

На правах рукописи



Мальшева Дарья Алексеевна

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

Специальность 1.6.9 «Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир-2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ).

Научный руководитель: **Конешов Вячеслав Николаевич**
доктор технических наук, профессор, руководитель научного направления «Потенциальные поля» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук;

Официальные оппоненты: **Костицын Владимир Ильич**
доктор технических наук, профессор кафедры геофизики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»;

Муравина Ольга Михайловна
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой геофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет»;

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

Защита диссертации состоится **4 апреля 2024 г. в 14:00 часов** на заседании диссертационного совета 24.1.132.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

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

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Жосткову Руслану Александровичу

Автореферат разослан « » февраля 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Жостков Р.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 настоящем времени 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 наземных 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 данных.

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 [ГОСТ РВ 1.1-96.], 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 «Рашипиль-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 РФФИ №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. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации показана актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи работы, её научная новизна, отражена практическая значимость результатов работы.

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

В первой главе приведены результаты анализа работы имеющейся гравиметрической аппаратуры и ее чувствительной системы, определён состав факторов, вызывающих погрешности при проведении наземной гравиметрической съемки. Помимо изменения силы тяжести на точке измерения регистрируются наиболее распространенные виды погрешностей. К ним относятся лунно-солнечные приливные эффекты, изменение масс атмосферы над точкой измерения, приводящее к изменению давления, а также сейсмические и микросейсмические события. Приведены существующие поправки, применяемые при обработке гравиметрических данных, а также обоснование необходимости улучшения данных поправок для достижения требуемой точности измерений.

В разделе 1.1 приведен обзор аппаратуры для гравиметрических наземных измерений, в том числе краткая история совершенствования отечественных гравиметров, а так же особенности чувствительной системы современных относительных гравиметров.

В разделе 1.2 приведены общие характеристики гравиметрических работ, включающие в себя положения методики наземной гравиметрической съемки и требования высокоточной государственной гравиметрической сети.

В разделе 1.3 рассмотрены аппаратурные погрешности, влияющие на точность выполнения гравиметрических измерений. Показано, что при проведении некоторых наземных гравиметрических съемок требуемая погрешность должна быть не хуже 0,05 мГал. В будущем эта погрешность должна быть уменьшена до погрешностей баллистических гравиметров, лежащих в пределах от 8 до 15 мкГал, что позволит лучше отслеживать гравитационные аномалии.

Учет погрешностей позволило сформулировать ряд предложений для усовершенствования методических приемов наземных гравиметрических измерений в рамках поставленных задач. А также внести рекомендации, которые на данный момент отсутствуют в методике наземной гравиметрической съемки.

Выводы по первой главе.

1. Современные потребности гравиметрических измерений с погрешностью порядка единиц мкГал обуславливают учет целого ряда факторов, которые ранее детально не рассматривались.

2. В настоящее время созданы и серийно выпускаются гравиметры с инструментальной точностью 1 мкГал, что существенно выше уровня помех, влияющих на точность определения силы тяжести. Учет этих помех потенциально позволит приблизиться к инструментальной точности гравиметров при выполнении гравиметрических измерений.

3. 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.

4. 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

Сейсмические события, так же как и микросейсмические колебания, влияют на данные, полученные с гравиметра, в связи с этим погрешность гравиметрических измерений увеличивается. Необходимо проанализировать это влияние и ввести ряд поправок для достижения требуемой точности измерений.

В разделе 2.1 показана взаимосвязь сейсмических и гравиметрических данных. Сейсмостанция UGRA и относительный гравиметр Autograv CG-5 были установлены на одном постаменте в гравиметрическом пункте первого класса «Запольское» (рисунок 1). 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, что характерно для морского прибое с периодом волны около 4–5 секунд (рисунок 2). В этот же период наблюдается повышенная зашумленность гравиметрических измерений до 0,1 мГал (рисунок 3), несмотря на то, что пункт наблюдения находится в центральной части России и достаточно далеко от источников штормов и прибоев.

Очевидно, что, если гравиметр реагирует на микросейсмы, связанные с деятельностью циклонов, то имеется взаимосвязь сейсмических и гравиметрических данных. Следовательно, по величине шторма можно предсказать уровень микросейсмических возмущений в ходе гравиметрических измерений.

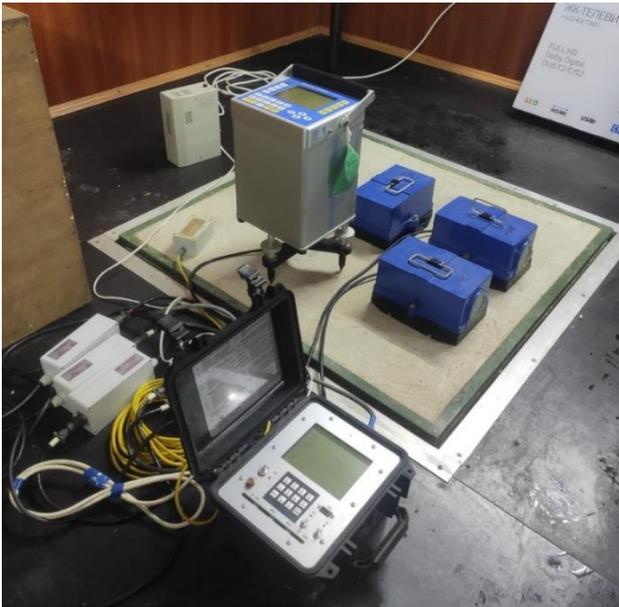


Рисунок 1 – Расположение сейсмостанции UGRA и относительного гравиметра CG-5 Autograv на одном постаменте в гравиметрическом пункте первого класса «Запольское»

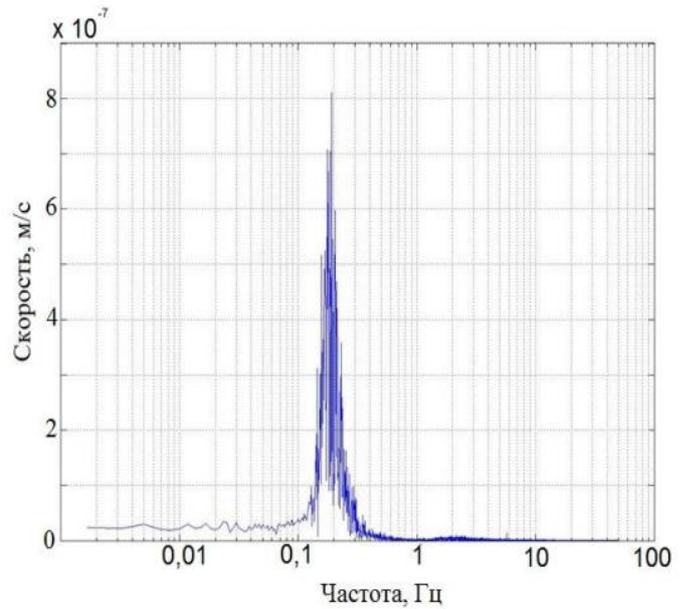


Рисунок 2 – Спектр, построенный по сейсмическим данным во время шторма

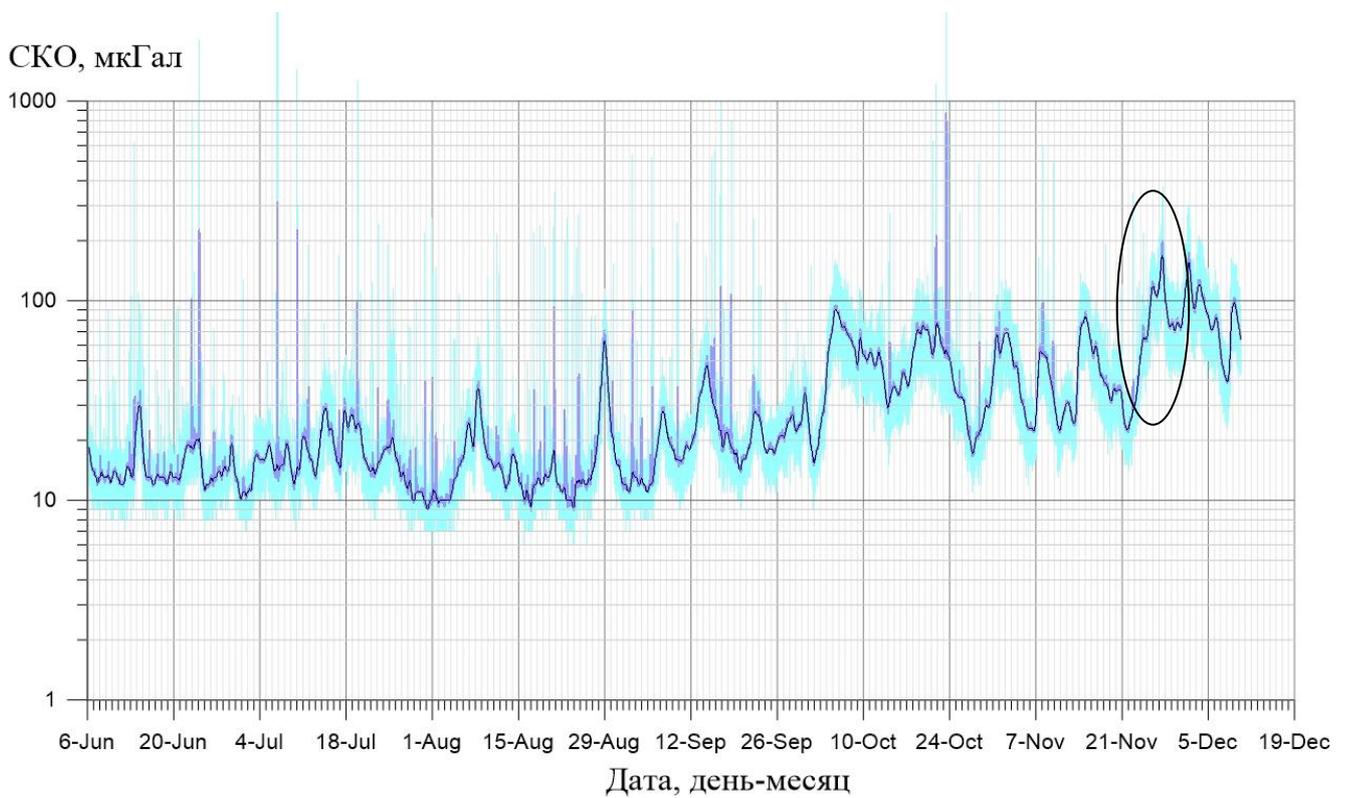


Рисунок 3 – СКО по данным, полученным с гравиметра, с зафиксированным штормом

В разделе 2.2 выполнена оценка влияния сейсмических событий на показания гравиметра. Во время гравиметрических наблюдений основным возмущающим фактором являются сейсмические события. Погрешность гравиметрических измерений после землетрясения довольно высокая и нельзя получать требуемую точность сразу после сейсмического события. Для того, чтобы проанализировать это влияние на гравиметрические данные, были рассмотрены события разной магнитуды и удаленности от места регистрации. При проведении эксперимента гравиметр и сейсмостанция располагались на одном постаменте гравиметрического пункта первого класса «Запольское». Была вычислена погрешность гравиметрических измерений, которая практически совпала со стандартным отклонением ускорений (СКО), полученным по данным сейсмостанции UGRA (рисунок 4).

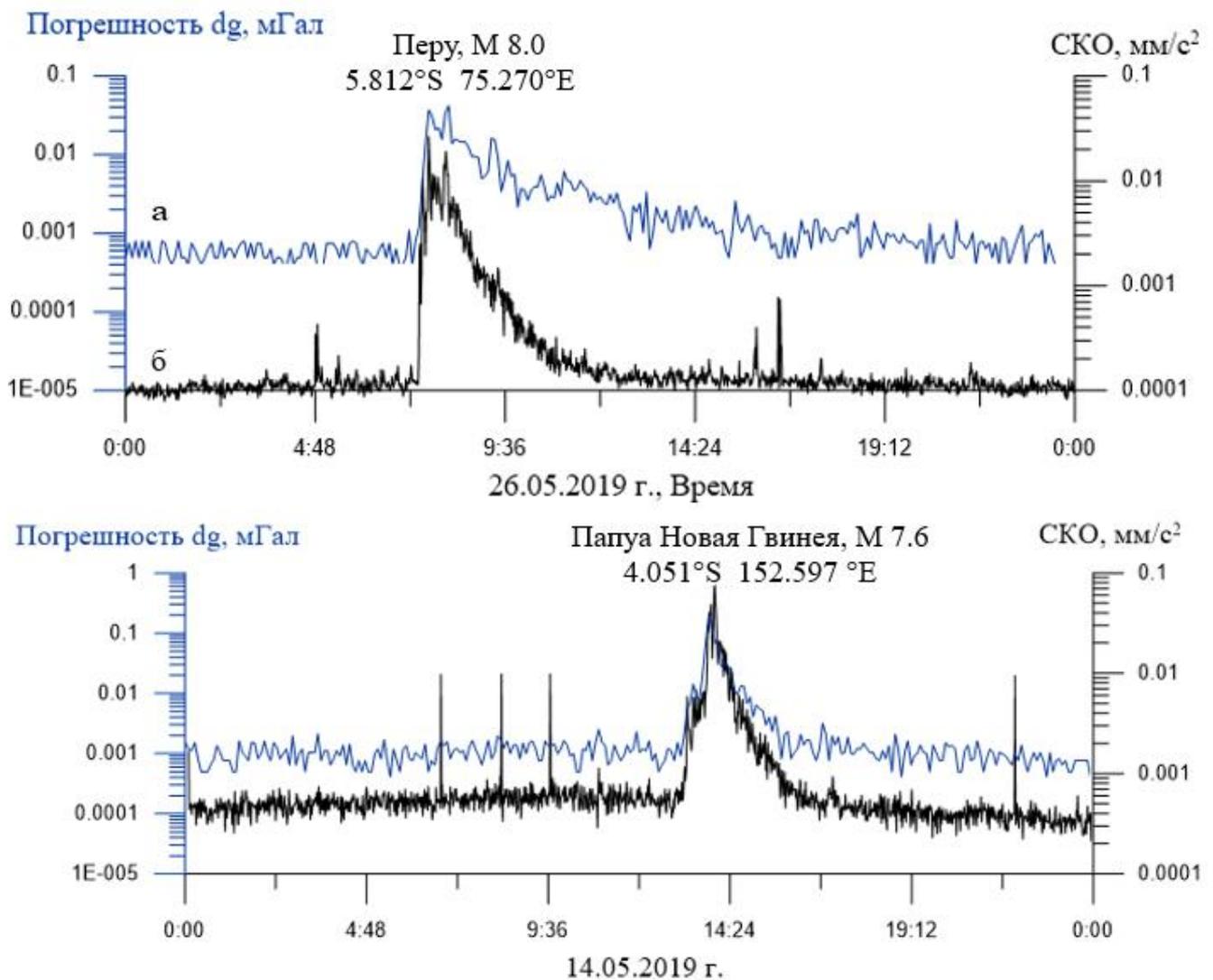


Рисунок 4 – Погрешность значений измерений гравиметра CG-5 Autograv (а) и СКО амплитуды вертикального ускорения по данным сейсмостанции UGRA (б) для двух разных землетрясений

Коэффициент корреляции между данными составил 0.85, следовательно, погрешность измерений гравиметра после сейсмического события представляет собой в первую очередь реакцию гравиметра на внешние воздействия в виде землетрясения, и в меньшей степени, внутренний шум прибора.

Рассматривая реакцию поверхности Земли на сейсмическое воздействие, как погрешность гравиметрических измерений, можно определить временной интервал с повышенными погрешностями. Для этого погрешность гравиметрических измерений сравнивалась с СКО гравиметрических измерений (рисунок 5).

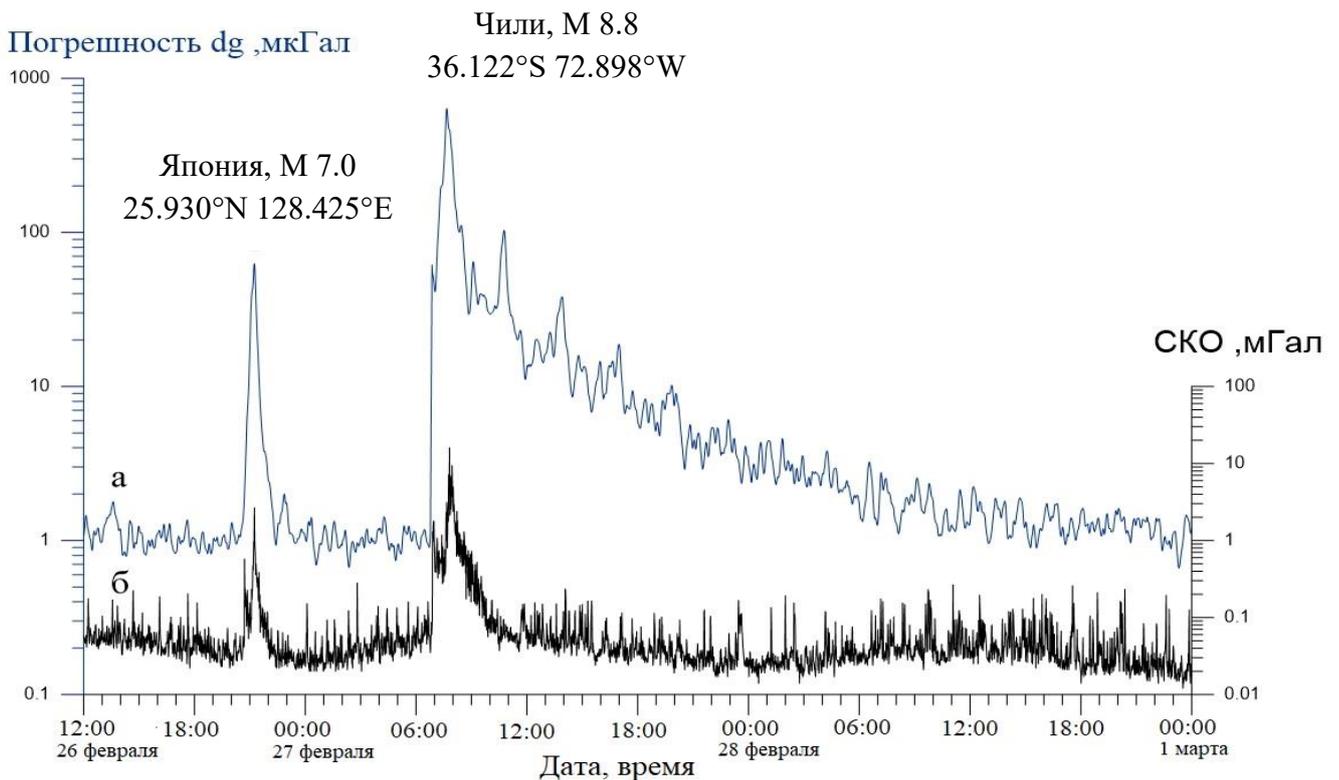


Рисунок 5 – Погрешность измерения (а) и СКО (б) по данным с гравиметра

В результате проведенного анализа значительного количества сейсмических события, была набрана статистика по влиянию землетрясений, которая сведена в таблицу 1.

Таблица 1. Группы событий, вызывающих возрастание СКО измерений

№ группы	СКО, мГал	Погрешность, мкГал	Время переходного процесса	Магнитуда
1	до 0,05			< 4.5
2	0,05-0,1	3	1 час	4.5 – 6.0
3	0,1-1	20	5 час	6.0 – 7.0
4	1-10	100	9 час	7.0 – 8.0
5	Свыше 10	1000	до 48 часов	> 8.0

Таким образом, при выполнении высокоточных наземных гравиметрических измерений оператор, имея информацию о величине СКО, должен учитывать время затухания колебания почвы и основания, на котором установлен относительной гравиметр, а также величину возможной погрешности в конкретной точке измерений.

В разделе 2.3 показана возможность получения сейсмической поправки, которую можно использовать для снижения высокочастотного шума в гравиметрических данных. Для этого гравиметрические и сейсмические данные приводятся к одинаковой дискретности. Сейсмические данные обрабатываются с помощью математической модели чувствительной системы гравиметра. Полученный из сейсмических данных, смоделированный ряд позволяет снизить уровень зашумленности гравиметрических данных.

В разделе 2.4 показана необходимость использования сейсмической информации при создании опорного гравиметрического пункта. Опорные гравиметрические измерения будут содержать погрешность, вызванную влиянием фоновых инерциальных возмущений техногенного и природного характера. Такие исследования были выполнены при создании опорного гравиметрического пункта первого класса «Запольское».

Региональный характер распределения микросейсм сложно предсказать. В качестве примера, приведен мониторинг микросейсмического шума по Владимирской области в районах с разным геологическим строением (рисунок 6) и по результатам эксперимента построен спектр мощности микросейсмического шума для каждой точки измерения (всего их было 8) (рисунок 7).

Максимальная разность в спектре составила порядка 50 дБ/Гц, что говорит о разном отклике природных районов Владимирской области на техногенную составляющую активности микросейсм. Предположительно отличие отклика связана с различием геологических структур.

Отличие спектральной плотности мощности только в восьми точках рассмотренного региона показала целесообразность выполнения исследований уровня микросейсмических шумов в заданном районе работ. При выполнении высокоточных гравиметрических измерений данные о распределении микросейсмического шума по территории будут полезны при обработке экспериментальных данных.

Также показан пример оценки каждого гравиметрического пункта съемки на пригодность для достижения требуемой точности гравиметрических измерений на основе построения СКО, используя сейсмические данные.

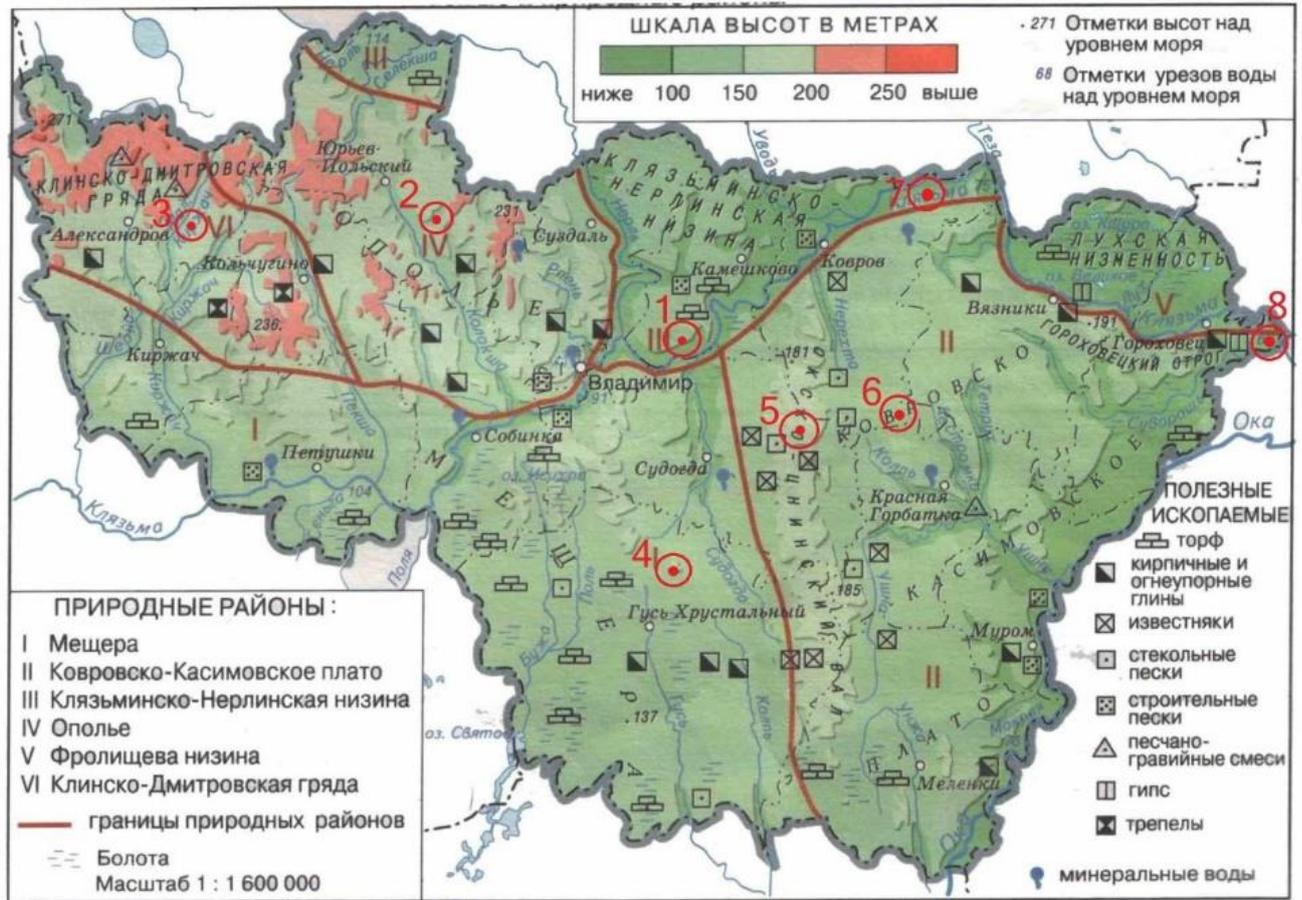


Рисунок 6 – Карта Владимирской области с точками измерений для мониторинга уровня микросейсмического шума

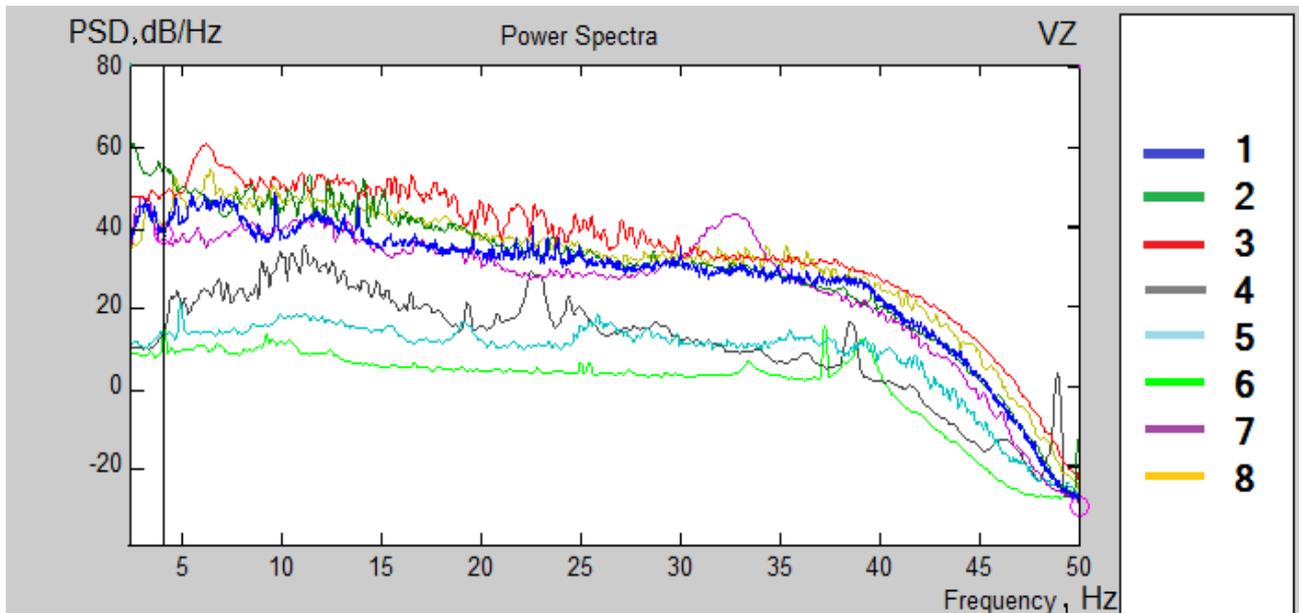


Рисунок 7 – Спектральная плотность мощности отклика среды на микросейсмическую активность

В разделе 2.5 показан способ улучшения ранее разработанной математической модели гравиметра для получения сейсмической поправки (описание которой приводится в разделе 2.3). Ранее математическая модель применялась к осредненному за время накопления отсчетов, установленным оператором, гравиметрическому ряду, но применение доработанной модели к исходным гравиметрическим отсчетам частотой 6 Гц позволяет получить сейсмическую поправку, которая значительно снижает уровень шума в гравиметрических данных (на 60-70%) (рисунок 8). Также, применение этой поправки значительно снижает уровень шума в гравиметрических данных при регистрации сейсмического события.

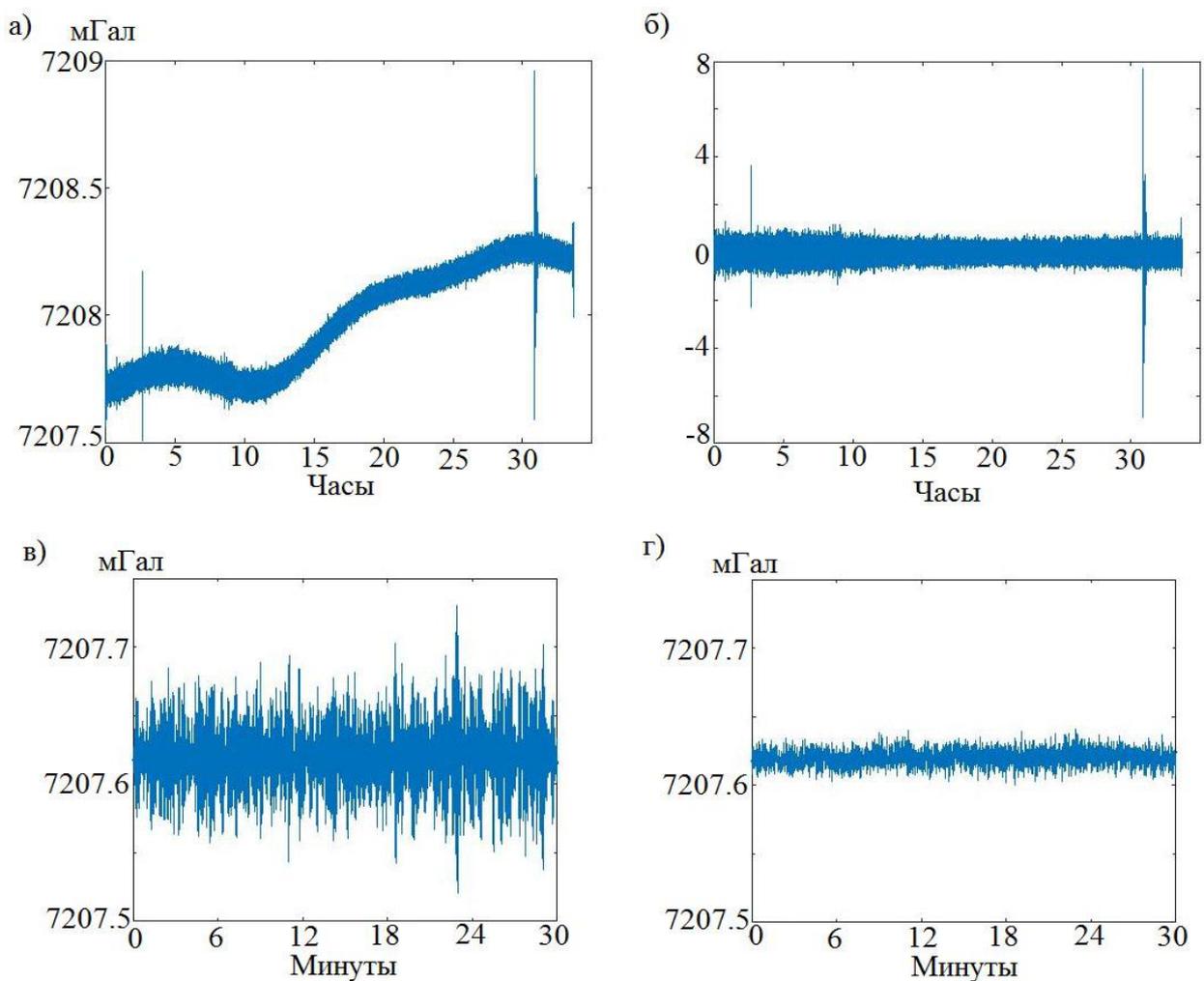


Рисунок 8 – Данные (6 Гц): а) гравиметрические отсчеты, 33 часа измерений; б) смоделированные данные, 33 часовой ряд; в) гравиметрические отсчеты, 30 минут измерений; г) гравиметрические отсчеты, 30 минут измерений с учетом сейсмического воздействия

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

Выводы по второй главе. Описанные в данной главе результаты обосновывают первое защищаемое положение. В результате выполненной работы были получены следующие основные результаты:

1. 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.

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

3. Сформулированы методические приемы повышения точности относительных гравиметрических наблюдений с использованием сейсмической информации.

Глава 3 Методические приемы по учету влияния метеорологических факторов на точность гравиметрических измерений

В третьей главе показаны результаты экспериментальной оценки влияния метеорологических факторов, таких как изменение атмосферного давления, температуры и влажности, на гравиметрические измерения в пункте наблюдений и предложены приемы по учету этих воздействий для повышения точности измерений.

В разделе 3.1 проанализированы экспериментальные наблюдения по учету изменения атмосферного давления непосредственно на пункте измерения. Поправка за изменение атмосферного давления в мкГал вычисляется по формуле:

$$dG_p = K\Delta P, \quad (1)$$

где K – коэффициент барометрической поправки, ΔP – изменение давления относительно нормального значения в мБар.

Коэффициент барометрической поправки уточняется уже несколько десятилетий и у разных авторов в результате разных подходов значения варьируются. Для того, чтобы устранить влияние изменения давления, определен поправочный коэффициент на гравиметрическом пункте «Запольское» путем построения аппроксимирующей прямой зависимости гравиметрических данных от изменения атмосферного давления, продолжительностью более 8 месяцев (рисунок 9), он составил $-0,2972$ мкГал/мБар. Применение полученного коэффициента позволило снизить СКО гравиметрических измерений

до 1,030 мкГал (с учетом среднего значения коэффициента было 1,261 мкГал), что позволяет повысить точность измерения на конкретном пункте.

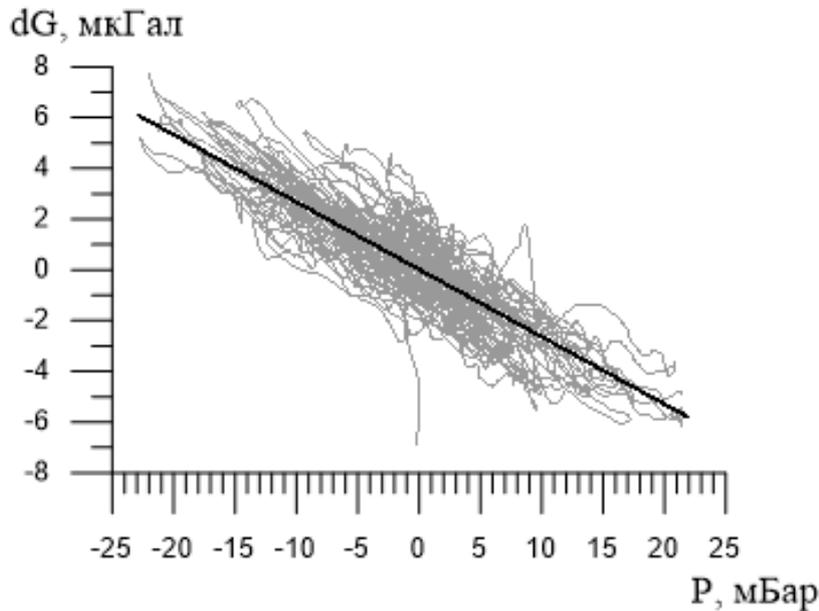


Рисунок 9 – Зависимость гравиметрических данных от давления (серый) аппроксимирующая кривая 1-го порядка (черный)

В разделе 3.2 показана оценка влияния изменения температуры окружающей среды на гравиметрические измерения. Ее изменение приводит к появлению нелинейности составляющей дрейфа нуля-пункта относительного гравиметра, а, следовательно, к еще одному источнику погрешности измерений. Первым, было проанализировано влияние перепада температуры при смене пункта наблюдения. Для оценки влияния температуры на относительный гравиметр были выбраны участки на записи данных, которые содержали переходные процессы, полученные в результате перемещения между пунктами “Запольское” и “Ледово”. На выбранных участках было снято значение дрейфа, после чего произведена аппроксимация логарифмической функцией с получением соответствующих коэффициентов (рисунок 10).

Эксперимент показал, что чем выше значение модуля разности температуры, тем дольше происходит установка чувствительного элемента гравиметра на новый уровень. Актуальность учета изменения температуры на пунктах измерений зависит от требуемой точности; например, при перепаде температуры на 10 °С среднеквадратическая погрешность гравиметрических измерений составила ± 0.025 мГал (относительная погрешность измерений 0.2 %) (рисунок 11). При больших перепадах температуры, для сохранения такого уровня погрешности, время наблюдения на каждом пункте измерения должно быть больше, чем 10 минут.

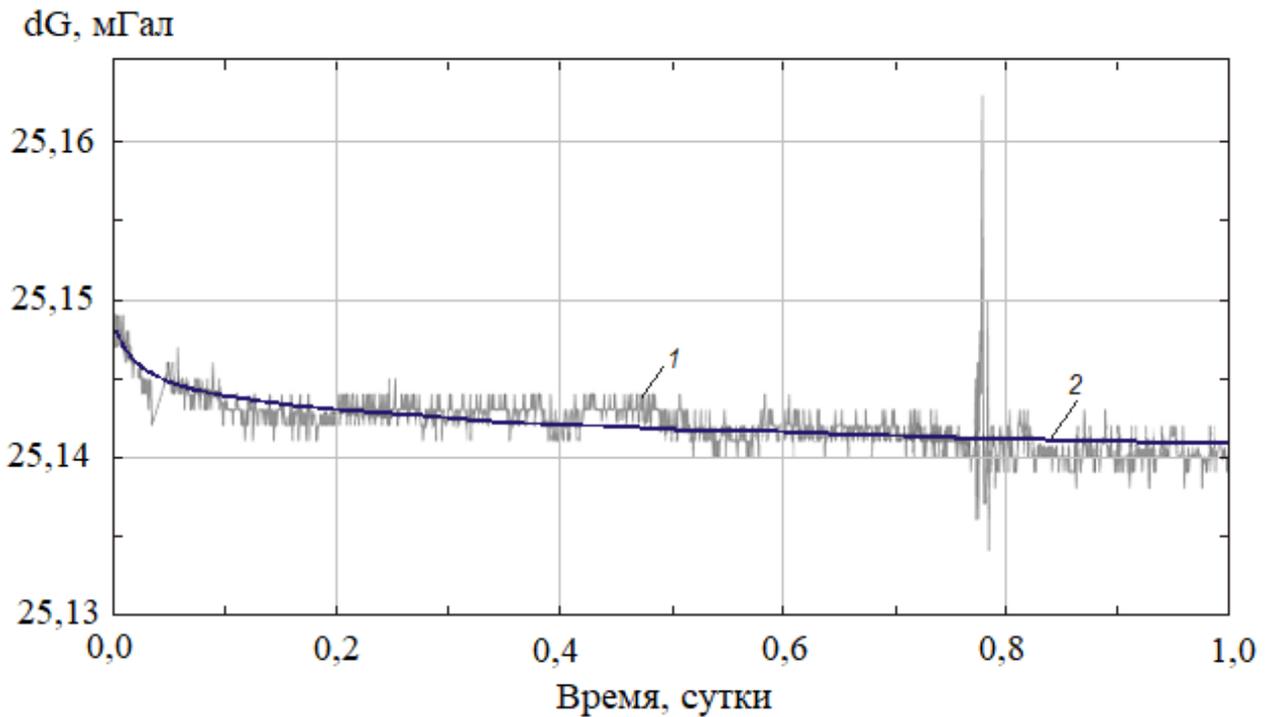


Рисунок 10 – Переходный процесс в гравиметрических данных после снятия дрейфа нуля (1) и аппроксимирующая его логарифмическая кривая (2)

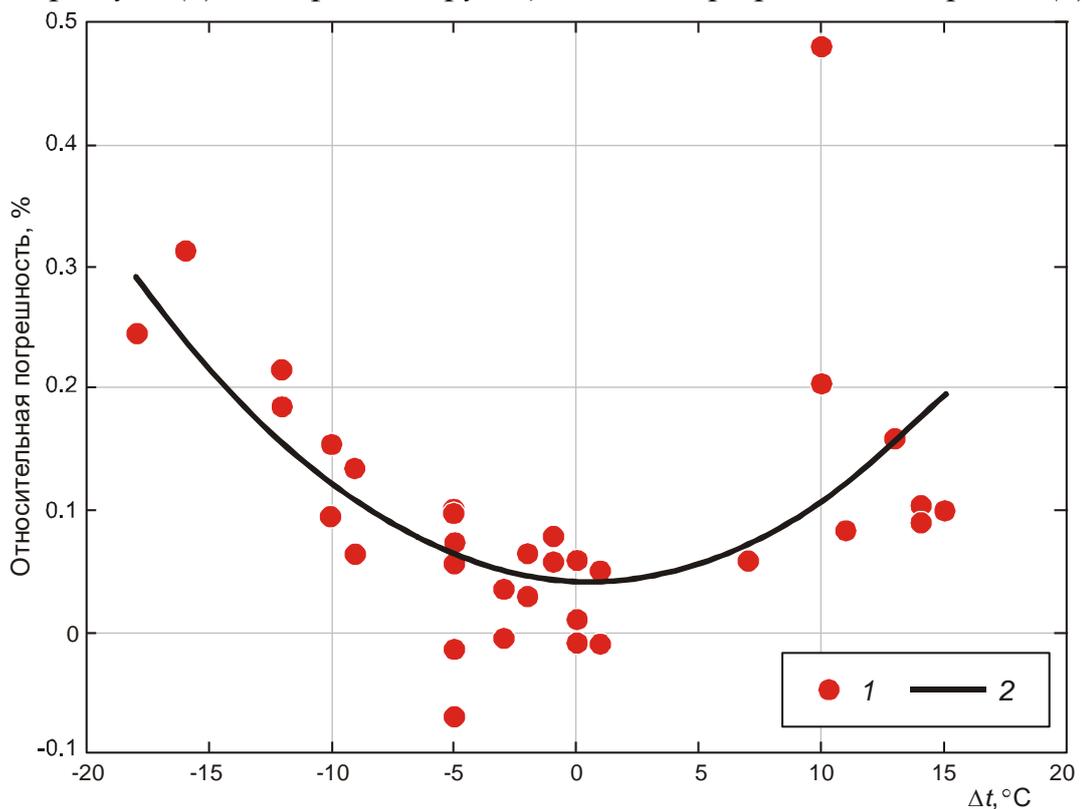


Рисунок 11 – Зависимость относительной погрешности измерений гравиметра от перепада температуры: 1 – рассчитанные погрешности определения разницы ускорения силы тяжести между пунктами в зависимости от зарегистрированного перепада температуры; 2 – кривая, аппроксимирующая все рассчитанные погрешности

Вторым исследованием было изучение зависимости скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра от изменения температуры. Была получена математическая модель температурной релаксации, которая позволила установить “эффективную” температуру, максимально точно описывающую воздействие на скорость дрейфа. Коэффициент корреляции между ними составил 0.981. При построении графика зависимости скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра от “эффективной” температуры была получена аппроксимирующая прямая, тангенс угла наклона которой использован в качестве коэффициента пересчета значений температуры в поправку, учитывающую нелинейную составляющую дрейфа нуля-пункта (рисунок 12).

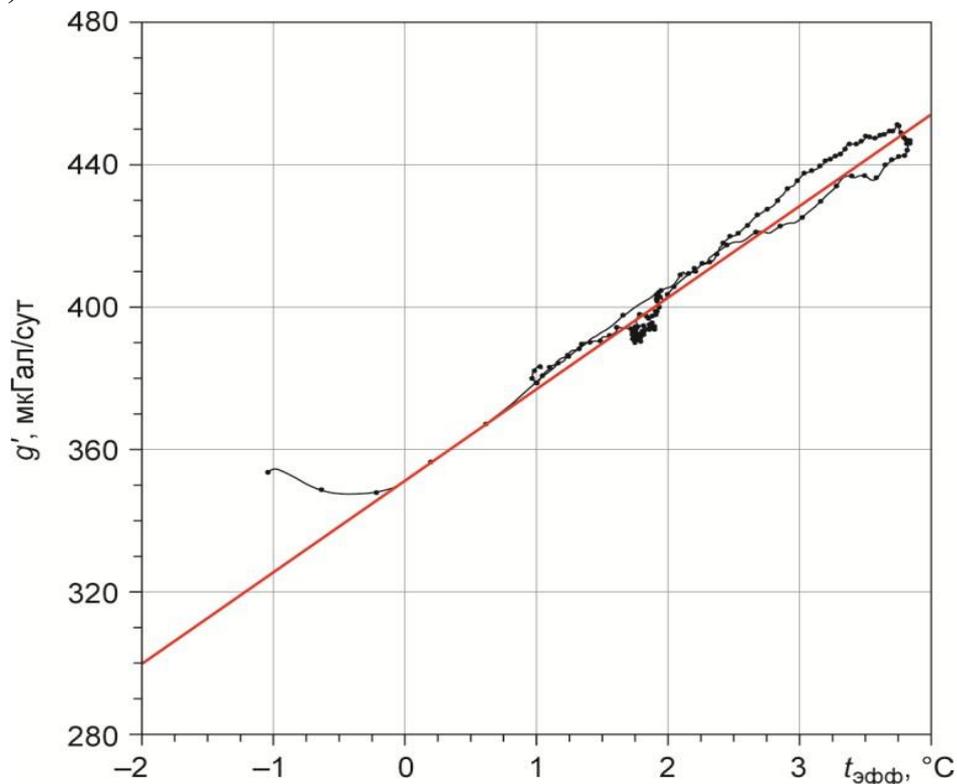


Рисунок 12 – Зависимость скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра g' от “эффективной” температуры $t_{эфф}$. Красной линией обозначена аппроксимирующая прямая, описываемая уравнением $y=25.67 \cdot t_{эфф} + 351.49$

В результате компенсации нелинейной составляющей скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра, по значению внешней температуры с использованием созданной математической модели, погрешность учета скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра уменьшилась на порядок на полугодовом ряде измерений, что подтверждает ее адекватность.

В разделе 3.3 описаны экспериментальные исследования по влиянию влажности на гравиметрические измерения. Эксперимент показал, что в условиях экстремального значения влажности (период высокой влажности выделен цветом) наблюдается увеличение скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра (рисунок 13).

Следовательно, при выполнении долговременных высокоточных гравиметрических наблюдений необходимо в помещении, где располагается прибор, поддерживать не только постоянную температуру, но и постоянный уровень влажности.

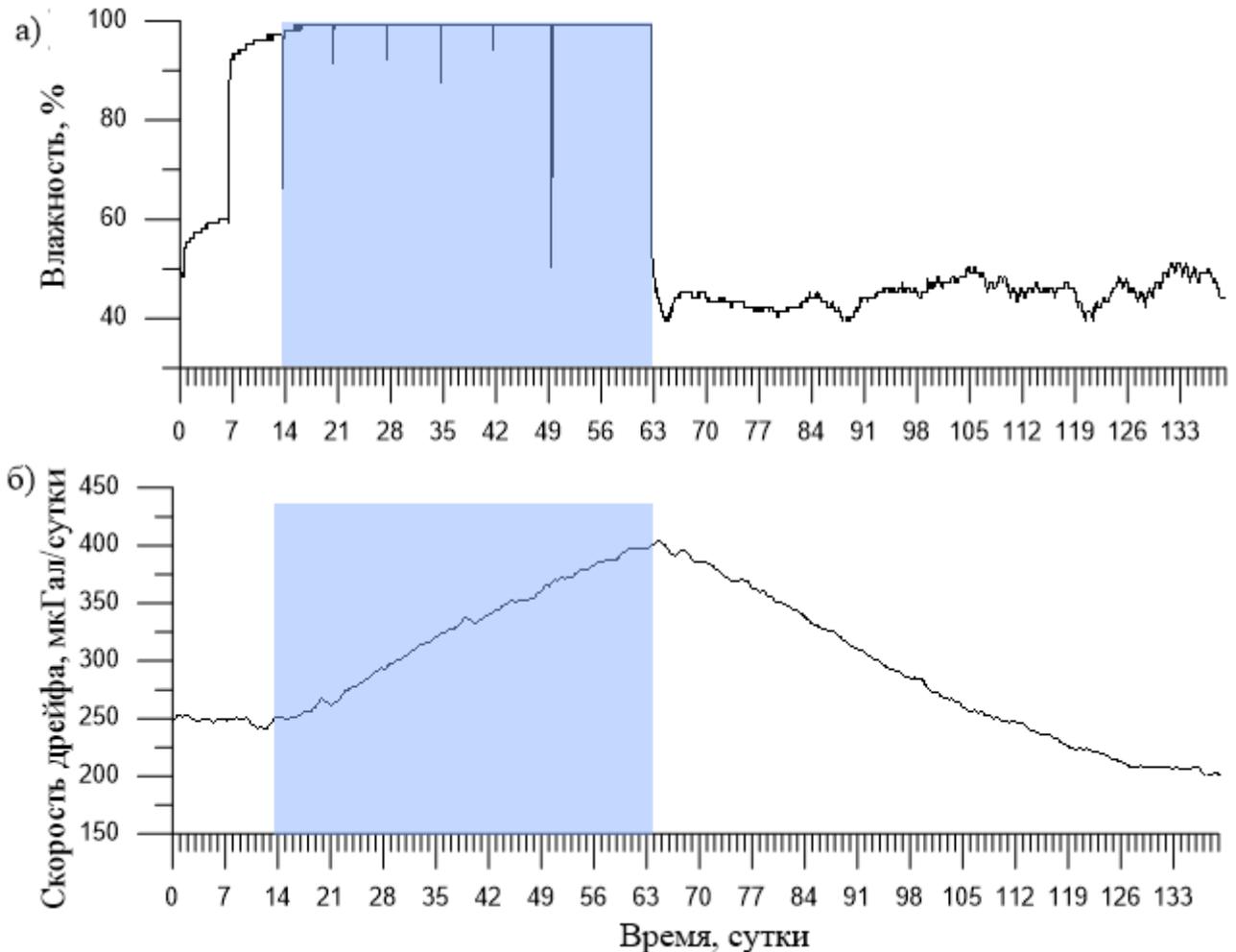


Рисунок 13 – а) Зависимость влажности от времени в изолирующем корпусе; б) зависимость скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра, находящегося в изолирующем корпусе, от времени

Выводы по третьей главе. Описанные в данной главе результаты обосновывают второе защищаемое положение. В результате проведенных экспериментов получены следующие основные выводы:

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

2. Показано, что существующее термостатирование чувствительной системы относительного гравиметра позволяет выполнять высокоточную гравиметрическую съемку продолжительностью до двух суток без учёта

нелинейной составляющей дрейфа нуля-пункта гравиметра. Нелинейная же составляющая скорости дрейфа нуля-пункта гравиметра зависит от температуры и влажности окружающей среды и ее изменения.

3. При проведении высокоточной гравиметрической съемки 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. Сформулированы методические приемы учета влияния метеорологических факторов на точность измерений при выполнении долговременной гравиметрической съемки.

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

В четвертой главе приведена реализация разработанных методических приемов по достижению наилучшей точности гравиметрической съемки. Для проведения высокоточных гравиметрических измерений в состав оборудования необходимо ввести сейсмическую и метеорологическую станции. Состав оборудования (без геодезического обеспечения) и виды информации, необходимых для обработки, показаны на рисунке 12.

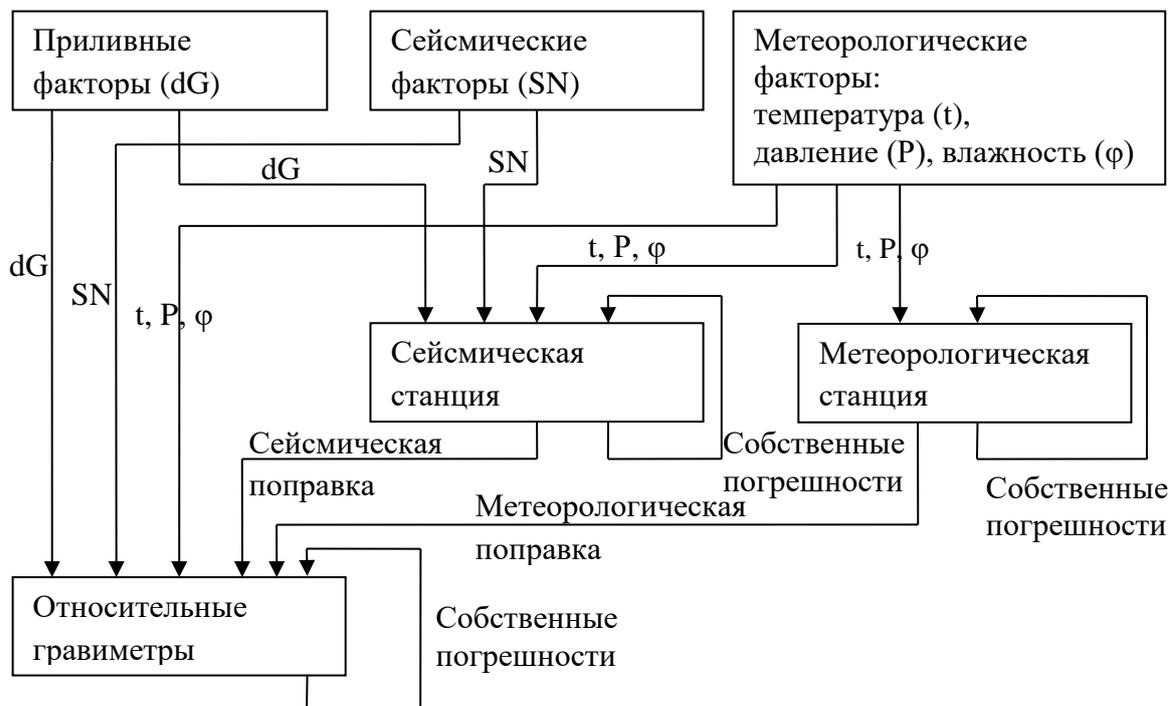


Рисунок 12 – Состав и структура комплекса оборудования, предлагаемые при проведении высокоточной гравиметрической съемки

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.

Апробация результатов обработки информации приведена на примере выполнения контрактов ИФЗ РАН, проводимых научной группой лаборатории гравиинерциальных измерений (№ 601) ИФЗ РАН на территории европейской части России в 58 точках ее территории (рисунок 13). Работы выполнялись по заказам ряда организаций, в частности, «Газпром Трансгаз Москва».

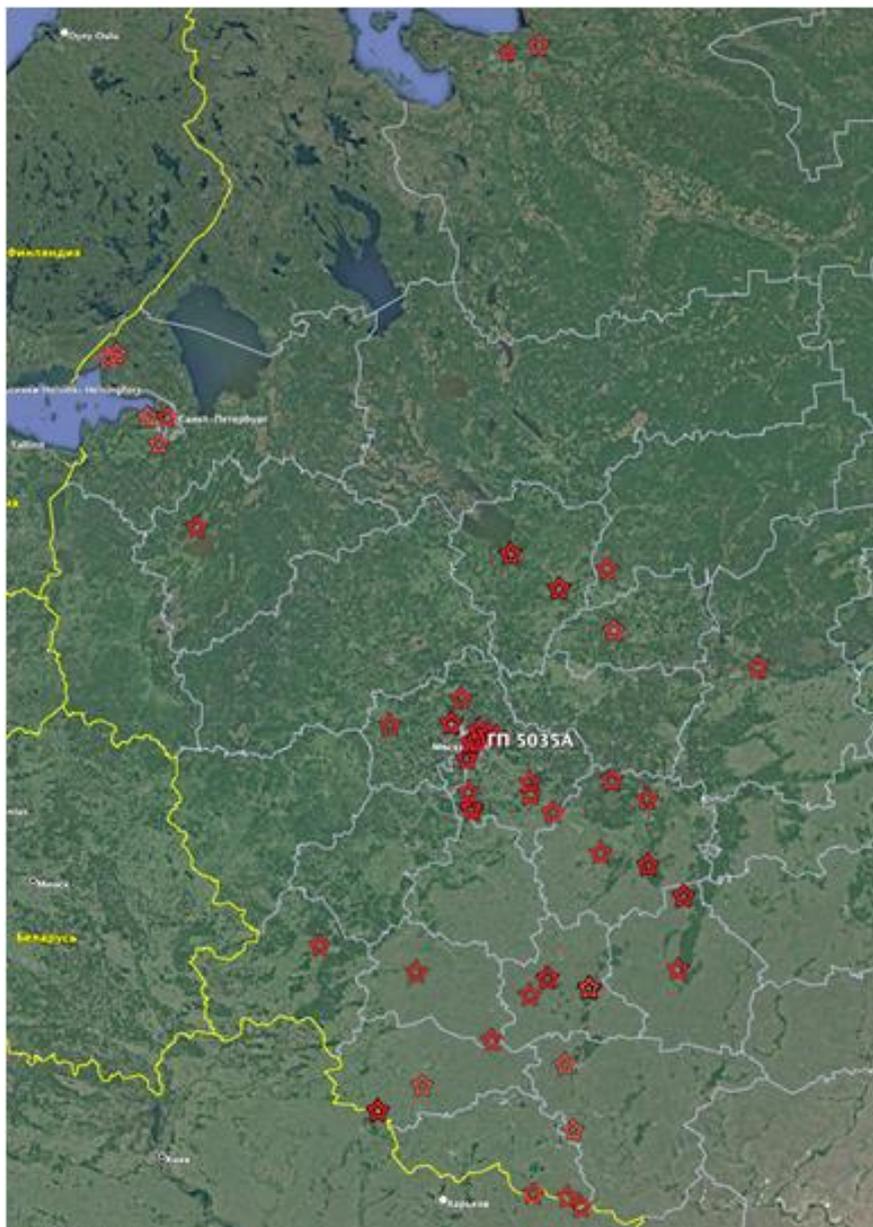


Рисунок 13 – Карта расположения пунктов («звездочки») высокоточных гравиметрических измерений, выполненных ИФЗ РАН с использованием предложений, сформулированных в диссертации

Разброс амплитуд погрешностей измерений по всем точкам составил от 5 до 19 мкГал при широком диапазоне изменения ускорения силы тяжести 801,8 мГал. По совокупности всех измерений 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.

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 РФФИ №22-17-20035.

Выводы по четвертой главе. Описанные в данной главе результаты обосновывают третье защищаемое положение. 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 наземных гравиметрических измерений. При этом выполнены теоретические и экспериментальные работы и получены следующие основные результаты:

1. Разработаны следующие методические приемы, позволяющие оценить точность гравиметрических измерений по сейсмическим данным:

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

- 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;

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

2. Получил развитие методический прием учета влияния сейсмических событий на гравиметрические измерения в пункте наблюдения:

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

3. Были усовершенствованы и разработаны новые методические приемы учёта метеорологического воздействия на гравиметрические измерения в пункте наблюдений:

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

- для получения высокоточных измерений, продолжительностью более двух суток, необходим учёт нелинейной составляющей дрейфа нуля-пункта гравиметра;

- при перемещении гравиметров между пунктами съемки необходимо 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 маршрутов перемещения опорный пункт – пункты измерений – опорный пункт целесообразно уменьшить.

4. Получены экспериментальные оценки влияния возмущающих внешних факторов на относительные наземные гравиметрические наблюдения с использованием предложенных методических приемов. Экспериментальные работы показали состоятельность основных положений диссертации, они были подтверждены при выполнении 58 контрактов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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.
2. 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.
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. 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.
5. 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.

Публикации в сборниках и материалах конференций:

6. Малышева Д.А. Влияние давления на компоненты микросейсмических составляющих // Дни науки студентов Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых: материалы науч.-практич. конференции 7-18 апреля 2014 г., г. Владимир [Электронный ресурс] / Владим. гос. ун-т им А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. – С. 70-71.
7. Малышева Д.А., Дорожков В.В., Конешов В.Н. О возможности мониторинга микросейсмической активности на экспериментальном полигоне // 11-я Международная научная конференция "Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии - ФРЭМЭ'2014" – Владимир-Суздаль, Россия, Доклады, Книга 2. – С. 196-199.
8. Малышева Д.А., Дорожков В.В., Фуров Л.В. Круглогодичный мониторинг сейсмических и микросейсмических процессов на сейсмостанции "Владимир" и территории Владимирского региона // 12-я Международная научная конференция "Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии - ФРЭМЭ'2016" – Владимир-Суздаль, Россия, Доклады, Книга 2. – С. 229-233.
9. 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 «ПТСПИ'17», ВлГУ. – 2017. – Том 2. – С. 111-114.

10. **Мальшева Д.А., Дробышев М.Н.** Воздействие метеорологических факторов на микросейсмический фон при долговременных гравиметрических наблюдениях // Труды XIII Международной научной конференции с научной молодежной школой имени И.Н. Спиридонова. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». В 2-х книгах. 2018. – С. 325-331.

11. **Дробышев М.Н., Мальшева 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.

12. **Мальшева Д.А., Дорожков В.В., Конешов В.Н.** Применение сейсмической информации для обработки гравиметрических данных при высокоточных измерениях // Труды XV Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2022) – Владимир-Суздаль. – 2022. – С. 389-391.

13. **Мальшева Д.А., Конешов В.Н., Дорожков В.В.** Влияние окружающей температуры на долговременные гравиметрические измерения // Труды XV Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2022) – Владимир-Суздаль. – 2022. – С. 392-394.

14. **Дробышев М.Н., Конешов В.Н., Мальшева Д.А.** Применение сейсмической информации в постобработке гравиметрических данных // Материалы 49-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей», Екатеринбург, Россия. – 2023. – С. 142-144.

Патент на изобретение:

Дробышев Н.В. Абрамов Д.В. Мальшева Д.А. Способ компенсации нелинейной составляющей скорости дрейфа нуля-пункта статического термостатированного гравиметра при гравиметрических измерениях. Патент на изобретение №2765613 от 01 февраля 2022 г.

Подписано в печать 24.01.2024 г.
Формат 60×84/16. Объем: 1.63 усл. печ. л.
Тираж 100 шт. Заказ № __
Отпечатано в ФГБОУ ВО ВлГУ
600000, Владимир, ул. Горького, 87.
Тел./факс: (4922)53-25-75