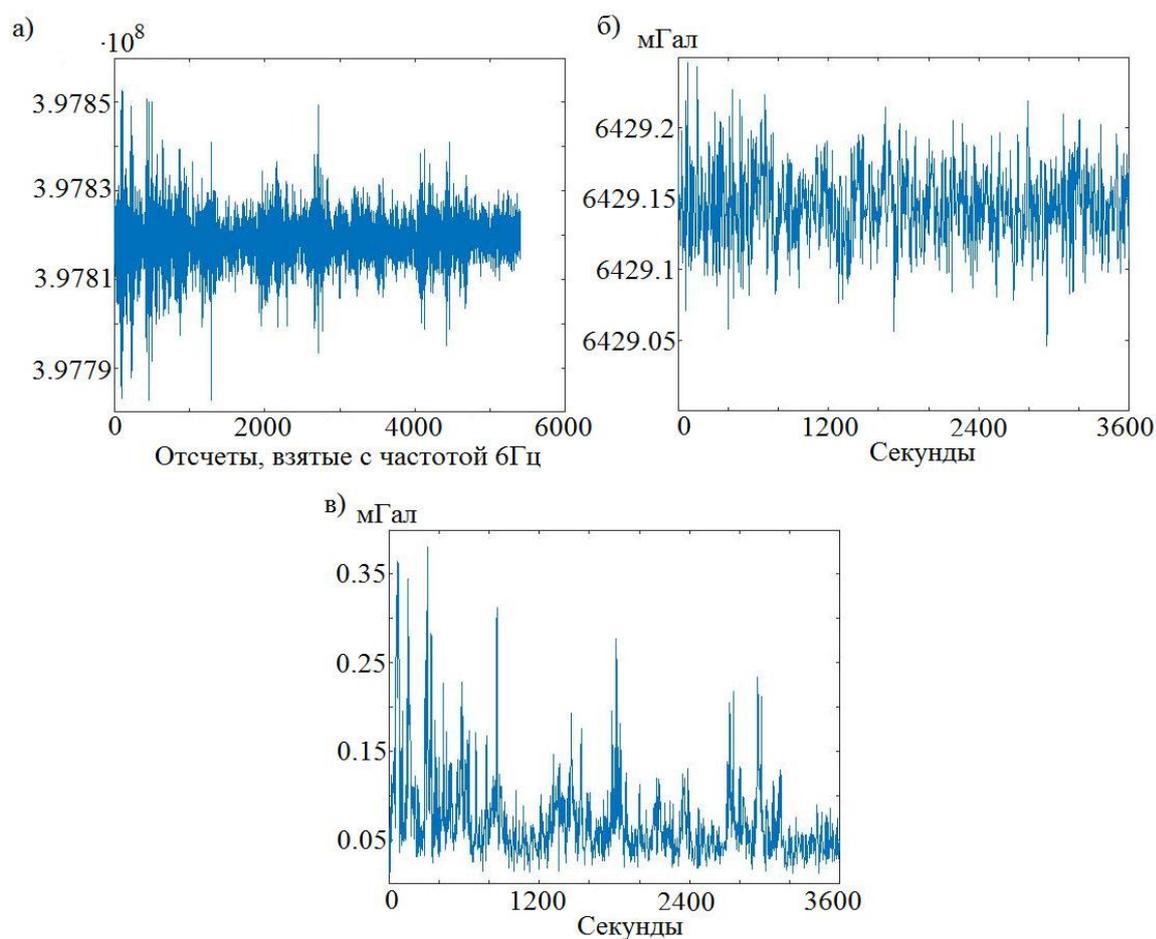


Рисунок 2.26 - Гравиметрические данные за 1 час измерений: а) дискретные единичные отсчеты с чувствительного элемента (частота 6 Гц); б) четырехсекундный выходной ряд гравиметрических отсчетов; в) SKO гравиметрических отсчетов

Применение математической модели гравиметра, описанной выше [42], с использованием продифференцированных отсчетов вертикального канала сейсмостанции, в качестве входных данных для смоделированного чувствительного элемента гравиметра, позволило получить максимальное значение коэффициента корреляции между сейсмическими и гравиметрическими данными. Значение коэффициента корреляции между смоделированным и гравиметрическим рядами частотой 6 Гц составил 0.959, что сопоставимо со значением корреляции 0.954 между смоделированным сигналом и итоговыми гравиметрическими отсчетами на частоте периода регистрации гравиметра (4 сек),

что подтверждает высокую степень влияния сейсмических явлений на гравиметрические измерения.

Замена дискретных единичных отсчетов с частотой 6 Гц на смоделированный по сейсмическим данным ряд в алгоритме расчета итогового гравиметрического отсчета позволила рассчитать СКО по алгоритму идентичному расчету гравиметра (рисунок 2.27 а). СКО смоделированного сигнала идентично СКО гравиметрического сигнала, разность между СКО гравиметрических и смоделированных рядов не превышает 0.1 мГал в пиковом значении и 0.02 мГал в фоновых измерениях (рисунок 2.27 б).

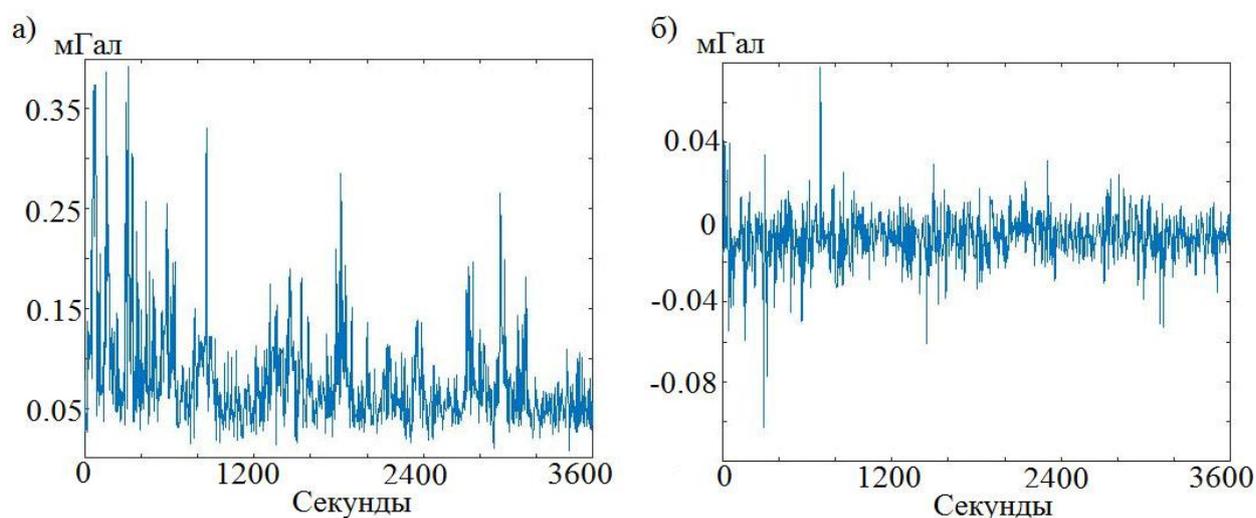


Рисунок 2.27 – а) СКО смоделированного из сейсмических данных сигнала за 1 час измерений; б) разница СКО смоделированного и гравиметрического сигналов

По вычисленной разнице СКО смоделированного и гравиметрического сигналов можно сделать вывод об адекватности смоделированного ряда. В то же время по уровню СКО смоделированных данных измерений можно принять решение - пригоден ли конкретный пункт гравиметрической съемки для достижения требуемой точности гравиметрических измерений.

2.5 Снижение влияния зарегистрированного сейсмического воздействия на результаты в гравиметрических рядах

Данные, зарегистрированные сейсмической станцией, можно использовать не только для оценки пригодности пункта измерения к проведению высокоточной гравиметрической съемки, но и для снижения высокочастотной составляющих помех гравиметрического ряда. На рисунке 2.26 был представлен исходный гравиметрический ряд. На рисунок 2.28 представлен гравиметрический ряд за 1 час измерений с учетом сейсмического воздействия. Вычитание смоделированного на сейсмических данных сигнала из гравиметрического ряда частотой 6 Гц значительно снижает погрешности.

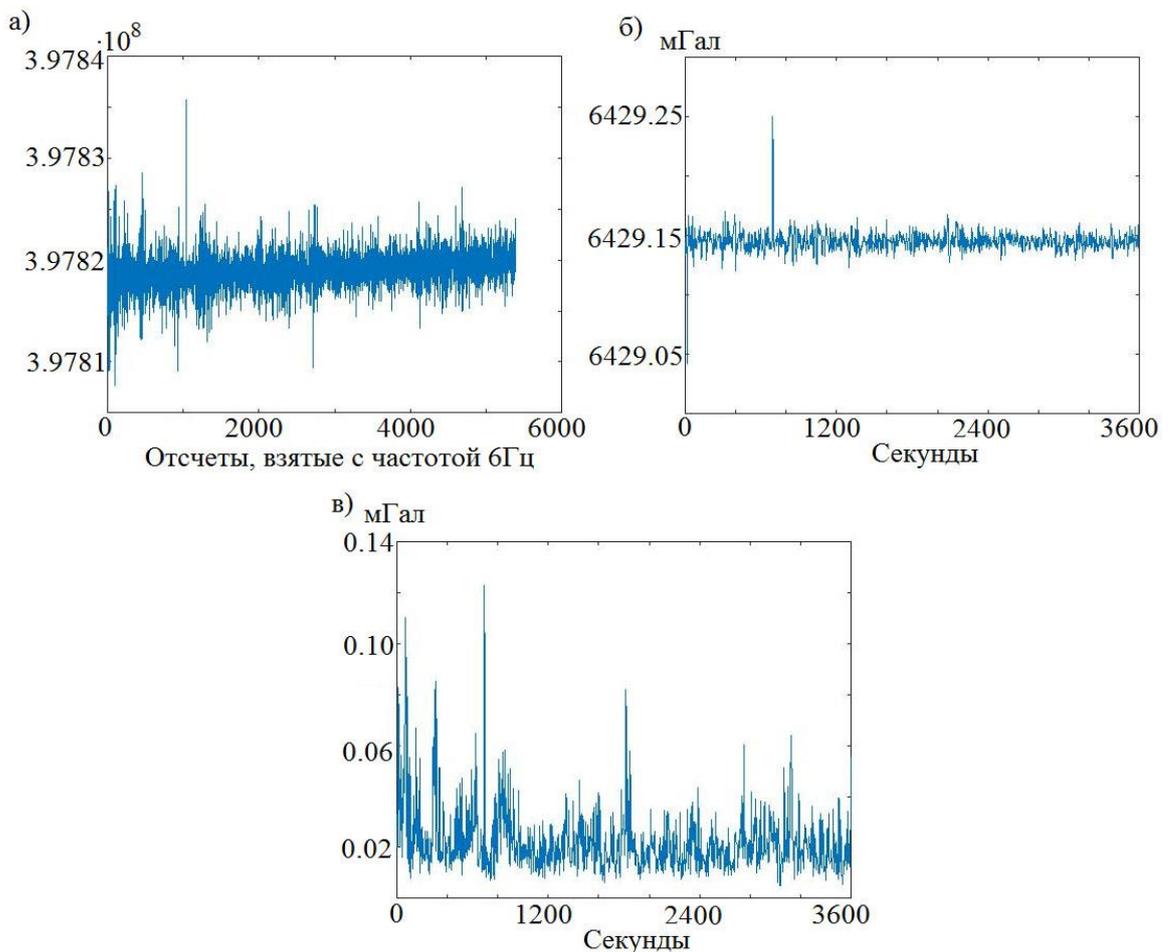


Рисунок 2.28 – Гравиметрические данные за 1 час измерений с учетом сейсмического воздействия: а) данные с чувствительного элемента частотой 6 Гц; б) четырехсекундный выходной ряд гравиметрических отсчетов; в) СКО гравиметрических отсчетов.

Амплитуда фоновой зашумленности «шестигерцовых» данных, в результате обработки, снижена примерно в два раза, а четырехсекундных гравиметрических отсчетов в 4-5 раз по сравнению с данными на рисунке 2.26.

Применение моделирования сигнала чувствительного элемента к «шестигерцовым» данным снижает необходимость применения широкополосных сейсмометров, так как для оценки информативности высокочастотных гравиметрических данных достаточен диапазон частот 1...6 Гц.

Математическая модель гравиметра, применяемая на коротком отрезке измерений «шестигерцовых» данных может позволить получить сейсмическую поправку к длинному гравиметрическому ряду, с периодом регистрации более 4 секунд (рисунок 2.29).

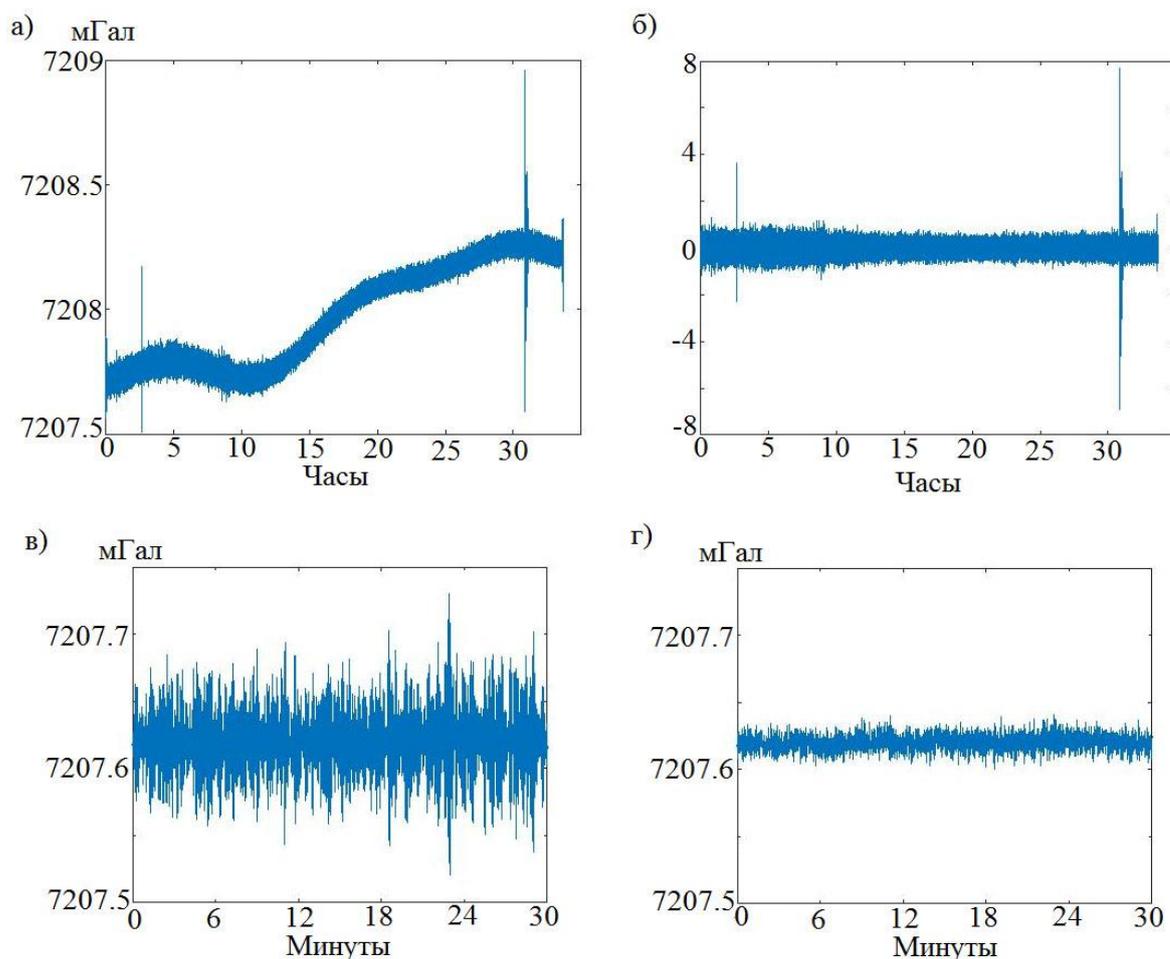


Рисунок 2.29 – Данные (6 Гц): а) гравиметрические отсчеты, 33 часа измерений; б) смоделированные данные, 33 часовой ряд; в) гравиметрические отсчеты, 30 минут измерений; г) гравиметрические отсчеты, 30 минут измерений с учетом сейсмического воздействия

Учитывая полученный результат можно сделать промежуточный вывод: вычитание смоделированного на сейсмических данных сигнала из гравиметрического «шестигерцового» ряда значительно снижает погрешности измерений. При этом амплитудно-частотная характеристика сейсмической станции, используемая для расчета гравиметрической поправки, должна попадать в диапазон от 1 до 6 Гц.

Во время проведения измерений было зарегистрировано сейсмическое событие: землетрясение М 6.1, 2019-04-22 09:11:12 (UTC) в 3 км на ЮЮЗ от Floridablanca, Philippines (рисунок 2.30 а).

Применение методического приема по учету сейсмических явлений на примере этого события демонстрируют рисунки 2.30 б, 2.30 в.

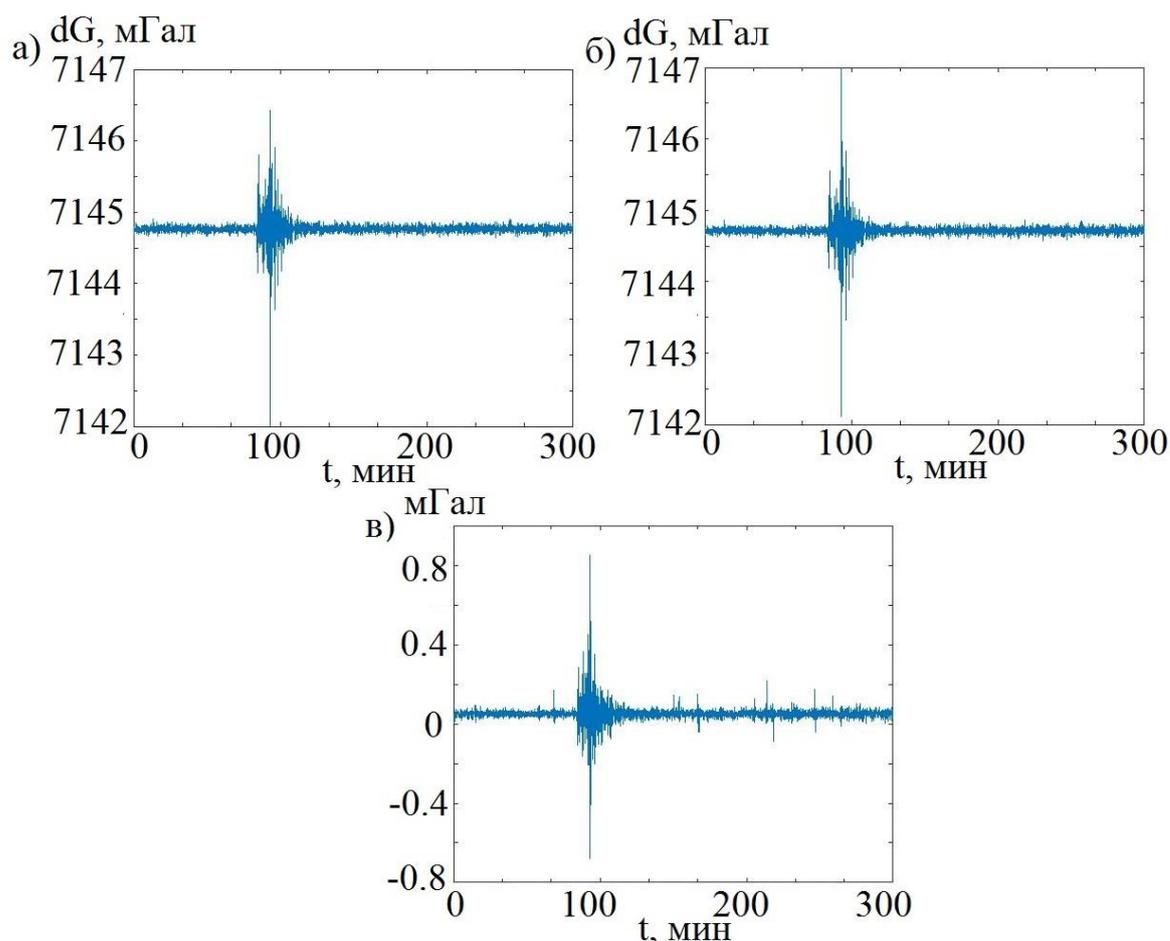


Рисунок 2.30 – Землетрясение М 6.1, 2019-04-22 09:11:12 (UTC):

а) гравиметрический ряд; б) ряд смоделированного воздействия;

в) гравиметрический ряд с учетом сейсмического воздействия

Из рисунка 2.30 видно, что применение методического приема по учету сейсмических воздействий в качестве смоделированного сигнала значительно снижает амплитуду высокочастотных помех. Максимальное значение амплитуды снижено с ~5 до 1,5 мГал, а на «спокойном» участке записи амплитуда снижена с ~0,2 до 0,1 мГал. Следовательно, эффективность снижения высокочастотного шума составляет порядка 50%, а для активных событий 70%.

Таким образом, уровень инерционного шума, обусловленного сейсмическим воздействием, снижен на 60-70% [40,43,70]. Метод смоделированного сигнала по сейсмическим данным показал, что влияние высокочастотного микросейсмического шума на гравиметрические измерения может быть значительно снижено по сравнению с методом простого математического осреднения, используемого в математическом аппарате относительного гравиметра Autograv.

Проведенные исследования подтверждают необходимость введения в состав комплекса сейсмической станции и корректного использования ее сигналов для уменьшения уровня микросейсмического шума при гравиметрических измерениях.

Выводы по материалам главы 2

В результате выполненной работы были получены следующие основные результаты и сделаны соответствующие выводы:

1. Применение моделирования чувствительного элемента гравиметра с сейсмическими данными в качестве входной информации в значительной степени позволяет отделить гравиметрические измерения от инерциальных воздействий.

2. Землетрясения магнитудой более 8 оказывают воздействия на гравиметрические измерения до 48 часов, а с магнитудой до 8 – в течении 1-9 часов в зависимости от удаленности эпицентра

3. Для оценки информативности высокочастотных гравиметрических данных применение широкополосных сейсмометров необязательно, так как достаточен диапазон частот сейсмостанции от 1 до 6 Гц.

4. Среднеквадратическое отклонение гравиметрических отсчетов в первую очередь характеризует уровень влияния микросейсмических шумов на чувствительный элемент гравиметра.

5. Рассчитав СКО гравиметрических отсчетов по сейсмическим данным, можно оценить каждый пункт сейсмометрических измерений на пригодность к проведению высокоточной гравиметрической съемки.

6. Сформулированы методические приемы повышения точности относительных гравиметрических наблюдений с помощью использования сейсмической информации:

- оценка уровня микросейсмических шумов с помощью сейсмостанции необходима при создании опорного пункта будущей гравиметрической съемки. Целесообразно сделать предварительную оценку регионального микросейсмического шума на площади, где будет выполнена детальная гравиметрическая съемка;

- при проведении высокоточных гравиметрических измерений необходимо иметь информацию о произошедших землетрясениях, чтобы учитывать время затухания колебаний основания, на котором установлен гравиметр и величину возможной погрешности;

- при математическом моделировании высокочастотных гравиметрических данных, используя сейсмические измерения в качестве входной информации, вычитать полученное значение поправки следует из шестигерцовых гравиметрических отсчетов;

- при моделировании сигнала чувствительного элемента гравиметра, возможно использовать только данные вертикального канала сейсмической станции.

Глава 3 Методические приемы по учету влияния метеорологических факторов на точность гравиметрической съемки при её выполнении

На гравиметрические измерения, при проведении высокоточных гравиметрических наблюдений, оказывают влияние множество внешних факторов. Наиболее значительное воздействие оказывают приливные, сейсмические и метеорологические явления. Влияние сейсмических факторов было рассмотрено в предыдущей главе, а теперь рассмотрим влияние метеорологических факторов, таких как вариации атмосферного давления, изменение окружающей температуры, изменение влажности в пункте наблюдений. Из всех факторов, влияющих на гравиметрические измерения, они представляют наибольший интерес, поскольку регистрируются в широком диапазоне частот.

3.1 Оценка влияния изменения атмосферного давления на гравиметрические измерения

Реакция поверхности Земли на изменение атмосферного давления разной продолжительности изучалось многими авторами [6,7,34,78,85,90].

Локальное изменение давления учитывается использованием соответствующего коэффициента. Поправка за изменение атмосферного давления в мкГал вычисляется по формуле:

$$dG_p = (0,225 \div 0,5)\Delta P \quad (5)$$

где ΔP – изменение давления относительно нормального значения в мБар.

Однако, значение барометрической поправки уточняется уже несколько десятилетий и у разных авторов, в результате разных подходов значения варьируются. [84,104,106,111,113,114,117]. Для точного определения

барометрической поправки необходимо иметь сеть метеорологических станций на удалении нескольких сотен километров друг от друга. По данным с этих станций, при помощи отслеживания перемещения атмосферных фронтов возможно получение точной поправки [113]. При использовании только одной метеостанции на пункте наблюдений рекомендовано значение коэффициента -0.356 мкГал/мБар.

В современных гравиметрах предусмотрены системы учета и введения поправок, но несмотря на это наблюдается остаточное влияние воздействующих факторов. Вызвано это тем, что влияние изменения атмосферного давления учитывается простой аналитической формулой. В связи с этим получение точностей на уровне первых мкГал невозможно без использования дополнительной информации в пункте наблюдения. Для получения точности измерений на уровне первых мкГал необходимо параллельно с гравиметрическими наблюдениями проводить измерения вариаций атмосферного давления, необходимые для уточнения поправочных коэффициентов, обусловленных влиянием факторов непосредственно на пунктах наблюдений.

3.1.1 Учет влияния изменения атмосферного давления

Рассмотрим учет эффекта, наблюдаемого гравиметрами во время изменения атмосферного давления, на примере его понижения.

На рисунке 3.1 представлены графики гравиметрических измерений и изменения давления за период с 4 июля по 21 марта. Из данных был удален тренд применением полинома 4-го порядка.

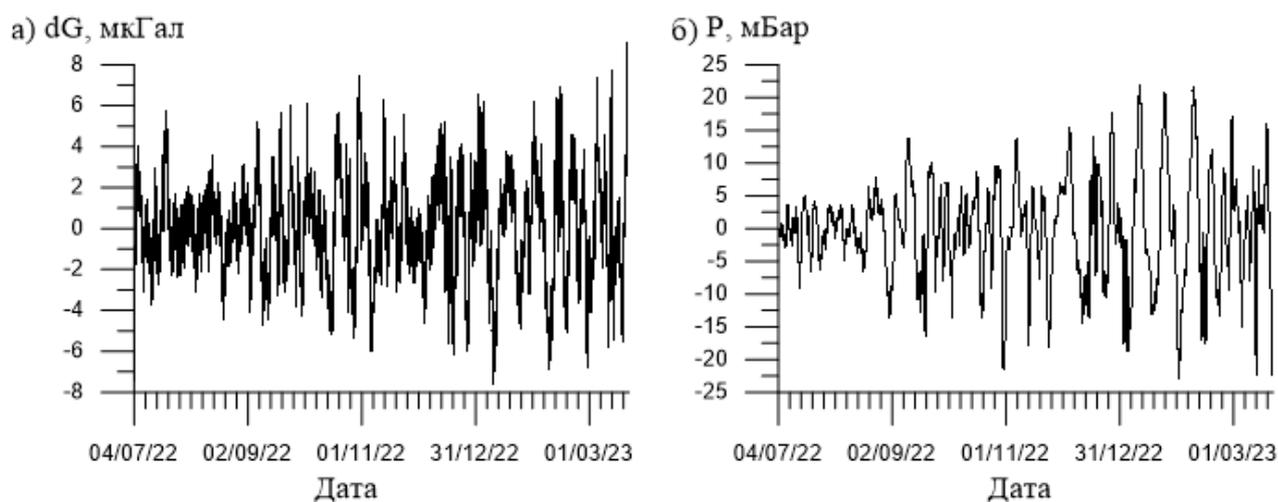


Рисунок 3.1 – Графики гравиметрических измерений (а) и изменения давления (б) за период с 4 июля по 21 марта

Применение стандартного коэффициента учета давления (-0.3 мкГал/мБар) не полностью компенсирует барометрическое влияние. СКО гравиметрических измерений при этом снижается с $2,375$ мкГал до $1,261$ мкГал. Определим поправочный коэффициент на пункте "Запольское". Для этого построим аппроксимирующую прямую [61] зависимости гравиметрических данных от изменения атмосферного давления (рисунок 3.2).

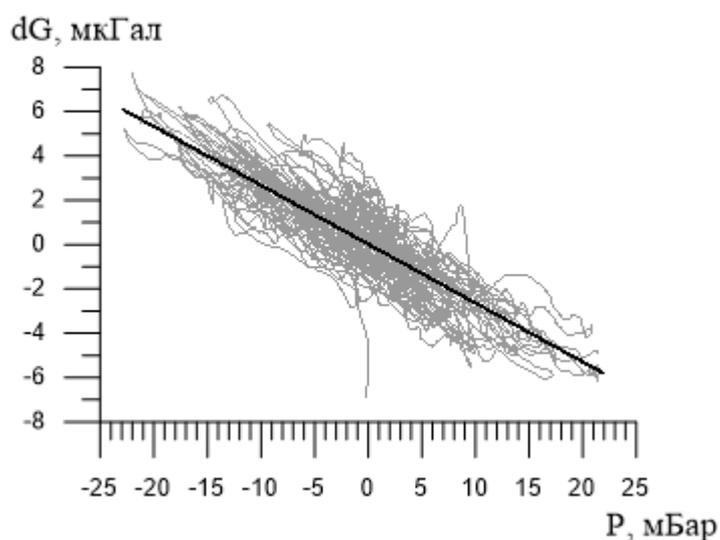


Рисунок 3.2 – Зависимость гравиметрических данных от давления (серый) аппроксимирующая кривая 1-го порядка (черный)

Угловой коэффициент прямой характеризует наклон и фактически является коэффициентом зависимости двух величин. Применение полученного коэффициента $-0,2972$ мкГал/мБар позволило повысить точность учета давления. Среднеквадратическое отклонение гравиметрических измерений снизилось до $1,030$ мкГал. График гравиметрических измерений с использованным поправочным коэффициентом приведен на рисунке 3.3.

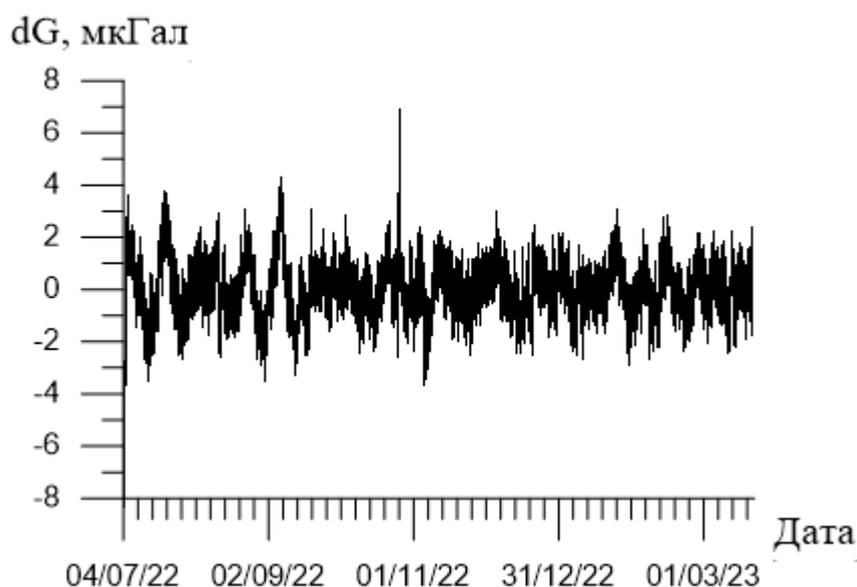


Рисунок 3.3 – График гравиметрических данных с использованным поправочным коэффициентом $-0,2972$ мкГал/мБар.

Данный подход предполагает, что для каждого гравиметра и на каждом гравиметрическом пункте целесообразно уточнять поправочный коэффициент влияния изменения атмосферного давления. Коэффициент влияния изменения атмосферного давления на пункте наблюдений "Запольское" составил $-0,2972$ мкГал/Бар. Предлагаемый прием позволяет устранить остаточное влияние атмосферного давления на гравиметрические измерения и повысить их точность [73].

3.1.2 Оценка влияния проходящих массивных атмосферных фронтов на гравиметрические измерения

Рассмотрим влияние массивного атмосферного фронта, прошедшего над пунктом измерения, на гравиметрические данные. Во время проводившегося наблюдения с 15 до 24 часов 10 июня проходил интенсивный фронт над точкой наблюдений. Дождь то усиливался, то ослабевал, но не прекращался в течение 9 часов. В этом интервале времени наблюдалось уменьшение уровня данных в показаниях гравиметров на величину до 3 мкГал (рисунок 3.4). На приведенном рисунке 3.4 тонкой сплошной красной линией показан рассчитанные данные с гравиметра для точки наблюдения, а двумя толстыми сплошными зелеными линиями - отфильтрованные показания двух гравиметров CG-5.

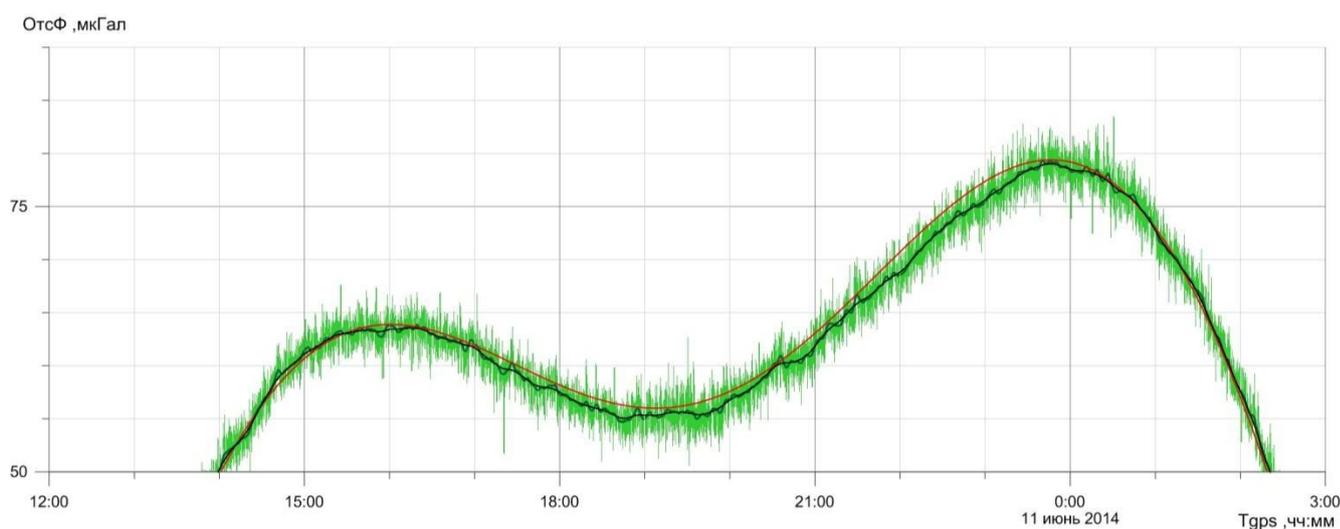


Рисунок 3.4 – Отфильтрованные гравиметрические данные с двух гравиметров CG-5 (зеленые кривые), вычисленный приливный эффект для точки наблюдения (красная кривая)

Как видно из рисунка 3.4 во время грозы в течение девяти часов ускорения силы тяжести, уменьшились на 2-3 мкГал. Практически синхронные отклонения одинаковой величины зафиксированы по двум гравиметрам CG-5. Возможно, что

наблюдаемый эффект был обусловлен большой массой дождевых облаков при довольно низкой грозовой облачности атмосферного фронта или каким-либо другим эффектом.

Влияние дождевой активности в ходе гравиметрических измерений ранее не рассматривалось. На базе экспериментального материала, полученного в ходе долговременных высокоточных гравиметрических наблюдений с помощью относительных гравиметров CG-5 со среднеквадратической погрешностью 1 мкГал на постаменте специально созданной геофизической обсерватории, выявлено, что во время сильной дождевой активности появляется систематическая погрешность измеряемой величины ускорения силы тяжести.

Таким образом, при выполнении высокоточных гравиметрических измерений, следует учитывать погрешность, вызванную прохождением интенсивного атмосферного фронта и наличия осадков над пунктом измерения или не выполнять в таких условиях гравиметрическую съемку.

3.2 Влияние изменения окружающей температуры на гравиметрические измерения

В процессе долговременных гравиметрических наблюдений заметное влияние на работу гравиметра оказывает изменение окружающей температуры, что приводит к еще одному источнику погрешности измерения – появлению нелинейной составляющей дрейфа нуля-пункта относительного гравиметра.

3.2.1 Оценка влияния перепада температуры на гравиметрические измерения при смене пункта наблюдений

Наземная гравиметрическая съемка подразумевает транспортировку гравиметра в разные пункты наблюдения согласно карте исследования и профилям, по которым совершают перемещение. Температурные условия в каждом пункте разные, следовательно, резкий перепад температуры может негативно сказаться на

дальнейшие гравиметрические измерения с точки зрения достижения точности. Необходимо детально изучить этот вопрос и дать рекомендации в методику проведения съемки для сохранения требуемой точности измерений.

В течение более чем 12 лет, по настоящее время, проводятся долговременные гравиметрические наблюдения на пункте первого класса “Запольское” и фундаментальном пункте “Ледово” попеременно [2,3]. С 2009 года приборы перевозились многократно по маршруту “Ледово” – “Запольское” и в обратном направлении; расстояние между пунктами составляет около 230 километров.

Одним из основных отличий в условиях наблюдений на этих пунктах, помимо разницы в значениях ускорения силы тяжести, являются температурные условия помещений. В пункте “Ледово” поддерживается комнатная температура, тогда как пункт “Запольское” – неотапливаемое помещение, и температура в нем в значительной мере зависит от внешней температуры, что вызывает неоднородность переходных процессов, возникающих при перемещении гравиметров между пунктами в зависимости от времени дня и года.

Относительные гравиметры CG-5 Autograv, несмотря на всю технологическую защищенность, подвержены воздействию внешних факторов. Минимизация эффекта от этих факторов позволяет повышать точность проводимых гравиметрических измерений. Так, с целью сохранения внутренней температурной стабильности чувствительного элемента, транспортировка гравиметров осуществлялась во включенном состоянии, в фирменных перевозочных контейнерах, что позволило снизить температурные перепады при перемещении гравиметров в автомобиль и из него на пункт наблюдений.

Возникающий в результате перемещения приборов переходный процесс в зарегистрированных данных представляет собой сумму влияния многих значимых параметров. Среди этих параметров можно выделить температуру окружающей среды, атмосферное давление, дрейф нуля чувствительного элемента гравиметра, вибрацию и удары, возникающие при транспортировке, и непосредственное приращение силы тяжести, являющееся главным искомым параметром. Вибрация и удары в нашем случае – это случайные параметры, вызванные транспортировкой,

влияние которых минимизируется за счет значительного количества измерений на пункте наблюдения. Значение атмосферного давления не выделяется отдельно, а учитывается вместе с дрейфом, в силу его медленного изменения на значительной площади [17,27,54].

Для определения возможности повышения точности выполнения гравиметрических измерений в первые часы после перемещения гравиметра с опорного пункта на пункт, на котором требуется провести измерения, необходимо было оценить характеристики переходных процессов. Пример полученной записи исходных данных с хорошо заметными дрейфом нуля-пункта и переходным процессом, начинающимся после скачка данных, возникшего из-за перемещения гравиметра между пунктами, представлен на рисунке 3.5.

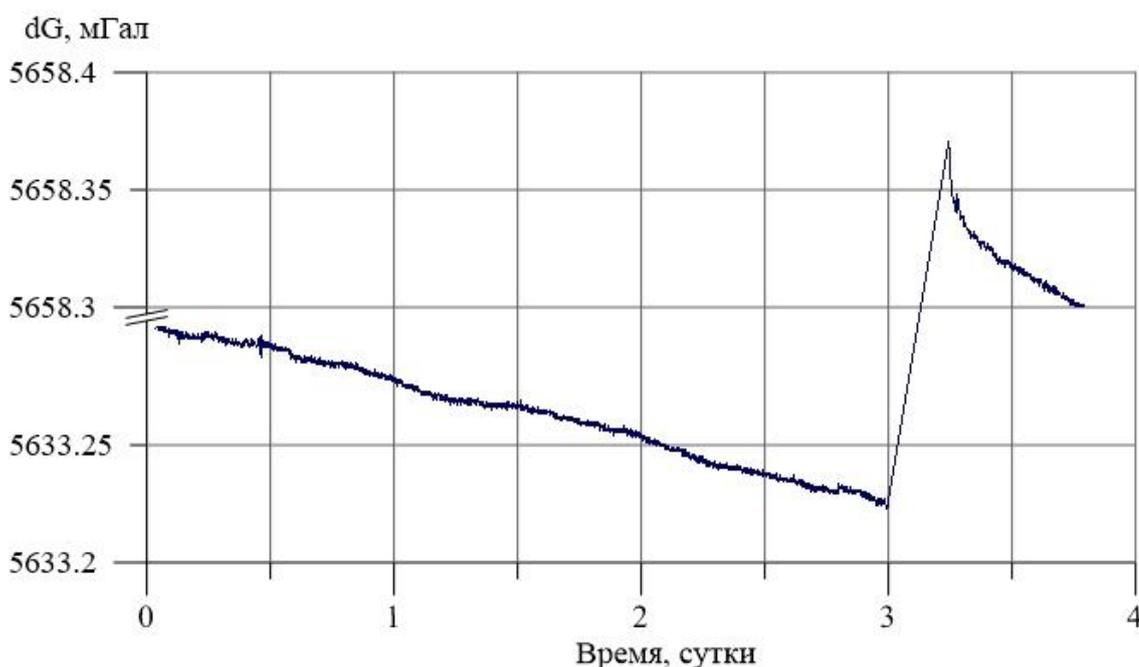


Рисунок 3.5 – Пример полученной записи исходных данных относительного гравиметра CG-5 Autograv с хорошо заметными дрейфом нуля-пункта и переходным процессом

Как видно на рисунке 3.5, наиболее значительное влияние на гравиметрические измерения оказывает дрейф нуля-пункта чувствительного элемента, составляющий от нескольких десятков до сотен мкГал/сут. Наличие в

данных такого фактора делает практически невозможным расчет разности ускорения силы тяжести между измерительными пунктами. На периоде в несколько суток дрейф нуля-пункта можно описать простой полиномиальной функцией, вычитанием которой из исходных данных можно получить достаточную точность снятия дрейфа [60,61,102]. Предлагается включить в методику проведения высокоточных гравиметрических измерений на пунктах наблюдений снятие дрейфа нуля гравиметра по данным, полученным на опорном пункте. Для этого целесообразно применять прогноз изменения нуля-пункта в виде полиномиальной функции. Полиномиальный прогноз заключается в получении коэффициентов полинома по данным, измеренным на опорном пункте в течение нескольких суток, и экстраполяции кривой полинома на время проведения полевых измерений с последующим уточнением после возвращения на опорный гравиметрический пункт. Полученная разница между измеренными значениями и экстраполированной кривой полинома и есть искомый прирост значения ускорения силы тяжести.

На основе критерия максимальной близости полинома к измерениям была определена оптимальная степень применяемого полинома. Был взят ряд данных с одного пункта длиной 3 суток, после чего по первым двум суткам определялись коэффициенты полиномов. Полученные кривые экстраполировались на третьи сутки, где сравнивались с гравиметрическими измерениями (рисунок 3.6).

Наиболее близкие значения к измерениям получаются по полиномам первой и второй степеней. Квадратичный полином, как максимально точно описывающий дрейф нуля на коротком промежутке времени, применялся в дальнейших расчетах.

После снятия дрейфа нуля-пункта в гравиметрических данных четко выделяется переходный процесс, который в течение нескольких часов (время зависит от внешних условий) приходит к значению разности ускорения силы тяжести между пунктами. Разность измеренных гравиметром значений ускорения силы тяжести между пунктами “Запольское” и “Ледово” составляет 25.136 мГал.

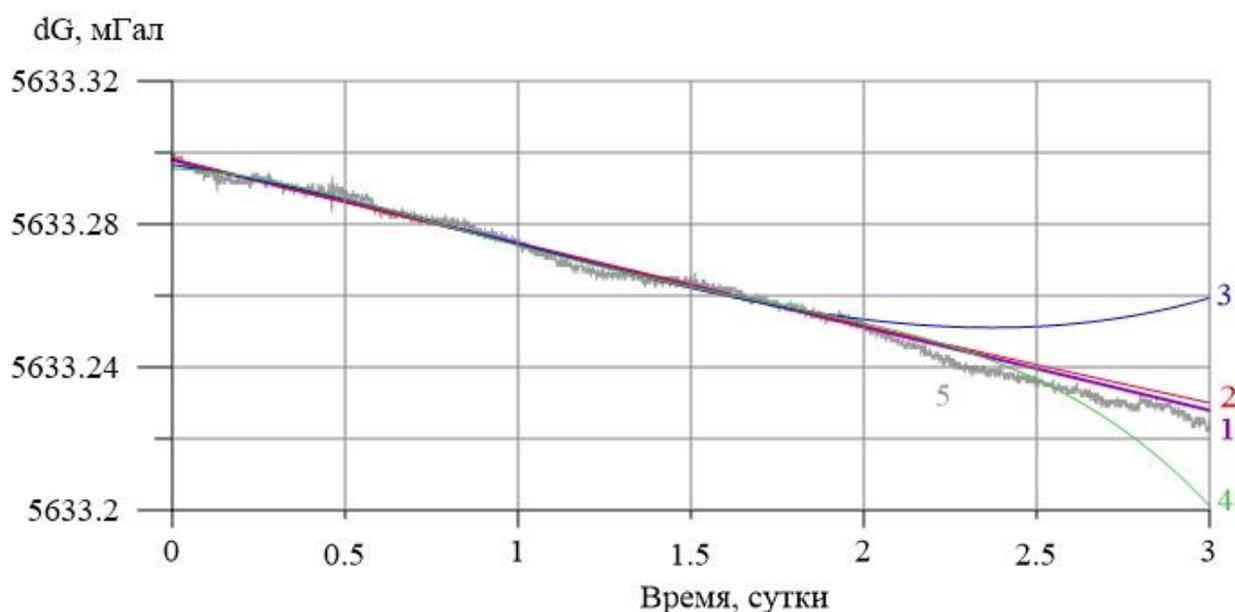


Рисунок 3.6 – Исходные гравиметрические данные (5) и кривые полиномов разных степеней: полином 1-й степени (1), полином 2-й степени (2), полином 3-й степени (3), полином 4-й степени (4)

Наблюдаемый в остаточных значениях четкий переходный процесс наиболее близко аппроксимируется логарифмической зависимостью:

$$Y = a * \lg X + b \quad (6)$$

где Y – относительное значение ускорения силы тяжести, X – время, a – продолжительность переходного процесса, b – уровень, к которому стремится значение гравиметрических данных после завершения переходного процесса. Иначе говоря, уровень гравиметрических данных – это разность значений ускорений силы тяжести между пунктами, а продолжительность переходного процесса описывает реакцию на значимый фактор – влияние перепада температуры окружающей среды вокруг гравиметра.

Для оценки влияния температуры на относительный гравиметр были выбраны участки, которые содержали переходные процессы, полученные в результате перемещения между “Запольским” и “Долгое Ледово”. При этом продолжительность нахождения в отправных точках составляла более 2 суток.

[105]. На выбранных участках было снято значение дрейфа, после чего произведена аппроксимация логарифмической функцией с получением соответствующих коэффициентов. На рисунке 3.7 приведен пример отрезка данных, полученного при перемещении гравиметра 12.05.2012 г., с перепадом температуры $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

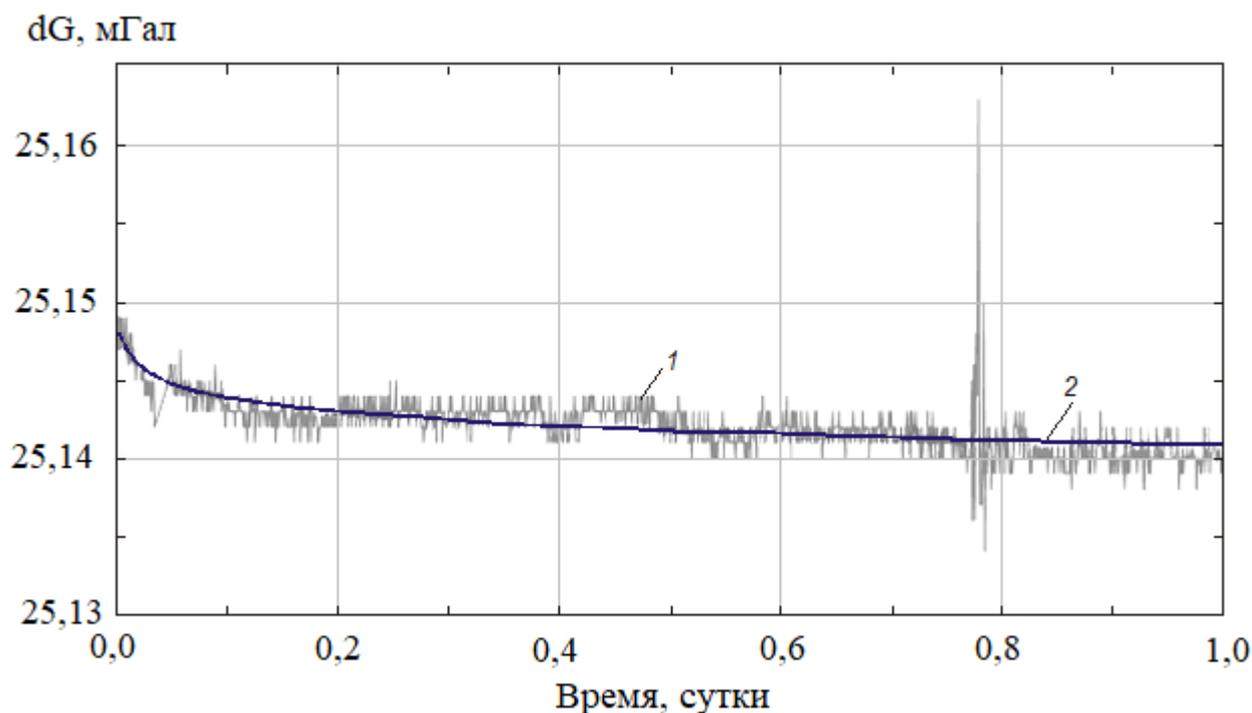


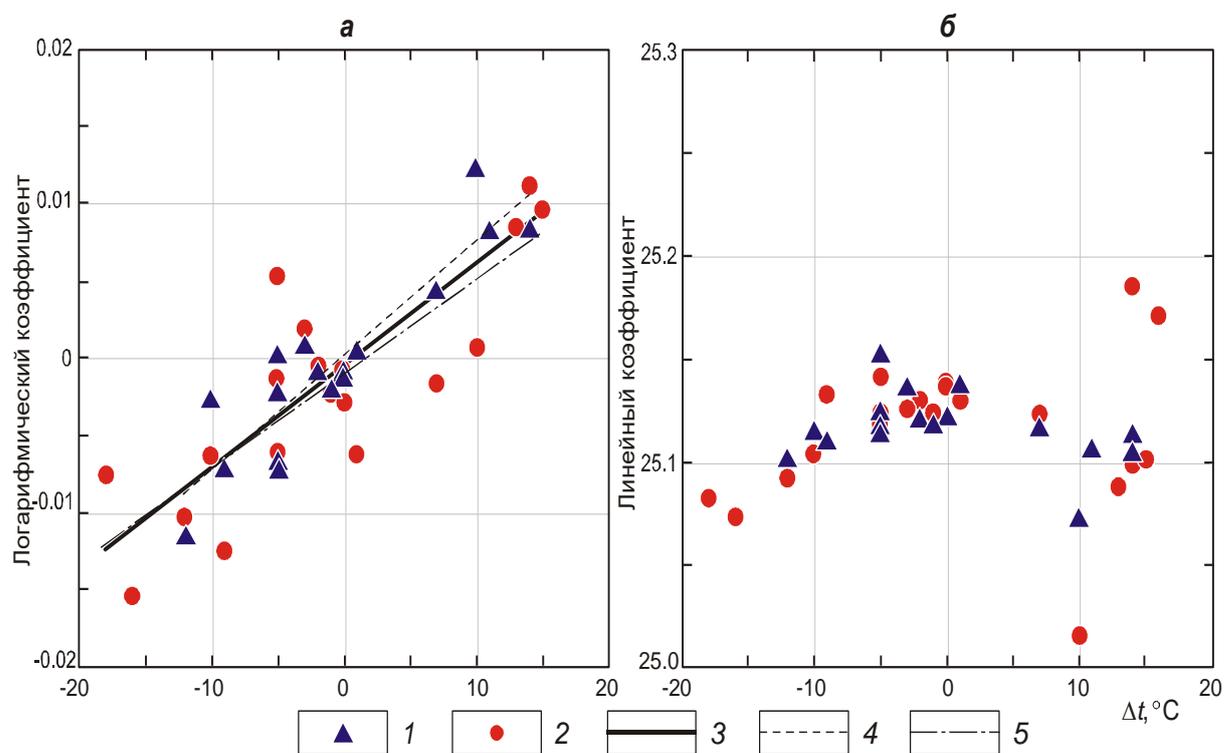
Рисунок 3.7 – Переходный процесс в гравиметрических данных после снятия дрейфа нуля (1) и аппроксимирующая его логарифмическая кривая (2)

Функция логарифмической аппроксимации при этом описывается выражением:

$$Y = -0.0013 \ln X + 25.1408. \quad (7)$$

В результате обработки данных были получены более 40 логарифмических уравнений аппроксимации гравиметрических данных. Поскольку гравиметры записывают также и показания температурных датчиков на корпусе приборов, эти данные были применены для получения аналитической зависимости коэффициентов логарифмических уравнений от температуры [81]. Сравнение температурных датчиков на гравиметре и сторонних приборах показало, что

датчики одинаково реагируют на изменение температуры, и их показания отличаются на постоянную величину в силу температуры работы гравиметров [72]. Во время транспортировки запись данных приборами не велась, однако они были во включенном состоянии и находились в перевозочных контейнерах, соответственно температурный режим можно считать более-менее стабильным, а значит, разность температур в точках старта и финиша мы и будем считать значением перепада температуры. Каждой паре коэффициентов логарифмических уравнений для каждого прибора соответствует свое значение перепада температуры. В качестве примера полученные зависимости коэффициентов от температуры представлены на рисунке 3.8.



Рисунке 3.8 – Зависимости логарифмических (а) и линейных (б) коэффициентов уравнения от перепада температуры: 1 – значения для первого гравиметра; 2 – значения для второго гравиметра; 3–5 – линейные аппроксимации для двух гравиметров вместе (3) и первого (4) и второго (5) по отдельности

Полученные зависимости логарифмического коэффициента от температуры описываются линейной функцией на всем диапазоне значений как для гравиметров

по отдельности, так и для всех данных в сумме: для первого прибора $Y = 0.000613X - 0.001125$, для второго $Y = 0.000748X + 0.000135$, для двух приборов по всем точкам $Y = 0.000661X - 0.000529$. Здесь через X обозначен перепад температуры, а через Y – соответствующий коэффициент. Линейность зависимости логарифмического коэффициента, а соответственно и продолжительности переходного процесса, от температуры показывает, ***что чем выше значение модуля разности температур, тем дольше происходит установка чувствительного элемента гравиметра на новый уровень.***

Зависимость линейного коэффициента от температуры оказалась несколько сложнее, но тоже довольно просто объясняется. Значения, наиболее близкие к искомому (25.136 мГал), получались при незначительном перепаде температур и при перепаде температуры в холодную сторону, то есть при перемещении из более теплого помещения в более холодное. Перемещение в более теплое помещение вызывает значительный разброс значений – от 25.014 до 25.186, что показывает необходимость большего времени для возвращения чувствительного элемента к устойчивому состоянию.

Обычная продолжительность проведения измерений на гравиметрических пунктах составляет порядка 10 мин. Для такой продолжительности была рассчитана относительная погрешность измерений Y и построена её зависимость от значения перепада температуры X , описываемая квадратичной формулой $Y = 0.0421 - 0.0007X + 0.0007X^2$ (рисунок 3.9).

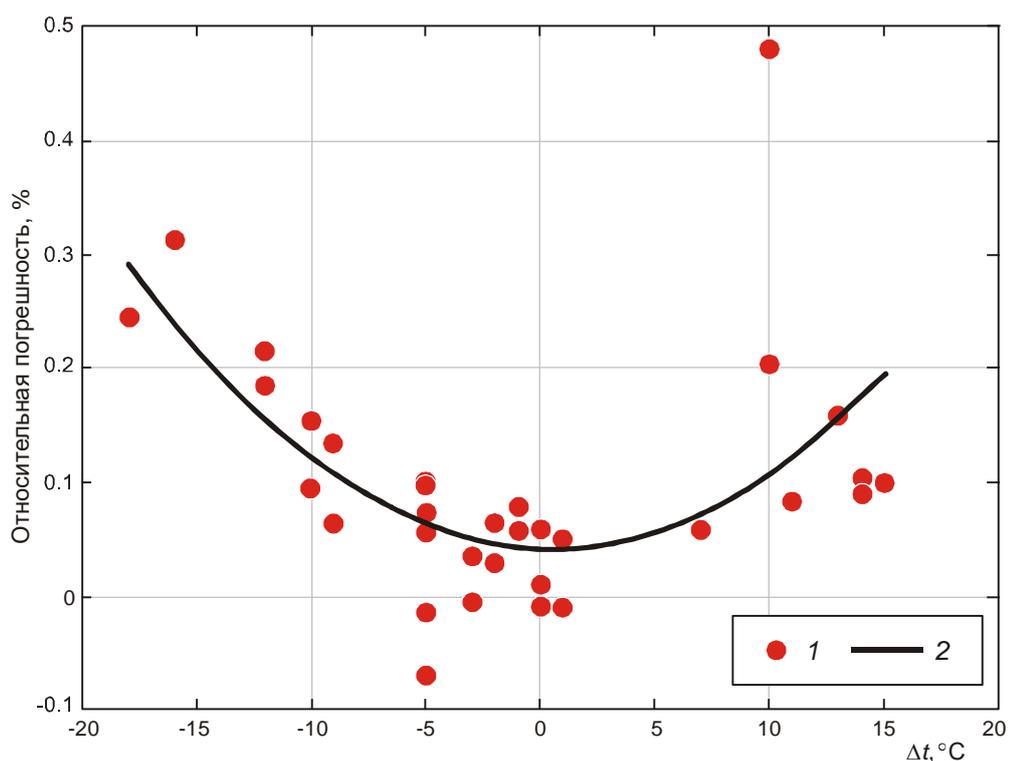


Рисунок 3.9 – Зависимость относительной погрешности измерений гравиметра от перепада температуры: 1 – рассчитанные погрешности определения разницы ускорения силы тяжести между пунктами в зависимости от зарегистрированного перепада температуры; 2 – кривая, аппроксимирующая все рассчитанные погрешности

Актуальность учета изменений температуры на пунктах измерений зависит от требуемой точности; например, при перепаде температуры на 10 °С среднеквадратическая погрешность гравиметрических измерений составила ± 0.025 мГал. При больших перепадах температуры время наблюдения на пункте измерения должно быть больше, чем 10 минут.

3.2.2 Исследования скорости смещения нуля-пункта гравиметра CG-5

Рассмотрим возможность учета влияния изменений внешней температуры (температуры корпуса гравиметра) на величину нелинейной составляющей нуля-пункта гравиметра *CG-5 Autograv*.

В относительном гравиметре предусмотрена защита от изменений внешней

температуры и атмосферного давления, которая достигается путем герметизации чувствительного элемента системы *Autograv* в вакуумной камере и температурной стабилизацией. Благодаря широкому диапазону рабочих температур, предполагается, что оператор может использовать систему *Autograv* в самых разных условиях в рамках его точностных характеристик [81]. Один из важнейших факторов, определяющих точность и достоверность получаемых гравиметрических данных, – это учёт дрейфа нуля-пункта гравиметра [33]. Малое смещение нуля-пункта гравиметра *CG-5* является результатом чрезвычайно устойчивой работы упругой кварцевой системы прибора и высокой степени термостабилизации. Стабильность работы гравиметра *CG-5* позволяет производить оценку линейного смещения нуля-пункта с точностью, составляющей менее чем 0.02 мГал/сут. Существующая точность определения постоянного смещения нуля-пункта дает возможность использовать гравиметрические данные для большинства областей применения [5,116]. Однако, при проведении долговременных гравиметрических наблюдений, нелинейная составляющая смещения нуля-пункта приводит к существенным погрешностям.

При выполнении долговременных стационарных наблюдений имеется возможность изучения зависимости дрейфа нуля-пункта гравиметра от изменений температуры окружающей среды. Пункт “Запольское” расположен в неотапливаемом теплоизолированном помещении, а пункт “Ледово” находится в отапливаемом помещении с практически постоянной температурой.

Фрагмент отсчётов гравиметра *CG-5 Autograv* № 350, зарегистрированный на пунктах “Ледово” – “Запольское” – “Ледово” в период с 19.11.2018 по 12.05.2020 гг. при отключенном автоматическом учёте постоянного смещения, представлен на рисунке 3.10.

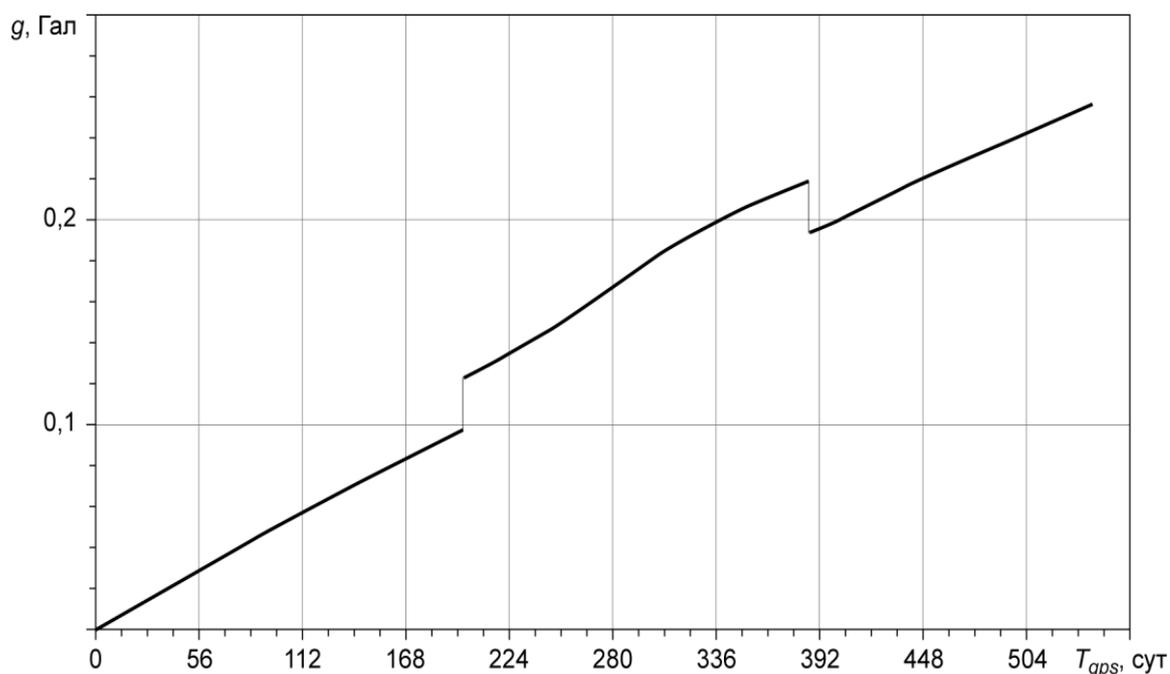


Рисунок 3.10 – Фрагмент отсчетов гравиметра *CG-5 Autograv* № 350, полученный на пунктах “Ледово” – “Запольское” – “Ледово” с 19.11.2018 по 12.05.2020 г.

Можно видеть, что смещение нуль-пункта носит в основном линейный характер. Скачки в отсчетах вызваны разницей в величине значений ускорения силы тяжести на гравиметрических пунктах при перемещении прибора.

Инструкцией по эксплуатации гравиметра *CG-5 Autograv* предусмотрена следующая процедура для определения скорости дрейфа:

- накопление отсчётов (рекомендованное время накопления 24 либо 12 часа);
- учёт лунно-солнечной гравиметрической поправки (обязательно);
- расчёт скорости дрейфа нуль-пункта (приращение к заданному периоду накопления).

Следует отметить, что повторение данной калибровочной процедуры предусматривается довольно часто. Однако это не всегда возможно при непрерывных долговременных наблюдениях. Поэтому вместо указанной процедуры было предложено провести фильтрацию накопленных во время наблюдений отсчётов в целях подавления микросейсмических шумов, снижения влияния сейсмических событий, не полного учёта лунно-солнечного и частично барометрического эффекта с последующим определением скорости дрейфа нуль-

пункта гравиметра. В данном исследовании постоянная времени фильтра была принята равной 36 часов.

В качестве фильтра использовался цифровой аналог аperiodического звена. В этом случае, чтобы исключить фазовый сдвиг, фильтрация проводилась последовательно – сначала в “прямом”, а затем в “обратном” времени, что привело к подавлению высокочастотной составляющей на уровне –40 дБ на частотах выше частоты среза [95]. Для определения скорости дрейфа применялось дифференцирование результата фильтрации. Итоги указанной процедуры приведены на рисунке 3.11.

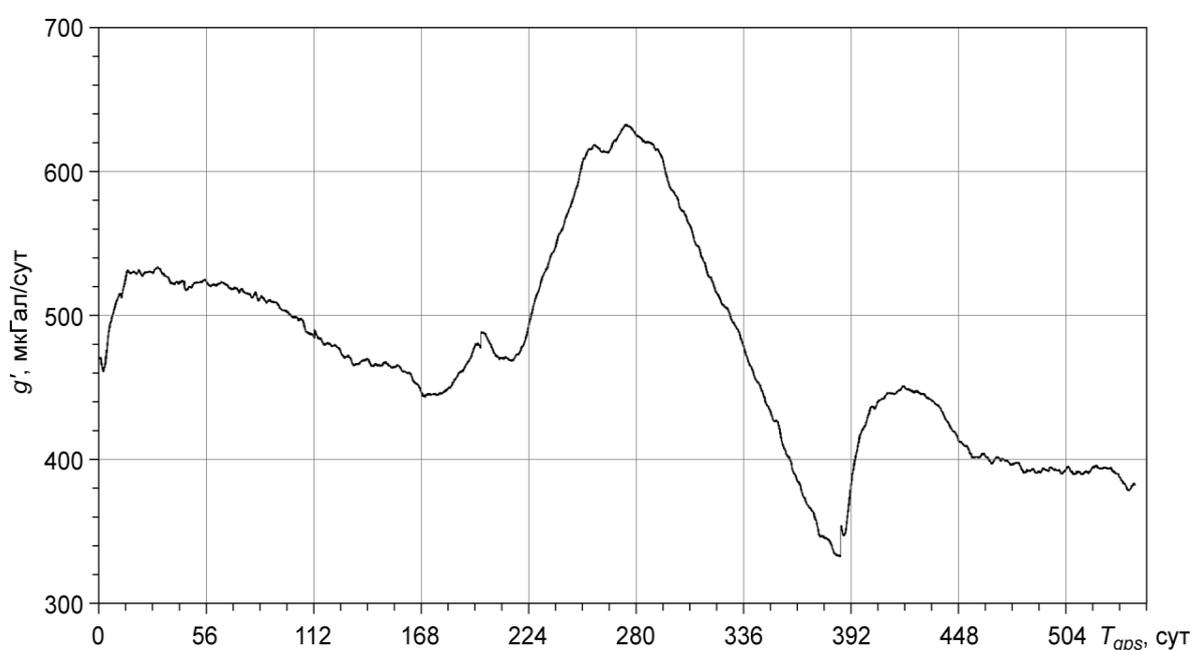


Рисунок 3.11 – Скорость дрейфа нуля-пункта гравиметра g' , мкГал/сут, зафиксированная за период наблюдений с 19.11.2018 по 12.05.2020 гг.

На представленном графике видно, что скорость дрейфа нуля-пункта гравиметра носит достаточно сложный характер. В то же время график изменения температуры корпуса гравиметра имеет примерно тот же вид (рисунок 3.12). Ряд естественным образом разделен на три участка, соответствующих расположению прибора в разных пунктах наблюдения. Первые два участка использовались для определения параметров вычисления “эффективной” температуры, а третий – в качестве контрольного для апробирования результатов.

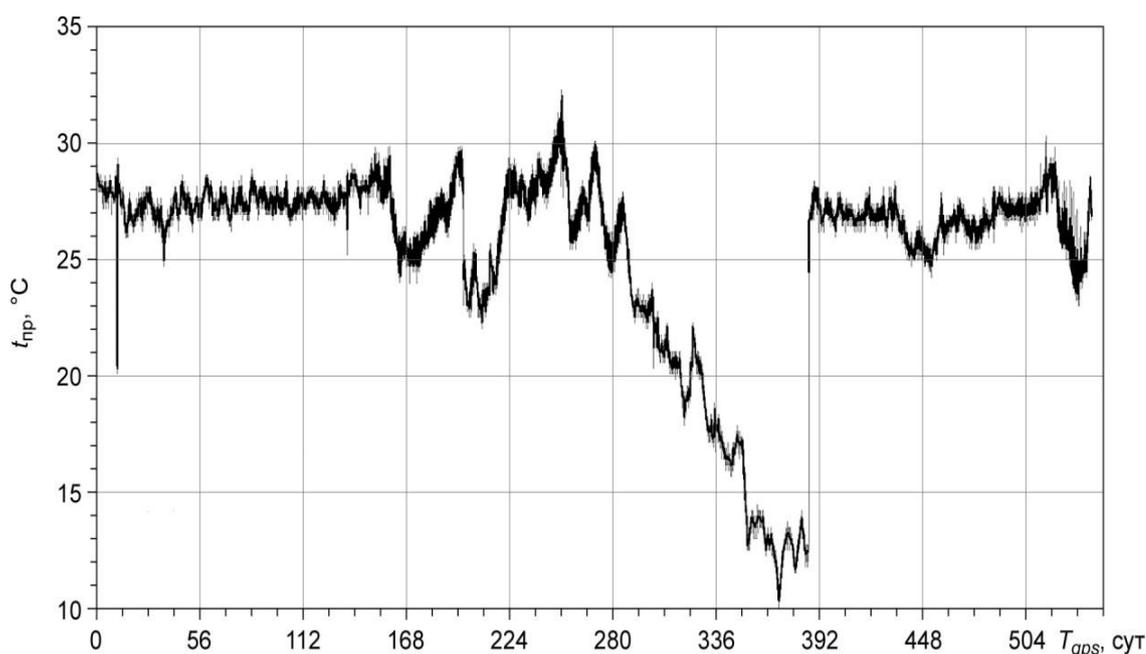


Рисунок 3.12 – Значения температуры корпуса гравиметра $t_{гр}$, °C, зафиксированные за период наблюдений с 19.11.2018 по 12.05.2020 гг.

В ходе исследований были установлены характеристики зависимости скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра от изменения температуры. Находясь на гравиметрическом пункте “Запольское” в неотапливаемом помещении, корпус гравиметра постепенно охладился до 12 градусов Цельсия, после чего относительный гравиметр был перемещен на фундаментальный гравиметрический пункт “Долгое Лёдово” с температурой окружающей среды порядка 20–22 градусов Цельсия. Таким образом было обеспечено практически классическое воздействие скачка температуры на скорость дрейфа нуля-пункта гравиметра.

Также было определено инерционное запаздывание показаний гравиметра от изменения температуры. Была получена математическая модель температурной релаксации, которая позволила установить “эффективную” температуру, максимально точно описывающую воздействие на скорость дрейфа. На рисунке 3.13 представлена структурная схема вычисления “эффективной” температуры $t_{эфф}$ при изменении температуры прибора $t_{пр}$.

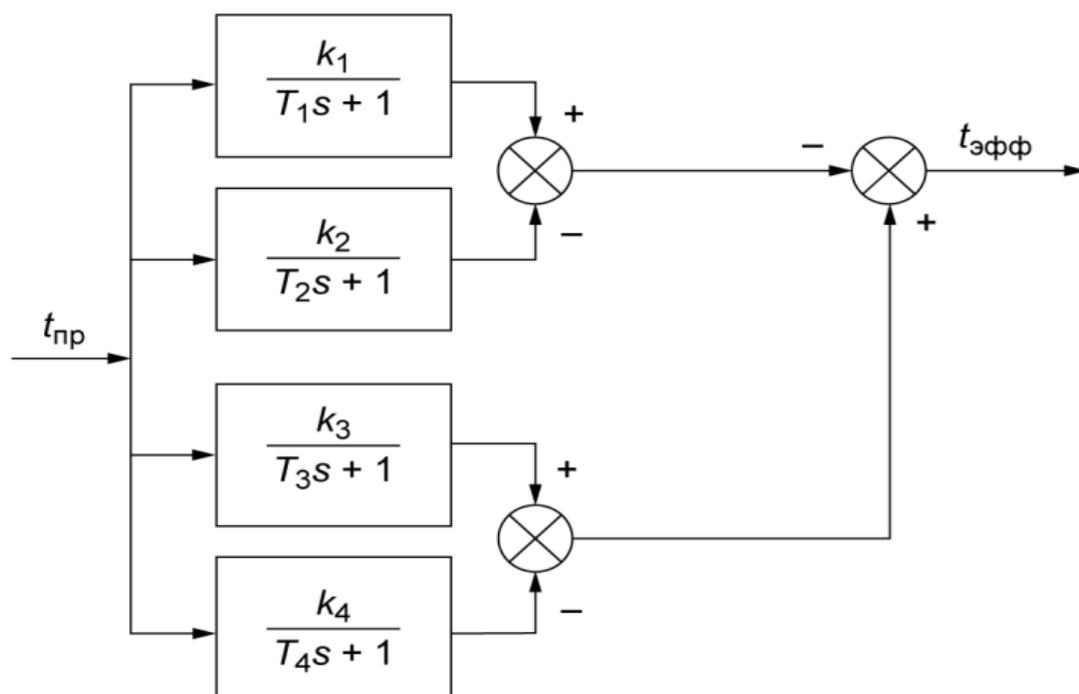


Рисунок 3.13 – Структурная схема вычисления “эффективной” температуры $t_{эфф}$.

Прямоугольниками обозначены передаточные функции преобразования температуры прибора $t_{пр}$; кругами – сумматоры сигнала с соответствующим знаком; k_1-k_4 – коэффициенты усиления; T_1-T_4 – постоянные времени преобразования; s – оператор дифференцирования

Параметры для вычисления “эффективной” температуры, учитывающей конструктивные особенности прибора, были установлены эмпирическим путем и составили $T_1=4$ суток, $T_2=5$ суток, $T_3=15$ суток, $T_4=30$ суток. Значения коэффициентов усиления $k_1=0.22$, $k_2=0.22$, $k_3=1.05$, $k_4=1$ подбирались исходя из максимизации корреляции между “эффективной” температурой и скоростью дрейфа нуля-пункта гравиметра.

“Эффективная” температура совместно со скоростью дрейфа нуля-пункта гравиметра, «пропущенная» через фильтр с постоянной времени равной 36 часов, и с учтенной линейной составляющей дрейфа нуля-пункта гравиметра представлена на рисунке 3.14. Коэффициент корреляции между ними составляет 0.981.

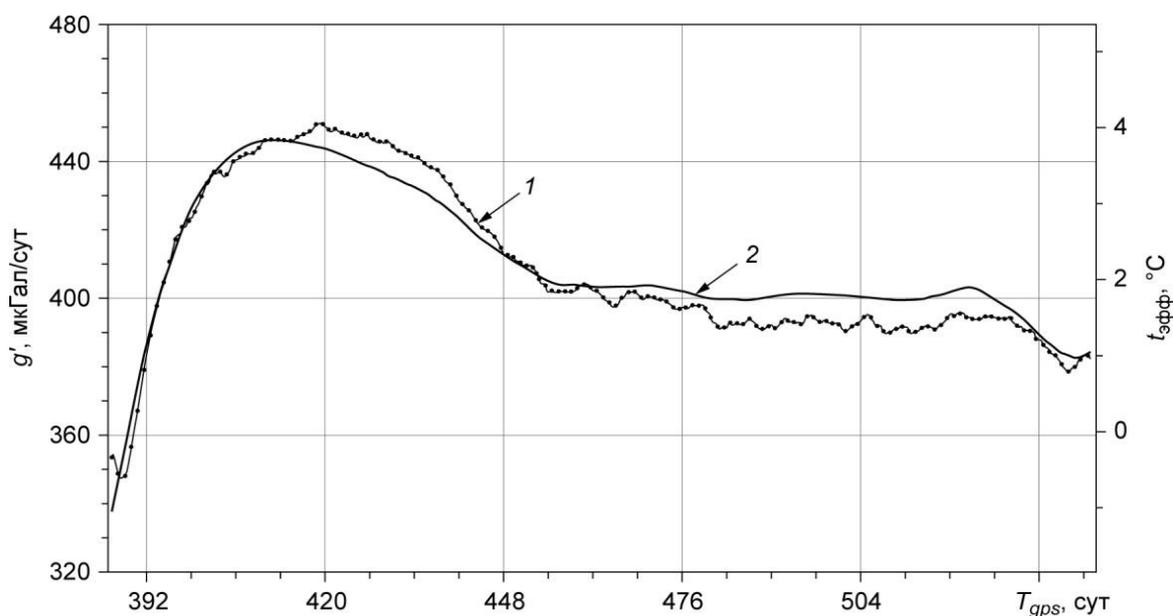


Рисунок 3.14 – Скорость дрейфа нуля-пункта гравиметра g' (1, левая шкала) и “эффективная” температура $t_{эфф}$ (2, правая шкала), полученные за период наблюдений с 15.12.2019 по 04.05.2020 гг.

При построении графика зависимости скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра от “эффективной” температуры (рисунок 3.15) была получена аппроксимирующая прямая, тангенс угла наклона которой использован в качестве коэффициента пересчета значений температуры в поправку, учитывающую нелинейную составляющую дрейфа нуля-пункта. Необходимо отметить, что скорость дрейфа нуля-пункта гравиметра целесообразно разделить на линейную и нелинейную составляющие. Линейная составляющая учитывается с помощью соответствующих коэффициентов, а нелинейная - как раз является предметом исследований.

Структурная схема модели компенсации нелинейной составляющей дрейфа нуля-пункта гравиметра показана на рисунке 3.16. Модель компенсации нелинейной составляющей дрейфа по значению “эффективной” температуры совместно с моделью температурной релаксации можно представить в виде алгоритма учета влияния внешней температуры на нелинейную составляющую скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра [38].

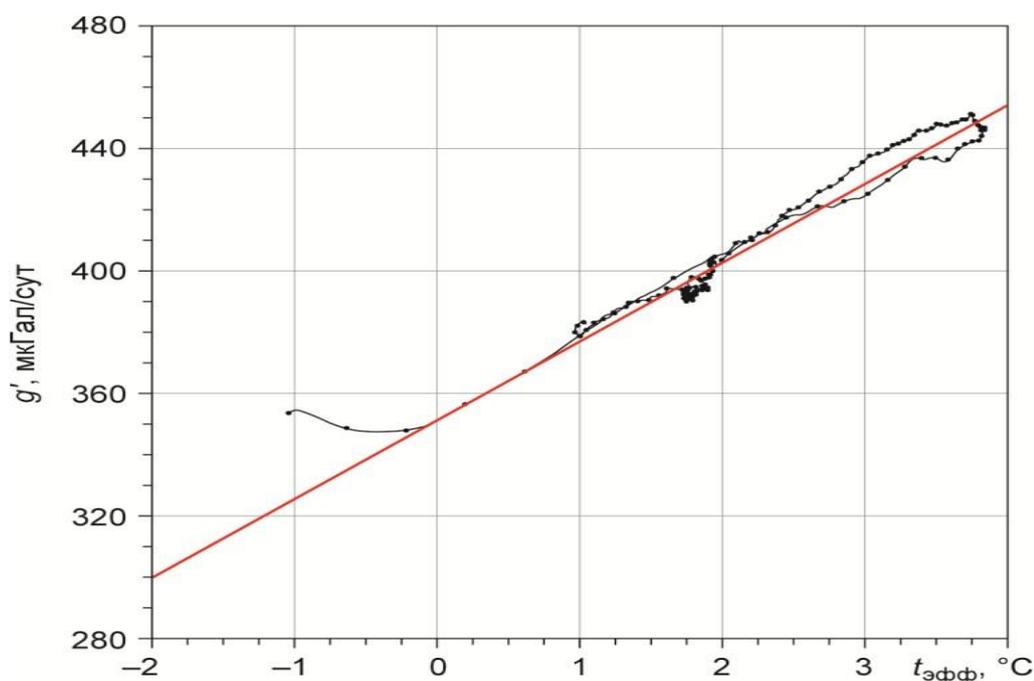


Рисунок 3.15 – Зависимость скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра g' от “эффективной” температуры $t_{эфф}$. Красной линией обозначена аппроксимирующая прямая, описываемая уравнением $y=25.67 \cdot t_{эфф}+351.49$



Рисунок 3.16 – Структурная схема модели компенсации нелинейной составляющей дрейфа по значению “эффективной” температуры (сумматор обозначен кружком)

В результате компенсации нелинейной составляющей скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра по значению внешней температуры с использованием созданной модели погрешность учета скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра уменьшилась на порядок на полугодовом ряде измерений (рисунок 3.17).

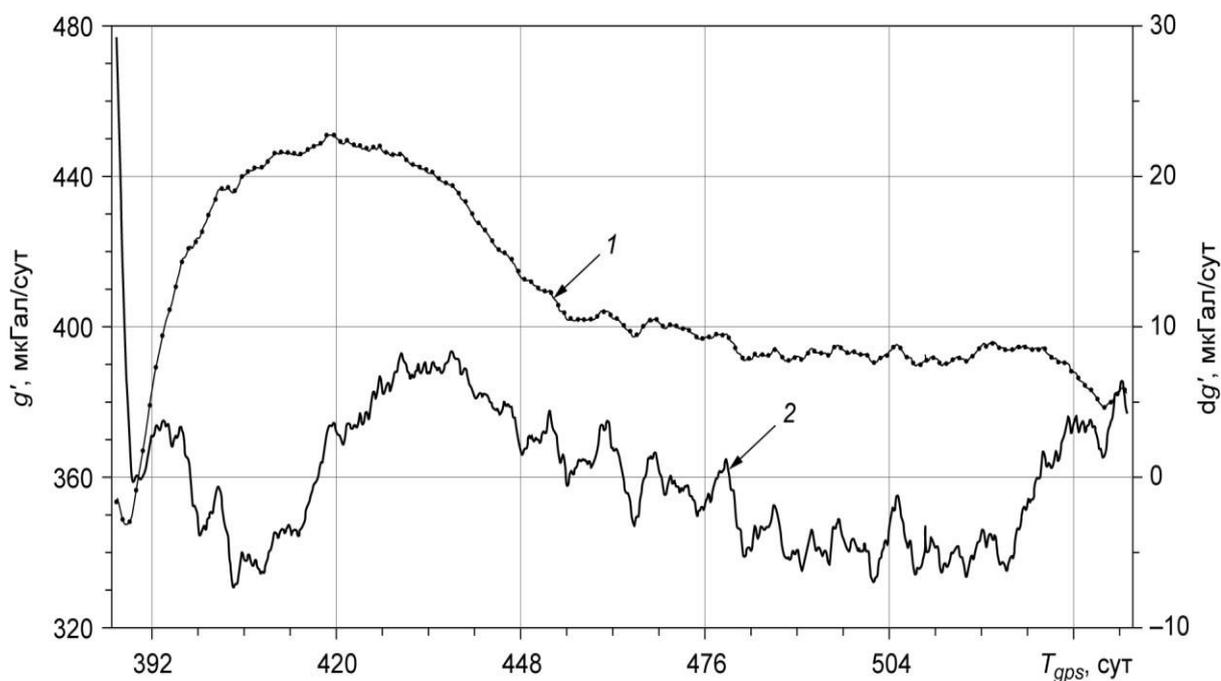


Рисунок 3.17 – Скорость дрейфа гравиметра g' (1, левая шкала) при долговременных наблюдениях и ее уточненное значение dg' (2, правая шкала) за период наблюдений с 15.12.2019 по 04.05.2020 гг.

Следует отметить, что полученный результат был достигнут при работе гравиметра в отапливаемом помещении, где колебания температур сводились к минимуму. При работе прибора в условиях постоянно меняющейся температуры структура модели компенсации останется неизменной, однако потребуется уточнение значений параметров модели. Это же относится и к использованию других аналогичных гравиметрических приборов.

3.3 Оценка влияния влажности на высокоточные гравиметрические измерения

В диссертационной работе было выполнено исследование влияния влажности на работу гравиметра при длительных гравиметрических измерениях.

Наблюдения выполнялись в помещении лаборатории на фундаментальном гравиметрическом пункте «Ледово» [99]. Для выполнения эксперимента был

изготовлен и помещён на гравиметрический постамент изолирующий короб (рисунок 3.18), внутри которого были созданы условия для поддержания максимальной 100%-ной влажности. Расположение гравиметра CG-5 Autograv и датчиков профессиональной интернет метеостанции «meteoscan 937PRO», позволяющей измерять влажность, температуру и давление, представлено на рисунке 3.19. Кроме этого, внутрь короба помещался увлажнитель воздуха, с помощью которого достигалась требуемая влажность.

Эксперимент выполнялся в несколько этапов. На первом этапе на постамент был установлен изолирующий короб для минимизации его влияния на наклон гравиметра [39,50].

Второй этап был посвящен достижению 100% влажности внутри изолирующего короба. На первых двух этапах эксперимента гравиметр находился на постаменте для определения значения нуль-пункта при значении влажности лабораторного помещения.



Рисунок 3.18 – Общий вид изолирующего короба на постаменте фундаментального гравиметрического пункта «Ледово»



Рисунок 3.19 – Расположение гравиметра CG-5 Autograv и датчиков метеостанции «meteoscan 937PRO» внутри изолирующего короба

Третий этап представлял собой активную фазу эксперимента, в которой гравиметр был помещен в экстремальные условия.

Четвертый этап – релаксация гравиметра в лабораторных условиях.

График выполнения этапов эксперимента, включающий их продолжительность и расположение аппаратуры, приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – График выполнения этапов эксперимента

Этап	Размещение аппаратуры	Срок
1	Гравиметр установлен на постамент, где работал в обычном режиме. Датчики метеостанции в изолирующем коробе. Крышка изолирующего короба открыта. Увлажнитель воздуха отсутствует.	1-7 день
2	Гравиметр установлен на постамент, где работал в обычном режиме. Датчики метеостанции в изолирующем коробе. Крышка изолирующего короба зарыта. Увлажнитель воздуха установлен.	8-14 день
3	Гравиметр установлен в изолирующий короб. Датчики метеостанции в изолирующем коробе. Крышка изолирующего короба зарыта. Увлажнитель воздуха установлен.	15-64 день
4	Гравиметр установлен в изолирующий короб. Датчики метеостанции в изолирующем коробе. Крышка изолирующего короба открыта. Увлажнитель воздуха отсутствует.	65-142 день

На рисунке 3.20 представлены графики изменения метеофакторов во время проведения эксперимента. Можно видеть, что резких скачков атмосферного давления не зарегистрировано (рисунок 3.20 а). После достижения внутри изолирующего короба требуемой влажности около 100%, на четырнадцатые сутки с момента начала эксперимента (рисунок 3.20 б), в изолирующий короб был установлен гравиметр, после чего внутри короба температура повысилась на 1,5 С⁰ (рисунок 3.20 в). Следует отметить, что изменение внешней температуры на полтора градуса не приводит к существенному изменению дрейфа нуля-пункта гравиметра. Кратковременные изменения влажности на рисунке 3.20 объясняются открытием изолирующего короба для еженедельного контроля технического состояния оборудования и снятия отсчетов гравиметра.

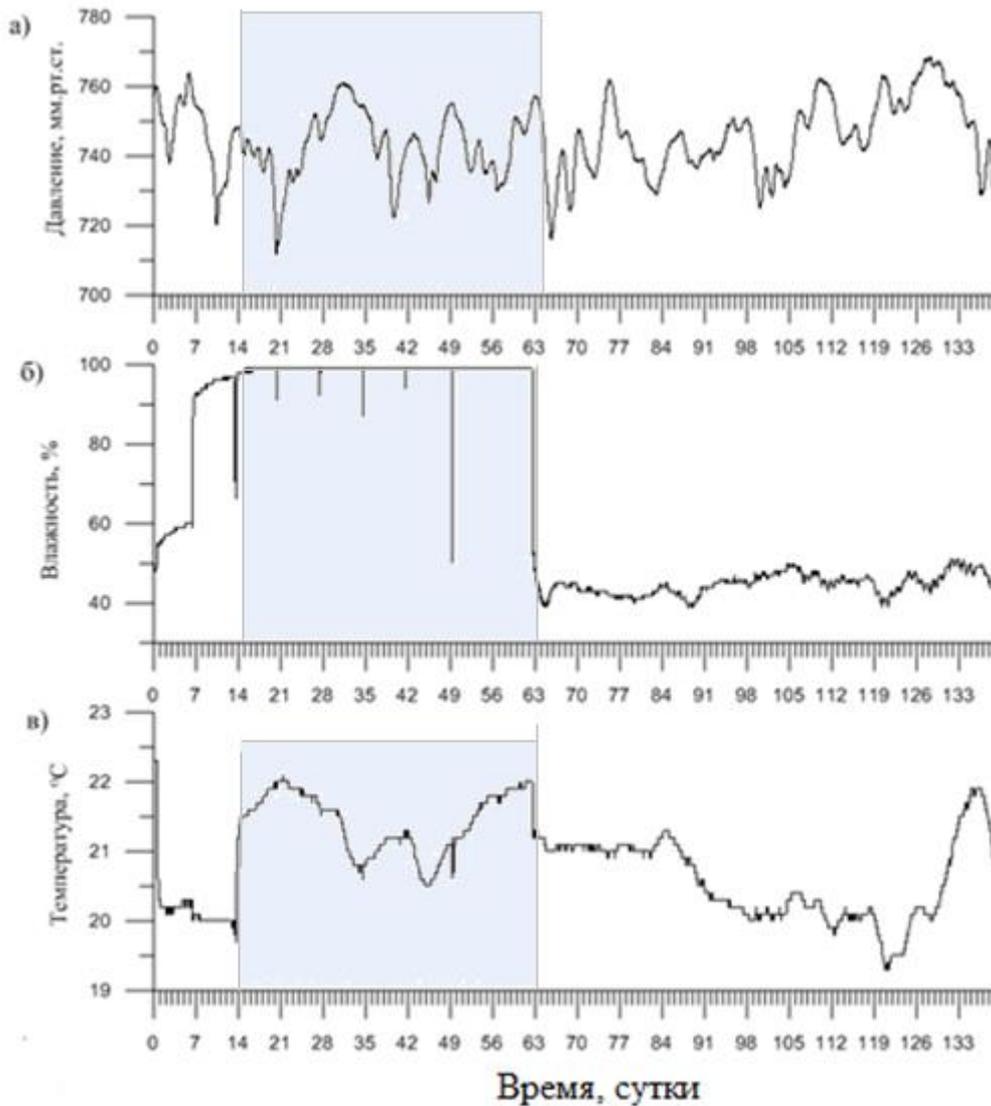


Рисунок 3.20 – Графики изменения метеофакторов внутри изолирующего короба, снятые с помощью метеостанции meteoscan 937PRO: а) давление; б) влажность; в) температура

Зарегистрированное значение показаний гравиметра, т.е. дрейфа нуля-пункта гравиметра относительно первого дня эксперимента, представлено на рисунке 3.21 (а). Чтобы снизить влияние высокочастотных шумов (микросейсм, лунно-солнечных приливов, внутренних шов прибора и т.д.), выполнялась предварительная фильтрация отсчётов гравиметра с постоянной времени 24 часа.

Нелинейная составляющая дрейфа нуля-пункта гравиметра (рисунок 3.21 б) получена путем вычитания из величины дрейфа его линейной составляющей.

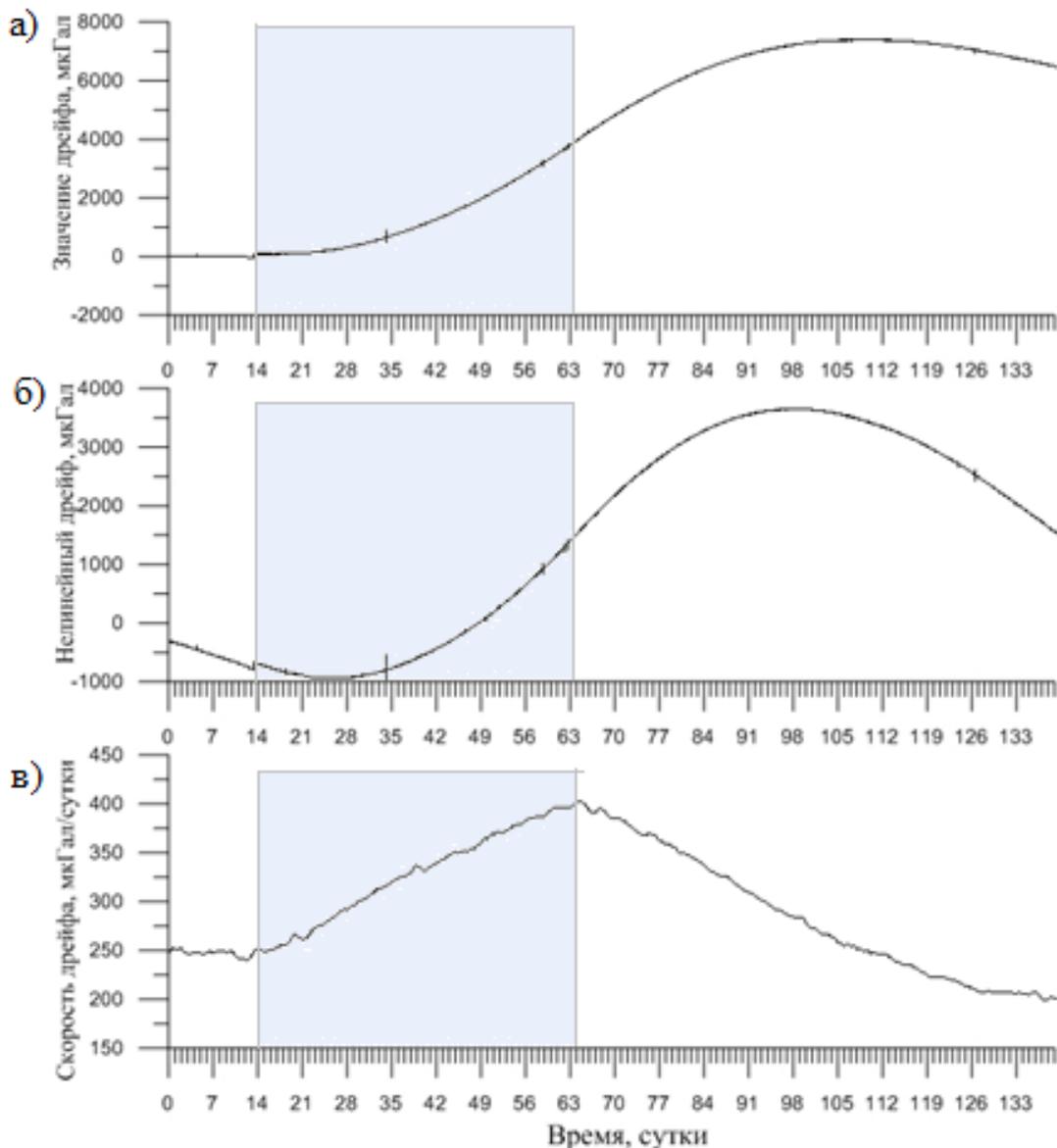


Рисунок 3.21 – Данные полученные по гравиметрическим отсчетам: а) значение дрейфа; б) нелинейный дрейф; в) скорость дрейфа

После снятия линейной составляющей дрейфа, полученной по первому и заключительному дню эксперимента, видно, что нелинейная, а, следовательно, и не учтенная величина дрейфа нуля-пункта достигает величины более 3 мГал за время проведения эксперимента.

Скорость дрейфа нуля-пункта гравиметра, вычисленная путем дифференцирования значений дрейфа нуля-пункта гравиметра, которая четко показывает ее зависимость от времени проведенного гравиметром в условиях 100% влажности представлена на рисунке 3.21 (в). Перед установкой гравиметра в

изолирующий короб дрейф его нуль-пункта составлял 250 мкГал/сутки с естественным отрицательным трендом. В условиях 100% влажности значение скорости дрейфа нуль-пункта стало резко, практически линейно, расти. Через 49 дней после помещения гравиметра во влажную среду был завершён третий этап эксперимента, и крышка изолирующего короба была открыта. К этому моменту скорость дрейфа нуль-пункта гравиметра достигла значения в 400 мкГал/сут. После открытия крышки изолирующего короба и извлечения из него увлажнителя воздуха влажность и температура сравнялись с естественными значениями в лаборатории. Скорость дрейфа нуль-пункта гравиметра стала снижаться пока не достигла своего начального значения порядка 220 мкГал/сутки.

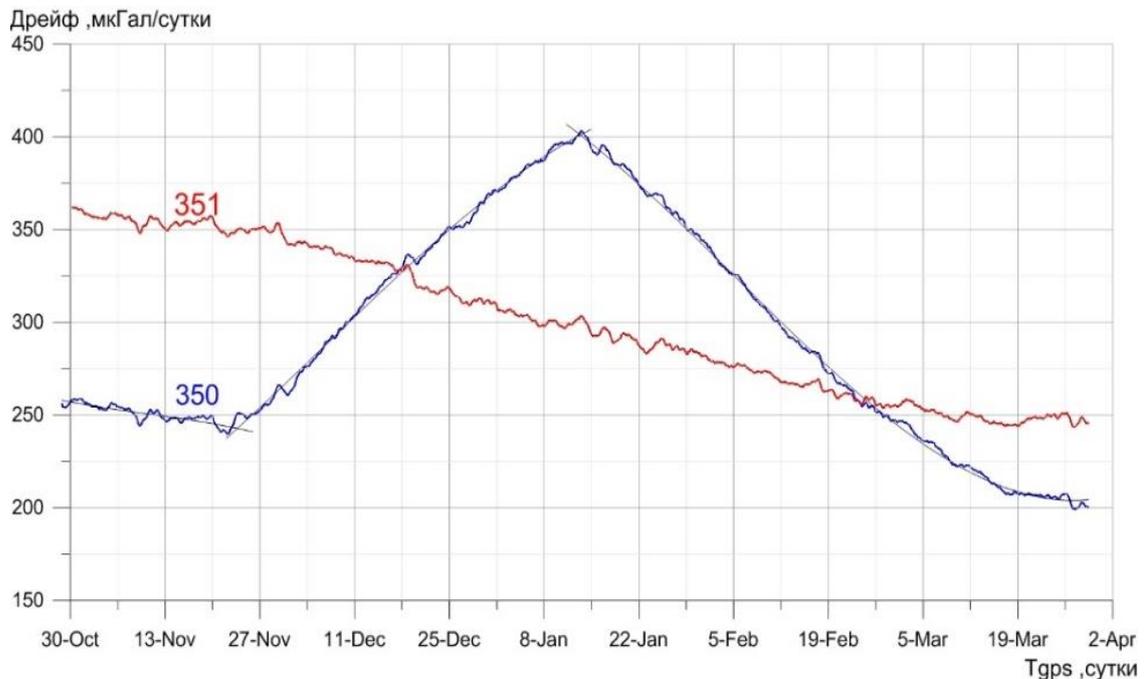


Рисунок 3.22 – Зависимость скорости дрейфа от времени для двух относительных гравиметров

Для сравнения, на рисунке 3.22 показана зависимость скорости дрейфа нуль-пункта от времени для двух относительных гравиметров. Гравиметр №350 работал в условиях 100% влажности, в тоже время гравиметр № 351 располагался на соседнем постаменте в условиях естественной влажности в лаборатории, порядка 40%. У гравиметра №351 виден естественный отрицательный тренд, у гравиметра

№350 видно увеличение скорости дрейфа в экстремальных условиях при высокой влажности [52,103].

Таким образом, влажность окружающего воздуха – один из основных факторов, влияющих на скорость дрейфа нуля-пункта гравиметра CG-5 Autograv. Изменение влажности приводит к увеличению нелинейной составляющей дрейфа нуля-пункта гравиметра. Это условие необходимо учитывать при долговременных гравиметрических наблюдениях в шахтах, штольнях и т.д., где присутствуют условия повышенной влажности.

По результатам этого исследования необходимо отметить, при выполнении долговременных высокоточных гравиметрических наблюдений необходимо в помещении, где располагается прибор поддерживать не только постоянную температуру, но и постоянный уровень влажности. А также то, что продолжительность во времени «петель»: опорный пункт – пункты измерений – опорный пункт целесообразно уменьшить.

Выводы по материалам главы 3

В результате проведенных экспериментов получены следующие основные выводы:

1. Показана необходимость при проведении высокоточной гравиметрической съемки непрерывного отслеживания метеофакторов и их изменения (температуры, давления, влажности).

2. Показано, что существующее термостатирование чувствительной системы относительного гравиметра позволяет выполнять высокоточную гравиметрическую съёмку продолжительностью до двух суток без учёта нелинейной составляющей дрейфа нуля-пункта гравиметра. Нелинейная же составляющая скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра зависит от температуры окружающей среды и ее изменения.

3. При проведении высокоточных гравиметрических измерений на нескольких гравиметрических пунктах нужно учитывать, что погрешность

вызванная перепадом температуры имеет квадратичную зависимость и достигает 0.1–0.2 % в случае высокой (более 10 °С) температурной разницы.

4. При транспортировке гравиметра с одного пункта измерений на другой установка чувствительного элемента на новый уровень происходит тем дольше, чем выше значение модуля разности температуры.

5. Показано, что для гравиметра, находящегося на пункте измерения, целесообразно уточнить поправочный коэффициент влияния изменения атмосферного давления, а не использовать тот, который рекомендован в Инструкции эксплуатации гравиметра.

6. Сформулированы методические приемы учета влияния метеорологических факторов на точность измерений при выполнении долговременной гравиметрической съемки:

- в составе с относительным гравиметром и сейсмостанцией необходима станция метеорологических наблюдений, которая в автоматическом режиме должна измерять давление, температуру и влажность в точке наблюдений;

- при выполнении высокоточной гравиметрической съёмки продолжительностью более двух суток необходим учёт нелинейной составляющей дрейфа нуля-пункта гравиметра;

- при перемещении гравиметров между пунктами съемки необходимо максимально стабильно сохранять и следить за температурой окружающей среды для получения наиболее достоверных результатов на гравиметрических пунктах измерений;

- рекомендуется привести температуру окружающей среды гравиметра в опорном пункте максимально близко к температуре, ожидаемой на пунктах измерений, с целью сокращения продолжительности переходного процесса;

- для гравиметра, находящегося на пункте измерения, необходимо уточнить поправочный коэффициент влияния изменения атмосферного давления;

- при условии высокой влажности продолжительность во времени «петель»: опорный пункт – пункты измерений – опорный пункт целесообразно уменьшить.

Глава 4 Практическая реализация разработанных методических приемов для проведения высокоточных гравиметрических измерений

В предыдущих главах данной диссертационной работы было оценено влияние различных факторов на высокоточные гравиметрические измерения. Но влияние этих факторов рассматривалось по отдельности. Для комплексного учета всех изложенных выше факторов была проведена серия измерений в разных районах России с применением практических рекомендаций, изложенных в данной работе, по достижению наилучшей точности гравиметрической съемки.

4.1 Предложения по улучшению методических приемов наземной гравиметрической съемки

В ходе исследований по улучшению точности гравиметрических измерений был составлен ряд практических рекомендаций по улучшению методических приемов наземной гравиметрической съемки. Рекомендации включают информацию о том, какое оборудование необходимо использовать для совместной работы с гравиметром, а также как использовать информацию, полученную от этого дополнительного оборудования.

4.1.1 Дополнения по составу оборудования при проведении наземной гравиметрической съемки

По результатам, изложенным в главах 2 и 3 диссертационной работы, следует, что для проведения высокоточной гравиметрической съемки в состав оборудования необходимо ввести сейсмическую и метеорологическую станции. Состав оборудования (без геодезического обеспечения) и виды информации, необходимых для обработки, показаны на рисунке 4.1.

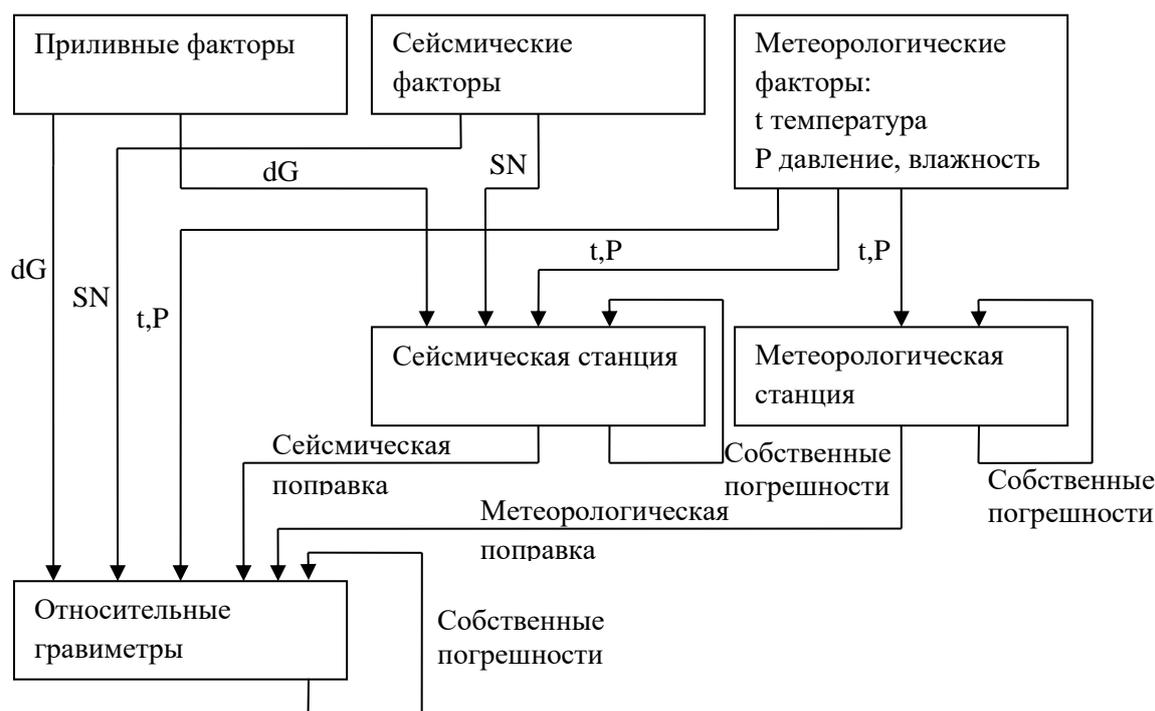


Рисунок 4.1 – Состав и структура оборудования, предлагаемая при проведении высокоточной гравиметрической съемки

Помимо дополнения по составу оборудования необходимо сформулировать перечень ряда операций, которые необходимо выполнить при подготовке и выполнении высокоточной гравиметрической съемки.

4.1.2 Рекомендации по использованию информации от дополнительного оборудования при оценке результатов гравиметрических измерений с помощью относительных гравиметров

При оценке результатов гравиметрических измерений с помощью относительных гравиметров, необходимо использовать информацию от дополнительного оборудования. Рассмотрим ряд рекомендаций, которые необходимо учитывать, получая информацию от относительного гравиметра, сейсмостанции и метеостанции, используемых в комплексе.

4.1.2.1 Предварительная подготовка оборудования и оценка микросейсмической обстановки в точке опорного гравиметрического пункта и будущем районе работ

Из материалов второй главы диссертации видно, что предварительная подготовка должна содержать два пункта.

1. Необходимо получение оценки уровня микросейсмических шумов с помощью сейсмостанции при создании опорного пункта будущей гравиметрической съемки. Несмотря на то, что опорный гравиметрический пункт создается с помощью абсолютных гравиметров, полученная оценка позволит выбрать наиболее «малошумное» в сейсмическом отношении место для опорного гравиметрического пункта. Это видно на примере, показанном на рисунке 2.22. Помимо этого целесообразно сделать предварительную оценку регионального микросейсмического шума на площади, где будет выполнена детальная гравиметрическая съемка, это позволит выработать рекомендацию по времени измерения на каждом пункте будущей крупномасштабной гравиметрической съемки.

2. До проведения гравиметрической съемки необходима предварительная работа по определению для конкретных гравиметров коэффициентов влияния изменения давления и температуры.

4.1.2.2 Использование информации от дополнительного оборудования при оценке результатов гравиметрических измерений с помощью относительных гравиметров

Из материалов второй и третьей глав диссертации видно, что при проведении гравиметрической съемки необходимо помнить о ряде выявленных эффектов и дополнительно выполнять следующие операции.

1. Землетрясения магнитудой до 8 оказывают воздействия на гравиметрические измерения в течении 1-9 часов. В случае возникновения землетрясений магнитудой более 8 высокоточные гравиметрические измерения возможно выполнять только через двое суток с момента события. При выполнении гравиметрической съемки это условие обуславливает необходимость оценки наличия сейсмических событий по данным сейсмостанции, включенной в состав оборудования, и параллельно использовать материалы каталога землетрясений.

2. Среднеквадратическое отклонение гравиметрических отсчетов в первую очередь характеризует уровень влияния микросейсмических шумов на чувствительный элемент гравиметра. При моделировании сигнала чувствительного элемента гравиметра можно использовать данные только вертикального канала сейсмической станции

3. Применение моделирования чувствительного элемента гравиметра с сейсмическими данными в качестве входной информации в значительной степени позволяет отделить гравиметрические измерения от инерциальных воздействий.

4. Рассчитав среднеквадратическое отклонение гравиметрических отсчетов по сейсмическим данным, можно оценить каждый пункт сейсмометрических измерений на пригодность к проведению высокоточной гравиметрической съемки. Полученные результаты можно интерполировать на удаленные пункты.

5. Для оценки информативности высокочастотных гравиметрических данных достаточно применение широкополосных сейсмометров с диапазон частот сейсмостанции от 1 до 6 Гц.

6. Показана необходимость непрерывного отслеживания метеофакторов и их изменения (температуры, давления, влажности), при проведении высокоточной гравиметрической съемки

7. Существующее термостатирование чувствительной системы относительного гравиметра позволяет выполнять высокоточную гравиметрическую съёмку продолжительностью только до двух суток без учёта нелинейной составляющей дрейфа нуля-пункта гравиметра, что накладывает ограничения на продолжительность «петель» гравиметрической съемки.

8. При перемещении гравиметров между пунктами съемки необходимо максимально стабильно сохранять и следить за температурой окружающей среды для получения наиболее достоверных результатов на гравиметрических пунктах измерений. Рекомендуется привести температуру окружающей среды гравиметра в опорном пункте максимально близко к температуре, ожидаемой на пунктах измерений, с целью сокращения продолжительности переходного процесса.

9. При проведении высокоточной гравиметрической съемки нужно учитывать, что погрешность имеет квадратичную зависимость от перепада температуры и достигает 0.1–0.2 % в случае высокой (более 10 °С) температурной разницы.

10. При выполнении высокоточных гравиметрических измерений следует учитывать погрешность, вызванную прохождением интенсивного атмосферного фронта и наличия осадков над пунктом измерения или не выполнять в таких условиях гравиметрическую съемку.

11. Показано, что изменение влажности окружающего воздуха влияет на скорость дрейфа нуль-пункта гравиметра CG-5 Autograv. Выполненные исследования позволяют рекомендовать, что при условии высокой влажности продолжительность во времени «петель»: опорный пункт – пункты измерений – опорный пункт целесообразно уменьшить.

4.2 Практические результаты высокоточных наземных измерений с помощью относительных гравиметров CG-5 в европейской части России

На протяжении нескольких лет с использованием предложений, приведенных в предыдущих разделах диссертации, выполнены относительные гравиметрические измерения в 58 точках европейской части России по 25 контрактам. Результаты измерений приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Данные о значениях приращений ускорений силы тяжести по отношению к опорному пункту «Ледово» и погрешностях измерений на пунктах наблюдений при выполнении контрактов ИФЗ РАН с участием диссертанта

Номер контракта	Заказчик	Адрес точки измерения	Измеренное приращение Δg и погрешность измерения, в мГал
№ 1	ФБУ «Тест-С.-Петербург»	Великий Новгород, ул.Нехинская, д.57, ком.320	+207,471±0,017
№ 2	ООО «Аплисенс»	Московская область, г. Старая Купавна	+17,029 ±0,014
№ 3	ООО «Йокогава Электрик СНГ»	Москва, Зеленоград, проезд № 4801, д.7, стр.3, пом.33	23,273±0,017
№ 4	ФГУП «Московское ОКБ «Марс»	Москва, 1-й Щемиловский пер., д.16, стр.5, помещения 041 и 042	0,526 ± 0,016 0,393±0,013
№ 5	ФГУП «Московское ОКБ «Марс»	Москва, ул.Ткацкая, д.19	-9,562±0,006
№ 6	ФБУ «Тест-С.-Петербург»	Санкт-Петербург, ул.Курляндская, д.1	360,199±0,004
№ 7	ФБУ «Нижегородский ЦСМ»	Нижний Новгород, ул. Республиканская, д.1	36,776±0,007
№ 8	ООО «Проммаштест»	Московская область, г.Чехов, Симферопольское шоссе, д.2	-59,029±0,015
№ 9	ФБУ «Костромской ЦСМ»	Кострома, ул.Советская, д.118а	163,679±0,007
№ 10	ФБУ «Ярославский ЦСМ»	Ярославль, ул.Гагарина, д.57, комната124 рабочее место 1 рабочее место 2 Рыбинск, пр.Серова, д.89 комната 206 комната 208	+123,790±0,008 +123,825±0,005 +175,620±0,017 +123,825±0,005
№ 11	ПАО «Тамбовский завод «Электроприбор»	Тамбов, Моршанское шоссе, д.36	-280,486±0,012
№ 12	ФГБУ «Специальный летный отряд «Россия»	Москва, Заводское шоссе, д.15	-78,843±0,016
№ 13	«Трансгаз-Москва»	Москва, Нововаганьковский пер., д.5	-25,50±0,07
№ 14	«Трансгаз-Москва»	Московская обл., г.Коломна, ул.Октябрьской революции, д.347	-12,13±0,010
№15	ООО «Газпром Трансгаз Москва»	1) Московская область, Ленинский район, п.Газопровод, д.101, ком.105 2) Московская область, Ленинский район, п.Газопровод, д.101, здание ПЭБ, ком. 401 3) Московская обл., Серпуховской район, д.Лукино (КС-3) здание СЭБ ком. 17 4) Московская обл., Серпуховской район, д.Левашово (КС-9А) здание КИПиА	-75,974±0,011 -78,265±0,013 -71,485±0,012 -71,543±0,012

Продолжение таблицы 4.1

№15	ООО «Газпром Трансгаз Москва»	<p>5) Московская обл., Коломенский район, Коломенский лесхоз, квартал 25 (КС-19), ком.108</p> <p>6) Московская обл., Дмитровский район, г.Яхрома, ПЗРГ</p> <p>7) Московская обл., Солнечногорский район, пос.Чашниково, корпус КИПиА и ГРС</p> <p>8) Московская обл., Волоколамский район, д.Тимонино, здание расходомерной</p>	<p>-61,075±0,015</p> <p>+35,486±0,015</p> <p>+24,056±0,013</p> <p>-15,981±0,015</p>
№16		<p>1) Липецкая обл., Красненский район, 10 км к югу от села Красное, здание ПЗРГ-4 «Ямбург-Елец-1»</p> <p>2) Липецкая область, Красненский район, 10 км к югу от села Красное, здание ПЭБ КЦ-3</p> <p>3) Тамбовская область, Моршанский район, с.Давыдово</p> <p>4) Тамбовская область, Моршанский район, с.Давыдово, в расходомерной</p> <p>5) Рязанская область, Путятинский район, с.Путятино, 10 км к югу, Калибровочная лаборатория КИП</p> <p>6) Рязанская область, Путятинский район, с.Путятино, 10 км к югу, Расходомерная КС-26</p> <p>7) Рязанская область, Касимовский район п.Крутоярский, Касимовский ПХГ, здание «Блок-бокс первичных датчиков»</p>	<p>-303,760±0,019</p> <p>-302,839±0,018</p> <p>-198,745±0,012</p> <p>-199,201±0,012</p> <p>-177,555±0,014</p> <p>-177,385±0,018</p> <p>-88,689±0,018</p>
№ 17	ООО «Газпром Трансгаз Москва»	<p>1) Курская область, Суджанский район, село Заолешенка</p> <p>1. ГИС «Суджа» точка 1</p> <p>2. ГИС «Суджа» точка 2</p> <p>3. ГИС «Суджа» точка 3</p> <p>4. ГИС «Суджа» точка 4</p> <p>2) г.Липецк, ул.Студенческая, Поверочная лаборатория ИТЦ</p> <p>3) Белгородская область, Валуйский район, с.Шведуновка, ГИС «Валуйки»</p> <p>4) Белгородская область, Ровеньский район, с.Лозная, ПЗРГ</p> <p>5) Белгородская область, Ровеньский район, с.Верхняя Серебрянка, ГИС «Серебрянка»</p>	<p>-458,840±0,012</p> <p>-458,883±0,011</p> <p>-458,353±0,013</p> <p>-457,547±0,013</p> <p>-292,209±0,016</p> <p>-544,056±0,009</p> <p>-539,121±0,012</p> <p>-540,640±0,007</p>
№ 18	ООО «Газпром Трансгаз Москва»	<p>1) Брянская область, Брянский район, село Глинищево, ул. П.М.Яшенина, д.1, ИТЦ</p> <p>2) Липецк, ул. К.Цеткин, ИТЦ «Липецк»</p>	<p>-254,814±0,011</p> <p>-297,205±0,017</p>

Продолжение таблицы 4.1

№ 19	ООО «Газпром Трансгаз Москва»	1) Липецкая область Елецкий район, 950 м на юго-запад от п.Газопровод, ЛПУМГ Елецкое	-321,003±0,018
		2) Липецк, ул.К.Цеткин, ИТЦ, АБК (литера А), ком.107 Пункт 1 Пункт 2	-297,233±0,015 -297,232±0,016
№ 20	ООО «Газпром Трансгаз Москва»	1) Московская область, Луховицкий район, п/о Мухино, п.Газопроводск	-108,812±0,007
		2) Рязанская область, Клепиковский район, д.Молькино	-67,302±0,011
		3) Рязанская область, Старожиловский район, с.Истье	-174,007±0,011
		4) Орел, ул.Ростовская, д.24	-318,223±0,019
		5) Орловская область, пос.Долгое	-354,045±0,008
№ 21	ООО «Газпром Трансгаз Москва»	1) Воронежская область, г.Семилуки, ул.Курская, д.111	-375,187±0,013
		2) Воронежская область, г.Острогожск	-436,791±0,014
		3) Курская область, Медвенский район, хутор Высоконские дворы	-429,622±0,014
		4) Липецк, ул.К.Цеткин, вл.1, литера А4, ком.6	-297,250±0,013
№ 22	Архангельский ЦСМ	Архангельск, ул Шабалина, д3	+933,264±0,005
№ 23	Ивановский ЦСМ	Иваново, ул. Почтовая, д 31/42 помещение ц7	82±0,004
№ 24	Гатчинский филиал ФБУ «Тест-Петербург»	Гатчина, пр.25 октября, д42	316,124±0,003
№ 25	Выборгский филиал ФБУ «Тест-Петербург»	Выборг, ул Резервная д1	376,425±0,014

Карта расположения пунктов наблюдений приведена на рисунке 4.2. Выполнение работ проводилось в радиусе до тысячи километров от Москвы. «Привязка» съемочных «петель» выполнялась относительно гравиметрического фундаментального пункта России «Ледово». Продолжительность "петель" не превышала двое суток.

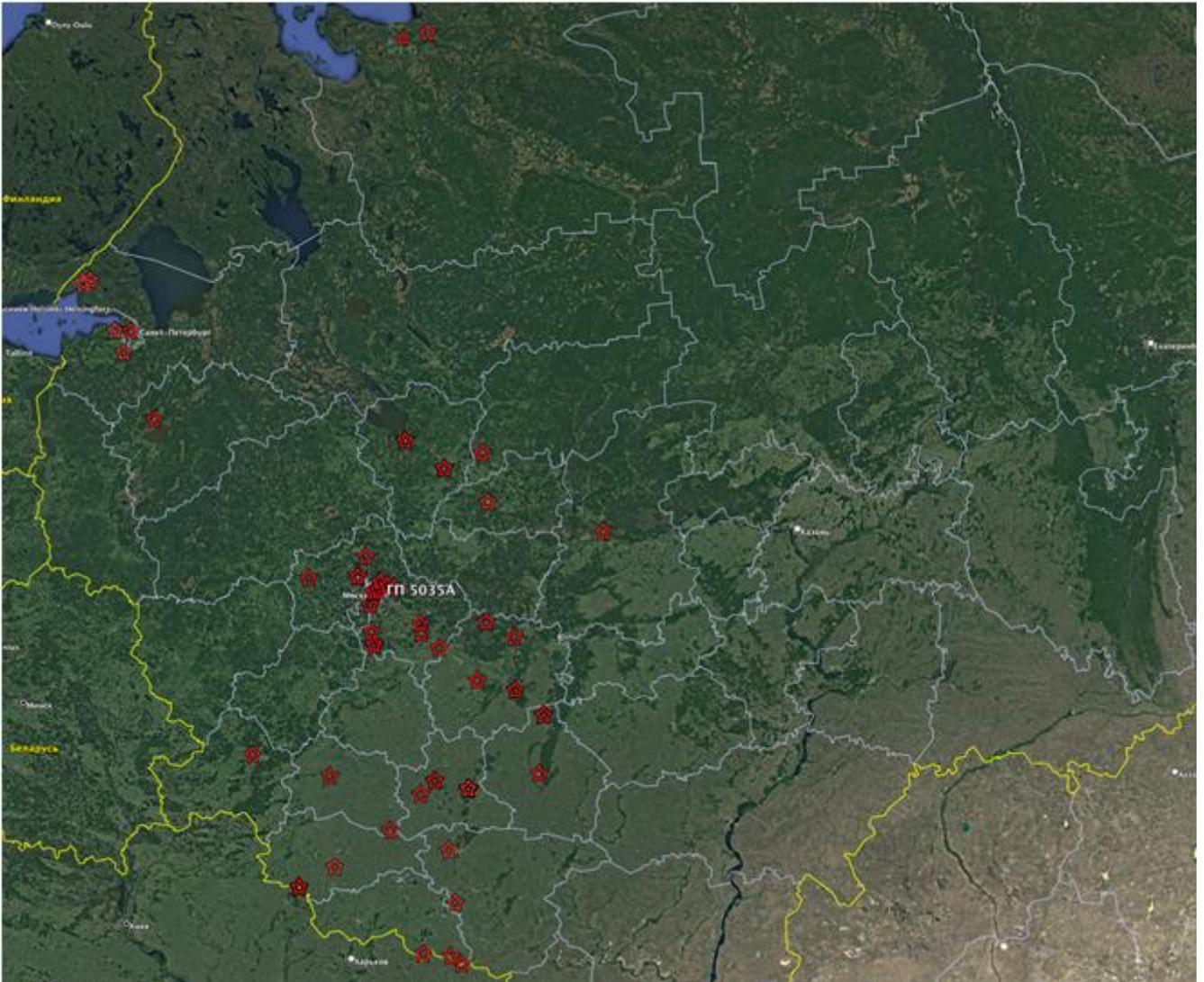


Рисунок 4.2 – Карта расположения пунктов высокоточных гравиметрических измерений, выполненных ИФЗ РАН с использованием предложений, сформулированных в диссертации

Разброс амплитуд погрешностей измерений по всем контрактам составил от 5 до 19 мкГал при широком диапазоне изменения силы тяжести 801,8 мГал. По совокупности всех контрактов среднеквадратическая погрешность составила 15,8 мкГал. Это значительно превышает требования к гравиметрическим пунктам наземных гравиметрических измерений и приближается к погрешностям измерений на опорных гравиметрических пунктах, выполненных с помощью баллистических гравиметров.

Выводы по материалам главы 4

Полученные практические результаты показали, что с использованием комплекса предложенных методических приемов, требуемая погрешность измерений может быть достигнута. Полученные точности гравиметрических измерений с помощью относительных гравиметров достаточны для выполнения гравиметрических съемок крупного масштаба при решении прикладных задач в геофизике.

Заключение

В диссертационной работе выполнены исследования по развитию методических приемов повышения точности выполнения наземной гравиметрической съемки. При этом выполнены теоретические и экспериментальные работы и получены следующие основные результаты:

1. Разработаны методические приемы, позволяющие оценить точность гравиметрических измерений по сейсмическим данным.
2. Получили развитие методические приемы учета сейсмических событий на гравиметрические измерения в пункте наблюдения.
3. Были усовершенствованы методические приемы учёта метеорологического воздействия на гравиметрические измерения в пункте наблюдений.
4. Получены экспериментальные оценки влияния возмущающих внешних факторов на относительные наземные гравиметрические наблюдения.
5. Экспериментальные работы показали состоятельность основных положений диссертации, они были подтверждены при выполнении 58 контрактов.

Список используемой 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. Абрамов Д.В., Дробышев Н.В., Малышева Д.А. Оценка влияния окружающей температуры на долговременные высокоточные измерения гравиметром CG-5 Autograv // Геофизические исследования. – 2022. – Т. 23, № 1. – С. 20-29.
4. Абрамов Д.В., Конешов В.Н., Дробышев М.Н., Горожанцев С.В. Комплексование долговременных измерений относительными гравиметрами с сейсмическими наблюдениями // В сборнике: Развитие систем сейсмологического и геофизического мониторинга природных и техногенных процессов на территории северной Евразии. Материалы международной конференции. – 2017. – С. 7.
5. Абрамов Д.В., Конешов В.Н., Чебров В.Н. Совершенствование методики долговременных наблюдений относительным гравиметром CG-5 // Сейсмические приборы. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 20-26.
6. Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А. Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре // Физика Земли. – 2008. – № 6. – С.77-85.
7. Адушкин В.В., Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Влияние Лунно-Солнечного прилива на вариации атмосферного давления // Динамические процессы в геосферах. – 2016. – №8. – С. 100-109.
8. Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в геофизике XXI века // Отв. ред. А.О. Глико. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН М.: Янус-К. – 2013. – 412 с.

9. Алексидзе М.А. Решение некоторых основных задач гравиметрии // Тбилиси: Мицниереба. – 1985. – 412 с.
10. Андреев О.П., Кобылкин Д.Н., Ахмедсафин С.К., Кирсанов С.А., Безматерных Е.Ф., Кривицкий Г.Е. Гравиметрический контроль разработки газовых и газоконденсатных месторождений. Состояние, проблемы, перспективы // М.: ООО Издательский дом Недра. – 2012. – 374 с.
11. Антонова Л.В., Аптикаев Ф.Ф. Карта уровня короткопериодных микросейсм на территории России и сопредельных государств // Исследования в области геофизики: к 75-летию Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта. – М.: ОИФЗ РАН. – 2004. – С. 43-53.
12. Аронов В.И. Обработка на ЭВМ значений аномалий силы тяжести при произвольном рельефе поверхности наблюдений. – М.: Недра. – 1976. – 128 с.
13. Беляев А.С., Розенберг В.Н. Влияние методики измерений на результаты высокоточной гравиметрической съемки // Разведочная геофизика. – М: Недра. – 1981. – №93. – С. 129-133.
14. Березкин В.М. Учет влияния рельефа и промежуточного слоя при детальной гравиразведке // М.: Недра. – 1967. – 117 с.
15. Болдырева В.А., Кантер Н.Д., Чернов А.А. Автоматизированный комплекс обработки гравиметрических измерений. – М.: Недра. – 1976. – 238 с.
16. Буданов В.Г. Механизм влияния микросейсм на показания кварцевых наземных гравиметров // Прикладная геофизика. – М.: Недра. – 1977. – Выпуск 86. – С. 99-116.
17. Букетов А.П. Тепловые возмущения в кварцевых гравиметрах// Прикладная геофизика. – М.: Недра, 1973. – Выпуск 71. – С. 153-157.
18. Буланже Ю.Д. Неприливные изменения силы тяжести // Повторные гравиметрические наблюдения. – М.: Нефтегеофизика. – 1983. – С. 3-18.
19. Бычков С.Г. Определение поправок за влияние верхней части разреза при гравиметрических исследованиях на нефть и газ // Геофизика. – 2007. – №1. – С. 56-58.

20. Бычков С.Г. Технология определения статических поправок по гравиметрическим данным // Геофизика. – 2009. – № 3. – С. 65-68.
21. Веселов К.Е., Варламов А.С., Кастальский Е.М., Степанов П.П. Инструкция по гравиразведке // М.: Недра. – 1980. – 89 с.
22. Веселов К.Е. Гравиметрическая съемка // М.: Недра. – 1986. – 311 с.
23. Веселов К.Е., Сагитов М.У. Гравиметрическая разведка // М.: Недра. – 1968. – 512 с.
24. Ветров С.В., Дьячков Н.П. Некоторые вопросы высокоточной гравиметрической съемки // Тр. Иркут. политехн. ин-та. – Иркутск, 1970. – Выпуск 51. – С. 104-108.
25. Газеев Н.Х., Жилин И.О., Рувинский Ю.И. Исследования влияния перепадов силы тяжести на изменение нуля-пункта гравиметров // Тр.Зап.-Сиб. н.-и.геол.-развед.нефт.ин-та. – Новосибирск, 1985. – № 65. – С. 14-16.
26. Гравиразведка: Справочник геофизика. / Под ред. Е.А. Мудрецово́й, К.Е. Веселова // М.: Недра. – 1990. – 607 с.
27. Гольштейн Б.Л. О зависимости ошибки измерения с гравиметром от продолжительности рейса // Изв. АН СССР. Физика Земли. – М. – 1970. – № 9. – С. 88-90.
28. Гордин В.М. Способы учета влияния рельефа местности при высокоточных гравиметрических измерениях // М.: ВИЭМС. – 1974. – 90 с.
29. ГОСТ 13017–83. Гравиметры наземные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов. – 1984. – 36 с.
30. ГОСТ Р 52334–2005. Гравиразведка. Термины и определения. – М.: Стандартинформ. – 2005. – 22 с.
31. ГОСТ РВ 1.1-96. Государственная система стандартизации Российской Федерации. Метрологическое обеспечение вооружения и военной техники. Основные положения. М.: Госстандарт России. – 1996. – 26 с.
32. Грушинский Н.П., Сажина Н.Б. Гравитационная разведка, издание третье // Издательство «Недра» Москва. – 1981. – 391 с.

33. Грушинский Н.П., Сажина Н.Б. Гравитационная разведка // М.: Недра. – 1988. – 364 с.
34. Дементьев Ю. В., Каленицкий А. И., Мареев А. В. Влияние стационарной атмосферы Земли на значение силы тяжести // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5. – С. 1-16.
35. Долгаль А.С., Бычков С.Г., Антипин В.В. Повышение точности определения поправок за влияние рельефа при гравиметрической съемке // Геофизика. – 2003. – №6. – С. 44-50.
36. Долгаль А.С. Моделирование погрешностей учета влияния рельефа при гравиметрической съемке // Известия РАН. Физика Земли. – 1997. – № 8. – С. 88-93.
37. Дорожков В.В., Конешов В.Н., Фуров Л.В. Автоматизированная сейсмостанция «Владимир» на экспериментальном полигоне ВлГУ // Физико-математические основы индустрии наносистем и материалов. Труды ВлГУ, Владимир. – 2010. – Выпуск 7. – С. 107-111.
38. Дробышев М. Н., Абрамов Д. В., Конешов В. Н., Малышева Д. А. Оценка влияния перепада температуры на гравиметрические измерения при смене пункта наблюдений // Сейсмические приборы. — 2022. — Т. 58, № 2. — С. 75-84.
39. Дробышев М.Н. Исследование динамики изменения углового положения гравиметрического постаменты с помощью комплекса геофизической аппаратуры // Сейсмические приборы. 2014. – Т. 50, № 2. – С.70-76.
40. Дробышев М.Н., Конешов В.Н., Абрамов Д.В., Малышева Д.А. Повышение точности гравиметрических наблюдений с помощью сейсмической информации // Геофизические исследования. — 2021. — Т. 22, № 3. — С. 26-34.
41. Дробышев М.Н., Конешов В.Н. Оценка предельной точности гравиметра CG-5 Autograv // Сейсмические приборы. – 2013. – Т. 49, № 2. – С.39-43.
42. Дробышев М.Н., Конешов В.Н. Учет сейсмического воздействия на высокоточные измерения гравиметром CG-5 Autograv // Физика Земли. – 2014. – №4. – С. 131-134.

43. Дробышев М. Н., Малышева Д.А. Повышение точности гравиметрических данных с помощью сейсмометрической информации на примере гравиметра CG-5 Autograv // Современные техника и технологии в научных исследованиях: сборник материалов XIV Международной конференции молодых ученых и студентов. — ИС РАН Бишкек. — 2022. — С. 27-30.

44. Зоммер И.Э. О систематических ошибках и методике наблюдений на опорных гравиметрических пунктах // Разведочная геофизика. — М.: Недра. — 1973. — Выпуск 59. — С. 101-104.

45. Евграфов Н.С. К методике вычисления поправки за смещение нуля-пункта гравиметров // Тр. Геологического ин-та. — Казань. — 1966. — Выпуск 14. — С. 196-201.

46. Инструкция по гравиметрической разведке. — М.: Недра, 1975. — 88 с.

47. Инструкция по гравиразведке / Ред. А.С. Варламов, Е.М. Кастальский, П.П. Степанов. - М.: Недра. — 1980. — 89 с.

48. Инструкция по развитию Государственной высокоточной гравиметрической сети России, ГКИНП-04-122-88. // Федеральная служба геодезии и картографии России, М. — 2004. — 220 с.

49. Инструкция по развитию Государственной гравиметрической сети СССР (фундаментальной и 1 класса). — М.: ОНТИ ЦНИИГАиК. — 1988. — 253 с.

50. Козьякова К.Я., Романюк В.А., Рукавишников Р.Б. и др., Эталонирование гравиметров методом наклона. — М.: Наука. — 1979. — 207 с.

51. Конешов В.Н., Абрамов Д.В., Дорожков В.В., Фуров Л.В. Особенности создания и использования наземного сейсмогравиметрического комплекса // Пермь, Вестник Пермского университета. Серия "Геология". — 2011. — №2. — С. 29-38.

52. Конешов В.Н., Абрамов Д.В., Дробышев Н.В., Малышева Д.А. Оценка влияния влажности на долговременные высокоточные измерения гравиметром CG-5 Autograv // Геофизические исследования. — 2023. — Т. 24, № 2. — С. 87-94.

53. Конешов В.Н., Малышева Д.А., Абрамов Д.В., Дробышев М.Н. Влияние метеофакторов на уровень микросейсмического фона при долговременных

гравиметрических наблюдениях с погрешностью порядка первых микрогал // Сейсмические приборы. – 2018. – Т. 54, №1. – С. 19-28.

54. Костицын В.И. Гравиметрические наблюдения с независимой обработкой результатов по участкам маршрута // Вопросы обработки и интерпретации геофизических наблюдений. – Пермь: ПГУ, 1967. – № 7. – С. 97-98.

55. Костицын В.И. Методы и задачи детальной гравиразведки / В.И. Костицын.- Иркутск, Иркут. ун-т. – 1989. – 128 с.

56. Костицын В.И. Методы повышения точности и геологической эффективности детальной гравиразведки. Пермь: Издательство Пермского университета. – 2002. – 224 с.

57. Костицын В.И. О сравнительных достоинствах различных методик высокоточных гравиметрических наблюдений // Геофизические изыскания. – Пермь: ПГУ. – 1975. – Выпуск 1. – С.132-136.

58. Костицын В.И., Юзвак В.П. О смещении нуля-пункта при высокоточных гравиметрических наблюдениях // Вопросы обработки и интерпретации геофизических наблюдений. – Пермь: ПГУ, 1975. – № 13. – С. 80-83.

59. Кривицкий Г.Е., Андреев О.П., Кобылкин Д.Н., Ахмедсафин С.К., Кирсанов С.А., Безматерных Е.Ф. Гравиметрический контроль разработки газовых и газоконденсатных месторождений // М.: Недра. – 2012. – 126 с.

60. Лобанов А.М. Гравиразведка. Учебное пособие для студентов геологических специальностей / Москва. – 2019. – 79 с.

61. Лоран П.Ж. Аппроксимация и оптимизация // М.: Мир. – 1975. – 496 с.

62. Любушкин А.А. Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки // Физика Земли. 2008. – №4. – С. 17-34.

63. Маловичко А.К. Детальная гравиразведка на нефть и газ / А.К. Маловичко, В.И. Костицын, О.Л. Тарунина // М.: Недра. – 1989. – 224 с.

64. Маловичко А.К. Интерполяция поправки за влияние рельефа при детальной гравиметрической съемке / А.К. Маловичко, В.И. Костицын // Вопросы

обработки и интерпретации геофизических наблюдений. Пермь: Издательство Пермского университета, 1974. – № II. – С. 3-11.

65. Маловичко А.К., Костицын В.И. Гравиразведка /М: Недра.– 1982. – 356 с.

66. Маловичко А.К., Костицын В.И. Гравиразведка: учебник для ВУЗов. М. – 1990. – 359 с.

67. Маловичко А.К., Костицын В.И. Изучение смещения нуля-пункта в связи с гравиметрическими наблюдениями высокой точности //Вопросы обработки и интерпретации геофизических аномалий. – Пермь: ПГУ. – 1977. – № 14. – С. 3-12.

68. Малышева Д.А. Влияние давления на компоненты микросейсмических составляющих // Дни науки студентов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых: материалы науч.-практ. конф. 7 – 18 апр. 2014 г., г. Владимир / Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ. – 2014. – С. 70-71.

69. Малышева Д.А., Дорожков В.В., Конешов В.Н. О возможности мониторинга микросейсмической активности на экспериментальном полигоне // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: Доклады 11-й межд. научн. конф. Книга 2 – Владимир. – 2014. – С. 196-199.

70. Малышева Д. А., Дорожков В. В., Конешов В. Н. Применение сейсмической информации для обработки гравиметрических данных при высокоточных измерениях // XV Международная научная конференция Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2022 – Владимир-Суздаль, Россия. Доклады. — ООО Графика г. Александров. – 2022. — С. 389-391.

71. Малышева Д.А. Дорожков В.В. О возможности регистрации микросейсмических составляющих в сейсмически тихом месте // Материалы X Международной научно-технической конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации - ПТСПИ'2013"/ Владим. гос. университет; редкол.: А.Г. Самойлов (и др.). – Владимир: ВлГУ, т. 2. – 2013. – С. 174-176.

72. Малышева Д. А., Конешов В. Н., Дорожков В. В. Влияние окружающей температуры на долговременные гравиметрические измерения // XV

Международная научная конференция Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2022 – Владимир-Суздаль, Россия. Доклады. — ООО Графика г. Александров. – 2022. — С. 392-394.

73. Малышева Д. А., Конешов В. Н., Дробышев М. Н. Влияние барического возмущения на уровень микросейсмического фона при долговременных наблюдениях // Материалы XII Международной научно-технической конференции Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017. — Т. 1. — Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых Владимир. – 2017. — С. 111-114.

74. Мельхиор П. Земные приливы // Издательство МИР, Москва. – 1968. – 483с.

75. Миронов В.С. Курс гравиразведки. / Л: Недра. – 1972. – 512 с.

76. Молев В.П. Методика и техника наземной гравиметрической съемки // Инженерная школа ДВФУ. – Владивосток: Дальневост. федерал. университет. – 2019. – 32 с.

77. Молоденский М.С. Избранные труды. Гравитационное поле. Фигура и внутреннее строение Земли // М.: Наука. – 2001. – 570 с.

78. Немцов Л.Д. Высокоточная гравиразведка // М.: Недра. – 1967. – 240 с.

79. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации / А.А. Никитин. М.: Недра. – 1986. – 342 с.

80. Никольский Ю.И. Методы учета нелинейного сползания нуля-пункта гравиметров // Труды ВСЕГЕИ. – Л.: ВСЕГЕИ. – 1964. – Т.105. – С.74-82.

81. Относительный гравиметр CG-5. Система Scintrex Autograv: руководство по эксплуатации. ред. 4. – 2008. – 156 с.

82. Пугин А.В. Гравиразведка: учебное пособие в 2 ч./ Пермь. – 2019. – 94 с.

83. Руководство по эксплуатации. CG-5 Система Scintrex Autograv. №867700. kadastrua.ru/geodezichna-i-matematichna-osnovakart/332geodezicheskaya-imatematicheskaya-osnova-kart.html

84. Серкеров С.А. Гравиразведка и магниторазведка в нефтегазовом деле // М.: Издательство «Нефть и газ». – 2006. – 512 с.

85. Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли // М.: Наука. Физматлит. – 2002. – 384 с.
86. Симанов А.А. Особенности использования крупномасштабных топографических карт при обработке результатов гравиметрических наблюдений // Горное эхо: вестник Горного института. Пермь. – № 4(18). – 2004. – С. 36-40.
87. Сорокин Л.В. Курс гравиметрии и гравиметрической разведки / Л.В. Сорокин // М.-Л.: Госгеолыздат. – 1941. – 568 с.
88. Справочник геодезиста: в 2-х книгах. Кн. 1/Под ред. В.Д. Большакова и Г.П. Левчука – 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Недра. – 1985. – 455 с.
89. Справочник геодезиста: в 2-х книгах. Кн. 2/Под ред. В.Д. Большакова и Г.П. Левчука – 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Недра. – 1985. – 440 с.
90. Старовойт Ю.О. Чувствительность сейсмической станции "Обнинск" к микроколебаниям атмосферного давления // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН. – 1998. – Выпуск 30. – С. 22-39.
91. Табулевич В.Н. Комплексные исследования микросейсмических колебаний // Новосибирск: Наука. – 1986. – 151 с.
92. Технические характеристики Автономного Накопителя Информации АНИ-SD геофизического комплекса на основе частотных датчиков // 2012. – 4 с.
93. Торге В. Гравиметрия // М: Мир. – 1999. – 428 с.
94. Тяпкин К.Ф. Использование медианных фильтров при обработке данных высокоточных гравимагнитных съемок // Геофизический журнал, № II. – 1989. – № I. – С. 46-49.
95. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. Пер. с англ. / Ред. пер. О.А. Потапов. М.: Недра. – 1987. – 221 с.
96. Цифровая трехкомпонентная сейсмическая станция Югра: руководство по эксплуатации // Обнинск. – 2005. – 57 с.
97. Цубои Т. Гравитационное поле Земли // Издательство МИР. Москва. – 1982. – 287 с.

98. Boddice D., Atkins P., Rodgers A., Metje N., Goncharenko Y., Chapman D.A. Novel approach to reduce environmental noise in microgravity measurements using a Scintrex CG5 // *Journal of Applied Geophysics*. – Volume 152. – May 2018. – P. 221-235
99. Boulanger Y.D., Gusev N.A., Lokhov V.V, Slivin Y.A., Heifets M.E., Scheglov S.N. Determination of gravitational acceleration at Moscow (Ledovo), Murmansk, Odessa and Nakhodka // *Bureau gravimetric international, Bulletin information*. 1974. – N 34. – P.1.25-1.30.
100. Bychkov S., Mityunina I.Y. Near-Surface Correction on Seismic and Gravity Data // *Journal of Earth Science*. – 2015. – 26(6): 851-857.
101. El Wahabi, A., Dittfeld, H.-J., Simon, Z. (2000): Meteorological Influence on Tidal Gravimeter Drift. - *Bulletin d'Information des Marées Terrestres*. – 133. – 10403-10414.
102. Elsaka B. Comparison of different polynomial degrees for correcting the instrumental drift of Scintrex CG-5 autograv gravimeter // *Austral. J. Basic Appl. Sci*. 2020. – V. 14, N 5. – P.19-25.
103. Malysheva D.A., Abramov D.V., Drobyshev M.N., Koneshov V.N. Influence of the meteorological factors on the level of a microseismic noise at long-term observations // *Seismic Instruments*. – 2019. – Volume 55. – P. 10-16.
104. Rabbel W., Zschau J. Static deformations and gravity changes at the Earth's surface due to atmospheric loading // *J. Geophys.* – 1985. – 56. – P. 81-99.
105. Seigel H.O. A guide to high precision land gravimeter surveys. Concord, Ontario: Scintrex Ltd. – 1995. – 122 p.
106. Spratt R. S. Modeling the effect of atmospheric pressure variations on gravity // *Geophys. J. R. astr. Soc.*. – 1982. – 71. – P. 173-186.
107. Ovcharenko A.V. Processing and interpretation of time series high precision gravimetric monitoring // *Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей*. – Казань: Казанский университет. – 2018. – С. 143.
108. Peterson J. Observations and modeling of background seismic noise. Open File Report, U.S. Geological Survey, Albuquerque, NM. – 1993. – P. 93-322.

109. Hinderer J., Crossley D., Xu H. A two-year comparison between the French and Canadian superconducting gravimeter data // *Geophys. J. Int.*, 1994. – 135. – P. 252-266
110. Heiskanen W.A. and Vening Meinesz F.A. *The Earth and Gravity Field*, McGraw-Hill, New-York. – 1958. – 470 p.
111. Müller T., Zürn W. Observation of gravity changes during the passage of cold fronts // *J. Geophys.*, 1983. – 53. – P. 155-162.
112. Merriam J. B. An investigation of dispersive effects on tidal gravity measurements at Alice Springs // *Phys. Earth planet. Inter.*, 1981. – 27. – P. 187-193.
113. Merriam J. B. Atmospheric pressure and gravity // *Geophys. J. Int.* 109. – 1992. – P. 488-500.
114. Spratt R. S. Modeling the effect of atmospheric pressure variations on gravity // *Geophys. J. R. astr. Soc.* – 1982. – 71. – P. 173-186.
115. Yang Z. The gravity & seismic data jointed formation separation technique for deep structure study / Z.Yang, Y.Wei // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2005. – P. 635-638
116. Yu H., Guo J., Li J., Mu D., Kong Q. Zero drift and solid Earth tide extracted from relative gravimetric data with principal component analysis // *Geodesy and Geodynamics*. 2015. – V. 6, Issue 2. – P.143-150.
117. Warburton R.J., Goodkind J.M. The influence of barometric pressure variations on gravity // *Geophys. J.R. astr. Soc.* – 1977. – 48. – P. 281-292.