

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Государственный университет по землеустройству»
(ГУЗ)

На правах рукописи

Чистякова Екатерина Александровна



Разработка комплексной методики учета неприливных эффектов
на пунктах Государственной фундаментальной гравиметрической сети

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Баранов Владимир Николаевич

Москва – 2023

ВВЕДЕНИЕ	6
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК УЧЕТА ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПУНКТАХ	12
1.1 Общая характеристика временных вариаций силы тяжести	12
1.2 Моделирование приливных вариаций ускорения силы тяжести	17
1.2.1 Глобальные теоретические модели земных приливов	17
1.2.2 Синтетические теоретические модели земных приливов	21
1.2.3 Локальные модели земных приливов	24
1.3 Атмосферный неприливный эффект	25
1.3.1 Общие сведения об атмосферном неприливном воздействии на ускорение силы тяжести	25
1.3.2 Характеристики вариаций атмосферного давления в Московском регионе	28
1.3.3 Анализ существующих моделей атмосферного неприливного эффекта	29
1.4 Гидрологический неприливный эффект	31
1.4.1 Общие сведения о гидрологическом воздействии на ускорение силы тяжести	31
1.4.2 Характеристики гидрологического режима в Московском регионе	32
1.4.3 Анализ существующих моделей гидрологической нагрузки	33
Выводы по первому разделу	35
2 ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	37
2.1 Общие сведения о современных гравиметрах	37

2.2 Пружинный приливной гравиметр gPhoneX.....	39
2.2.1 Описание и технические характеристики.....	39
2.2.2 Проблема выявления дрейфа нуля-пункта	41
2.3 Абсолютный баллистический гравиметр FG5	43
2.3.1 Описание и технические характеристики абсолютного баллистического гравиметра FG5.....	43
2.3.2 Методика абсолютных гравиметрических определений	45
2.4 Существующее программное обеспечение	46
2.5 Требования к пункту и методике измерений	50
Выводы по второму разделу	52
3 КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ.....	54
3.1 Общие положения и постановка задачи	54
3.2 Методика автоматизированной предварительной обработки мониторинговых наблюдений	56
3.2.1 Постановка задачи.....	56
3.2.2 Исключение случайных выбросов и пропусков данных	57
3.2.3 Изменение частоты дискретизации.....	61
3.2.4 Фильтрация шумов.....	62
3.2.5 Выявление и учет дрейфа нуля-пункта гравиметра	65
3.2.6 Получение локальных параметров земных приливов	67
3.2.7 Предварительный анализ неприливных вариаций ускорения силы тяжести	68
3.3 Методика учета атмосферного неприливногo эффекта	70
3.3.1 Постановка задачи.....	70

3.3.2 Анализ влияния атмосферного неприливного эффекта.....	71
3.3.3 Учет атмосферного неприливного эффекта	72
3.4 Методика учета гидрологического неприливного эффекта	73
3.4.1 Постановка задачи.....	73
3.4.2 Анализ влияния гидрологии на вариации ускорения силы тяжести	74
3.4.3 Учет гидрологического неприливного эффекта	75
3.5 Методика совместного учета неприливных эффектов.....	77
3.5.1 Постановка задачи.....	77
3.5.2 Анализ совместного влияния атмосферного и гидрологического неприливных эффектов	77
3.5.3 Совместный учет неприливных эффектов	78
Выводы по третьему разделу	79
4 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ.....	80
4.1 Априорная оценка точности локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести.....	80
4.2 Оценка репрезентативности эталонной выборки	81
4.3 Апостериорная оценка точности локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести	82
4.3.1 По результатам многолетних наблюдений приливным гравиметром....	82
4.3.2 По результатам многолетних абсолютных определений.....	84
4.4 Оценка влияния неприливных вариаций на геодезическую высоту	85
Выводы по четвертому разделу	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	90
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	92
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	93

ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ЛОКАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ЗЕМНЫХ ПРИЛИВОВ	105
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) ЧИСЛА ЛЯВА, ВЫЧИСЛЕННЫЕ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЗЕМНЫХ ПРИЛИВОВ.....	106
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОЙ НЕПРИЛИВНОГО ЭФФЕКТА	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ НЕПРИЛИВНОГО ЭФФЕКТА	110
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕПРИЛИВНОГО ЭФФЕКТА	112
ПРИЛОЖЕНИЕ Е (обязательное) ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ МОНИТОРИНГОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕПРИЛИВНОГО ЭФФЕКТА	118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Развитие и поддержание общеземной системы координат, обновление высотной основы и изучение геодинамических явлений с максимально доступной точностью являются актуальными задачами высшей геодезии. В связи с этим повсеместно возникает необходимость создания и совершенствования моделей временных вариаций ускорения силы тяжести. Современные методики обработки и анализа гравиметрической информации не совершенны и имеют ряд недостатков. Учет изменений ускорения силы тяжести, вызванных приливными явлениями и движениями земных полюсов, в настоящее время возможен на уровне 1 мкГал. При этом неприливные вариации, фиксируемые при мониторинговых наблюдениях, составляют более 20 мкГал, что существенно превышает требуемую точность к результатам абсолютных определений ускорения силы тяжести на фундаментальных пунктах Государственной фундаментальной гравиметрической сети Российской Федерации (далее – ГФГС) в 8 мкГал.

В рамках государственной программы «Космическая деятельность России» реализуется множество научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. В частности, в рамках подпрограммы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» ведущими научными и научно-производственными организациями ведется опытно-конструкторская работа по теме «Развитие государственной гравиметрической сети» (ОКР «ГРАВИКА-2030»), одним из разделов которой является изучение временных вариаций ускорения силы тяжести.

Сегодня во многих странах ведутся исследования гравитационного поля Земли с применением современного высокоточного оборудования, в частности гравиметров приливного типа. Точность определения ускорения силы тяжести по результатам современных абсолютных и мониторинговых относительных определений составляет 2–5 мкГал. Проведение комплекса постоянных наблюдений абсолютными и относительными методами на всех фундаментальных пунктах ГФГС практически нереализуемо. Проведение мониторинговых относительных наблюдений можно

заменить использованием модельных значений ускорения силы тяжести. Существующие зарубежные методики учета неприливных эффектов предполагают использование различных глобальных моделей и сложную неавтоматизированную вычислительную обработку. Ввиду ограниченного набора исходных данных, использованных зарубежными исследователями, подобные глобальные модели не учитывают локальные особенности на конкретной территории. Поэтому возникает необходимость изучения и учета локальных параметров временных вариаций ускорения силы тяжести на пунктах ГФГС с точностью несколько мкГал.

В связи с этим, *актуальность* диссертационного исследования обусловлена необходимостью исследования локальных особенностей неприливных вариаций ускорения силы тяжести и разработки комплексной методики создания локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести на фундаментальных пунктах ГФГС.

Степень разработанности темы. В России тема исследования временных вариаций ускорения силы тяжести довольно нова. Ее изучением занимались: Бровар В. В., Бровар Б. В., Вихирев Б. В., Парийский Н. Н., Перцев Б. П., Крамер М. Б., Карпик А. П., Мазуров Б. Т., Баранов В. Н., Спиридонов Е. А., Конешов В. Н., Непоклонов В. Б., Соловьев В. Н., Железняк Л. К., Михайлов П. С., Ганагина И. Г., Канушин В. Ф., Голдобин Д. Н., Дорогова И. Е., Елагин А. В., Спесивцев А. А. и др. В зарубежной практике исследования временных вариаций ускорения силы тяжести, в частности вызываемых неприливными эффектами, ведутся многими научными организациями. Основной вклад внесли такие ученые, как Wenzel H. G., Boy J.-P., Hinderer J., Longuevergne L., Llubes M., Merriam J. B., Agnew D. C., Cartwright D. E., Tayler R. J., Longman I. M., Farrell W. E., Van Dam T. M., Wahr J. M., Imanishi Y., Zhang M., Wu T., Hinderer J., Riccardi U. Однако исследований с целью анализа высокоточных мониторинговых относительных гравиметрических определений или создания высокоточной локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести для территории России ранее не проводилось.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка комплексной методики учета неприливных эффектов в результаты гравимет-

рических определений для создания локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести на пункте ГФГС по данным приливного гравиметра.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести информационно-аналитический обзор существующих способов исследования временных вариаций ускорения силы тяжести и учета влияния неприливных эффектов;
- разработать требования и усовершенствовать методику проведения и предварительной обработки результатов мониторинговых наблюдений ускорения силы тяжести относительными гравиметрами приливного типа;
- оценить влияние изменения гидрологических и атмосферных параметров на изменения ускорения силы тяжести во времени и разработать комплексную методику учета временных вариаций ускорения силы тяжести по локальным данным;
- выполнить экспериментальные исследования разработанной комплексной методики с использованием независимых относительных и абсолютных гравиметрических определений.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются неприливные временные вариации ускорения силы тяжести. Предметом исследования выступает методика учета неприливных эффектов в результаты гравиметрических определений.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- впервые на пункте ГФГС выполнены исследования локальных вариаций ускорения силы тяжести на основе результатов длительных (8 лет) мониторинговых наблюдений высокоточным гравиметром приливного типа совместно с регулярными абсолютными определениями баллистическим гравиметром;
- данное исследование позволяет создать первую высокоточную локальную модель временных вариаций ускорения силы тяжести, учитывающую неприливные эффекты для пункта на территории Российской Федерации.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что выполненное исследование позволило провести анализ влияния непривливых эффектов, а именно изменения гидрологических и атмосферных параметров, на временные вариации ускорения силы тяжести, что вносит вклад в развитие геодезической гравиметрии и геодинамики.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что разработанная комплексная методика позволяет создавать локальные модели временных вариаций ускорения силы тяжести на фундаментальных пунктах и может быть рекомендована к использованию при развитии ГФГС.

Методология и методы исследования базировались на комплексном использовании теоретических и экспериментальных изысканий. В ходе исследования проводился анализ современной научной литературы по теме диссертации и возможных требований к учету непривливых составляющих вариаций ускорения силы тяжести. С использованием методов математического моделирования, высшей геодезии и геодезической гравиметрии разработана методика учета влияния непривливых эффектов на пунктах ГФГС. Для проверки и оценки точности результатов, полученных в ходе апробации разработанной методики, проводились практические исследования с использованием метода вычислительного эксперимента. Обработка и анализ экспериментальных данных выполнялись с использованием стандартных математических методов исследования: математической статистики, численного анализа, регрессионного анализа и метода наименьших квадратов.

Положения, выносимые на защиту:

- предложенные требования и методика проведения мониторинговых наблюдений ускорения силы тяжести, которые обоснованы результатами выполненных исследований, обеспечивают возможность создания локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести с требуемой точностью за минимальный срок;
- разработанная методика предварительной обработки данных приливного гравиметра позволяет выполнить унифицированную автоматическую обработку

результатов измерений, выявить и провести анализ неприливных вариаций ускорения силы тяжести;

– предложенная методика учета атмосферных и гидрологических эффектов, которая является основой для создания локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести, позволяет повысить точность определения мгновенного значения ускорения силы тяжести без проведения непосредственных измерений.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика диссертации соответствует следующим областям исследования: 1 – Определение формы поверхности и гравитационного поля Земли, их изменений в пространстве и времени с использованием наземных, морских, аэрокосмических средств измерений. Теория вращения Земли и глобальная геодинамика, включая изучение параметров вращения Земли, движения ее центра масс, изменений уровня моря, гляцио-изостазии и других движений и деформаций природного и антропогенного происхождения; 3 – Создание и развитие геодезической координатно-временной основы различного назначения с использованием геодезических, астрономических, гравиметрических и других (космических, наземных, подземных и подводных) методов измерений; оценка их стабильности и характера изменений, вопросы проектирования и оптимизации. Разработка и развитие теорий построения и реализации координатных, высотных и гравиметрических систем отсчета паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности работы определяется корректностью постановки задач, использованием стандартных математических методов при проведении исследования, согласованностью экспериментальных и теоретических данных.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на V Симпозиуме международной ассоциации по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях» – TG-SMM 2019 (Санкт-Петербург, 2019 г.), Международном научно-промышленном форуме «Великие реки'2019» (Нижний Новгород, 2019 г.), II научно-технической

конференции «Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии» (Московская обл., 2019 г.), Международной научно-технической онлайн-конференции «Пространственные данные в условиях цифровой трансформации» (Москва, 2020 г.), VI Национальной Научно-практической конференции с международным участием «Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения» (Новосибирск, 2022 г.), XIX Международной выставке и научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, 2023 г.).

Результаты диссертационного исследования внедрены в производственный процесс публично-правовой компании «Роскадастр», а также в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет по землеустройству» при преподавании дисциплин «Теория фигур планет и гравиметрия» и «Высшая геодезия» (модуль «Геодезическая гравиметрия»).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 научных работах, 3 из которых опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 1 опубликована в издании, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 120 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 96 наименований, содержит 6 таблиц, 25 рисунков, 7 приложений.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК УЧЕТА ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПУНКТАХ

1.1 Общая характеристика временных вариаций силы тяжести

Пространственные вариации ускорения силы тяжести широко исследуются геодезистами, геофизиками, геологами. Гравиметрические карты используются при решении целого ряда прикладных задач: поиск и добыча полезных ископаемых, строительство уникальных зданий и сооружений, запуск ракет, космических летательных аппаратов. Точность, требуемая для решения этих задач, растет с каждым годом, поэтому сегодня знания только о пространственном распределении гравитационного поля Земли недостаточно [4, 79]. В частности, для поддержания единой координатно-временной основы на государственном и мировом уровнях необходимо знать особенности изменения ускорения силы тяжести с течением времени с максимально доступной точностью [6, 12, 14–16, 23, 29].

Многие отечественные и зарубежные исследования гравитационного поля Земли показали, что временные вариации ускорения силы тяжести зависят от многих факторов, имеющих различную физическую природу и характеристики [8, 11, 13, 21, 23, 29], поэтому выявление их методом простой фильтрации не представляется возможным. Для выявления и учета изменения значения ускорения силы тяжести со временем на результаты геодезических измерений необходимо использовать методы математического моделирования геодинамических явлений и их влияния на временные вариации ускорения силы тяжести [21]. Поэтому одной из задач диссертационной работы является оценка влияния некоторых физических факторов на изменение ускорения силы тяжести с течением времени. Для этого далее рассмотрены основные физические факторы, вызывающие изменения в гравитационном поле Земли во времени.

Приливы и отливы будоражили воображение еще древних философов и продолжают привлекать внимание современных геодезистов и геофизиков. В древности были отмечены лишь океанические и морские приливы и отливы. Поведение уреза воды было математически связано с расположением Луны еще в 1610–1620 гг. Иоганном Кеплером [8]. В XIX в., когда были проведены первые регулярные длительные наблюдения ускорения силы тяжести, было установлено, что твердая Земля, имея определенную степень упругости, также подвержена лунно-солнечным приливным воздействиям [11]. При этом происходят деформации как земной поверхности, так и поверхности геоида, а, как известно, именно она является отсчетной для нивелирных высот [16, 22].

С возрастающей точностью гравиметрического оборудования и с накоплением измерительной информации были отмечены и иные факторы, вызывающие изменения параметров гравитационного поля Земли: движение земных полюсов, изменение атмосферного давления, уровня грунтовых вод и пр. [29]. На сегодняшний день установлено, что временные вариации ускорения силы тяжести, улавливаемые современными гравиметрами, представляют собой сложный сигнал, трудно поддающийся моделированию [33, 34, 95].

Сигнал, фиксируемый гравиметром, можно представить в виде блок-схемы (рисунок 1.1).

Блок 1. Небесная механика. На основании данных астрономических наблюдений и законов небесной механики известно положение небесных тел Солнечной системы, а также орбитальное движение и вращение Земли вокруг своей оси. Самый заметный приливной эффект вызывает притяжение Луной, на втором месте – притяжение Солнцем. Также в современных моделях учитывается притяжения Юпитера и других планет Солнечной системы, а также пояса астероидов [18]. Влияние притяжения любого объекта можно вычислить с привлечением законов небесной механики [11, 33, 58].

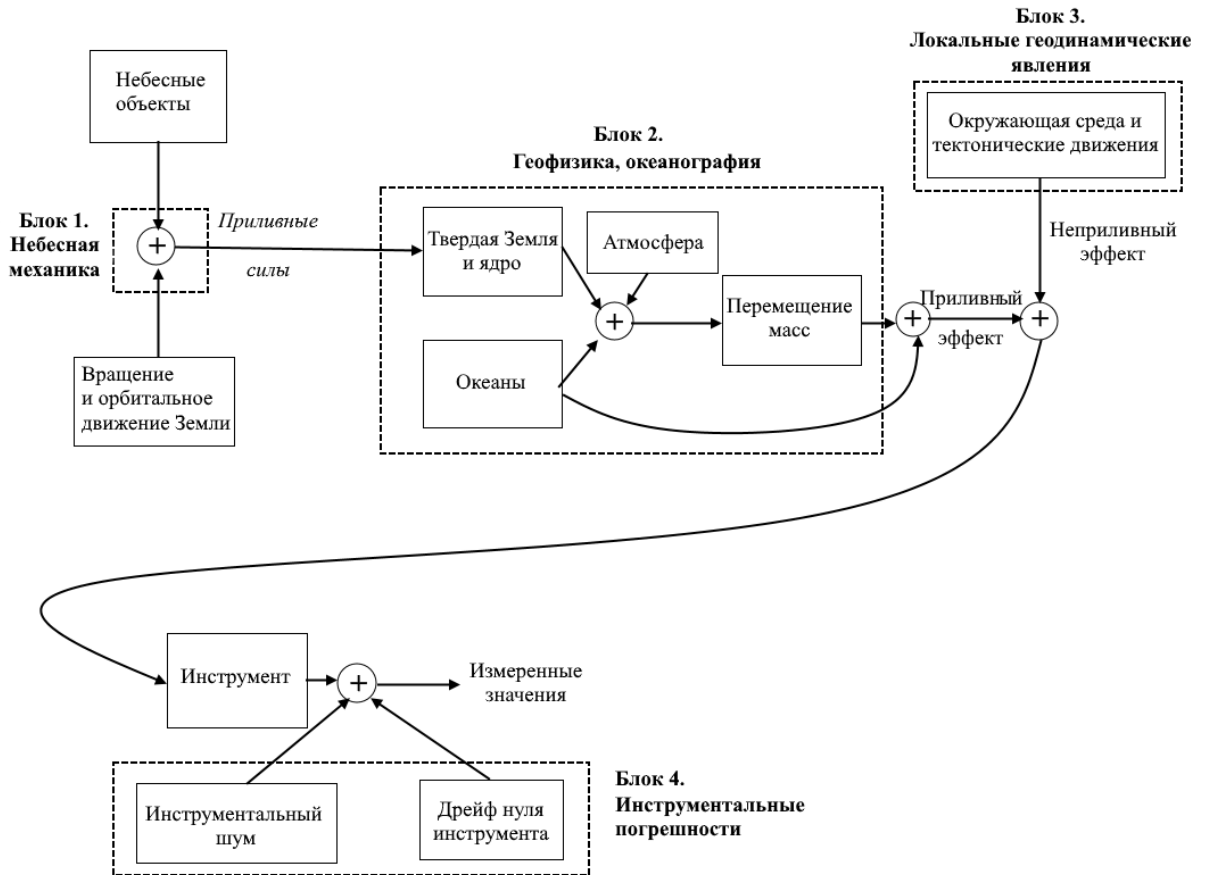


Рисунок 1.1 – Блок-схема формирования сигнала временных вариаций ускорения силы тяжести

Блок 2. Геофизика, океанография. Притяжения небесных тел вызывают деформации земной и океанической поверхностей. Эти деформации влекут за собой перемещение масс и, как следствие, периодическое изменение гравитационного поля. При этом периодические перемещения масс влияют на земные приливы дважды: непосредственно и косвенно. Косвенный эффект перемещения масс на ускорение силы тяжести называют «нагрузкой» [33], вызванной деформациями земной поверхности. Различают приливные земные и океанические нагрузки. Данные о строении Земли и океанов, а также о возникающих в них приливах, широко исследуются в соответствующих разделах геофизики и океанографии. Отдельный интерес представляют так называемые «приливы в атмосфере». Атмосфера является массой, на которую действуют приливные силы, перемещение атмосферных масс также вызывает деформации земной поверхности. Величина возмущений, вызван-

ных приливами в атмосфере незначительна (десятые доли мкГал) [45, 54, 76], однако при высокоточных гравиметрических определениях все же нуждается в учете.

Блок 3. Локальные геодинамические явления. На возмущения гравитационного поля Земли влияют различные локальные факторы, такие как состояние атмосферы на пункте наблюдений, изменение уровня грунтовых вод, тектонические движения и другие локальные геодинамические явления. Эти факторы невозможно учесть предварительно, так как характер их изменений заранее неизвестен [62, 79]. Однако некоторые из них можно частично учесть в пост-обработке. Для выявления и разработки методики учета тех или иных локальных геодинамических явлений необходимы специальные исследования. Сигнал вариаций ускорения силы тяжести, имеющий непериодический характер, называют неприливым [11].

Блок 4. Инструментальные погрешности. Общий сигнал изменений ускорения силы тяжести искажается инструментальными погрешностями. Записываемый сигнал в значительной степени оказывается зашумлен. Большое влияние на результаты измерений оказывает дрейф нуля-пункта гравиметра, который часто имеет заметную величину и изменяется по неизвестному закону. Для длительных наблюдений следует использовать специальные гравиметры: сверхпроводящие и пружинные приливные [73]. Сверхпроводящие гравиметры практически лишены дрейфа нуля (несколько десятых мкГал/год), а приливные гравиметры, благодаря системе пружин нулевой начальной длины, обладают небольшим (десятки мкГал/мес.) линейным дрейфом [52]. Прежде чем выполнять измерения приливными гравиметрами, необходимо тщательно изучить характер изменения положения нуля-пункта [73].

Учитывая сказанное, временные вариации ускорения силы тяжести, фиксируемые гравиметром, можно представить в аналитическом виде:

$$\Delta g = \Delta g_{tide} + \Delta g_{Pol} + \Delta g_{notide} + \Delta g_{drift} + i, \quad (1.1)$$

где Δg – измеренное значение ускорения силы тяжести;

Δg_{tide} – составляющая временного ряда ускорения силы тяжести, вызванная факторами приливного характера (лунно-солнечные приливы в твердой Земле, океанические приливы, приливы в атмосфере);

Δg_{pol} – изменения, вызванные движением земных полюсов;

Δg_{notide} – неприливные вариации ускорения силы тяжести, вызванные различными физическими факторами и не объясняющиеся приливной теорией;

Δg_{drift} – систематическая ошибка измерений, обусловленная дрейфом нуля пункта гравиметра;

i – шумовая составляющая временного ряда (шумы системы, вызванные сейсмическими и техногенными факторами).

Таким образом, имея данные из небесной механики (блок 1), геофизики и океанографии (блок 2), можно создавать теоретические модели приливов, основываясь исключительно на физических законах. Однако поскольку строение Земли доподлинно не известно и всегда локально отличается от модельного, параметры глобальных теоретических моделей также будут отличаться от локальных. Особый интерес представляют неприливные изменения ускорения силы тяжести. Поскольку они имеют малую величину (несколько мкГал), а приборы с такой чувствительностью появились сравнительно недавно, неприливные изменения изучены еще в недостаточной мере. На сегодняшний день можно учитывать неприливные вариации непосредственно по результатам измерений специальными приливными гравиметрами, однако, как было сказано ранее (см. Введение), оборудовать ими все пункты гравиметрической сети и все объекты строительства прецизионных сооружений экономически неэффективно.

В связи с этим можно сделать вывод, что необходимо выявление неприливных вариаций ускорения силы тяжести, установление связи между конкретными физическими и геодинамическими явлениями, а также создание методики учета влияния этих эффектов на результаты гравиметрических и геодезических измерений.

1.2 Моделирование приливных вариаций ускорения силы тяжести

1.2.1 Глобальные теоретические модели земных приливов

Глобальные теоретические модели земных приливов являются основой для разработки любой модели приливных вариаций ускорения силы тяжести.

Первый шаг в создании теоретической модели – вычисление приливных сил и приливного потенциала. Приливы можно разделить на две составляющие:

- приливы в твердой Земле, т. е. приливы, которые мы бы наблюдали на Земле, лишенной океанов;
- нагрузочные приливы, т. е. приливы, которые происходят из-за приливного перемещения масс, в том числе океанических.

Теоретический расчет функций приливного потенциала для определенного пункта наблюдений на определенную эпоху может быть получен различными методами:

а) прямые вычисления. Потенциал может быть вычислен по эфемеридам небесных тел и по функциям приливного потенциала для твердой Земли, лишенной океанов [33, 58, 95]. Однако, используя этот метод, невозможно вычислить истинный приливной эффект, создаваемый упругой Землей, покрытой океанами [95];

б) гармонические разложения. Приливной потенциал может быть представлен в виде ряда сферических функций. В результате их анализа создаются модели приливов, представленные в виде каталогов – таблиц амплитуд, фаз и частот для определенных приливных волн [33, 83, 94, 95];

в) спутниковая гравиметрия. Потенциал может быть получен из спутниковых наблюдений. Для изучения гравитационного потенциала Земли существуют такие проекты, как CHAMP, GRACE, LAGEOS, GOCE [1, 3, 7, 19, 20, 49]. Однако на сегодняшний день точность определения потенциала по результатам спутниковых наблюдений не сопоставима с точностью наземных измерений (точность спутниковых определений ускорения силы тяжести остается на уровне нескольких мГал) [3, 5, 17, 49].

Рассмотрим два первых метода более подробно.

Прямые вычисления использовались еще с середины XIX в. Первым вычислить изменение потенциала под действием Луны и Солнца удалось Дж. У. Лаббоку в 1830 г. [71]. Первой полноценной программой расчета земных приливов, основанной на представлении эфемерид в аналитическом виде, является программа Лонгмана, разработанная в 1959 г. [58]. Она до сих пор используется для получения приближенных приливных поправок в гравиметрические данные, например, в гравиметрах Scintrex [40]. Программу Лонгмана отличает то, что при расчете используются упрощенные лунные эфемериды. Для расчета земных приливов профессорами Национального Института Океанографии (Великобритания) Мунком, Картрайтом и Тайлером в 1966–1971 гг. были получены более точные связи, определяющие изменение ускорения силы тяжести в зависимости от координат пункта и времени [38]. Следует отметить, что точность определения значения приливного потенциала в этом методе зависит исключительно от точности эфемерид небесных объектов, параметров вращения Земли и координат наблюдаемого пункта [33].

Позднее было разработано несколько других, более точных моделей, в том числе модель Тамуры 1982 г., использующая лунную теорию Брауна [82].

Численные эфемериды использовались в основном для создания контрольных временных рядов, а не для программ общего назначения. Большинство (например, Хартмана и Венцеля [94]) полагались на эфемериды Солнечной системы, производимые JPL [94, 95]. Основной целью было использование этих рядов в качестве основы для гармонического разложения приливного потенциала.

Особенностями моделей, полученными методом прямых вычислений, являются следующие:

- модели относятся к глобальным;
- учитывается только прямой эффект приливов в твердой или упругой Земле, лишенной океанов;
- присутствует локальная приливная аномалия (см. 1.2.3);
- используются для обработки результатов относительных измерений ускорения силы тяжести на небольших временных промежутках (до нескольких суток).

Таким образом, метод прямых вычислений рекомендуется использовать только для оперативного контроля результатов наблюдений.

Гармонические разложения представляют собой представление потенциала в виде ряда сферических функций (ряд Тейлора) [33]. В этом случае аномальный потенциал выражается как сумма синусоид, частоты которых связаны с комбинациями астрономических частот, а амплитуды определяются из эфемерид. Индивидуальные синусоиды или гармоники называются приливными составляющими. Преимущество этого метода заключается в том, что после создания таблицы составляющих амплитуд, они остаются актуальными в течение длительного времени. Также подобное частотное представление полезно для использования в различных областях геофизики. В частности, мы можем использовать одни и те же частоты для любого другого приливного явления. Таким образом, хотя такое разложение изначально использовалось для океанских приливов [71], оно также хорошо описывает и другие приливы, наблюдаемые на Земле [33].

Именно подобное разложение осуществлено в большинстве моделей земных приливов. Первым разложение океанического приливного потенциала выполнил Дудсон [46]. Долгое время точность модели Дудсона удовлетворяла точности измерений, поэтому следующая модель Картрайта и Тайлера [38] появилась только через 50 лет. С течением времени точность эфемерид небесных тел все возрастала, а внедрение все более современных вычислительных мощностей позволяло увеличивать количество членов разложения.

Данные теоретические модели представляют собой приливной каталог – таблицы, где к теоретически рассчитанным частотам подобраны теоретически вычисленные амплитуды и фазы. В качестве исходных данных используются эфемериды небесных объектов и модель упругой Земли, лишенной океанов.

Самые популярные модели, количество выводимых волн и точности представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные характеристики теоретических моделей земных приливов

Модель	Количество волн	Разрешение, мкГал
Дудсона (1921)	377	10,4
Картрайта и др. (1971)	505	3,8
Тамура (1987)	1 200	0,8
Тамура (1993)	2 060	0,3
Хартмана – Венцеля (1995)	12 935	0,014
Кудрявцева (2004)	27 000	0,0025

Сегодня наиболее используемыми приливными каталогами являются модель Тамура [83] (далее – Tam87) и Хартмана – Венцеля [94] (далее – HW95). Они применяются для обработки длительных или разрозненных во времени наблюдениях ускорения силы тяжести, а также как основа для более точных синтетических моделей земных приливов и разработки локальных моделей.

В рамках данной диссертационной работы выполнен анализ приливных моделей Tam87 и HW95, полученных в программе PREDICT пакета ETERNA версии 3.40 [77]. Теоретические модели сравнивались с экспериментальными данными, полученными приливным гравиметром gPhoneX #117 на пункте TSNI (г. Москва). Локальные приливные аномалии, представляющие собой разность экспериментальных и теоретически рассчитанных значений изменения ускорения силы тяжести, представлены на рисунке 1.2. Среднее квадратическое отклонение для моделей Tam87 и HW95 составляет 14,8 и 22,0 мкГал соответственно, а в отдельные дни абсолютные отклонения достигают 41,0 и 61,4 мкГал соответственно.

Появление подобных приливных аномалий не удивительно. Теоретические модели не учитывают многие факторы, касающиеся внутреннего строения Земли. В основу данного метода положена теория, согласно которой Земля представляет собой упругое тело, лишённое океанов, и не подверженное нагрузочным деформациям.

Многие исследования говорят о том, что необходимо уточнение приливных каталогов с привлечением более совершенных теорий строения Земли, учет приливов океанов и атмосферы, а также учет косвенных явлений – перемещений земных и океанических масс – так называемых нагрузочных деформаций [47].

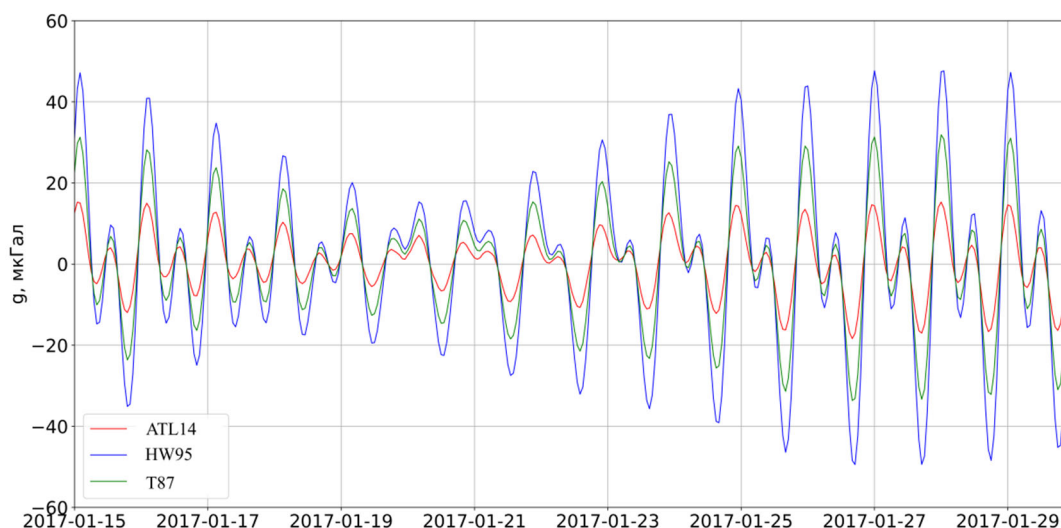


Рисунок 1.2 – Локальные приливные аномалии, полученные для различных теоретических моделей

К особенностям теоретических моделей, представленных в виде приливных каталогов, можно отнести:

- модели относятся к глобальным;
- учитывается только прямой эффект приливов в твердой или упругой Земле, лишенной океанов;
- присутствует локальная приливная аномалия;
- используются для обработки результатов длительных (более недели) или разрозненных во времени наблюдениях ускорения силы тяжести.

Таким образом, теоретические модели, полученные методом гармонических разложений, более точные, чем полученные методом прямых вычислений.

Приливные каталоги, полученные в результате гармонических разложений, могут быть использованы как основа для создания более точных (синтетических) моделей, учитывающих более сложные модели строения Земли.

1.2.2 Синтетические теоретические модели земных приливов

Синтетические теоретические модели земных приливов представляют собой поправки к существующим приливным каталогам. Поправками являются ампли-

тудные и фазовые дельта-факторы, то есть разности каталожных и исправленных амплитуд и фаз для заданного каталогом набора частот [33].

Поправки вычисляются исходя из уточнения теории земных приливов, учитывающей более сложные модели строения Земли, океанические и атмосферные приливы, а также нагрузочные приливы [33]. То есть синтетические модели так же являются теоретическими глобальными моделями, но подразумевают более сложную приливную теорию.

Самой распространенной является синтетическая модель ETGTAB, разработанная Л. Тимменом и Х.-Г. Венцелем в 1995 г. [87]. Модель ETGTAB представляет собой синтетический прилив, рассчитанный в узлах сетки $1^\circ \times 1^\circ$ для всей поверхности Земли. Параметры прилива ускорения силы тяжести получены из амплитуд каталога приливного потенциала Tam87, относящегося к твердой Земле, с учетом амплитудных факторов с использованием модели изотропной, эллипсоидальной, лишенной океанов, Земли с жидким ядром (модель строения Земли Вара – Деанта [44, 92], а также океанического прилива и нагрузки с использованием океанической модели Швидерского [78]. Синтетические приливные параметры были сравнены с данными с 31 гравиметрической станции сети GGP.

Самой современной является модель Atlantida (далее – Atl17), разработанная в ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН Спиридоновым Е. А. [18]. Программа позволяет получать синтетический прилив для любого пункта наблюдений с разрешением 60 секунд. Параметры прилива ускорения силы тяжести получены из амплитуд каталога приливного потенциала Tam87 с возможностью выбора модели строения упругой эллипсоидальной, лишенной океанов, Земли с жидким ядром (IASP91 и PREM), а также различных моделей океанических нагрузок [18].

В рамках данной диссертационной работы проведено исследование с целью оценки точности моделей EGТАВ и Atl17 по данным приливного гравиметра на пункте TSNI (г. Москва). Для этого было выполнено сравнение результатов фактических измерений ускорения силы тяжести на пункте TSNI с теоретически синтезированными приливами по программам ETGTAB и Atl17. Средние квадратиче-

ские отклонения локальных приливных аномалий в обоих случаях составили 1,8 мкГал, а абсолютные отклонения в обоих случаях достигают 11,6 мкГал [27]. При этом характер моделей, хоть и схож, но различается (рисунок 1.3). Для большинства задач геодезии и гравиметрии такой точности достаточно для учета приливной составляющей сигнала. Однако для создания высокоточной локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести эта точность все-таки недостаточна. Поэтому необходимо создание локальной модели земных приливов.

По результатам сравнения результатов наблюдений с существующими глобальными моделями можно сделать следующие выводы:

1 Модель Atlantida наилучшим образом описывает фактические изменения УСТ на пункте TSNI. Максимальное отклонение локальных приливных аномалий составляет 11 мкГал. В связи с этим можно рекомендовать использовать модель Atl17 для учета приливных вариаций ускорения силы тяжести в Московском регионе в случаях, когда ее применение удовлетворяет предъявляемой к работе точности.

2 Точность глобальных моделей земных приливов не удовлетворяет требованиям к точности определения ускорения силы тяжести на пунктах ГФГС. В связи с этим возникает необходимость создания локальной модели земных приливов в Московском регионе.

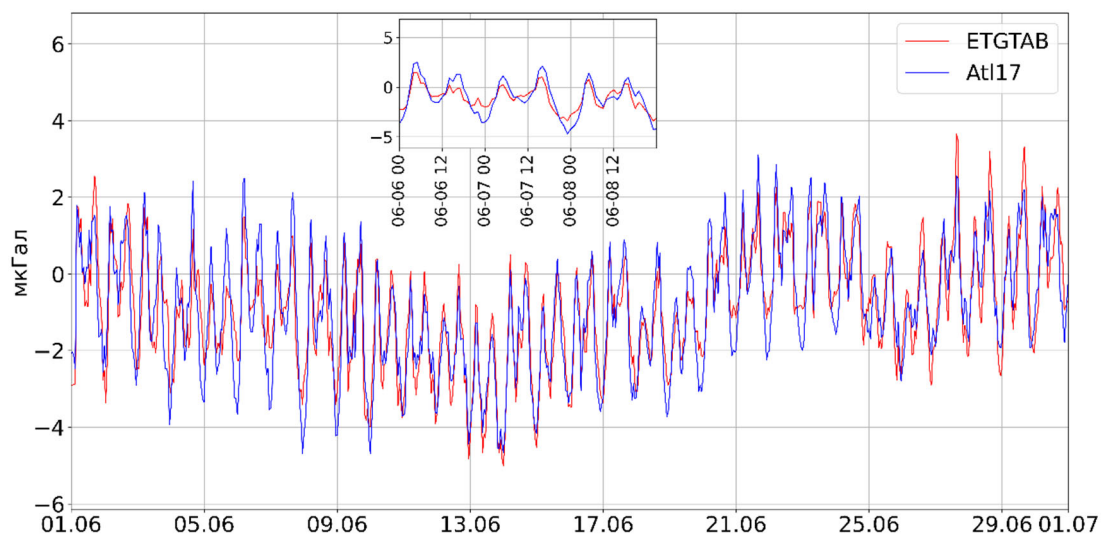


Рисунок 1.3 – Локальные приливные аномалии, вычисленные с использованием моделей Atl17 и ETGTAB

1.2.3 Локальные модели земных приливов

Достоверность приливных моделей проверяется на пунктах международной гравиметрической сети GGP, которые расположены преимущественно в Европе, Америке, а также в ряде стран Азии и Африки. На территории Российской Федерации пунктов, входящих в сеть GGP, на сегодняшний день нет. Несмотря на элегантность теории приливного потенциала, она, как и любая другая теория, не в состоянии учесть локальные аномалии гравитационного поля. Ввиду особенностей строения земной коры, удаленности океанических масс, наличия грунтовых вод и прочих особенностей конкретного пункта, экспериментальные данные отличаются от теоретических на десятки мкГал, что для нас представляется существенной величиной.

Создание новой локальной модели земных приливов при наличии данных лишь на одном или нескольких пунктах нецелесообразно. Поэтому под получением параметров земных приливов для данного пункта подразумевается уточнение параметров одной из глобальных моделей.

Локальные приливные аномалии исследуются во всем мире с использованием сверхпроводящих и приливных гравиметров [31, 35, 42]. Их можно учесть путем создания локальной модели земных приливов. Приливы в теле Земли, океанические приливы и приливы в атмосфере, вызванные лунно-солнечным притяжением, содержат одинаковые частоты. Поэтому вычислить вклад отдельных компонент практически невозможно. Таким образом, вычисленные по экспериментальным данным локальные параметры земных приливов будут содержать все приливные компоненты.

На сегодняшний день наиболее распространенным подходом к приливному анализу является метод наименьших квадратов для набора синусоид с известными частотами, выбранными в соответствии с приливной теорией. Условием является то, что сумма квадратов остаточных изменений силы тяжести должна быть минимальна.

Математика для решения такой задачи вполне стандартная, хотя усложняется наличием шума в исходных данных. Уравнения решаются в матричном виде. В случае анализа периодических сигналов, нормальные уравнения включают суммы синусов и косинусов, и их можно найти аналитически.

Проблема использования условия наименьших квадратов для приливного анализа возникает из-за мелкомасштабной частотной структуры приливной функции. Поэтому ставится дополнительное условие в виде границ частотных диапазонов для искомых приливных волн. Таким образом, все процедуры анализа по методу наименьших квадратов должны включать в себя предположение о близлежащих приливных составляющих, то есть подразумеваемое предположение о допуске.

Метод наименьших квадратов, в частности, реализован в программе ANALYZE пакета ETERNA [77, 94].

Локальные параметры земных приливов для пункта TSNI#110b были вычислены с использованием программы ETERNA [77] для годового (360 дней) интервала наблюдений (далее – эпоха). Программа реализует подбор локальных параметров к существующим моделям земных приливов по методу наименьших квадратов. Результаты представлены в 3.2.6.

1.3 Атмосферный неприливный эффект

1.3.1 Общие сведения об атмосферном неприливном воздействии на ускорение силы тяжести

На сегодняшний день существует большое количество исследований, направленных на улучшение эмпирических и теоретических методов учета влияния атмосферного давления на гравитационное поле Земли, однако пока никому не удалось учесть влияние атмосферы полностью [4, 55, 79, 85]. Данное исследование является еще одной попыткой повысить точность учета влияния атмосферного давления на результаты высокоточных гравиметрических определений. Многочисленными исследованиями установлено, что атмосфера оказывает заметное влияние на гравита-

ционное поле Земли (до 10 % от приливного сигнала) [55]. Этот эффект (назовем его атмосферным неприливым эффектом) состоит из суммы гравитационного притяжения атмосферы аномальной атмосферной плотностью и нагрузки, вызванной вертикальными деформациями земной коры и мантии. Теоретически, непосредственное воздействие масс аномальной плотности оценивается в $-0,4$ мкГал/мбар (см. формулу (1.2)), а нагрузочный эффект в $+0,1$ мкГал/мбар [61].

Прямой гравитационный эффект подчиняется по закону Всемирного тяготения. В первом приближении влияние изменения давления можно представить в виде притяжения простого слоя Буге:

$$\Delta g^- = -2\pi G H \delta\sigma = -0,43 \Delta P, \quad (1.2)$$

где G – гравитационная постоянная;

H – толщина слоя атмосферы;

$\delta\sigma$ – изменение плотности слоя атмосферы;

ΔP – изменение атмосферного давления.

Здесь коэффициент $-0,43$ является теоретически вычисленным так называемым «атмосферным дельта-фактором». По многочисленным эмпирическим наблюдениям в различных точках земного шара [30, 56, 62, 84, 91, 96] установлено, что локальное значение атмосферного дельта-фактора может варьироваться в пределах от $-0,27$ до $-0,43$ мкГал мбар в зависимости от локальных особенностей пункта наблюдений. Резолюцией Международной ассоциации геодезии принят средний атмосферный дельта-фактор, равный $-0,3$ мкГал мбар, при этом локальное уточнение предполагается методом простой линейной корреляции атмосферного давления и ускорения силы тяжести.

Однако это не единственный существующий метод учета влияния атмосферы на результаты гравиметрических определений. Особое внимание стоит уделить исследованию Мерриам [62], в котором оценен вклад локального, регионального и глобального атмосферных эффектов:

1 Около 90 % изменений ускорения силы тяжести вызвано атмосферным неприливым эффектом в локальной области (50 км), и 90 % из них оказывается прямым гравитационным притяжением; оставшиеся 10 % приходятся на нагрузочные деформации земной коры.

2 Региональная зона простирается на расстоянии 500–150 км от пункта наблюдений. В этой зоне атмосферное воздействие сравнительно мало (несколько процентов) и в основном вызвано нагрузочными деформациями земной коры.

3 Остальная атмосфера (дальше, чем в 150 км от пункта наблюдений) на глобальном уровне оказывает незначительное влияние – всего несколько процентов от общего атмосферного неприливого эффекта.

Многочисленные исследования Мерриам и ее коллег [25, 56, 68, 73] легли в основу создания модели атмосферных неприливых эффектов, предоставляемой Службой нагрузочных деформаций в виде временного ряда вычисленного изменения ускорения силы тяжести [62].

Использование стандартной модели регрессии предлагает учитывать только локальные данные об атмосферном давлении. Для учета регионального и глобального эффекта необходимо учитывать пространственные метеорологические данные. Исследования Фаррелла [47] доказали, что для учета нагрузочных деформаций, наблюдаемых в исследуемом районе, эффективно использовать разложение в ряд притяжения по функциям Грина.

Мерриам [62] предложила использовать двухэтапное вычисление атмосферного неприливого эффекта:

- вычисление локального воздействия, вызываемого непосредственным ньютоновским притяжением «столба» атмосферы, находящегося над пунктом наблюдений;
- вычисление глобального эффекта, вызванного совокупностью притяжения региональных и глобальных атмосферных масс и эффектом, создаваемым нагрузочными деформациями земной поверхности.

Ньютоновское притяжение «столба» атмосферы над пунктом наблюдений зависит от давления и температуры и может быть хорошо описано функциями Грина [62].

Нагрузочные деформации также можно описать функциями Грина, предложенными Фарреллом [47]. Интегрирование атмосферных нагрузочных деформаций в отношении ускорения силы тяжести с использованием данных об атмосферном давлении и температуре как в районе наблюдений, так и по всей Земли, позволяет вычислить значения вариаций ускорения силы тяжести, вызванных атмосферной нагрузкой.

1.3.2 Характеристики вариаций атмосферного давления в Московском регионе

Атмосферное давление изменяется случайным образом, трудно поддающемся моделированию и прогнозированию. Поэтому поправки в ускорение силы тяжести за атмосферный неприливный эффект можно вычислить только в режиме пост-обработки.

Принято считать, что атмосферное давление изменяется линейно в течение 3 часов [25]. Суточные изменения атмосферного давления содержат периодическую составляющую, имеющую полусуточный период. Однако в средних широтах суточный ход давления составляет всего несколько десятых мбар, в то время как случайная составляющая достигает 20–30 мбар. Поэтому периодическую составляющую практически невозможно выявить в результатах наблюдений на широте города Москвы. Статистически, в летние месяцы минимум атмосферного давления приходится на 16–19 часов, а зимой – в предутренние часы. Максимум же, наоборот, в предутренние часы наблюдается в летний период, а в зимние месяцы – в 20–24 часа.

Среднемесячное давление имеет ход в 10 мбар и практически не связано со сменой времен года. Отклонения от среднемесячного давления сильно зависят от месяца наблюдений: наибольшие колебания отмечаются зимой (амплитуда достигает 95 мбар), а наименьшие – летом (в среднем не более 55 мбар). Среднее давление для Москвы в период с 2015 по 2023 г. составляет 1015,5 мбар. На рисунке 1.4 представлен график хода атмосферного давления в течение 3 лет (с 2019 по 2023 г.).

Если принять за максимальное отклонение атмосферного давления величину в 95 мбар, то максимальное изменение ускорения силы тяжести, вызванное атмосферной нагрузкой, может составить 28,5 мкГал, что во много раз превышает точ-

ность измерений приливным гравиметром (1 мкГал) и требования к точности определения значения ускорения силы тяжести на пункте ГФГС (8 мкГал).

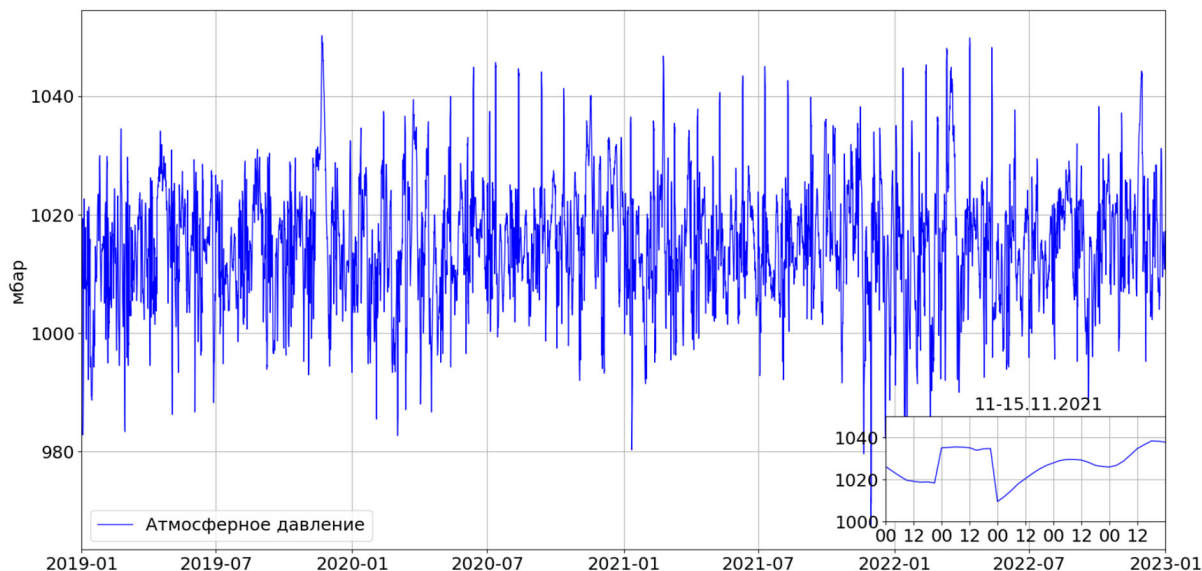


Рисунок 1.4 – График изменения атмосферного давления в Москве

Учитывая вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

– поскольку атмосферное давление изменяется линейно в течение 3 часов, для исследования влияния атмосферного давления на результаты измерений ускорения силы тяжести с достаточной частотой дискретизации можно принять период, равный 1 часу. Это значительно уменьшит объем данных для обработки (в сравнении с выполненными секундными измерениями);

– вариации атмосферного давления в Москве вызывают существенные (более 25 мкГал) изменения ускорения силы тяжести неприливногo характера, которые необходимо выявить и учитывать в режиме пост-обработки.

1.3.3 Анализ существующих моделей атмосферного неприливногo эффекта

Как было сказано ранее, самой простой моделью атмосферного неприливногo эффекта является модель линейной регрессии. При этом используются только локальные данные об изменении атмосферного давления. Современные гравиметры

приливного типа оснащены встроенными датчиками атмосферного давления, поэтому данный метод не требует дополнительного оборудования, а простой математический аппарат не требует существенной вычислительной мощности.

Более сложные модели используют трехмерные модели атмосферы. Служба нагрузочных деформаций использует две модели атмосферы: ERA5 и MERRA2 и предоставляет одноименные модели атмосферного неприливногo эффекта. Характеристики моделей атмосферы представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительные характеристики моделей атмосферы

Модель	ERA5	MERRA2
Производитель	ECMWF	NASA
Пространственное разрешение, км	30	60
Временное разрешение, час	1	1
Временной охват	1950 г. – наст. вр.	1980 г. – наст. вр.
Исходные данные	наземные	наземные и спутниковые

В рамках диссертационной работы выполнено исследование, посвященное сравнению моделей атмосферного неприливногo эффекта с простой моделью регрессии со стандартным атмосферным дельта-фактором. Для этого выполнено сравнение временных рядов атмосферных нагрузок, предоставляемых Службой нагрузочных деформаций для пункта TSNI (г. Москва), и простой регрессионной модели со стандартным атмосферным дельта-фактором, равным $-0,3$ мкГал/мбар. На рисунке 1.5 представлены временные ряды, вычисленные для указанных моделей для 2022 г.

Очевидно, что различия представленных модельных значений несущественны: взаимные отклонения не превышают 1 мкГал. В связи с этим можно сделать вывод, что использование сложной модели атмосферных нагрузок с учетом трехмерного строения атмосферы, предоставляемых для Московского региона Службой нагрузочных деформаций, не дает существенного преимущества в сравнении с применением поправки, вычисленной со стандартным атмосферным

дельта-фактором. Можно рекомендовать в качестве модели атмосферного неприливного эффекта использовать поправку за влияние атмосферы, рекомендованную IAG с локальным уточнением атмосферного дельта-фактора. Предлагаемая методика учета влияния атмосферного неприливного эффекта представлена в 3.3.



Рисунок 1.5 – Сравнение различных моделей атмосферного неприливного эффекта

1.4 Гидрологический неприливный эффект

1.4.1 Общие сведения о гидрологическом воздействии на ускорение силы тяжести

Вариации гравитационного поля Земли, вызванные периодическим перемещением водных масс на глобальном уровне, широко изучены [68] и могут быть учтены при создании локальной модели земных приливов с точностью 0,01–0,03 мкГал. Более поздние исследования показали необходимость учета эффектов, вызванных изменением уровня грунтовых вод. В различных исследованиях [17, 53, 59, 60, 64, 72] доказана возможность учета влияния уровня грунтовых вод, влажности почвы и снежного покрова с использованием различных гидрологических моделей.

Изменение уровня грунтовых вод носит сезонный характер, что вызывает сезонные изменения гравитационного поля Земли. Величина гидрологического воздействия может быть различной в зависимости от различных локальных особенностей места наблюдений (см. 1.4.2). Многочисленные исследования показали, что необходим тщательный выбор оптимальной гидрологической модели для каждого пункта наблюдений, а также калибровка модели гидрологического воздействия на результаты гравиметрических определений [53, 60, 64, 72].

Модель гидрологического неприливногo эффекта представляет собой временной ряд вычисленного влияния, оказываемого изменением уровня грунтовых вод и влажности почвы на изменение ускорения силы тяжести. При этом прямой локальный эффект вычисляется аналогично притяжению простого слоя аномалии Буге [23]:

$$\Delta g_{hydro} = 2\pi G \rho_w \varphi \delta H = 0,42677 \varphi \delta H, \quad (1.3)$$

где G – фундаментальная гравитационная постоянная;

ρ_w – плотность воды;

φ – влажность почвы в %;

δH – изменение уровня грунтовых вод в см.

Так называемый «не-локальный эффект» включает в себя влияние изменения уровня грунтовых вод на удаленных от места наблюдения участках, а также косвенный (нагрузочный) эффект, вызванный деформацией земной поверхности под воздействием локальных гидрологических изменений. Он рассчитывается с использованием разложения гравитационного потенциала и модели гидрологии по функциям Грина [47], аналогичного разложению, использованному для атмосферного неприливногo эффекта (см. 1.3).

1.4.2 Характеристики гидрологического режима в Московском регионе

Изменение уровня грунтовых вод зависит от множества факторов, таких как физические характеристики почв в районе места наблюдений, количество атмо-

сферных осадков, наличие снежного покрова и режима снеготаяния, глубина промерзания почвенного слоя в зимний период, влажность и температура воздуха.

В средней полосе России гидрологический режим характеризуется выраженной сезонностью с максимумом уровня в весенний период и минимумом в летне-осенний. Наибольший уровень грунтовых вод отмечается в период с конца февраля по март. В это время наблюдается активное снеготаяние и выпадает большое количество осадков. Летом традиционно уровень грунтовых вод снижается и достигает минимума в июле-сентябре.

В Московском регионе уровень грунтовых вод за год может колебаться до 2 м, что согласно формуле (1.3), может привести к изменению в значении ускорения силы тяжести на 9 мкГал.

К сожалению, вблизи пункта TSNI (г. Москва) в период с 2015 по 2022 г. регулярных достоверных наблюдений за уровнем грунтовых вод не велось. Кроме того, как было сказано ранее, локальный эффект составляет только 40 % от общей величины вариаций, вызванных влиянием гидрологии. Существенный вклад оказывают региональные и глобальные вариации гидрологического режима. В связи с этим, в рамках данной диссертационной работы локальные вариации уровня грунтовых вод не рассматриваются. В качестве исходных данных приняты модели гидрологического неприливного эффекта, предоставляемые Службой нагрузочных деформаций. Их характеристики и обоснование выбора конкретной модели для дальнейших исследований представлено в следующем разделе.

1.4.3 Анализ существующих моделей гидрологической нагрузки

Для учета воздействия изменения гидрологических параметров на гравитационное поле Земли Службой нагрузочных деформаций [68] предоставляется модель гидрологического неприливного эффекта – временной ряд измерений ускорения силы тяжести, вычисленный с использованием четырех различных гидрологических моделей [68]: ERA5, GLDAS2, MERRA2 и GRACE.

Гидрологические модели различаются разрешением в пространстве и во времени, набором используемых исходных данных, задержкой предоставления данных (в режиме пост-обработки). Сравнение актуальных гидрологических моделей представлено в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Сравнительные характеристики гидрологических моделей

Модель	ERA5	MERRA2	GLDAS2	GRACE
Производитель	ECMWF	NASA	NASA	NASA
Пространственное разрешение, км	30	60	30	350
Временное разрешение	1 час	1 час	3 час	1 месяц
Временной охват	с 1950 г.	с 1980 г.	с 2000 г.	
Исходные данные	наземные	наземные и спутниковые	наземные и спутниковые	спутниковые

Для всех представленных гидрологических моделей Службой нагрузочных деформаций предоставляются модели гидрологического неприливного эффекта, оказываемого на ускорение силы тяжести, для различных пунктов, в том числе для пункта TSNI (г. Москва). На рисунке 1.6 представлен гидрологический неприливный эффект, вычисленный с использованием рассматриваемых гидрологических моделей, а также неприлинные временные вариации ускорения силы тяжести, измеренные на пункте TSNI, вызванные влиянием гидрологии (подробнее см. 3.4).

Очевидно, что модель GRACE показывает наихудший результат из представленных моделей, что вполне обоснованно: данные предоставляются всего один раз в месяц и получены только по данным спутниковых наблюдений. Широко известно, что данные миссии GRACE дают хорошее понимание от внешнего гравитационном поле Земли на высоте полета спутников, однако недостаточно точны для использования при обработке высокоточных гравиметрических определений [17].

Наиболее высокую корреляцию с экспериментальными данными показывает временной ряд гидрологической нагрузки, вычисленный с использованием модели MERRA2. Подробный анализ проведен автором в исследовании [28].

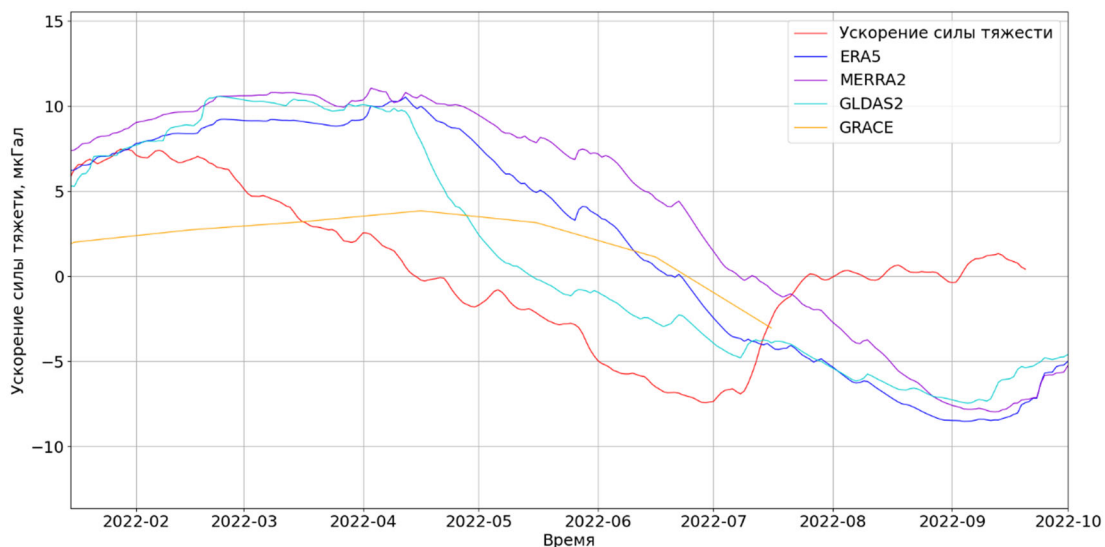


Рисунок 1.6 – Поправки за гидрологическую нагрузку, вычисленные по различным моделям

Выводы по первому разделу

В разделе представлены общая характеристика сигнала временных вариаций ускорения силы тяжести, перечислены основные факторы, влияющие на изменения ускорения силы тяжести с течением времени, а также основные источники погрешностей.

Приведен обзор существующих методик учета приливной составляющей сигнала. Обоснован выбор методики учета приливных вариаций ускорения силы тяжести с использованием локальной модели земных приливов.

Рассмотрены характеристики временных вариаций атмосферного давления, а также существующие методики учета влияния атмосферы на временные вариации ускорения силы тяжести. Обоснована необходимость исследования влияния атмосферного неприливного эффекта на локальные особенности временных вариаций ускорения силы тяжести на пунктах фундаментальной гравиметрической сети. Доказано, что применение сложных моделей состояния атмосферы на сегодняшний день нецелесообразно, так как это не приведет к повышению точности в сравнении с использованием локальных данных об атмосферном давлении.

Рассмотрены характеристики временных вариаций уровня грунтовых вод, а также существующие методики учета влияния гидрологического неприливного эффекта на временные вариации ускорения силы тяжести. Обоснована необходимость исследования влияния данного фактора на локальные особенности временных вариаций ускорения силы тяжести на пунктах фундаментальной гравиметрической сети. Обоснован выбор гидрологической модели MERRA2 для проведения дальнейшего анализа.

2 ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

2.1 Общие сведения о современных гравиметрах

В настоящее время в производстве используют следующие типы гравиметров:

- абсолютные баллистические;
- относительные пружинные;
- относительные сверхпроводящие.

Абсолютные баллистические гравиметры предназначены для измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести на пункте. Принцип работы основан на свободном падении тела (углового отражателя) в вакууме [48]. Подобные гравиметры позволяют при соблюдении методики измерений и обработки результатов получить непосредственно абсолютное значение ускорения силы тяжести с точностью не хуже 5 мкГал [86]. Однако баллистические гравиметры предназначены только для проведения «точечных» измерений – методика предполагает определение одного абсолютного значения по результатам измерений длительностью от 30 минут до 24 часов. В то же время рабочий ресурс ограничен износом механизма гравиметра, отвечающим за свободное падение, что делает проведение длительных наблюдений экономически неэффективным и исключает возможность проведения многолетних наблюдений с достаточной для исследования временных вариаций регулярностью (одно измерение в час). Поэтому при проведении исследований временных вариаций ускорения силы тяжести рекомендуется использовать абсолютные баллистические гравиметры только для проведения контрольных измерений. Характеристики и особенности измерений баллистическими гравиметрами представлены в 2.3.

Относительные пружинные гравиметры представлены двумя семействами гравиметров: кварцевые пружинные и приливные. Самыми распространенными кварцевыми гравиметрами на сегодняшний день являются Scientrex CG-5 и CG-6 (США). Они предназначены для полевых и лабораторных измерений приращений ускорения силы тяжести между пунктами, а также для площадной и пространствен-

ной гравиметрической съемки. Кварцевая пружина, являющаяся основным чувствительным элементом, обладает существенным (0,5 мкГал/сут) нелинейным дрейфом нуля-пункта, практически не поддающемся моделированию на времени более 10 суток [63]. В связи с этим, применять кварцевые гравиметры для изучения временных вариаций ускорения силы тяжести невозможно.

Приливные гравиметры, также относящиеся к относительным пружинными гравиметрам, разработаны специально для проведения длительных мониторинговых измерений ускорения силы тяжести с частотой снятия отсчета до 5 Гц. Приливной гравиметр gPhoneX производства Micro-g LaCoste (США) отличает особая система пружин нулевой пружин нулевой начальной длины, которая имеет малый квазилинейный дрейф нуля-пункта [52], что позволяет проводить длительный (несколько лет) мониторинг ускорения силы тяжести в лабораторных условиях. Более подробное описание и технические характеристики приведены в 2.2.

Относительные сверхпроводящие (криогенные) гравиметры представляют собой отдельный класс высокоточного гравиметрического оборудования. Принцип работы основан на эффекте сверхпроводимости, который возникает в вакууме при сверхнизких температурах. Главным преимуществом таких гравиметров является то, что путем замены механической пружины на пробную массу, свободно левитирующую в магнитном поле, полностью решена проблема дрейфа нуля-пункта. Изолированная от внешнего магнитного воздействия сфера из полупроводника покоится в равновесии. Любое относительное движение между земной поверхностью (с которой связана система гравиметра) и сферой или любое возмущение гравитационного потенциала перемещает сферу из положения равновесия. Положение сферы определяется с помощью фазочувствительного синхронизирующего усилителя в сочетании с емкостным мостом. Максимальная чувствительность системы, заявленная производителем, составляет 0,1 нГал [63]. По результатам исследований [43, 69, 90], сверхпроводящие гравиметры позволяют изучать как короткопериодические приливные сигналы, так и долговременные сейсмические эффекты с точностью не хуже 1 нГал.

При всех своих преимуществах (чувствительность и отсутствие дрейфа нуля-пункта), сверхпроводящие гравиметры дороги и сложны в эксплуатации, поэтому менее распространены в производстве, чем пружинные gPhoneX.

В рамках данного исследования использовались относительный пружинный гравиметр gPhoneX и абсолютный баллистический гравиметр FG5. Однако предлагаемая методика может быть применена и к результатам измерений сверхпроводящим гравиметром, исключая этап выявления и учета дрейфа нуля-пункта.

2.2 Пружинный приливной гравиметр gPhoneX

2.2.1 Описание и технические характеристики

Гравиметр gPhoneX компании Micro-g LaCoste (США) с металлическим пружинным датчиком предназначен для измерения силы тяжести и сейсмического шума.

Гравиметр обладает небольшим инструментальным дрейфом. Это позволяет использовать его для выявления долгопериодических процессов (таких как земные приливы) в течение длительных промежутков времени (несколько лет) [52].

Система gPhoneX состоит из трех основных компонент (рисунок 2.1):

- а) блок измерителя с гравитационным датчиком – гравиметр;
- б) блок электронной аппаратуры с устройством бесперебойного питания и модулем синхронизации;
- в) портативный компьютер с установленной на нем программой gMonitor (программное обеспечение для сбора данных) [51].

Технические характеристики системы приведены в таблице 2.1.

В измерительном блоке размещены чувствительная система и электроника. Чувствительная система состоит из системы металлических пружин нулевой (начальной) длины с незначительным дрейфом, и системы емкостной обратной связи СРІ.



Рисунок 2.1 — Приливной гравиметр gPhoneX

Таблица 2.1 – Технические характеристики gPhoneX

Наименование характеристики	Значение
Разрешение	0,1 мкГал
Гарантируемая точность	1 мкГал
Шум системы	Не хуже 0,45 мкГал/Гц
Дрейф нуля-пункта	Не хуже 1,5 мГал/мес
Диапазон измерения	7 000 мГал без калибровки
Диапазон обратной связи	100 мГал

Специальный прочно изолированный двойной термостат обеспечивает необходимый температурный контроль для обеспечения безопасности гравиметрического датчика от изменений температуры окружающей среды. Внутренний термостат заполнен сухим воздухом, создающим для датчика среду с постоянной влажностью. Внешний уплотненный кольцевыми прокладками кожух защищает прибор воды и создает дополнительную изоляцию от внешних воздействий.

Помимо физических факторов, обуславливающих стабильность, система gPhoneX осуществляет контроль и регистрацию температуры и давления окружающей среды и датчика.

Данные могут быть использованы для ввода программных поправок в результаты гравиметрических измерений. Все сигналы системы в цифровом виде последовательно отправляются в компьютер с установленной программой gMonitor (см. 2.4).

Блок электронной аппаратуры включает в себя модуль GPS и модуль синхронизации рубидиевых часов, устройство бесперебойного питания, блок питания и внешние разъемы.

Модуль синхронизации осуществляет четыре основные функции:

- выработка синхронизирующего сигнала частотой 1 импульс в секунду с помощью рубидиевого генератора и отправка данного сигнала в блок гравиметра для начала процесса передачи данных;
- подача питания на гравиметр и рубидиевые часы посредством источника питания переменного или постоянного тока напряжением 24 В и мощностью 100 Вт;
- получение данных GPS (в формате NEMA) и отправка их на ПК;
- обеспечение взаимодействия между гравиметром и компьютером.

Приливной гравиметр gPhoneX позволяет выполнять длительные мониторинговые наблюдения ускорения силы тяжести с высокой точностью (не хуже 1 мкГал) и частотой снятия отсчета (5 Гц). Гравиметр прост в эксплуатации, однако обработка результатов требует высокой квалификации исполнителя. Основными проблемами являются корректная фильтрация исходных данных, выявление и учет дрейфа нуля-пункта.

2.2.2 Проблема выявления дрейфа нуля-пункта

Как было сказано ранее, гравиметрический датчик gPhoneX состоит из системы металлических пружин нулевой начальной длины, обладающей малым квазилинейным дрейфом нуля-пункта, характеристики которого определяются механизмом упругости материала [83]. Величина дрейфа для гравиметра gPhoneX значительно меньше, чем у кварцевых гравиметров, однако все же является существенной величиной и нуждается в учете при проведении исследований приливных и неприливных вариаций ускорения силы тяжести.

Каждый гравиметр обладает уникальными характеристиками дрейфа нуля-пункта, при этом тренд будет существенно изменяться после каких-либо вмешательств в работу (таких как перебои питания, перезагрузка и т. д.) [52]. Принято считать, что для длительных временных интервалов непрерывных наблюдений

дрейф будет постоянным, поэтому его можно точно аппроксимировать простым полиномом [42, 73, 80]. Те данные, которые получены после вмешательств, должны быть исправлены различными методами: если наблюдения велись постоянно после короткого перерыва, например, одна неделя, такие данные следует удалить [52].

Зарубежными исследователями рекомендуется несколько методик выявления и учета дрейфа нуля-пункта:

- по взаимному схождению результатов измерений несколькими гравиметрами gPhoneX;
- сравнением с результатами наблюдений сверхпроводящим гравиметром;
- сравнением с результатами абсолютных определений;
- кусочно-линейной аппроксимацией результатов наблюдений.

Метод определения дрейфа нуля-пункта по взаимному схождению результатов несколькими гравиметрами gPhoneX (3 и более) требует размещения на одном постаменте нескольких приборов и постоянных синхронных наблюдений. Преимуществом данного метода является то, что в случае перерыва в наблюдениях одного прибора (например, в связи с техническим обслуживанием), остаются измерения соседними приборами, что дает фактически непрерывный ряд измерений. К недостаткам можно отнести довольно сложную математическую обработку для выявления дрейфа, отсутствие внешнего независимого контроля полученных результатов, необходимость редуцирования результатов всех гравиметров к одному пункту, а также саму необходимость иметь три и более одинаковых гравиметра на одном пункте.

Метод сравнения с результатами наблюдений сверхпроводящим гравиметром эффективен благодаря более высокой точности измерений (в 100 раз). Ввиду фактического отсутствия дрейфа нуля-пункта, результаты измерений сверхпроводящим гравиметром можно считать эталонными [42, 73]. Однако исследования временных вариаций ускорения силы тяжести пружинными гравиметром при наличии значительно более точных и стабильных определений нецелесообразны с производственной точки зрения.

Результаты абсолютных измерений ускорения силы тяжести также фактически лишены дрейфа нуля-пункта, поэтому их принято считать эталонными [26, 41].

Особенность выявления дрейфа приливного гравиметра в сравнении с результатами абсолютных определений заключается в необходимости проведения измерений баллистическим гравиметром (в идеале, одним и тем же) регулярных наблюдений и особой методике обработки результатов (см. 2.3). Преимуществом метода является то, что измерения и результаты являются независимыми, поэтому дрейф нуля-пункта таким методом определяется наиболее надежно [26, 41]. Именно этот метод рекомендуется в предлагаемой методике и принят за эталонный.

Метод кусочно-линейной аппроксимации является наиболее простым и не требует дополнительного оборудования. Этот метод применяется в исследованиях [75, 80], когда выполнение дополнительных измерений не представляется возможным. В этом случае предлагается использовать метод кусочно-линейной аппроксимации. Для длительных непрерывных наблюдений ускорения силы тяжести, дрейф нуля-пункта должен оставаться стабильным, а, значит, может быть описан простым полиномом. Для данных, терпящих разрыв, необходимо либо удалить те данные от времени начала измерений, которые не будут описываться подобранным полиномом (в зависимости от причин и времени прерывания наблюдений, от 1 недели до 3 месяцев). Исследований, оценивающих точность учета дрейфа нуля-пункта, полученного методом кусочно-линейной аппроксимации, зарубежными исследователями не представлено. В связи с этим, в рамках диссертационной работы выполнена оценка эффективности данного метода на примере измерений на пункте TSNI. Материалы исследования опубликованы в статье [26] и приведены в 3.2.5.

2.3 Абсолютный баллистический гравиметр FG5

2.3.1 Описание и технические характеристики абсолютного баллистического гравиметра FG5

В рамках данного исследования, результаты абсолютных определений необходимы для независимого контроля и оценки эффективности предлагаемой комплексной методики. В соответствии с требованиями, предъявляемым к пунктам Международной фундаментальной опорной гравиметрической сети, на пункте

TSNI проводятся регулярные абсолютные определения баллистическим гравиметром FG5.

Баллистический гравиметр FG5 серийно производится американской фирмой Micro-g LaCoste. Прибор FG5 #110 был приобретен ФГУП «ЦНИИГАиК» в 2004 г. В июне 2017 г. был отправлен в США на ремонт и частичную модернизацию (полностью заменен блок электроники). В настоящее время в России гравиметром FG5 владеет только ППК «Роскадастр».

Базис для свободного падения пробной массы в гравиметре FG5 составляет приблизительно 20 см. Лазерный интерферометр генерирует оптические интерференционные полосы, которые подсчитываются и синхронизируются с атомными часами для получения точных пар времени и расстояния. К полученным данным подбирается параболическая траектория, позволяющая рассчитать точное значение силы тяжести. Шкала расстояния задается частотным стабилизированным гелиево-неонным (HeNe) лазером, а рубидиевый стандарт частоты обеспечивает точную временную шкалу. Фотография гравиметра в рабочем состоянии представлена на рисунке 2.2, а основные характеристики гравиметра – в таблице 2.2.



Рисунок 2.2 – Гравиметр FG5 в сборе

Таблица 2.2 – Технические характеристики гравиметра FG5

Наименование характеристики	Значение
Погрешности измерения ускорения силы тяжести	не более 2 мкГал
Диапазон измерения значений ускорения силы тяжести	не ограничен
Рабочий температурный диапазон	от +15 до +30 °С
Относительная погрешность стандарта частоты (эталон времени)	не более 10^{-10}
Относительная погрешность частоты оптического стандарта	не хуже $2,5 \cdot 10^{-11}$
Длина волны лазера	633 нм (красный)
Давление остаточного газа в баллистической камере	10^{-7} мм рт. ст.
Продолжительность цикла единичного измерения	не более 5 с
Число отсчетов за одно падение свободно падающего тела	не менее 700
Период собственных колебаний маятника сейсмометра	30–60 секунд
Потребляемая мощность (без системы предварительной откачки)	не более 500 Вт
Источник электропитания	(110-240 В, 50 Гц)
Занимаемый объем пространства	1,5 м ³
Вес комплекта	не более 150 кг

2.3.2 Методика абсолютных гравиметрических определений

Процесс работы с гравиметром FG5 подробно описан в инструкциях [48, 50, 81]. Большой интерес представляет методика обработки результатов наблюдений.

Однократно измеренное значение ускорения силы тяжести принято называть «броском» [48, 50, 81]. Абсолютное значение g_i на пункте при каждом броске вычисляется по формуле:

$$g_i = g_1 + \delta g_c + \delta g_A + \delta g_B + \delta g_{tide} + \delta g_{polar}, \quad (2.1)$$

где g_1 – полученное из решения по методу наименьших квадратов значение ускорения силы тяжести по одному броску на уровне эффективной высоты гравиметра над местом установки;

δg_c – поправка за конечность скорости распространения света;

δg_A – поправка за притяжение атмосферы;

δg_B – поправка за влияние сопротивления остаточного воздуха в баллистической камере;

δg_{tide} – поправка за прилив, аналогичная поправке, применяемой к измерениям gPhoneX;

δg_{polar} – поправка за движение полюса.

За итоговое значение ускорения силы тяжести принимают среднее значение из двух серий бросков, выполненных по двум направлениям (азимутам) – $\bar{g}_\alpha$ и $\bar{g}_{\alpha+180^\circ}$ – и вычисляется по формуле:

$$\bar{g} = \frac{1}{2}(\bar{g}_\alpha + \bar{g}_{\alpha+180^\circ}). \quad (2.2)$$

Длительность серии и количество бросков определяется требуемой точностью результирующего значения.

При соблюдении методики проведения и обработки результатов абсолютных определений гравиметром FG5 можно получить точечные значения ускорения силы тяжести в конкретные моменты времени с фактической точностью в 2–4 мкГал. Этой точности достаточно для определения «каталожного» значения ускорения силы тяжести, однако точечные значения не дают возможности определить абсолютные значения в любой момент времени с той же точностью. Таким образом, результаты абсолютных определений можно использовать только в качестве контрольных значений для результатов мониторинговых относительных определений.

2.4 Существующее программное обеспечение

На сегодняшний день существует несколько программных продуктов, позволяющих выполнять отдельные этапы обработки мониторинговых гравиметрических наблюдений.

Программа *gMonitor* поставляется в комплекте с оборудованием приливного гравиметра *gPhoneX*. Программа *gMonitor* является неотъемлемой частью комплекса приливного гравиметра и позволяет выполнять настройки прибора, выполнять запись результатов измерений, а также представлять результаты измерений в графическом виде. Встроенные вычислительные модули позволяют выполнять расчет поправок за положение уровней гравиметра, за земные приливы (по модели ETGTAB), за движение земных полюсов и некоторые другие.

Однако программа *gMonitor* не позволяет выполнять какую-либо обработку и анализ. Поэтому она повсеместно используется только в качестве модуля управления гравиметром.

Программа *TSoft* предоставляется Королевской обсерваторией Бельгии [89] в открытом доступе. Эта программа предназначена для анализа длительных наблюдений ускорения силы тяжести [89]. Под анализом подразумевается возможность предварительной обработки результатов измерений: изменение частоты дискретизации временного ряда, фильтрация шумов с использованием различных фильтров, исключение земных приливов с использованием теоретической модели, учет движения земных полюсов по данным IERS и некоторые другие. К достоинствам программы можно отнести тот факт, что большинство современных гравиметров позволяют экспортировать данные в формате *.tsf, являющийся основным рабочим форматом программы *TSoft*. Главной удобством является наличие графического интерфейса, позволяющего интерактивно работать с данными, представленными в графическом виде.

Однако программа *TSoft* имеет ряд существенных недостатков:

- 1 Исключение случайных выбросов, ступеней и пропусков данных в автоматическом режиме возможно лишь частично. Необходим визуальный контроль каждого этапа обработки.

- 2 Отсутствие возможности вычисления локальных параметров земных приливов делает практически невозможным высокоточную обработку гравиметрических данных без привлечения сторонних программных продуктов.

3 Отсутствует возможность проведения статистических исследований и неинформативность графиков, получаемых при экспорте, что делает программу практически бесполезной для анализа неприливных вариаций ускорения силы тяжести.

Пакет программ *ETERNA (Nanogal Software)* был создан в 1990-х гг. Венцелем Х.-Г [94]. Пакет представляет собой набор программ, реализованный на языке Fortran90 и позволяющий выполнять приливной анализ. Особый интерес представляют модули ANALYZE и PREDICT. Первый позволяет вычислять локальные параметры земных приливов в соответствии с методикой, описанной в 1.2.3; второй модуль позволяет вычислять синтетический прилив для указанного временного интервала.

Модуль ANALYZE на сегодняшний день не имеет аналогов. За многие годы он заслуженно доказал свою эффективность для решения задач приливного анализа. Однако следует отметить следующие особенности ETERNA:

1 Архаичность программы приводит к трудностям в работе. Хотя и была создана версия ETERNA3.4 [77], позволяющая работать на 64-разрядной операционной системе, работа программы не всегда стабильна.

2. Настройка параметров требует высокой квалификации пользователя.

Текстовый файл с настройками проекта необходимо заполнять с особой тщательностью.

3 Для работы модуля ANALYZE необходима тщательная предварительная подготовка исходных данных: исключение шумов и выбросов, соблюдение форматирования файла и т. д.

Утилита для MATLAB/Octave *GravProcess* позволяет выполнить подготовку данных приливных гравиметров для дальнейшего анализа [39]. Программа содержит алгоритмы для фильтрации исходного сигнала, фиксируемого гравиметром, учета приливов в твердой Земле, а также введение поправок за такие неприливные эффекты, как движение земных полюсов и атмосферное давление с применением стандартного атмосферного дельта-фактора. Программа имеет графический интерфейс и позволяет представлять результаты в виде графиков и диаграмм.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что программа GravProcess удобна для использования и для выявления несовершенства глобальных теорий,

однако она не позволяет выполнять качественный анализ локальных особенностей пункта наблюдений и составлять прогноз.

Утилита для MATLAB/Octave *mGlobe* предназначена для вычисления эффекта, оказываемого на ускорение силы тяжести атмосферой и уровнем грунтовых вод [65]. Программа находится в открытом доступе. Она позволяет вычислять поправки с учетом глобальных моделей атмосферы и гидрологии по методике, аналогичной предлагаемой Службой нагрузочных деформаций (см. 1.3, 1.4). При этом при вычислении поправок используются только данные глобальных параметров без возможности проведения анализа и локального уточнения параметров учета указанных эффектов.

Таким образом, программа *mGlobe* не эффективна для предлагаемого в данной диссертационной работе анализа.

Сервис Службы нагрузочных деформаций *EOST Loading Service* предоставляет готовые временные ряды вычисленного неприливного атмосферного и гидрологического эффекта на ускорение силы тяжести. При этом используются глобальные модели гидрологии и атмосферы (см. 1.3, 1.4), которые дают не вполне удовлетворительный результат в сравнении с экспериментальными значениями для пункта, располагающегося в Москве (см. 1.3.3, 1.4.3). Кроме того, Сервис предоставляет вычисления только для пунктов, направивших заявку на вычисления, что делает невозможным получение поправок для любого пункта. Однако поправки, предоставляемые Службой нагрузочных деформаций, используются в ведущих международных исследованиях как наиболее надежные [37, 64, 66]. В связи с этим, в рамках данной диссертационной работы также для анализа используются поправки предоставляемые *EOST Loading Service*.

Представленный обзор существующих методик и программных продуктов позволяет сделать следующие выводы:

- единой методики и программного обеспечения, позволяющих выполнять обработку и анализ результатов мониторинговых наблюдений ускорения силы тяжести, на сегодняшний день не существует;
- получение локальных параметров земных приливов возможно выполнить только в программе *ETERNA* (Nanogal Software). В исследованиях, выполненных

в рамках данной диссертационной работы, приведены результаты использования этой программы;

– необходимо создание единой методики обработки и анализа результатов мониторинговых наблюдений ускорения силы тяжести.

2.5 Требования к пункту и методике измерений

Фундаментальный пункт ГФГС, как правило, состоит из группы центров, гравиметрически связанных между собой, образуя так называемую локальную гравиметрическую сеть. Сеть состоит из основных и пунктов-спутников. Основной пункт подразумевает выполнение полной программы высокоточных определений на нем: выполнение определений абсолютным методом, измерение вертикального градиента силы тяжести, а также передача значения силы тяжести на пункты-спутники относительным методом с использованием статических гравиметров.

Места размещения центров фундаментального пункта должны обеспечивать долговременную сохранность, удобство доступа к пункту, свободный проезд, возможность выполнения наблюдений в любое время суток, как в будние, так и в выходные дни; колебания уровня грунтовых вод должны быть минимальны в течение длительного времени. Пункты необходимо размещать вдали от промышленных объектов, автомобильных и железных дорог, улиц с интенсивным движением, линий электропередачи, от мест, где возможно перемещение больших масс грунта или воды, от нефтегазодобывающих участков работ и прочих агрегатов, которые могут оказать негативное влияние на сейсмический фон. При закреплении пунктов в пределах городской территории это требование зачастую не выполняется.

При проектировании новых основных пунктов помещение должно удовлетворять следующим требованиям:

- размер помещения должен быть не менее 8 м^2 ;
- высота потолка не менее 2 м над верхней плоскостью постаментов;
- влажность воздуха в помещении должна быть минимальной;
- температура воздуха не должна быть менее $+10 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

– наличие электросети.

Пункт TSNI располагается на первом этаже капитального строения по адресу: город Москва, улица Онежская. Пункт представляет собой цельный постамент с собственным фундаментом, свободным от остальной конструкции здания. В 50 м от пункта наблюдений располагается автомобильная дорога с умеренным трафиком. Ближайшая железная дорога находится в 1 км. Здание, в котором располагается пункт, является административным, с постоянным присутствием людей. В связи с этим, можно заключить, что в результатах измерений будет наблюдаться повышенный шумовой фон, обусловленный микросейсмами антропогенного и техногенного характера, при этом в ночные часы, когда в здании отсутствуют сотрудники, а на улице отмечается минимальный трафик, шум будет минимален. Максимальный шум следует ожидать в утренние и вечерние часы (8–9 утра и 17–20 вечера по местному времени).

В связи с этим возникает необходимость тщательного подбора типа фильтра и параметров фильтрации для выявления полезного сигнала. Шумовая составляющая при этом будет практически бесполезна для анализа собственных земных микросейсм, поскольку они будут замаскированы шумами техногенного характера.

Наблюдения приливными гравиметром рекомендуется выполнять в одном помещении с абсолютными определениями. При этом необходимо редуцировать результаты абсолютных и относительных определений к одной эффективной высоте. Сами наблюдения должны быть непрерывными. Любой перебой в работе приводит к арретированию датчиков гравиметра, а после арретирования могут изменяться параметры дрейфа нуль-пункта гравиметра. Исследование, выполненное в рамках диссертационной работы [26], показало, что стабилизация дрейфа нуль-пункта происходит через 30–60 дней после прерывания измерений. После перемещения гравиметра время стабилизации дрейфа может достигать 6 месяцев.

В связи с этим необходимо обеспечить стабильность подключения гравиметра к сети электропитания, следить за состоянием компьютера, выполняющего управление измерениями (не допускать перезапуска компьютера).

Поскольку приливным гравиметром выполняются наблюдения за временными вариациями ускорения силы тяжести, необходимо не допускать «появления» или «исчезновения» избыточных масс вблизи гравиметра в процессе наблюдений.

Важным является возможность синхронизации рубидиевого стандарта частоты с ГНСС-оборудованием. В комплекте с гравиметром gPhoneX поставляется антенна для синхронизации со спутниковыми часами. Особенно важна подобная синхронизация при исследовании земных микросейсм и землетрясений.

Таким образом, главными особенностями методики наблюдений за временными вариациями ускорения силы тяжести на пунктах ГФГС являются:

- в помещении, где производятся наблюдения, должны быть минимизированы перестановки и перемещения оборудования, людей;
- обеспечение стабильности подключения гравиметра к сети электропитания;
- обеспечение синхронизации рубидиевого стандарта частоты с ГНСС-оборудованием;
- поддержание постоянной температуры в помещении.

Выводы по второму разделу

В разделе обоснован выбор используемого оборудования (относительный приливной гравиметр gPhoneX и абсолютный баллистический гравиметр FG5), приведены их технические характеристики, особенности методики наблюдений. Подчеркнута необходимость выявления и учета дрейфа нуля-пункта относительного гравиметра приливного типа методом сравнения с результатами регулярных абсолютных наблюдений.

Описаны существующие методики и программные продукты, предназначенные для обработки измерений временных вариаций ускорения силы тяжести. Сделан вывод, что единой методики и/или программного продукта, позволяющего выполнять обработку результатов высокоточных мониторинговых наблюдений относительными гравиметрами, не существует. Существующие методики обработки не имеют достаточной теоретической базы, доказывающей эффективность и точность

предлагаемых алгоритмов. Методика обработки результатов мониторинговых наблюдений ускорения силы тяжести нуждается в доработке и автоматизации.

Описаны требования к расположению и конструкции пунктов ГФГС. Сделан вывод, что расположение пункта TSN1 отличается повышенным шумом техногенного характера. В связи с этим необходим тщательный подбор фильтра для выявления полезного сигнала.

3 КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ

3.1 Общие положения и постановка задачи

Существующие программы обработки мониторинговых гравиметрических данных позволяют эффективно обрабатывать приливные вариации ускорения силы тяжести. Однако на сегодняшний день актуальной является задача исследования неприливных составляющих сигнала. Кроме того, существующие программные продукты позволяют выполнять обработку результатов наблюдений в полуручном режиме: несмотря на автоматизацию вычислительного процесса, исключение случайных выбросов, пропусков данных, а также выбор параметров учета тех или иных физических факторов выполняется вручную (см. 2.4).

В связи с этим, разработка и реализация на программном уровне комплексной методики позволили решить следующие задачи:

1 Полная автоматизация процесса обработки результатов наблюдений гравиметрами приливного типа.

2 Создание локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести с учетом неприливных эффектов для фундаментального пункта ГФГС с точностью не хуже 8 мкГал.

Как было установлено ранее (см. раздел 1), основными факторами, вызывающими неприливные возмущения ускорения силы тяжести, которые в недостаточной мере учитываются в существующих методиках, являются изменение уровня грунтовых вод и вариации атмосферного давления.

Учитывая вышесказанное, комплексную методику можно представить в виде блок-схемы (рисунок 3.1).

Или в аналитическом виде с учетом (1.1):

$$\Delta g = \Delta g_{tide} + \Delta g_{Pol} + \Delta g_{drift} + \quad (3.1)$$

где Δg_{tide} – приливная составляющая временных вариаций УСТ;

Δg_{Pol} – вариации, вызванные движением земных полюсов, которые, в общем случае, относятся к неприливному, но выделены отдельно, так как учитываются еще на этапе предварительной обработки данных;

Δg_{drift} – дрейф нуля-пункта гравиметра;

Δg – атмосферный неприливный эффект;

Δg_{hydro} – гидрологический неприливный эффект;

– совместный неприливный эффект, оказываемый изменением атмосферного давления и гидрологического режима;

Δg_{res} – остаточные неприливные вариации, вызванные иными факторами;

i – шум системы (высокочастотная составляющая сигнала), обусловленный такими факторами, как сейсмические эффекты, шум гравиметра, факторы антропо-генного и техносферного характера.

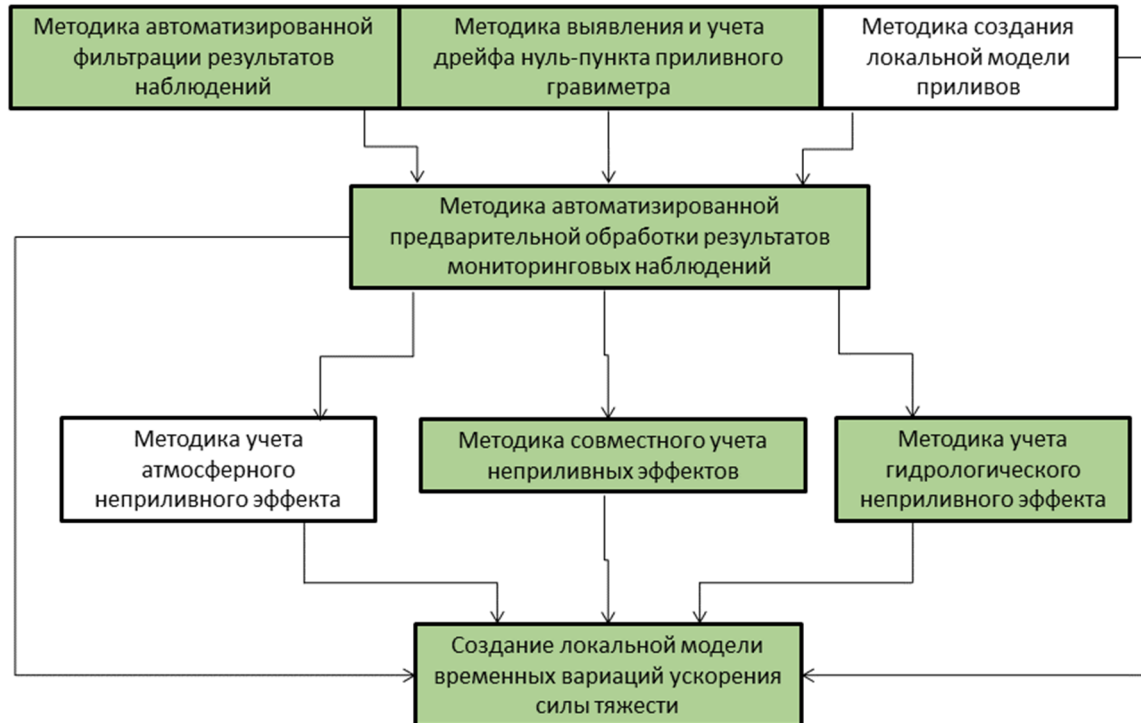


Рисунок 3.1 – Блок-схема комплексной методики. Цветом выделены блоки, разработанные в результате диссертационного исследования

Таким образом, предлагаемая комплексная методика учета временных вариаций ускорения силы тяжести на пунктах фундаментальной гравиметрической сети Российской Федерации состоит из следующих методик:

- 1 Методика автоматизированной предварительной обработки результатов мониторинговых наблюдений (учет Δg_{tide} , Δg_{Pol} , Δg_{drift} , i).
- 2 Методика учета атмосферного неприливного эффекта (учет Δg -).
- 3 Методика учета гидрологического неприливного эффекта (учет Δg_{hydro}).
- 4 Методика совместного учета неприливных эффектов.

Далее рассмотрим указанные методики подробнее.

3.2 Методика автоматизированной предварительной обработки мониторинговых наблюдений

3.2.1 Постановка задачи

В большинстве существующих методик обработки данных мониторинговых наблюдений гравиметрами приливного типа предполагается обработка в программе TSoft (см. 2.4). В этом случае выбор параметров фильтрации, исключение случайных выбросов и разрывов данных выполняется вручную, также как и дальнейший учет необходимых для обработки параметров: дрейфа нуля-пункта, движения земных полюсов, приливной составляющей и пр. Таким образом, целью данного этапа комплексной методики является автоматизация процесса предварительной обработки (фильтрация и изменение частоты дискретизации), а также учет таких известных параметров, как движение земных полюсов, земные приливы и дрейф нуля-пункта гравиметра.

Предлагаемую методику можно описать следующим алгоритмом:

- 1 Исключение случайных выбросов и пропусков данных.
- 2 Изменение частоты дискретизации.
- 3 Фильтрация шумов.

- 4 Выявление и учет дрейфа нуля-пункта гравиметра.
- 5 Создание и учет локальной модели земных приливов.
- 6 Оценка точности моделирования и предварительный анализ неприливных вариаций ускорения силы тяжести.

Прежде чем начинать непосредственную обработку результатов наблюдений, стоит обратить внимание на общую характеристику исследуемого сигнала.

Результаты измерений приливным гравиметром представляют собой сложный сигнал с ярко выраженными периодической и линейной составляющей, имеют некий тренд (см. рисунок 3.7). Для повышения надежности результатов обработки, воспользуемся известной техникой «удаления-восстановления» [36], которая часто используется для обработки различных гравиметрических данных [2, 41]. Согласно этой технике, сначала из исходных данных исключаются («удаляются») все известные параметры в первом приближении. Далее выполняют необходимые операции с оставшимся сигналом, а затем методом «восстановления» возвращают «удаленные» ранее параметры. В связи с этим, прежде чем выполнять обработку, «удалим» из имеющегося сигнала приливные вариации, рассчитанные по модели At117, а также выполним учет движения земных полюсов.

3.2.2 Исключение случайных выбросов и пропусков данных

Первым этапом предварительной обработки является исключение случайных выбросов. Подобные выбросы имеют существенную величину (в большинстве случаев более 1 000 мкГал) и незначительную продолжительность (до нескольких минут). Подобные выбросы связаны с землетрясениями. Подземные толчки, фиксируемые гравиметрами, могут происходить в любой точке Земли.

К примеру, выброс в 5 000 мкГал, представленный на рисунке 3.2, вызван землетрясением в Мексике 19 сентября 2017 г. [10].

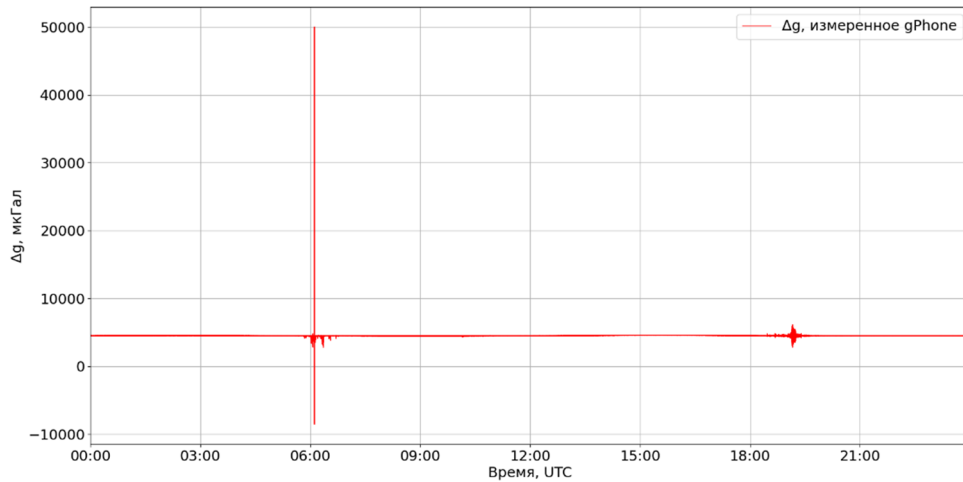


Рисунок 3.2 – Наблюдаемые значения вариаций ускорения силы тяжести
19 сентября 2017 г.

Для исключения случайных выбросов необходимо разработать критерий, который позволит отделить выброс от обычной шумовой составляющей. Для этого выполним оценку среднего уровня шума. Оценка дисперсии выполнялась для часовых и суточных интервалов. Для удобства восприятия, приведем не саму дисперсию, а квадратный корень дисперсии, то есть среднее квадратическое отклонение, вычисленное по формуле Бесселя (3.2), обозначив x_i – непосредственно измеренные значения ускорения силы тяжести:

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (3.2)$$

где n – количество измерений ускорения силы тяжести; $\bar{x}$ – оценка математического ожидания значения ускорения силы тяжести, вычисляемая как среднее арифметическое:

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i}. \quad (3.3)$$

На рисунке 3.3 представлена динамика суточных средних квадратических отклонений.

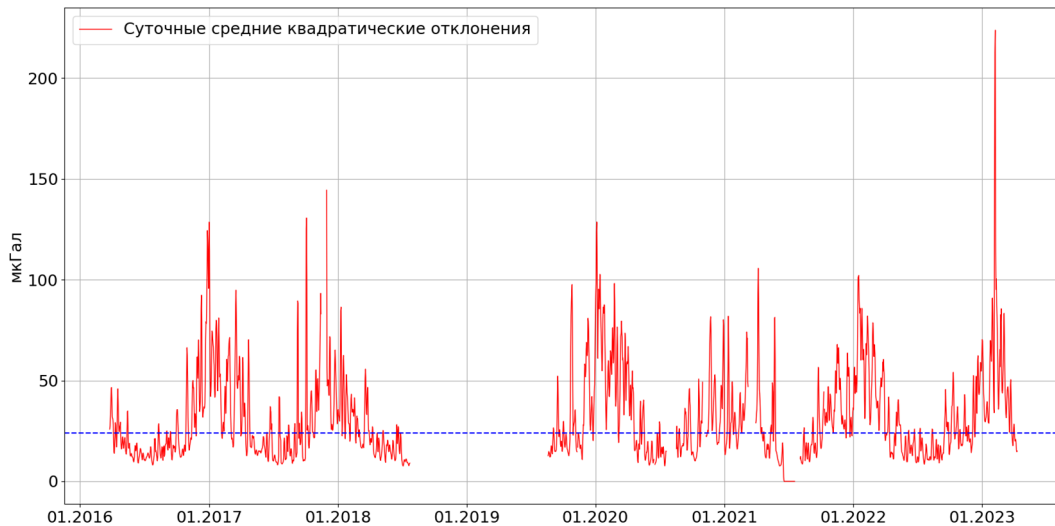


Рисунок 3.3 – Суточные средние квадратические отклонения

Из анализа полученных значений средних квадратических отклонений можно сделать следующие выводы:

1 Зимой (в январе) сигнал более зашумлен, чем в летние месяцы (июнь-июль). Средняя шумовая составляющая повышается с 20 до 50 мкГал.

2 Медианное значение среднего квадратического отклонения составляет 24,00 мкГал.

Поскольку среднее квадратическое отклонение для временного ряда измеренных значений ускорения силы тяжести – величина не постоянная, использование единого критерия для выявления выбросов применительно ко всему ряду данных, нецелесообразно. В связи с этим рекомендуется применять динамическую оценку, например с помощью медианного [24].

Данный фильтр работает по принципу скользящего среднего: для окна данных вычисляется медианное значение. Далее вычисляется медианное стандартное отклонение MAD :

$$MAD = median(|x_i - \bar{x}|) \quad (3.4)$$

и выполняется оценка каждого стандартного отклонения от медианного значения *MAD* согласно условию: если стандартное отклонение больше, чем удвоенное *MAD* (принимая, что результаты измерений ускорения силы тяжести подчиняются закону нормального распределения), отклонение считается выбросом

$$|x_i - \bar{x}| > 2MAD. \quad (3.5)$$

Выбросы, выявленные с использованием подобного критерия, исключаются, а полученный пропуск заменяется медианным значением.

Описанная методика реализована на языке программирования Python 3.10 (листинг 3.1).

Листинг 3.1 – Алгоритм исключения случайных выбросов и пропусков данных, реализованных на Python 3.10

```
def hampel (y, window_size, simg =3):
    n = len(y)
    new_y = y.copy()
    k = 3
5    idx = []
    for i in range ((window_size) , (n - window_size)):
        r_median = np.median(y[(i - window_size):(i +
window_size)]) #скользящая медиана
        r_mad = np.median(np.abs(y[(i - window_size):(i +
window_size)] - r_median)) #скользящий MAD
        if (np.abs(y[i] - r_median) > simg*r_mad):
10         new_y[i] = r_median #замена выброса
            idx.append(i)
    return new_y, idx

g_new, outliers = hampel(g_raw, 59)
```

Результаты выявления и исключения выбросов представлены в графическом виде на примере двухнедельных данных на рисунке 3.4.

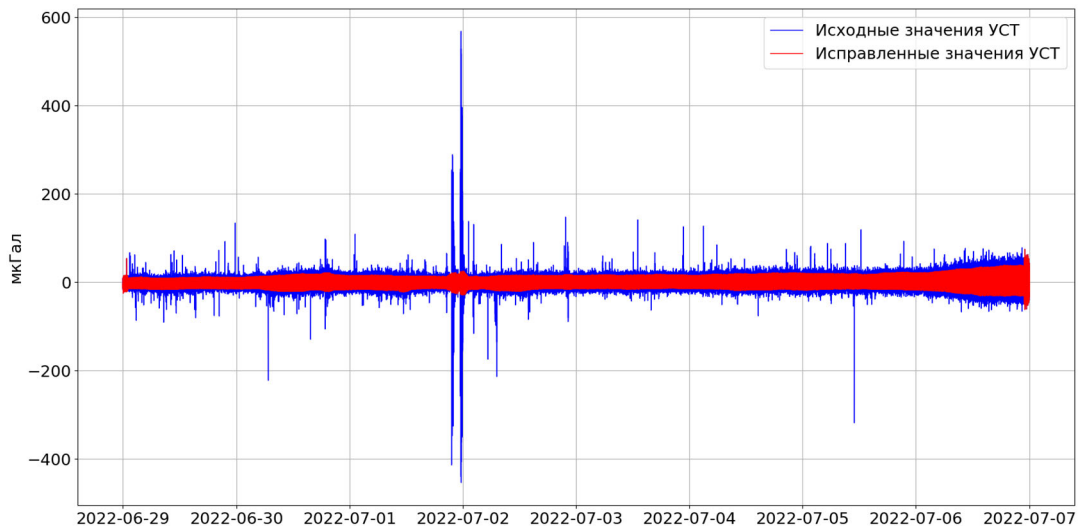


Рисунок 3.4 – Результаты выявления случайных выбросов

3.2.3 Изменение частоты дискретизации

Необходимая частота дискретизации исследуемого сигнала напрямую зависит от характеристик исследуемых явлений. Исходные данные представлены в виде дискретного сигнала с частотой 1 Гц. При одном измерении в секунду объем данных длительного (несколько лет) мониторинга представляет собой колоссальный объем, требующий значительной вычислительной мощности. Поэтому необходимо сократить объем исходной информации, не потеряв при этом полезный сигнал.

Исследуемыми явлениями являются приливные вариации ускорения силы тяжести и неприливные эффекты, вызванные влиянием изменения атмосферного давления и гидрологического режима. Исходя из сведений, приведенных в разделе 1, можно сделать вывод, что периода в 1 час достаточно для того, чтобы выполнить качественный анализ исследуемых эффектов.

Изменение частоты дискретизации выполнено в соответствии с теоремой Котельникова [9]. Реализация вычислений выполнена на языке программирования Python 3.10 (листинг 3.2).

Листинг 3.2 – Алгоритм исключения случайных выбросов и пропусков данных, реализованных на Python 3.10

```
g_hour = g_new.resample('1h').mean()
```

3.2.4 Фильтрация шумов

Исключение шумов следует выполнять с особой осторожностью. Шумовая составляющая сигнала вызвана такими факторами, как сейсмическая активность, а также техногенными и антропогенными факторами. Подобные шумы имеют высокую частоту и не являются предметом исследования.

Многочисленные исследования предлагают использовать простой пятиточечный фильтр или метод скользящего среднего с окном от 3 до 50 точек. Применительно к представленным данным, метод скользящего среднего дает неудовлетворительный результат: при фильтрации по трем точкам (часам) фильтр не убирает все оставшиеся шумы, а при фильтрации с большим окном излишне сглаживает данные таким образом, что теряется часть периодического (приливного) сигнала.

Оптимальным фильтром является фильтр Савицкого – Голея [74], который в последние годы часто используется для обработки спутниковых данных [57, 67]. Это обусловлено тем, что фильтр Савицкого – Голея, реализуя аппроксимацию полиномом, сохраняет высокочастотные компоненты сигнала и, при правильном подборе степени полинома и окна фильтрации, качественно подавляет шум.

Фильтрация реализована на языке программирования Python 3.10 (листинг 3.3).

Листинг 3.3 – Алгоритм фильтрации, реализованный на Python 3.10

```
from scipy.signal import savgol_filter

g= savgol_filter (g_hour, 5, 3) # 5 - окно фильтрации, 3 -
    степень полинома
```

Результаты фильтрации представлены в графическом виде на рисунке 3.5 на примере 14-дневного интервала.

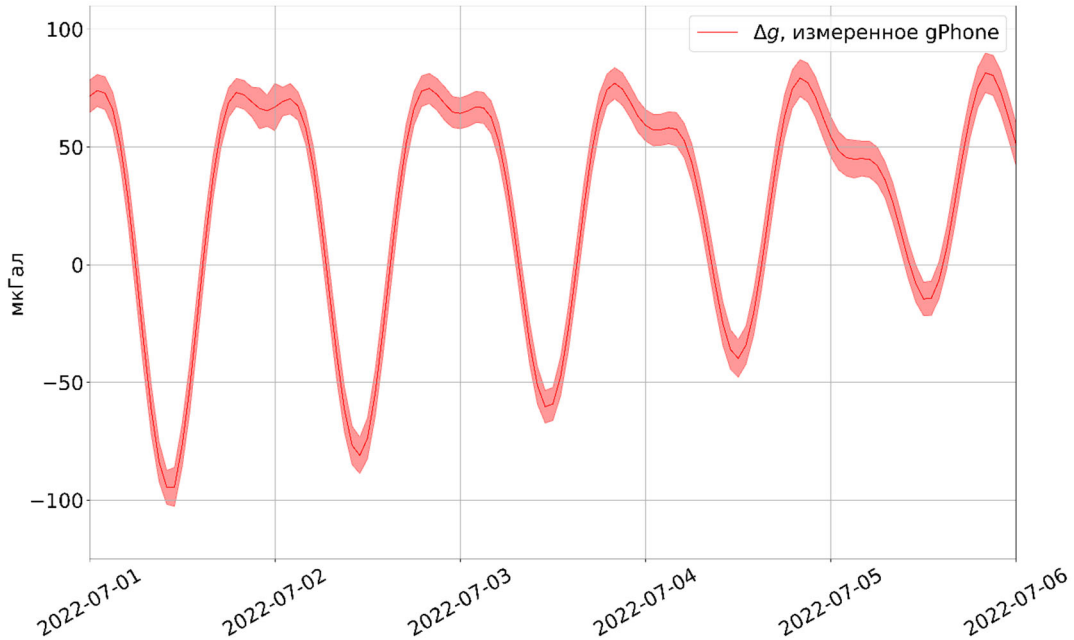


Рисунок 3.5 — Результаты фильтрации исходных данных

Оценка качества фильтрации производилась по четырем показателям: средняя квадратическая ошибка фильтрации ($RMSE$), пиковое отношение «сигнал – шум» ($RSNR$), универсальный индекс качества ($UIQI$) и стандартная ошибка определения среднего (SE).

Средняя квадратическая ошибка фильтрации оценивалась по стандартной формуле Гаусса:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - y_i)^2}{n}}, \quad (3.6)$$

где x_i – исходные значения ускорения силы тяжести;

y_i – значения ускорения силы тяжести, полученные после процедуры фильтрации.

Пиковое отношение «сигнал – шум» показывает степень подавления шума относительно характеристик исходного сигнала и вычисляется по формуле:

$$RSNR = 20 \lg \frac{x_{max}}{RMSE}. \quad (3.7)$$

В среднем для исследуемого сигнала пиковое отношение «сигнал – шум» равно 20. Универсальный индекс качества $UIQI$ является более объективной оценкой качества фильтрации. Индекс вычисляется по формуле:

$$UIQI = \frac{4\sigma_{xy}\bar{x} \cdot \bar{y}}{[\sigma_x^2 + \sigma_y^2][\bar{x}^2 + \bar{y}^2]}, \quad (3.8)$$

где $\bar{x}$ – оценка математического ожидания исходного ряда значений ускорения силы тяжести, вычисляемая по формуле (3.3);

$\bar{y}$ – оценка математического ожидания ряда значений ускорения силы тяжести, полученных после процедуры фильтрации, вычисляемая по аналогичной формуле:

$$\bar{y} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}; \quad (3.9)$$

σ_x^2 и σ_y^2 – дисперсии значений ускорения силы тяжести исходных и полученных после процедуры фильтрации соответственно:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2; \quad (3.10)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2; \quad (3.11)$$

σ_{xy} – ковариация значений ускорения силы тяжести исходных и полученных после процедуры фильтрации:

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}); \quad (3.12)$$

Чем ближе универсальный индекс качества к 1, тем качественнее выполнена фильтрация. В данном случае $UIQI = 0,925$, что говорит о высоком качестве фильтрации. Кроме того, проведенный анализ выявленной шумовой составляющей сигнала говорит о том, что периодическая составляющая вариаций ускорения силы тяжести осталась незатронутой фильтром.

Непосредственная оценка точности фильтрации определялась как стандартная ошибка среднего (SE):

$$SE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3.13)$$

Ошибка фильтрации составила 1 мкГал.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенный фильтр Савицкого – Голея с параметрами фильтрации полином 3-й степени и окно 5 точек (часов) дает оптимальные результаты фильтрации и может быть рекомендован в качестве фильтра высоких частот для обработки результатов наблюдений приливным гравиметром.

3.2.5 Выявление и учет дрейфа нуля-пункта гравиметра

Исключение дрейфа нуля-пункта пружинного приливного гравиметра является важным этапом обработки результатов мониторинговых наблюдений (см. раздел 2).

Одним из наиболее простых способов выявления и учета дрейфа нуля-пункта гравиметра, применяемым за рубежом, является метод кусочно-линейной аппроксимации [80]. Учет выполняется поэтапно: сперва подбирается полином второй степени для отдельных месячных интервалов, а затем подбирается общий полином второй степени для всего массива данных.

Однако этот метод обладает существенным недостатком: вместе с дрейфом могут быть исключены вековые составляющие вариаций ускорения силы тяжести, что неприемлемо при обработке многолетних наблюдений и дальнейшем моделировании временных вариаций.

Эффективность применения этого метода проверена в исследовании, выполненном автором и опубликованном в статье [26]. Исследование показало, что метод кусочно-линейной аппроксимации можно использовать для контроля стабильности дрейфа нуля-пункта, при этом необходимо использовать аппроксимацию всего ряда наблюдений как единого массива (а не по месяцам) полиномом первой степени. Для корректного учета дрейфа необходимо выполнять периодические абсолютные наблюдения.

Далее выполним сравнение регулярных абсолютных измерений на пункте TSNI#110a, выполненных гравиметром FG5#110, и мониторинговых измерений на пункте TSNI#110b, выполненных приливным гравиметром gPhoneX#117. Постаменты TSNI#110a и TSNI#110b располагаются в одном помещении на расстоянии менее 2 м. Для сравнения было выполнено редуцирование измерений на одну и ту же эффективную высоту по методике, описанной в 2.3.2.

Рассмотрим кривые вариаций ускорения силы тяжести, осредненных за 2 месяца для выявления дрейфа нуля-пункта приливного гравиметра gPhoneX#117 (рисунк 3.6).

Очевидно, что гравиметр gPhoneX#117 обладает небольшим линейным дрейфом в +7 мкГал/месяц. Это значительно лучший результат, чем был получен гравиметрами зарубежных исследователей (30–50 мкГал/месяц) [70, 73, 80, 93], что

говорит о качестве сборки данного конкретного прибора и возможности его использования в дальнейшем для изучения приливных явлений.

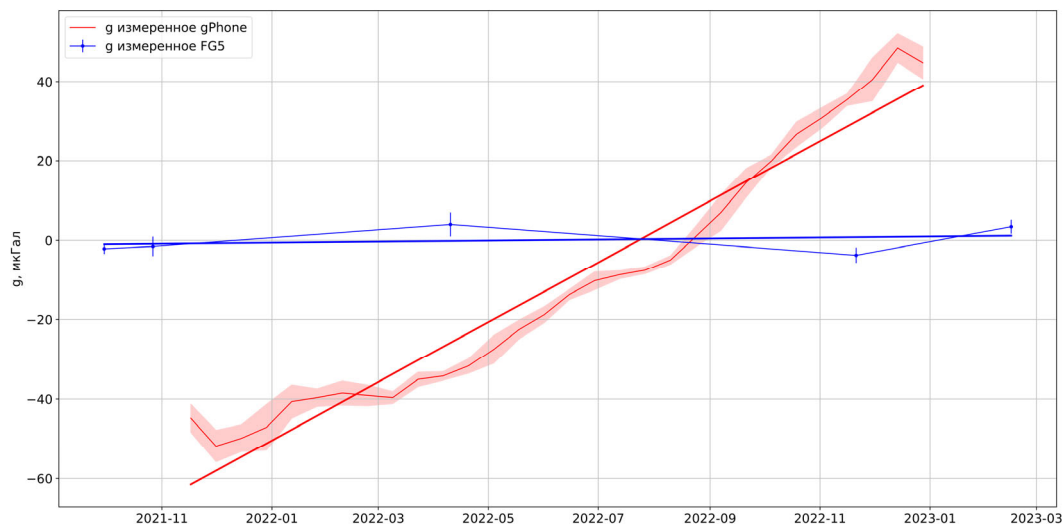


Рисунок 3.6 – Выявление дрейфа нуля-пункта гравиметра gPhoneX#117 в сравнении с абсолютными значениями

Зная дрейф нуля-пункта инструмента, можно производить дальнейший анализ данных. Остаточные линейные изменения могут быть вызваны несовершенством модели приливов и различными неприливыми вариациями.

3.2.6 Получение локальных параметров земных приливов

Локальные параметры земных приливов были получены с использованием пакета ANALYZE программы ETERNA [77] Принципы получения параметров приведены в 1.2.3. Локальные параметры земных приливов для пункта TSNI#110b были вычислены с использованием программы ETERNA для годового (360 дней) интервала наблюдений с декабря 2021 г. по декабрь 2022 г. (далее – эпоха). Программа реализует подбор локальных параметров к существующим моделям земных приливов по методу наименьших квадратов [33, 38, 94, 95]. Процедура подбора локальной модели и ее анализ подробно представлены в исследовании, выполненном автором и опубликованном в статье [27].

Параметры полученной локальной модели приведены в приложении А, числа Лява представлены в приложении Б.

Ошибки определения локального синтетического прилива определены как периодическая составляющая разности экспериментальных значений силы тяжести и синтетических приливов (с учётом дрейфа нуля-пункта гравиметра, движения земных полюсов). Локальная приливная модель получена с ошибкой 0,2 мкГал, что соответствует точности измерений.

Далее мы получили синтетические приливы для различных промежутков времени, в которые также велись наблюдения вариаций силы тяжести.

3.2.7 Предварительный анализ неприливных вариаций ускорения силы тяжести

Вернемся к формуле (3.1) и выделим круглыми скобками те составляющие, которые были учтены в результате предварительной обработки:

$$\Delta g = (\Delta g_{tide}) + (\Delta g_{Pol}) + (\Delta g_{drift}) + \Delta g_{notide} + (\epsilon_i), \quad (3.14)$$

где Δg_{notide} – неприливные вариации ускорения силы тяжести.

Таким образом, временной ряд, полученный по методике предварительной обработки, является неприливной составляющей временных вариаций ускорения силы тяжести. Представим неприливные вариации в графическом виде (рисунок 3.7).

Разброс выявленных неприливных вариаций ускорения силы тяжести составляет 30 мкГал. Корректность временного ряда неприливных вариаций ускорения силы тяжести подтверждается сходимостью с результатами наблюдений абсолютным гравиметром FG5. На рисунке 3.7 показано, что неприливные вариации, полученные по данным гравиметра gPhoneX и FG5, совпадают в пределах точности выполненных определений.

Полученный временной ряд содержит сезонную составляющую, которая обусловлена влиянием изменения гидрологических параметров (см. 1.4 и 3.4.2). Кроме

того, наблюдается более высокочастотная составляющая, обусловленная влиянием атмосферного неприливного эффекта (см. 1.3 и 3.3).



Рисунок 3.7 - График несприливных вариаций ускорения силы тяжести на пункте TSNi

Ошибку определения несприливных вариаций ускорения силы тяжести можно определить как:

$$m_{notide}^2 = m_{tide}^2 + m_{Pol}^2 + m_{drift}^2 + m^2, \quad (3.15)$$

где $m_{tide} = 0,2$ мкГал – ошибка синтетической локальной модели земных приливов;

$m_{Pol} = 0,2$ мкГал – ошибка учета движения земных полюсов;

$m_{drift} = 0,5$ мкГал – ошибка учета дрейфа нуля-пункта гравиметра;

$m = 1,0$ мкГал – ошибка фильтрации.

Из предварительного анализа несприливных вариаций ускорения силы тяжести можно сделать следующие выводы:

1 Неприливные вариации, выявленные по результатам мониторинговых наблюдений приливным гравиметром, по методике автоматизированной предварительной обработки, выявлены достоверно, ошибка определения неприливных вариаций составляет 1,1 мкГал.

2 Разброс временных вариаций ускорения силы тяжести достигает 30 мкГал, что является существенной величиной при проведении высокоточных гравиметрических определений. Неприливные вариации ускорения силы тяжести нуждаются в исследовании и учете.

3 Неприливные вариации ускорения силы тяжести в значительной степени обусловлены атмосферным и гидрологическим неприливыми эффектами.

Полный листинг программы автоматизированной предварительной обработки мониторинговых наблюдений приведен в приложении Е.

3.3 Методика учета атмосферного неприливого эффекта

3.3.1 Постановка задачи

Как было сказано ранее (см. 1.3) многочисленными исследователями установлено, что основным фактором, вызывающим неприливные вариации ускорения силы тяжести, является изменение атмосферного давления. Временные вариации распределения плотности атмосферы вызывают изменения гравитационного притяжения воздушных масс на локальном уровне. Согласно исследованию, приведенному в 1.3.3, рекомендуется в качестве модели атмосферного неприливого эффекта использовать поправку за влияние изменения атмосферного давления, рекомендованную IAG с локальным уточнением атмосферного дельта-фактора.

Таким образом, задачами данной методики являются:

1 Исследовать влияние вариаций атмосферного давления на временные вариации ускорения силы тяжести.

2 Выявить составляющую сигнала временных вариаций ускорения силы тяжести, вызванную влиянием изменения атмосферного давления.

3 Подобрать параметры учета влияния изменения атмосферного давления на результаты мониторинговых наблюдений временных вариаций ускорения силы тяжести.

4 Оценить качество прогноза атмосферного негривного эффекта.

3.3.2 Анализ влияния атмосферного негривного эффекта

Для исследования влияния изменения атмосферного давления на вариации ускорения силы тяжести выполним корреляционный анализ.

По результатам корреляционного анализа атмосферное давление имеет статистически значимую заметную обратную связь с ускорением силы тяжести. Коэффициент корреляции равен $-0,569$ (уровень значимости $p < 0,001$). На рисунке 3.8 представлено поле корреляции, наглядно отражающее данную обратную зависимость.

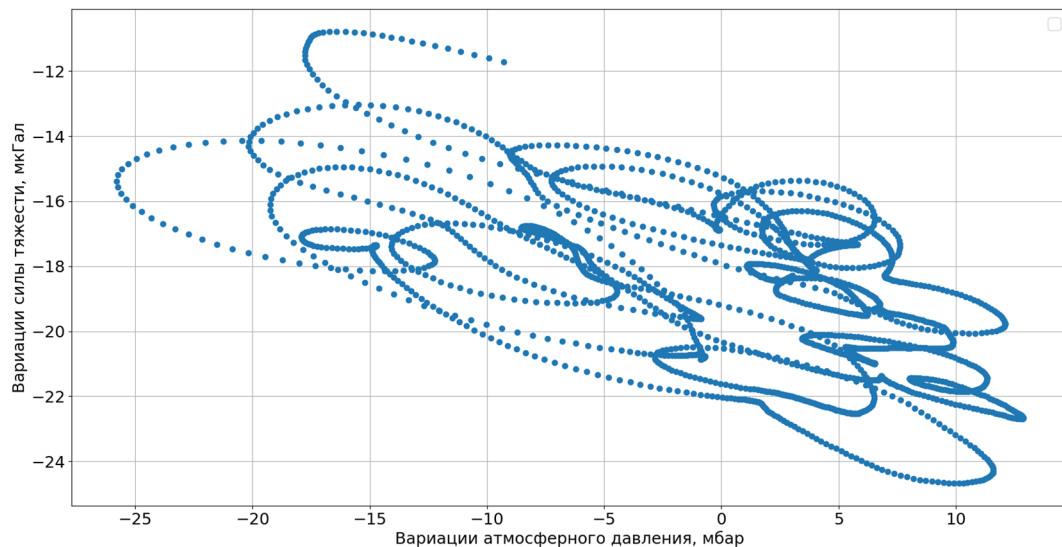


Рисунок 3.8 – Поле корреляции ускорения силы тяжести и атмосферного давления

Регрессионный анализ показал наличие часовой и месячной цикличности негривных вариаций ускорения силы тяжести. Они объясняются автокорреляцией значений ускорения силы тяжести – каждое последующее значение зависит от предыдущего. Поэтому для повышения качества модели, кроме показателя атмосферного негривного эффекта, в нее были включены циклические компоненты

в форме наборов фиктивных переменных для внутрисуточных и месячных циклических компонент. Фиктивные переменные принимают значение единицы для соответствующего времени суток (месяца), и нуля во всех остальных случаях. Для представления внутрисуточной цикличности в модели представлено 23 переменных, месячной – 11 переменных. Результаты оценки регрессионной модели представлены в приложении В.

Модель статистически значима по критерию Фишера. В связи с наличием автокорреляции, выявленной с помощью теста Дарбина – Уотсона, стандартные ошибки вычислены в форме Навье – Уэста. Скорректированный коэффициент детерминации показывает, что 85 % вариации ускорения силы тяжести объясняется совместной вариацией атмосферного давления, трендовой и циклической компонент.

При увеличении атмосферного давления на 1 мбар, ускорение силы тяжести снижается в среднем на 0,26 мкГал при прочих равных условиях.

Часовая цикличность демонстрирует статистически значимый рост ускорения силы тяжести в 2:00–20:00 по сравнению с 0:00. В 1:00, 21:00–23:00 ускорение силы тяжести не отличается в среднем от значения в 0:00.

Месячная цикличность демонстрирует увеличение ускорения силы тяжести с февраля по июнь по сравнению с январем, и снижение – с августа по декабрь. В июле ускорение силы тяжести статистически незначимо отличается от января.

3.3.3 Учет атмосферного неприливного эффекта

Учитывая вышесказанное, около 85 % сигнала неприливных вариаций ускорения силы тяжести могут быть объяснены вариациями атмосферного давления.

Атмосферный неприливный эффект предлагается вычислять по формуле:

$$\Delta g^- = 0,26 \Delta P. \quad (3.16)$$

На рисунке 3.9 представлена динамика фактических, прогнозных значений и остатков модели на примере измерений, выполненных в 2022 г.

Среднее абсолютное отклонение фактического значения от прогнозного при прогнозировании с использованием данной модели составляет 1,84 мкГал. Оценка выполнена по формуле:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i), \quad (3.17)$$

где y_i – значения неприливных вариаций ускорения силы тяжести;

$\hat{y}_i$ – прогнозные (модельные) значения неприливных вариаций ускорения силы тяжести.

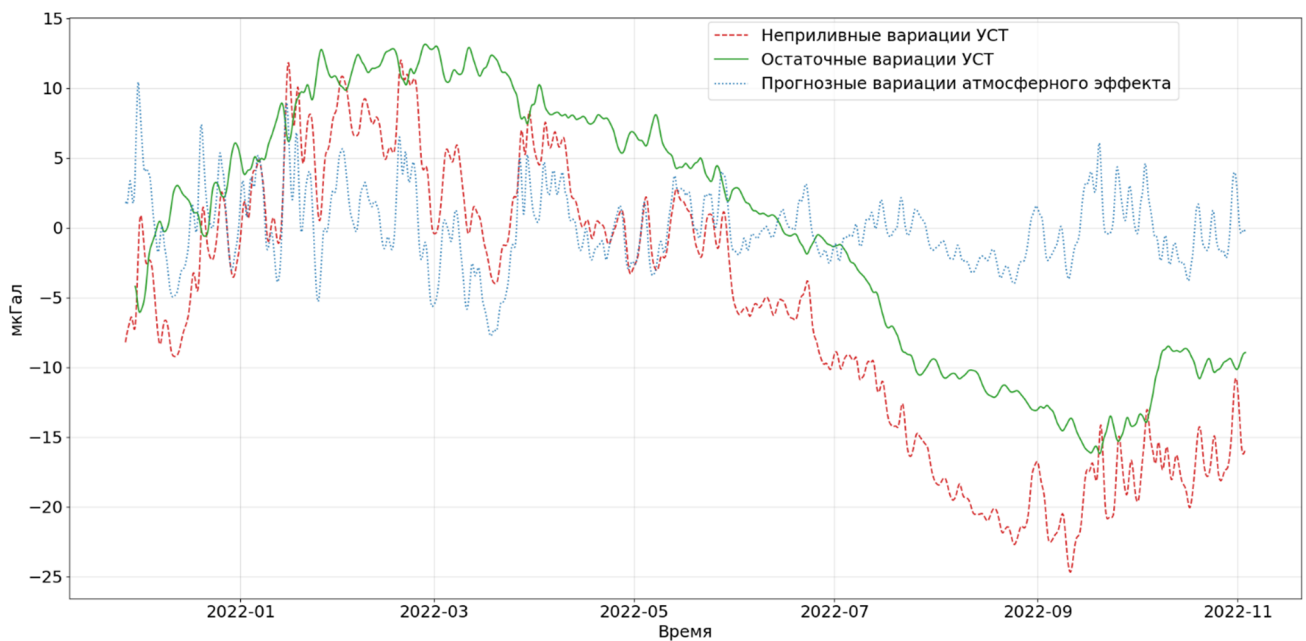


Рисунок 3.9 – Результаты учета атмосферного неприливногo эффекта

3.4 Методика учета гидрологического неприливногo эффекта

3.4.1 Постановка задачи

Существующая модель гидрологического неприливногo эффекта (см. 1.4) проходила апробацию на пунктах, расположенных на расстоянии более 2 000 км от

исследуемого района. Поэтому данная методика должна помочь решить следующие задачи:

- 1 Исследовать влияние гидрологии на временные вариации ускорения силы тяжести.
- 2 Выявить составляющую сигнала временных вариаций ускорения силы тяжести, вызванную влиянием гидрологического неприливного эффекта.
- 3 Подобрать параметры учета модели гидрологического неприливного эффекта в результаты мониторинговых наблюдений временных вариаций ускорения силы тяжести.
- 4 Оценить качество прогноза гидрологического неприливного эффекта.

3.4.2 Анализ влияния гидрологии на вариации ускорения силы тяжести

На графике (рисунок 3.10) представлены вариации ускорения силы тяжести, полученные по результатам абсолютных наблюдений гравиметром FG5#110, относительным приливным гравиметром gPhoneX#117, и предлагаемая модель временных вариаций ускорения силы тяжести, вызванных гидрологической нагрузкой. Из визуального анализа наличие зависимости между результатами наблюдений и модельными значениями очевидно.

Коэффициент корреляции гидрологической нагрузки с ускорением силы тяжести составляет 0,722 (при уровне значимости $p < 0,001$), что демонстрирует высокую прямую связь между ними. Визуально данная связь подтверждается видом поля корреляции (рисунок 3.11).

Полученная модель статистически значима по критерию Фишера, совместная вариация факторов объясняет 68,54 % вариации ускорения силы тяжести, оставшихся после учета влияния атмосферы.

В приложении Г представлены результаты оценки модели влияния на ускорение силы тяжести гидрологического неприливного эффекта, его предыдущих значений, трендовой и циклических компонент.



Рисунок 3.10 – График несприливных вариаций ускорения силы тяжести, полученных по результатам наблюдений гравиметрами и вычисленных по модели гидрологии

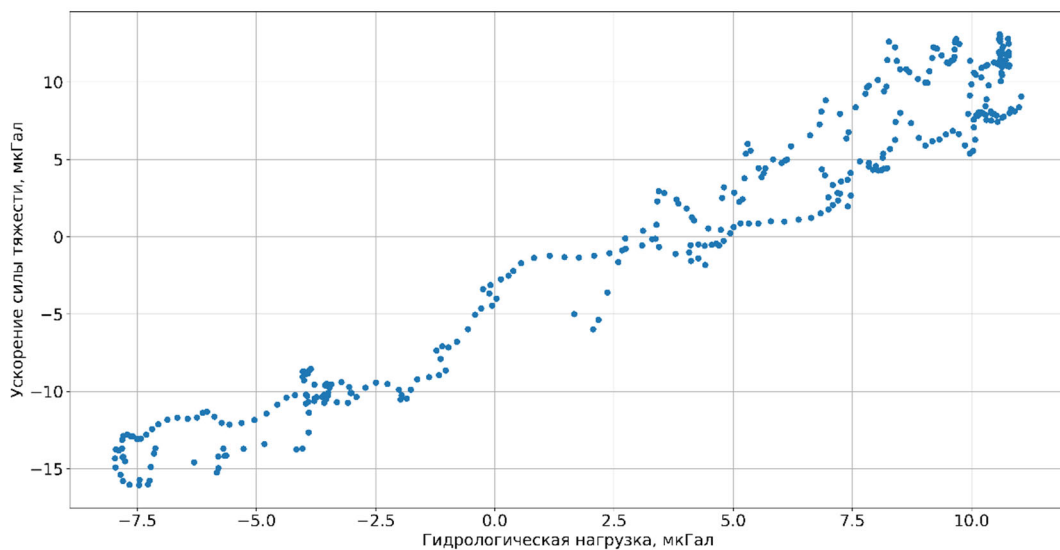


Рисунок 3.11 – Поле корреляции ускорения силы тяжести и модели гидрологического эффекта MERRA2

3.4.3 Учет гидрологического несприливного эффекта

При увеличении гидрологического несприливного эффекта, вычисленного по модели гидрологии, на 1 мкГал, ускорение силы тяжести растет в среднем на 0,76 мкГал. При этом на ускорение силы тяжести влияют предшествующие значения гидрологической нагрузки, от часового до 48-часового запаздывания. Значения

с большим лагом не оказывают статистически значимого влияния на ускорение силы тяжести.

В аналитическом виде влияние гидрологии можно выразить в виде:

$$\Delta g_{hydro} = 30,99\Delta g_{m2} - 24,99\Delta g_{m2}^{t-1} - 3,2\Delta g_{m2}^{t-24} - 2,0\Delta g_{m2}^{t-48} \quad (3.18)$$

или в приближенном виде без учета задержки:

$$\Delta g_{hydro} = 0,76\Delta g_{m2}. \quad (3.19)$$

Средняя абсолютная ошибка прогноза по данной модели, вычисленная по формуле (3.17), составляет 2,57 мкГал. Таким образом методами спектрального и регрессионного анализа получено, что предлагаемая поправка, вычисленная по модели гидрологических нагрузочных деформаций, переоценивает влияние изменения уровня грунтовых вод на временные вариации ускорения силы тяжести на 30 %. Учет влияния необходимо выполнять с использованием значений, вычисленных по модели гидрологии MERRA2 с учетом поправочного коэффициента по формуле (3.18).

На рисунке 3.12 показаны результаты учета гидрологического непривлиного эффекта по локализованной модели гидрологии.

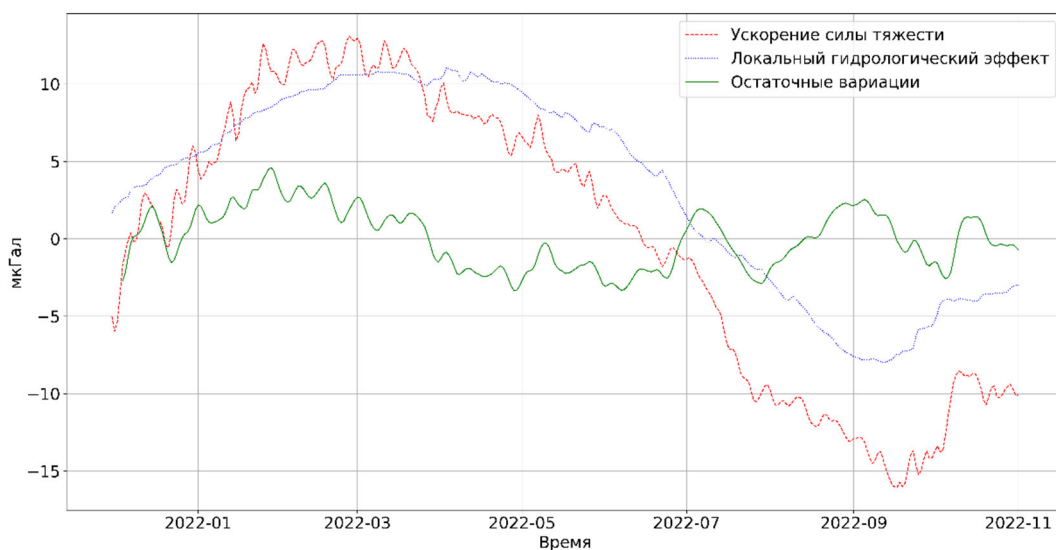


Рисунок 3.12 – Результаты учета гидрологического непривлиного эффекта

3.5 Методика совместного учета неприливных эффектов

3.5.1 Постановка задачи

Большинство существующих методик учета неприливных эффектов предполагает последовательный учет сначала атмосферного, а затем гидрологического воздействия. Поскольку гидрологические и атмосферные параметры связаны между собой своей физической природой, представляется возможным совместный учет атмосферного и гидрологического неприливных эффектов.

В связи с этим, необходимо решить следующие задачи:

1 Исследовать совместное влияние неприливных эффектов на временные вариации ускорения силы тяжести.

2 Подобрать параметры учета неприливных эффектов в результаты мониторинговых наблюдений временных вариаций ускорения силы тяжести.

3.5.2 Анализ совместного влияния атмосферного и гидрологического неприливных эффектов

Модель, представленная в приложении Д, включает одновременное влияние на ускорение силы тяжести атмосферного и гидрологического эффектов. Модель значима по критерию Фишера на высоком уровне значимости. Совместная вариация включенных в модель факторов объясняет 91,42 % вариации ускорения силы тяжести.

При повышении модельных значений гидрологического неприливногo эффекта на 1 мкГал, ускорение силы тяжести растет на 0,67 единиц измерения при прочих равных условиях. При повышении атмосферной нагрузки на 1 мбар – снижается на 0,45 мкГал при прочих равных условиях. Также на ускорение силы тяжести влияет атмосферная нагрузка в предшествующий час.

Различия в величине коэффициентов при показателе неприливных эффектов в моделях В, Г и в модели совместного учета Д обусловлены их различной специ-

фикацией. Когда в модели отсутствует одна из переменных, статистически значимо влияющая на зависимую переменную, и при этом коррелирующая с переменной, включенной в модель, коэффициенты модели меняются, вбирая влияние пропущенной переменной. Гидрологический неприливный эффект статистически значимо связан с ускорением силы тяжести, как и атмосферный неприливный эффект, при этом их влияние противоположно по знаку.

Гидрологический и атмосферный неприливные эффекты обладают слабой, однако статистически значимой обратной связью (коэффициент корреляции равен $-0,07$, $p < 0,001$). Поэтому при отсутствии в модели одного из параметров коэффициенты могут изменяться, так как эффекты частично адсорбируют прямое влияние на ускорение силы тяжести друг друга.

Часовая цикличность также аналогична выявленной с помощью предшествующих моделей: с 2:00 по 20:00 ускорение силы тяжести в среднем выше, чем в 0:00, в остальные часы статистически незначимо отличается от 0:00. Присутствует также цикличность: во все месяцы ускорение силы тяжести в среднем выше, чем в январе.

3.5.3 Совместный учет неприливных эффектов

В виде формулы полученную модель можно представить следующим образом:

$$\Delta g_{notide} = 0,67\Delta g_{m2} - 0,45\Delta P + 0,17\Delta P^{t-1}, \quad (3.20)$$

где ΔP^{t-1} – значение атмосферного давления в предшествующий час.

Средняя абсолютная ошибка прогноза по данной модели, вычисленная по формуле (3.17), составляет 1,36 мкГал. На рисунке 3.13 представлены фактические, прогнозные значения и остатки модели. Таким образом, прогнозная способность данной модели совместного учета неприливных эффектов выше по сравнению с моделями учета неприливных эффектов по отдельности.

На рисунке 3.13 представлена динамика фактических, прогнозных значений и остатков модели на примере измерений, выполненных в 2022 г.

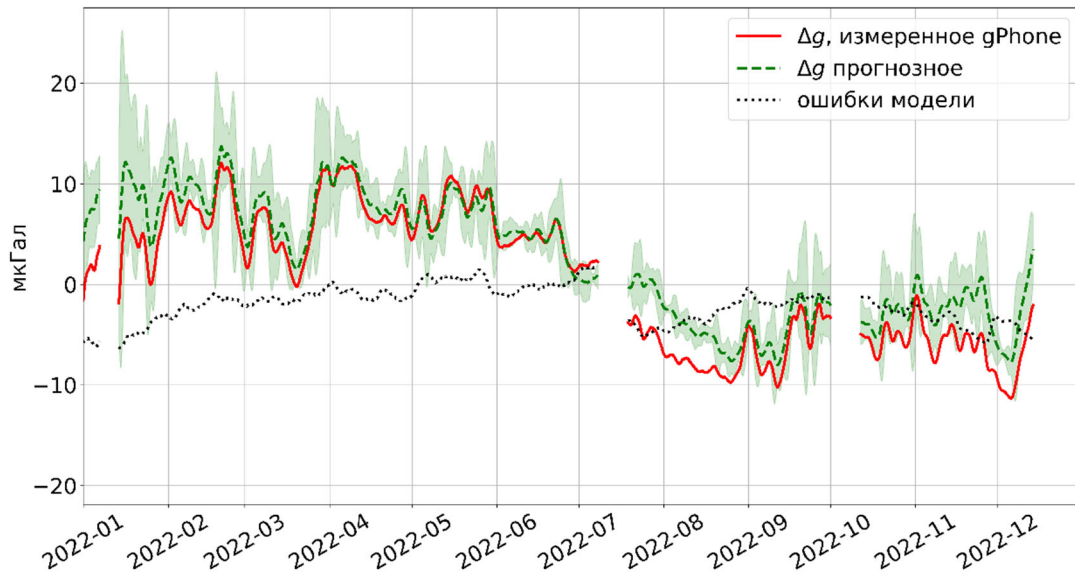


Рисунок 3.13 – Результаты совместного учета неприливного эффекта

Выводы по третьему разделу

В рамках проведенных исследований достигнуты следующие результаты:

- подобраны критерии для выявления и алгоритм учета выбросов данных, связанных с землетрясениями;
- обоснован выбор оптимального фильтра для исключения шумов;
- усовершенствована методика выявления и учета дрейфа нуля-пункта приливного гравиметра;
- усовершенствована методика учета влияния изменения атмосферного давления на временные вариации ускорения силы тяжести;
- разработана методика учета гидрологического неприливного эффекта;
- разработана методика совместного учета атмосферного и гидрологического неприливного эффекта;
- создана локальная модель неприливных эффектов на фундаментальном пункте ГФГС;
- создана локальная модель временных вариаций ускорения силы тяжести на фундаментальном пункте ГФГС.

4 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ

4.1 Априорная оценка точности локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести

Результатом применения комплексной методики учета неприливных эффектов является локальная модель временных вариаций ускорения силы тяжести, полученная для фундаментального пункта ГФГС.

Локальная модель состоит из таких синтезированных параметров, как:

- локальный прилив;
- движение земных полюсов;
- неприливные эффекты.

Априорная оценка точности локальной модели может быть получена из формулы (3.1) и быть оценена как (при учете атмосферного и гидрологического неприливных эффектов по отдельности):

$$m_g^2 = m_{tide}^2 + m_{pol}^2 + m_{drift}^2 + m^{-2} + m_{hydro}^2 + m^2, \quad (4.1)$$

где $m_{tide} = 0,2$ мкГал – ошибка локальной модели земных приливов;

$m_{pol} = 0,2$ мкГал – ошибка учета движения земных полюсов;

$m_{drift} = 0,5$ мкГал – ошибка учета дрейфа нуля-пункта гравиметра;

$m^{-} = 3,2$ мкГал – ошибка учета атмосферного неприливногo эффекта;

$m_{hydro} = 1,4$ мкГал – ошибка учета гидрологического неприливногo эффекта;

$m = 1,0$ мкГал - ошибка фильтрации.

Средняя квадратическая ошибка моделирования составит $m_g = 3,7$ мкГал, а предельная ошибка при доверительной вероятности 0,954 составит 7,4 мкГал, что удовлетворяет требованиям к точности абсолютных определений на пунктах ГФГС в 8 мкГал.

При совместном учете неприливных эффектов суммарная ошибка учета атмосферного и гидрологического эффекта будет определена как $m_{notide} = 1,4$ мкГал, тогда (4.1) будет преобразовано:

$$m_g^2 = m_{tide}^2 + m_{Pol}^2 + m_{drift}^2 + m_{notide}^2 + m^2. \quad (4.2)$$

Средняя квадратическая ошибка моделирования составит $m_g = 1,8$ мкГал, а предельная ошибка при доверительной вероятности 0,954 составит 3,6 мкГал, что в два раза точнее, чем при раздельном учета влияния атмосферного и гидрологического неприяливных эффектов.

4.2 Оценка репрезентативности эталонной выборки

В качестве одного из критериев оценки качества моделирования необходимо оценить репрезентативность исходных данных. Это необходимо для того, чтобы убедиться, что выбранный временной интервал отображает все особенности исследуемых эффектов и с достаточной степенью вероятности оценивает зависимости между исследуемыми явлениями. Также оценка репрезентативности различного набора исходных данных дает возможность оценить минимальную длительность наблюдений, необходимую для создания качественной модели временных вариаций ускорения силы тяжести.

Для это выполнена апробация разработанной комплексной методики для различных временных интервалов, принятых за эталонный. Далее выполнялась оценка точности полученных локальных моделей временных вариаций ускорения силы тяжести по результатам фактических наблюдений приливным гравиметром.

Представим результаты оценки точности моделирования, выполненного на основе эталонных данных длительностью 1 месяц, 6 месяцев, 12 месяцев.

В случае моделирования на основании данных за *1 месяц* полученная локальная модель временных вариаций быстро теряет свою актуальность. Точность модели локальных приливных вариаций, в частности компонент с периодом более суток, превышает 5 мкГал. Высокочастотная составляющая вариаций атмосферного эффекта описывается хорошо. Влияние гидрологии не прослеживается. Таким образом, результатов наблюдений за 1 месяц недостаточно для создания качественной модели временных вариаций.

В случае моделирования на основании данных за *6 месяцев* локальные приливные вариации и вариации, вызванные атмосферным неприливым эффектом, моделируются удовлетворительно. Модель приливным вариаций теряет свою актуальность через 3–5 лет (в неприливых остатках на удалении более 3 лет от эталонного интервала прослеживаются периодические составляющие, через 5 лет их величина достигает 3 мкГал).

В случае моделирования на основании данных за *12 месяцев* моделирование выполняется с требуемой точностью (подробнее см. 4.3).

Дальнейшее увеличение интервала увеличит надежность вычисляемой модели, однако не приведет к увеличению точности моделирования. Для контроля корректности моделирования необходим периодический контроль по результатам абсолютных определений не реже одного раза в год.

4.3 Апостериорная оценка точности локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести

4.3.1 По результатам многолетних наблюдений приливым гравиметром

При разработке комплексной методики в качестве эталонного интервала были выбраны наблюдения, выполненные в 2022 г. Для оценки точности создана локальная модель временных вариаций ускорения силы тяжести для периода с 01 января 2015 г по 01 января 2023 г. Полученные прогнозные значения сравнивались с фактически измеренными приливым гравиметром данными, предварительно подготовленными по методике, описанной в 3.2.

В приложении Ж представлены в графическом виде результаты учета прогнозных значений неприливых вариаций ускорения силы тяжести в результаты наблюдений приливым гравиметром в разные временные промежутки.

Результаты и оценка качества моделирования для эталонного интервала (2022 г.) представлены на рисунке 4.1. Здесь приведены результаты для самого удаленного от эталонного интервала: август–декабрь 2015 г.

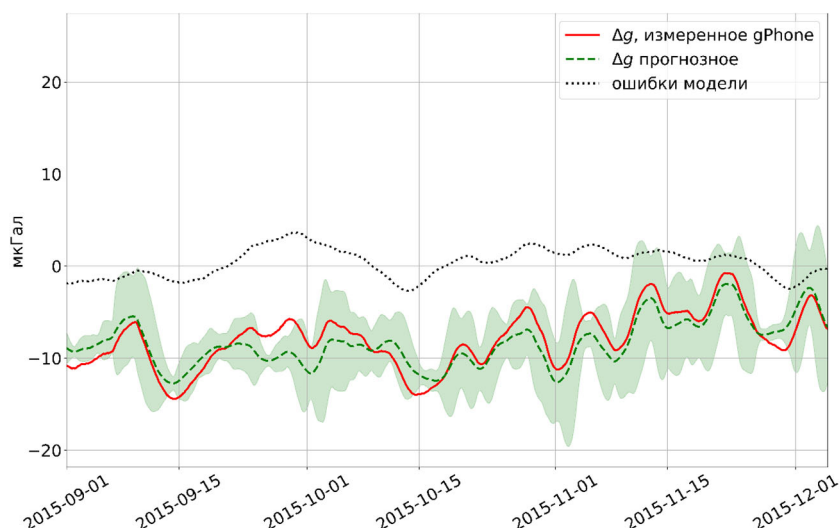


Рисунок 4.1 – Результаты моделирования для интервала с августа по декабрь 2015 г.

Из анализа остатков (разницы результатов экспериментальных наблюдений приливным гравиметром и прогнозных значений ускорения силы тяжести) можно заключить, что величина временных вариаций, не учтенных по предлагаемой комплексной методике, не превышает требуемой точности к результатам наблюдений ускорения силы тяжести на пунктах ГФГС. Средняя квадратическая ошибка моделирования за весь интервал наблюдений составляет 2,86 мкГал.

Моделирование неприливного эффекта выполнялось с использованием данных регрессионной модели, представленной уравнением (3.20). Результаты моделирования приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты совместного моделирования неприливного эффекта на пунктах ГФГС

Оцениваемый фактор	Параметры модели	Стандартная ошибка определения параметров	<i>t</i> -статистики	Коэффициент значимости регрессии, <i>p</i>
Гидрология	0,673630	0,018735	35,95477	<0,0001
Атмосферное давление	-0,454732	0,087467	-5,198885	<0,0001
Атмосферное давление (-1 час)	0,170100	0,087328	1,947838	0,0514
Коэффициент детерминации R^2	0,914413	<i>F</i> -статистика		5300,625
Скорректированный коэффициент R^2	0,914240	<i>p</i> (<i>F</i> -статистика)		<0,0001

Максимальные абсолютные отклонения остаточных вариаций ускорения силы тяжести наблюдаются в периоды, когда атмосферное давление достигает максимальных значений (свыше 1 030 мбар), и достигают 7 мкГал, что не превышает требуемую точность определения значения ускорения силы тяжести на пунктах ГФГС в 8 мкГал, полученную в результате использования алгоритма (4.2).

Минимальные отклонения наблюдаются в периоды с апреля по июль и с октября по декабрь. Это обусловлено тем, что в эти временные промежутки наблюдаются наименьшие колебания в вариациях атмосферного давления и отсутствуют экстремумы (минимум или максимум) уровня грунтовых вод. В связи с этим рекомендуется выполнять наблюдения ускорения силы тяжести в весенне-летний и осенний периоды.

В связи с этим, можно сделать следующие выводы:

- результаты использования разработанной комплексной методики учета наприливных эффектов (а именно результаты моделирования временных вариаций ускорения силы тяжести в режиме пост-обработки) удовлетворяют требованиям к определениям значения ускорения силы тяжести на пунктах ГФГС;
- максимальные ошибки наблюдаются при значениях атмосферного давления свыше 1 030 мкГал, в связи с чем можно рекомендовать выполнять определения ускорения силы тяжести при атмосферном давлении ниже данной отметки;
- рекомендуется выполнять наблюдения ускорения силы тяжести в периоды с апреля по июль и с октября по декабрь.

4.3.2 По результатам многолетних абсолютных определений

В качестве независимой оценки разработанной комплексной методики выполнено сравнение локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести с результатами абсолютных определений ускорения силы тяжести, проводимых с сентября 2019 г. по январь 2023 г. Для наглядности на рисунке 4.2 представлены прогнозные значения неприливных вариаций ускорения силы тяжести и результаты абсолютных определений, выполненных баллистическим гравиметром FG5 на пункте TSNI, с учетом локальных приливов.

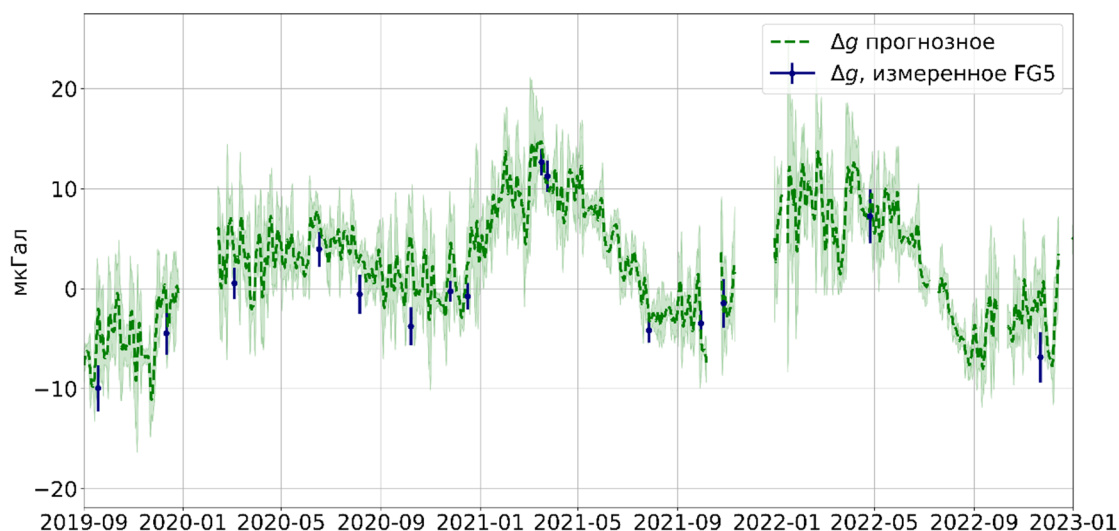


Рисунок 4.2 – Непривливаемые прогнозные вариации ускорения силы тяжести и результаты абсолютных определений

Анализируя представленный график, можно сделать вывод, что временные вариации ускорения силы тяжести, вычисленные по результатам моделирования по предлагаемой комплексной методике, описывают фактические временные вариации ускорения силы тяжести в пределах точности измерений и моделирования.

4.4 Оценка влияния непривливаемых вариаций на геодезическую высоту

На сегодняшний день одной из актуальных задач геодезии является повышение точности результатов спутниковых определений. Средняя квадратическая погрешность определения геодезических высот на постоянно действующих пунктах Фундаментальной астрономо-геодезической сети (далее – ФАГС) составляет 5–10 мм. Однако при мониторинговых наблюдениях отмечается непостоянство в значении геодезической высоты пункта, достигающие 30 мм. Подобные временные вариации могут быть обусловлены различными факторами, в том числе изменением параметров гравитационного поля Земли.

Как было отмечено ранее, изменение ускорения силы тяжести со временем вызывает нагрузочные деформации земной поверхности, вследствие чего может изменяться геодезическая высота пункта наблюдений. Фактический прогиб земной

поверхности зависит от плотности и упругости земной коры в районе наблюдений. Исследования влияния изменения значения силы тяжести на изменения геодезической высоты в последние годы активно ведутся ведущими зарубежными исследовательскими группами [32, 88].

В связи с вышесказанным, возникает необходимость исследования влияния локальных временных вариаций ускорения силы тяжести на геодезическую высоту. Для этого рассмотрим результаты определений геодезической высоты на постоянно действующем пункте ФАГС «ЦНИИГАиК». В результаты уже введена поправка за приливные изменения и за движение полюсов, аналогичная одноименным поправкам в значения силы тяжести. Таким образом, можно предположить, что временные вариации геодезической высоты могут быть вызваны неприливым эффектом. Неприливные вариации ускорения силы тяжести и вариации геодезической высоты представлены на рисунке 4.3.

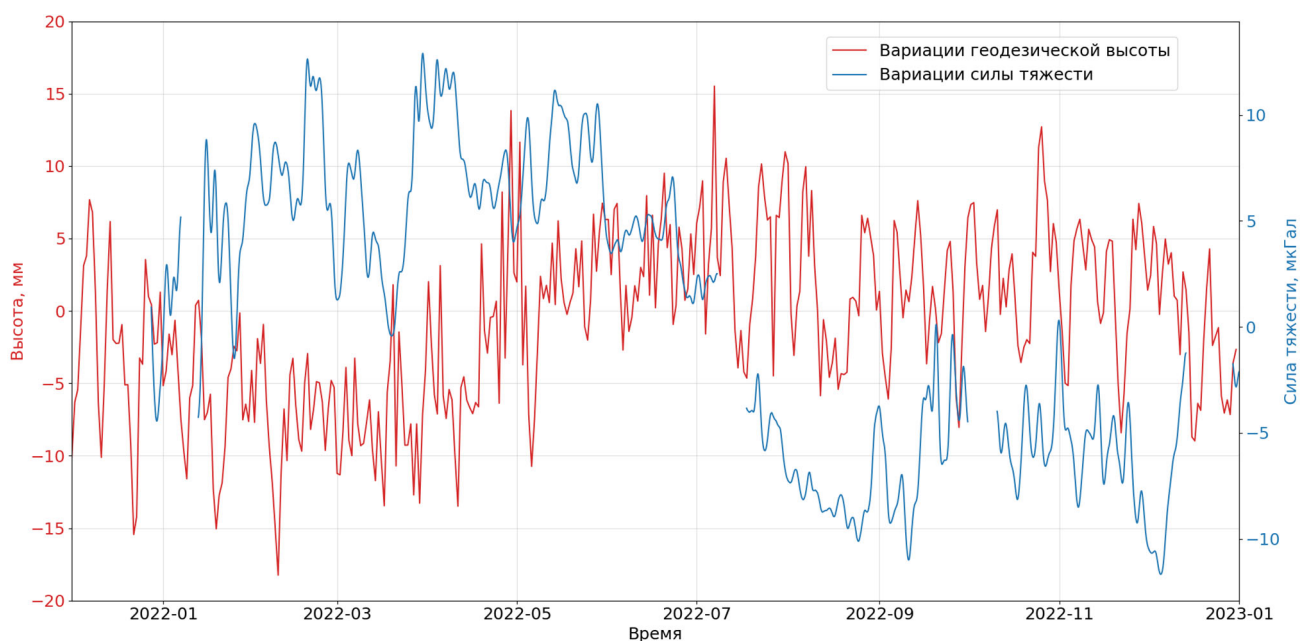


Рисунок 4.3 – Вариации ускорения силы тяжести и геодезической высоты на пункте «ЦНИИГАиК»

Результаты корреляционного анализа свидетельствуют об отсутствии зависимости между изменениями атмосферного давления и геодезической высоты с течением

нием времени. Коэффициент взаимной корреляции составляет менее 0,15. Отсутствие явной зависимости, возможно, вызвано наличием других ошибок определения геодезических высот, имеющих схожие с атмосферным давлением амплитудно-частотные характеристики. При этом наблюдается обратная линейная зависимость между модельными значениями гидрологической нагрузки и изменениями геодезической высоты с течением времени. Также отмечается сдвиг коррелированных значений: модель гидрологии «отстает» от изменений геодезической высоты на двое суток.

С учетом сдвига, около 45 % сигнала вариаций геодезической высоты можно объяснить гидрологической нагрузкой. Созданная линейная модель регрессии позволяет учесть влияние гидрологии на изменение геодезической высоты, что приводит к уменьшению среднего квадратического отклонения геодезической высоты с 6,2 до 4,7 мм, при этом максимальные отклонения геодезической высоты от среднего снижаются с 25 до 15 мм. Поправку в геодезическую высоту за гидрологию предлагается вычислять по формуле:

$$\partial H^t = 0,67 \Delta g_{m2}^{t-48}, \quad (4.3)$$

где ∂H^t – поправка в геодезическую высоту, вычисленная для момента t ;

Δg_{m2}^{t-48} – значение поправки за гидрологический неприливный эффект, вычисленной с использованием модели MERRA2 для момента, отстающего на 48 часов.

Вариации геодезической высоты, полученные после учета гидрологической нагрузки за период с 2016 по 2023 г., представлены на рисунке 4.4.

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- 1 Вариации атмосферного давления невозможно учесть, поскольку атмосферный эффект замаскирован иными ошибками спутниковых определений. Влияние гидрологии на геодезические высоты четко прослеживается и может быть учтено.

2 Точность определения геодезической высоты повышается с 6,2 до 4,3 мм при учете модельных значений поправки за гидрологическую нагрузку. Точность определения геодезической высоты может быть увеличена на 25 %.

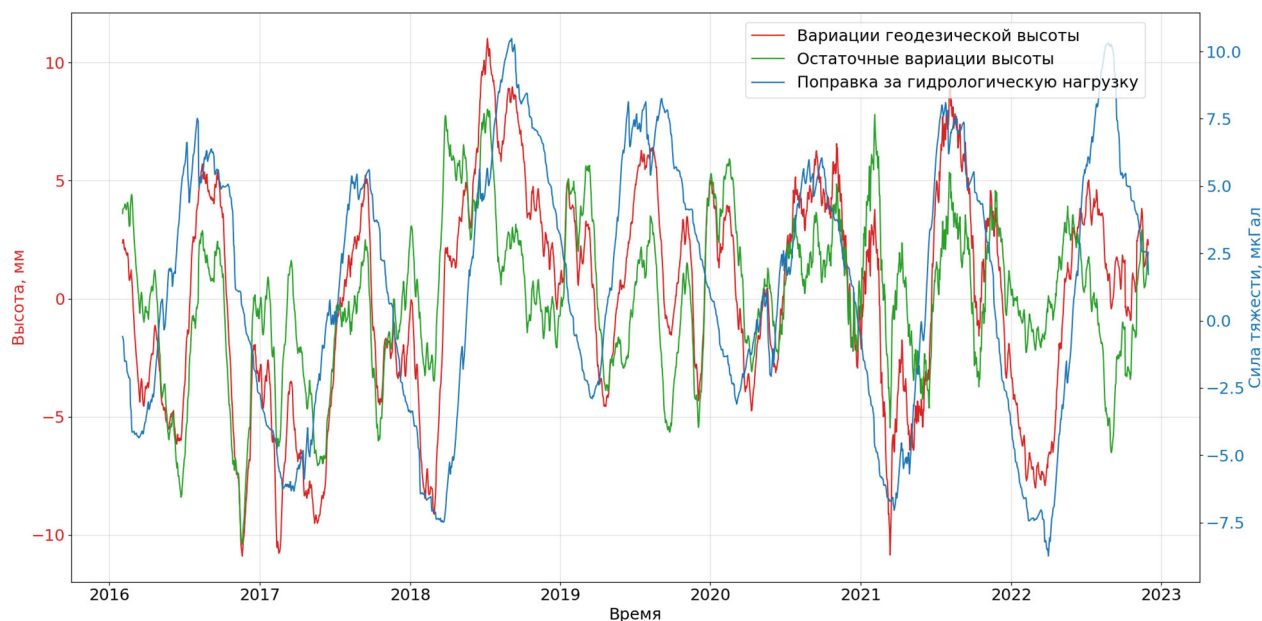


Рисунок 4.4 – Результаты определения геодезической высоты до и после поправки за гидрологию

Выводы по четвертому разделу

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

Результаты априорной и апостериорной оценки точности не противоречат друг другу, что свидетельствует о правильности подхода и корректности разработанной комплексной методики.

Результаты использования разработанной комплексной методики учета наприливных эффектов (а именно результаты моделирования временных вариаций ускорения силы тяжести в режиме пост-обработки) удовлетворяют требованиям к определениям значения ускорения силы тяжести на пунктах ГФГС.

Минимальный и достаточный эталонный интервал для моделирования составляет 12 месяцев наблюдений приливным гравиметром. Далее рекомендуется вы-

полнять периодический контроль по результатам абсолютных определений не реже одного раза в год.

По результатам независимой оценки разработанной комплексной методики временные вариации ускорения силы тяжести, вычисленные по результатам моделирования по предлагаемой комплексной методике, описывают фактические временные вариации ускорения силы тяжести в пределах точности измерений и моделирования.

По результатам выполненных исследований можно рекомендовать выполнять наблюдения ускорения силы тяжести в периоды с апреля по июль и с октября по декабрь и при значении атмосферного давления ниже 1 030 мбар.

Можно рекомендовать применять поправку за неприливные вариации по результатам мониторинговых гравиметрических определений в результаты определений геодезических высот спутниковыми методами. При отсутствии возможности проведения гравиметрических определений можно рекомендовать использовать поправку за гидрологическую нагрузку. На основании проведенных исследований представляется возможным применение комплексной методики учета неприливных эффектов не только в отношении силы тяжести, но и для повышения точности определения геодезических высот спутниковыми методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге выполнения диссертационной работы с целью повышения точности учета временных вариаций ускорения силы тяжести на пунктах ГФГС Российской Федерации была разработана комплексная методика учета неприливных эффектов и проведено ее экспериментальное исследование по данным абсолютных и относительных гравиметрических определений.

Основные научные и практические *результаты* заключаются в решении следующих основных научно-технических вопросов:

- выполнен информационно-аналитический обзор существующих способов исследования временных вариаций ускорения силы тяжести и учета влияния неприливных эффектов, который позволил выявить недостатки существующих способов обработки гравиметрической информации, исследования и учета неприливных эффектов и сформулировать цель и основные научно-технические задачи диссертационного исследования;

- разработанные требования и методики проведения и предварительной обработки результатов мониторинговых наблюдений ускорения силы тяжести относительными гравиметрами приливного типа позволяют получить неприливные вариации в автоматическом режиме;

- произведенная оценка влияния изменения гидрологических и атмосферных параметров на изменения ускорения силы тяжести во времени позволила разработать комплексную методику учета временных вариаций ускорения силы тяжести по локальным данным и создать локальную модель временных вариаций ускорения силы тяжести, что позволяет повысить точность определения мгновенного значения ускорения силы тяжести без проведения непосредственных измерений;

- выполненные экспериментальные исследования разработанной комплексной методики с использованием независимых относительных и абсолютных гравиметрических определений доказывают эффективность разработанной комплексной методики.

Результаты диссертационного исследования рекомендуются к использованию при поддержании и развитии ГФГС, а также для дальнейшего исследования временных вариаций ускорения силы тяжести.

Перспективы дальнейших исследований по данному направлению заключаются в проведении дальнейших исследований на других пунктах ГФГС для создания единой комплексной модели временных вариаций ускорения силы тяжести на территории Российской Федерации.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ГФГС – Государственная фундаментальная гравиметрическая сеть Российской Федерации
- Atl17 – синтетическая глобальная модель земных приливов, полученная с по алгоритму программы ATLANTIDA
- HW95 – модель земных приливов, основанная на приливном каталоге Хартмана – Венцеля 1995 г.
- Tam87 – модель земных приливов, основанная на приливном каталоге Тамуры 1987 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Анализ данных чистых и смешанных аномалий силы тяжести, полученных по результатам работы космических гравиметрических миссий GRACE, GOCE / И. Г. Ганагина, В. Ф. Канушин, Д. Н. Голдобин, И. В. Зверев. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 130–137. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-130-137.

2 Елшеви, М. А. Разработка модели локального геоида в Египте с использованием искусственных нейронных сетей: тематическое исследование на побережье Красного моря / М. А. Елшеви, А. М. Елшештави, Е. А. Чистякова – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрокосмосъемка. – 2021. – Т. 65. – № 6. – С. 615–624. – DOI 10.30533/0536-101X-2021-65-6-615-624.

3 Исследование современных моделей гравитационного поля Земли : монография / В. Ф. Канушин, А. П. Карпик, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, А. М. Косарева, Н. С. Косарев. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 270 с. – Текст : непосредственный.

4 К вопросу о необходимости учета непривливаемых изменений силы тяжести при деформационном мониторинге гидротехнических сооружений / В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Н. С. Косарев, Д. Н. Голдобин. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Строительство. – 2017. – № 11-12 (707-708). – С. 72–80.

5 Ключиков, А. Новая эра в изучении гравитационного поля Земли / А. Ключиков. – Текст : непосредственный // Научные труды Института астрономии РАН. – 2018. – Т. 2. – С. 20–25.

6 Конешов, В. Н. Исследование точности представления гравитационного поля Земли в полярных районах по данным глобальных моделей геопотенциала / В. Н. Конешов, В. Б. Непоклонов. – Текст : непосредственный // Физика Земли. – 2018. – № 3. – С. 123–131. – DOI 10.7868/S0002333718030092.

7 Конешов, В. Н. Сравнение моделей гравитационного поля Земли в переходных районах / В. Н. Конешов, В. Б. Непоклонов, Е. С. Спиридонова. – Текст : непо-

средственный // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 5–23. – DOI 10.21455/gr2021.4-1.

8 Коперник. Галилей. Кеплер. Лаплас и Эйлер. Кетле : биографические повествования / М. Энгельгардт, Ю. Горбунов, Е. Литвинова, А. Арендарь, Е. Предтеченский, Н. Райхесберг. – Челябинск : Урал, 1997. – 456 с. – Текст : непосредственный.

9 Котельников, В. А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи / В. А. Котельников. – Текст : непосредственный // Усп. физ. наук. – 2006. – Т. 176, № 7. – С. 762–770.

10 Крупнейшие землетрясения в мире за последние пять лет. — URL: <http://www.tass.ru/info/15001867>. – Текст : электронный.

11 Мельхиор, П. Земные приливы / П. Мельхиор. – Москва : МИР, 1968. – 482 с. – Текст : непосредственный.

12 Метрология в гравиметрии и международная гравиметрическая система / Л. Ф. Витушкин, Д. В. Иванов, Е. П. Кривцов, В. Б. Непоклонов. – Текст : непосредственный // Законодательная и прикладная метрология. – 2021. – № 3 (171). – С. 8–13.

13 Морозов, А. В. Вариации силы тяжести из-за влияния уровня грунтовых вод на площадке строительства уникальных зданий и сооружений / А. В. Морозов, В. Н. Баранов, В. К. Андреев. – Текст : непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2022. – Т. 4. – С. 92–97.

14 Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы : постановление Российской Федерации от 24.10.2016 № 1240. – URL: <https://www.consultant.ru/>. – Текст : электронный.

15 Об установлении структуры государственной гравиметрической сети и требований к созданию государственной гравиметрической сети, включая требования к гравиметрическим пунктам : приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 29.03.2017 № 141. – URL: <https://www.consultant.ru/>. – Текст : электронный.

16 Огородова, Л. Высшая геодезия. Часть III. Теоретическая геодезия : учебник для вузов / Л. Огородова. – Москва : Геодезкартиздат, 2006. – 384 с. – Текст : непосредственный.

17 Спесивцев, А. А. Разработка методики учета сезонных геодинамических эффектов с использованием данных о гравитационном поле Земли : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 25.00.32 / Спесивцев Александр Александрович. – Москва : ФГБОУ ВПО Московский государственный университет геодезии и картографии, 2017. – 110 с. – Текст : непосредственный.

18 Спиридонов, Е. Новые методы моделирования земных приливов : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук : 25.00.10 / Спиридонов Евгений Александрович. – Москва : ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, 2019. – Текст : непосредственный.

19 Сравнение современных глобальных ультравысокостепенных моделей гравитационного поля Земли / В. Н. Конешов, В. Б. Непоклонов, В. Н. Соловьев, Л. К. Железняк. – Текст : непосредственный // Геофизические исследования. – 2019. – Т. 20, № 1. – С. 13–26. – DOI 10.21455/gr2019.1-2.

20 Сравнение современных глобальных ультровысокостепенных моделей гравитационного поля Земли / В. Н. Конешов, В. Б. Непоклонов, В. Н. Соловьев, Л. К. Железняк. – Текст : непосредственный // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей : сборник научных трудов по материалам 46-й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского, Пермь, 20–26 января 2019 года. – Пермь: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2019. – Выпуск 1 (46). – С. 199–202.

21 Суздалев, А. С. Пространственно-временные вариации гравитационного поля Земли / А. С. Суздалев, И. Г. Вовк, Н. П. Артемьева. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – Т. 3. – С. 20–25.

22 Телеганов, Н. А. Высшая геодезия и основы координатно-временных систем : учебное пособие / Н. А. Телеганов, А. В. Елагин. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 2016 с. – Текст : непосредственный.

23 Торге, В. Гравиметрия : перевод с английского / В. Торге. – Москва : МИР, 1999. – 429 с. – Текст : непосредственный.

24 Хемминг, Р. Цифровые фильтры / Р. Хемминг. – Москва : Сов. радио, 1980. – 224 с. – Текст : непосредственный.

25 Хромов, С. П. Метеорология и климатология: учебник, 7-е издание / С. П. Хромов, М. А. Петросянц. – Москва : Наука, 2006. – 582 с.

26 Чистякова, Е. А. Выявление и учет дрейфа нуля-пункта относительного гравиметра приливного типа / Е. А. Чистякова – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2023. – Т. 85. – № 4. – С. 14–19. – DOI 10.22389/0016-7126-2023-994-4-14-19.

27 Чистякова, Е. А. Исследование атмосферных нагрузочных эффектов по результатам мониторинговых наблюдений силы тяжести на пункте ЦНИИГАиК / Е. А. Чистякова – Текст : непосредственный // Труды научного конгресса 21-го Международного научно-промышленного форума : в 3-х томах. – 2019. – Т. 1. – С. 296–299.

28 Чистякова, Е. А. Эксперимент по созданию опорного пункта фундаментальной гравиметрической сети с учетом требований к пунктам Международной опорой гравиметрической сети IGRF / Е. А. Чистякова, В. Н. Баранов – Текст : непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 6. – С. 129–133. – DOI 10.17513/use.38063.

29 Юзефович, А. П. Поле силы тяжести и его изучение : учебное пособие / А. П. Юзефович. – Москва : Издательство МИИГАиК, 2014. – 194 с. – Текст : непосредственный.

30 A study of the solid earth tides, ocean and atmospheric loadings using an 8-year record (2010–2018) from superconducting gravimeter OSG-060 at Djougou (Benin, West Africa) / J. Hinderer [et al.]. – Текст : непосредственный // Journal of Geodynamics. – 2020. – Vol. 134. – P. 101692.

31 A superconducting gravimeter on the island of Heligoland for the high-accuracy determination of regional ocean tide loading signals of the North Sea / C. Voigt [et al.]. – Текст : непосредственный // *Geophysical Journal International*. – 2023. – Vol. 234, no. 3. – P. 1585–1602.

32 Accounting for spatiotemporal correlations of GNSS coordinate time series to estimate station velocities / C. Benoist, X. Collilieux, P. Rebischung, Z. Altamimi, O. Jamet, L. Métivier, K. Chanard, L. Bel. – Текст : непосредственный // *Journal of Geodynamics*. – 2020. – Volume 135. – P. 101693.

33 Agnew, D. C. *Earth Tides* / D. C. Agnew. – Текст : непосредственный // *Treatise on Geophysics*. – 2007. – Vol. 3. – P. 163–195.

34 Agnew, D. C. *Earth Tides* / D. C. Agnew. – Текст : непосредственный // *Treatise on Geophysics, Second Edition*. – 2015. – Vol. 3. – P. 151–178.

35 Baker, T. Validating Earth and ocean tide models using tidal gravity measurements / T. Baker, M. Bos. – Текст : непосредственный // *Geophysical Journal International*. – 2003. – Feb. – Vol. 152. – P. 468–485.

36 Barzaghi, R. The Remove-Restore Method / R. Barzaghi. – Текст : непосредственный // *Encyclopedia of Geodesy*. – 01/2016. – P. 1–4.

37 Boy, J.-P. Reduction of surface gravity data from global atmospheric pressure loading / J.-P. Boy, P. Gegout, J. Hinderer. – Текст : непосредственный // *Geophysical Journal International*. – 2002. – May. – Vol. 149, no. 2. – P. 534–545.

38 Cartwright, D. E. New Computations of the Tide-generating Potential / D. E. Cartwright, R. J. Tayler. – Текст : непосредственный // *Geophysical Journal International*. – 1971. – Vol. 23, no. 1. – P. 45–73.

39 Cattin, R. GravProcess: An easy-to-use MATLAB software to process campaign gravity data and evaluate the associated uncertainties / R. Cattin, S. Mazzotti, L.-M. Baratin. – Текст : непосредственный // *Computers and Geosciences*. – 2015. – Vol. 81. – P. 20–27.

40 CG-5. Scintrex Autograv System Operation Manual / SCINTREX Limited. – 8th ed. – Concord, Ontario, Canada, 2017. – Текст : непосредственный.

41 Chistiakova, E. A. Observations with gPhone Gravimeter in Moscow / E. A. Chistiakova. – Текст : непосредственный // 5th Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2019). International Association of Geodesy Symposia. Springer. – Т. 153. – 2022. – P. 67–71. – DOI 10.1007/1345_2022_142.

42 Continuous Gravity Observations at Mt. Somma-Vesuvius with a gPhoneX Gravimeter: In-Depth Instrumental Response Characterization and Tidal Model / U. Riccardi [et al.]. – Текст : непосредственный // Pure and Applied Geophysics. – 2023. – Vol. 180. – P. 2625–2650.

43 Crossley, D. Regional gravity variations in Europe from superconducting gravimeters / D. Crossley, J. Hinderer, J.-P. Boy. – Текст : непосредственный // Journal of Geodynamics. – 2004. – Vol. 38, no. 3. – P. 325–342.

44 Dehant, V. Tidal parameters for an inelastic Earth / V. Dehant. – Текст : непосредственный // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1987. – Vol. 49, no. 1. – P. 97–116.

45 Dieminger, W. Atmospheric Tides / W. Dieminger, G. K. Hartmann, R. Leitingner. – Текст : непосредственный // The Upper Atmosphere: Data Analysis and Interpretation / ed. by W. Dieminger, G. K. Hartmann, R. Leitingner. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1996. – P. 97–109.

46 Doodson, A. T. The harmonic development of the tide-generating potential / A. T. Doodson, H. Lamb. – Текст : непосредственный // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. – 1921. – Vol. 100 (704). – P. 305–329.

47 Farrell, W. E. Deformation of the Earth by surface loads / W. E. Farrell. – Текст : непосредственный // Reviews of Geophysics. – 1972. – Vol. 10, no. 3. – P. 761–797.

48 FG5 Absolute Gravimeter User's Manual / Micro-g LaCoste. – Version 1.01. – Lafayette, Colorado, USA, 2011. – Текст : непосредственный.

49 Flechtner, F. Observation of the System Earth from Space – CHAMP, GRACE, GOCE and future missions : GEOTECHNOLOGIEN Science Report No. 20 / F. Flecht-

ner, N. Sneeuw, W.-D. Schuh. – Springer Berlin Heidelberg, 2014. – 230 p. – Текст : непосредственный

50 g9 User's Manual / Micro-g LaCoste. – Lafayette, Colorado, USA, 2012. – Текст : непосредственный.

51 gMonitor User's Manual: gMonitor Gravity Data Acquisition and Processing Software. – Microg LaCoste. – 2013. – 80 p.

52 gPhone : Hardware Manual. – Microg LaCoste, 2010. – P. 94. – Текст : непосредственный.

53 Gravity as a tool to improve the hydrologic mass budget in karstic areas / T. Pivetta [et al.]. – Текст : непосредственный // Hydrology and Earth System Sciences. – 2021. – Vol. 25, no. 11. – P. 6001–6021.

54 Hagan, M. Atmospheric tides / M. Hagan, J. Forbes, A. Richmond. – Текст : непосредственный // Encyclopedia of Atmospheric Sciences / ed. by J. R. Holton. – Oxford : Academic Press, 2003. – P. 159–165.

55 Hinderer, J. Superconducting Gravimetry/ J. Hinderer, D. Crossley, R. Warburton. – Текст : непосредственный // Treatise on Geophysics. – 2015. – Vol. 3– P. 59–115.

56 Imanishi, Y. Inertial effects due to eruption-induced atmospheric disturbances identified by superconducting gravimeter observations at Matsushiro, Japan / Y. Imanishi. – Текст : непосредственный // Earth, Planets and Space. – 2022. – Vol. 74, no. 1. – P. 54.

57 Jean, Y. Combination of GRACE monthly gravity field solutions from different processing strategies / Y. Jean, U. Meyer, A. Jäggi. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2018. – Feb. – Vol. 92. – P. 1313–1328.

58 Longman, I. M. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun / I. M. Longman. – Текст : непосредственный // Journal of Geophysical Research. – 1959. – Vol. 64. – P. 2351–2355.

59 Long-term and seasonal gravity changes at the Strasbourg station and their relation to crustal deformation and hydrology / M. Amalvict, J. Hinderer, J. Mäkinen,

S. Rosat. – Текст : непосредственный // *Journal of Geodynamics*. – 2004. – Т. 38. – P. 343–353.

60 M'emin, A. Correcting GPS Measurements for Non-Tidal Loading / A. M'emin, J.-P. Boy, A. Santamar'ia-G'omez. – Текст : непосредственный // *GPS Solut.* – Berlin, Heidelberg, 2020. – Т. 24, № 2.

61 Merriam, J. An investigation of dispersive effects on tidal gravity measurements at Alice Springs / J. Merriam. – Текст : непосредственный // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1981. – Vol. 27, no. 3. – P. 187–193.

62 Merriam, J. B. Atmospheric pressure and gravity / J. B. Merriam. – Текст : непосредственный // *Geophysical Journal International*. – 1992. – Vol. 109, no. 3. – P. 488–500.

63 Meurers, B. Scintrex CG5 used for superconducting gravimeter calibration / B. Meurers. – Текст : непосредственный // *Geodesy and Geodynamics*. – 2018. – Vol. 9, no. 3. – P. 197–203.

64 Michel, A. Hydrological Loading in Western Europe Estimated from the Inversion of GPS Displacements computed with GINS/PC software / A. Michel, J. P. Boy, F. Perosanz. – Текст : непосредственный // *AGU Fall Meeting Abstracts*. – 2019. – G53B–0622.

65 Mikolaj, M. Modelling of global mass effects in hydrology, atmosphere and oceans on surface gravity / M. Mikolaj, B. Meurers, A. Güntner. – Текст : непосредственный // *Computers and Geosciences*. – 2016. – Vol. 93.

66 Mikolaj, M. Resolving Geophysical Signals by Terrestrial Gravimetry: A Time Domain Assessment of the Correction-Induced Uncertainty / M. Mikolaj, M. Reich, A. Güntner. – Текст : непосредственный // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2019. – Vol. 124, no. 2. – P. 2153–2165.

67 Mitigation of ionospheric signatures in Swarm GPS gravity field estimation using weighting strategies / L. Schreiter [et al.]. – Текст : непосредственный // *Annales Geophysicae*. – 2019. – Vol. 37, no. 1. – P. 111–127.

68 Modelling atmospheric and induced non-tidal oceanic loading contributions to surface gravity and tilt measurements / J.-P. Boy [et al.]. – Текст : непосредственный // Journal of Geodynamics. – 2009. – Vol. 48, no. 3. – P. 182–188.

69 Performance of superconducting gravimeters from long-period seismology to tides / S. Rosat [et al.]. – Текст : непосредственный // Journal of Geodynamics. – 2004. – Vol. 38, no. 3. – P. 461–476.

70 Performance Test of gPhone (#123, #126, and #127) in Kyoto and ITB Jatinangor / E. J. Wahyudi [et al.]. – Текст : непосредственный // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Aug. – Vol. 739, no. 1. – P. 012033.

71 Rawsthorne, H. M. An historic analysis of tide prediction machines using an adapted prosopographic approach and digital humanities tools / H. M. Rawsthorne. – 2019. – 48 p. – Текст : непосредственный.

72 Reducing hydrological disturbances in absolute gravity observations by combining global hydrological models with a regional run-off model / B. Bramanto [и др.]. – Текст : непосредственный // Geophysical Journal International. – 2022. – Т. 230, № 2. – С. 976–994.

73 Riccardi, U. Comparison of the Micro-g LaCoste gPhone-054 spring gravimeter and the GWR-C026 superconducting gravimeter in Strasbourg (France) using a 300-day time series / U. Riccardi, S. Rosat, J. Hinderer. – Текст : непосредственный // Metrologia. – 2011. – Т. 48, № 1. – С. 28.

74 Savitzky, A. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures / A. Savitzky, M. J. E. Golay. – Текст : непосредственный // Analytical Chemistry. – 1964. – Jan. – Vol. 36. – P. 1627–1639.

75 Schilling, M. Accuracy Estimation of the IfE Gravimeters Micro-g LaCoste gPhone-98 and ZLS Burris Gravity Meter B-64 / M. Schilling, O. Gitlein. – Текст : непосредственный // IAG 150 Years / ed. by C. Rizos, P. Willis. – Cham : Springer International Publishing, 2016. – P. 249–256.

76 Schindelegger, M. Chapter 16 – Atmospheric tides – An Earth system signal / M. Schindelegger, T. Sakazaki, M. Green. – Текст : непосредственный // A Journey Through Tides / ed. by M. Green, J. C. Duarte. – Elsevier, 2023. – P. 389–416.

77 Schueller, K. Theoretical basis for Earth Tide analysis with the new ETERNA34-ANA-V4. 0 program / K. Schueller. – Текст : непосредственный // Bull. Inf. Marées Terrestres. – 2015. – Vol. 149, no. 12. – P. 024–012.

78 Schwiderski, E. W. On charting global ocean tides / E. W. Schwiderski. – Текст : непосредственный // Reviews of Geophysics. – 1980. – Vol. 18, no. 1. – P. 243–268.

79 Seasonal changes of Earth's gravitational field due to solid precipitation / I. G. Ganagina, V. F. Kanushin, D. N. Goldobin [et al.]. – Текст : непосредственный // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering : 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Novosibirsk. – Novosibirsk : SPIE, 2019. – Vol. 11208 – P. 112088T. – DOI 10.1117/12.2540317.

80 Seasonal Variations in Hydrological Influences on Gravity Measurements Using gPhones / K. Kang [et al.]. – Текст : непосредственный // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. – 2011. – Apr. – Vol. 22.

81 System Interface Module (SIMx) User's Manual / Micro-g LaCoste. – Version 1.0. – Lafayette, Colorado, USA, 2013. – Текст : непосредственный.

82 Tamura, Y. A computer program for calculating the tide-generating force / Y. Tamura. – Текст : непосредственный // Publications of the International Latitude Observatory at Mizusawa. – 1982. – Vol. 16, no. 1. – P. 1–20.

83 Tamura, Y. A harmonic development of the tide-generating potential / Y. Tamura. – Текст : непосредственный // Marées terrestres (Bruxelles). – 1987. – No. 99. – P. 6813–6855.

84 The Impact of Atmospheric Correction on Brazilian Earth Tide Models / D. Arana [et al.]. – Текст : непосредственный // Pure and Applied Geophysics. – 2020. – Vol. 177, no. 9. – P. 4377–4389.

85 The impact of the nonuniform distribution of atmospheric pressure to changes in the Earth's global gravity field / I. G. Ganagina, V. F. Kanushin, D. N. Goldobin [et al.]. – Текст : непосредственный // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering : 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Novosibirsk. – Novosibirsk : SPIE, 2019. – Vol. 11208. – P. 1120896. – DOI 10.1117/12.2540688.

86 Timmen, L. Observed secular gravity trend at Onsala station with the FG5 gravimeter from Hannover / L. Timmen, A. Engfeldt, H.-G. Scherneck. – Текст : непосредственный // Journal of Geodetic Science. – 2015. – Vol. 5, no. 1. – P. 18–25.

87 Timmen, L. Worldwide Synthetic Gravity Tide Parameters / L. Timmen, H.-G. Wenzel. – Текст : непосредственный // Gravity and Geoid. International Association of Geodesy Symposia. – 1995. – Vol. 113. – P. 92–101.

88 Transient crustal deformation from karst aquifers hydrology in the Apennines (Italy) / F. Silverii, N. D'Agostino, A. A. Borsa, S. Calcaterra, P. Gambino, R. Giuliani, M. Mattone. – Текст : непосредственный // Earth Planet Sc. – 2019. – 506. – P. 23–37.

89 Van Camp, M. Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides / M. Van Camp, P. Vauterin. – Текст : непосредственный // Computers and Geosciences. – 2005. – Vol. 31, no. 5. – P. 631–640.

90 Van Camp, M. Uncertainty of absolute gravity measurements / M. Van Camp, S. D. P. Williams, O. Francis. – Текст : непосредственный // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2005. – Vol. 110, B5.

91 Van Dam, T. M. Displacements of the Earth's surface due to atmospheric loading: Effects on gravity and baseline measurements / T. M. Van Dam, J. M. Wahr. – Текст : непосредственный // Journal of Geophysical Research. – 1987. – Vol. 92, B2. – P. 1281–1286.

92 Wahr, J. M. Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth / J. M. Wahr. – Текст : непосредственный // Geophysical Journal International. – 1981. – Vol. 64, no. 3. – P. 677–703.

93 Warburton, R. Initial Results With the New GWR iGrav™ Superconducting Gravity Meter / R. Warburton, H. Pillai, R. Reineman. – 2010. – July.

94 Wenzel, H.-G. The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30 / H.-G. Wenzel. – Текст : непосредственный // Bull. Inf. Marées Terrestres. – 1996. – Vol. 124. – P. 9425–9439.

95 Wenzel, H.-G. Tide-generating potential for the earth / H.-G. Wenzel. – Текст : непосредственный // Vol. 66. – 04/2006. – P. 9–26.

96 Zhang, M. Precise Correction of Gravity Data for the Effect of Local Atmospheric Loading at Beijing Seismic Station, China / M. Zhang, Q. Wu, Y.-t. Teng. – Текст : непосредственный // Pure and Applied Geophysics. – 2021. – Vol. 178, no. 2. – P. 465–475.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

ЛОКАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ЗЕМНЫХ ПРИЛИВОВ

Latitude: 55.8550 deg, longitude: 37.5160 deg, azimuth: 0.0000 deg.
Tamura (1987) TGP, threshold: 0.100D-06 1200 waves.
WAHR-DEHANT-ZSCHAU inelastic Earth model used.
 UNITY window used for least squares adjustment.
 Sampling interval: 3600. s
 Numerical filter is no filter with 1 coefficients.

Estimation of noise by least squares method.
 White noise structure assumed.

Adjusted tidal parameters :

from	to	wave	<u>theor.</u> <u>ampl.</u>	<u>ampl.fac.</u>	<u>stdv.</u>	<u>ph.</u> lead	<u>stdv.</u>
[cpd]	[cpd]	[nm/s**2]				[deg]	[deg]
0.000146	0.003426	SA	28.3648	3.48514	0.07549	147.6624	0.1714
0.004709	0.010952	SSA	31.4691	0.83643	0.01610	-75.2597	1.1258
0.025811	0.031745	<u>MSM</u>	6.8345	0.96020	0.07079	24.4212	4.1932
0.033406	0.044653	MM	35.7366	1.14863	0.01344	0.7086	0.6632
0.060131	0.068640	<u>MSF</u>	5.9273	1.24095	0.07495	6.2823	3.4647
0.069845	0.080798	<u>MF</u>	67.6289	1.15437	0.00529	0.8615	0.2622
0.096422	0.104932	<u>MSTM</u>	2.4593	1.07856	0.18217	12.1446	9.6940
0.106136	0.115412	<u>MTM</u>	12.9482	1.16551	0.02715	5.6176	1.3418
0.130192	0.143814	<u>MSQM</u>	2.0678	1.44431	0.17314	-32.1985	6.9176
0.145166	0.249952	<u>MQM</u>	1.7133	0.94417	0.19808	-0.6470	12.0272
0.721499	0.833113	<u>SGQ1</u>	2.1327	1.11532	0.17226	4.3093	8.8516
0.851181	0.859691	<u>2Q1</u>	7.3146	1.25454	0.05914	8.7162	2.7019
0.860895	0.870024	<u>SGM1</u>	8.8286	1.19156	0.04449	4.1470	2.1393
0.887326	0.896130	<u>Q1</u>	55.2826	1.14302	0.00746	6.7391	0.3736
0.897806	0.906316	<u>RO1</u>	10.5009	1.18363	0.03539	7.7990	1.7127
0.921940	0.930450	<u>O1</u>	288.7393	1.15479	0.00140	7.0957	0.0696
0.931963	0.940488	<u>TAU1</u>	3.7660	1.02060	0.13844	0.9738	7.7691
0.958085	0.966757	<u>NO1</u>	22.7084	1.16385	0.01926	7.5110	0.9483
0.968564	0.974189	<u>CHI1</u>	4.3430	1.21099	0.09047	0.3217	4.2815
0.989048	0.998029	<u>P1</u>	134.3497	1.15096	0.00332	7.2583	0.1655
0.999852	1.013690	<u>S1K1</u>	406.0847	1.13589	0.00102	7.6362	0.0516
1.028549	1.034468	<u>TET1</u>	4.3424	1.14326	0.09017	6.6121	4.5174
1.036291	1.044801	<u>J1</u>	22.7078	1.14323	0.01968	7.4208	0.9859
1.064840	1.071084	<u>SO1</u>	3.7666	1.12008	0.10612	5.4231	5.4308
1.072582	1.080945	<u>OO1</u>	12.4213	1.15463	0.02651	8.2128	1.3155
1.099160	1.216398	<u>NU1</u>	2.3782	1.25168	0.13509	10.0131	6.1864
1.719380	1.837970	<u>EPS2</u>	1.7495	1.16231	0.26575	10.1460	13.1094
1.853919	1.872143	<u>2N2</u>	7.2413	1.14071	0.05184	11.1196	2.6026
1.888386	1.906463	<u>N2</u>	45.3445	1.18152	0.01077	14.7761	0.5225
1.923765	1.942754	<u>M2</u>	236.8359	1.16928	0.00190	14.5509	0.0933
1.958232	1.963709	<u>LAM2</u>	1.7464	1.01644	0.26112	11.3080	14.7163
1.965826	1.976927	<u>L2</u>	6.6942	1.17020	0.03385	16.6473	1.6575
1.991786	2.000767	<u>S2</u>	110.1885	1.15824	0.00403	14.3743	0.1994
2.002590	2.013690	<u>K2</u>	29.9456	1.15261	0.01253	14.0112	0.6228
2.031287	2.047391	<u>ETA2</u>	1.6743	1.48370	0.25398	10.5119	9.8087
2.067578	2.182844	<u>2K2</u>	0.4385	1.37353	0.62547	0.7424	26.0864
2.753243	3.081255	M3	2.6147	1.05401	0.16562	22.7631	9.0047

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

ЧИСЛА ЛЯВА, ВЫЧИСЛЕННЫЕ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЗЕМНЫХ ПРИЛИВОВ

Routine ETLOVE, version 1996.05.25.

Latitude dependent parameters for an elliptical, rotating,
inelastic and oceanless Earth from Wahr-Dehant-Zschau model.

frequency of wave O1: 13.943036 deg per hour
resonance frequency : 15.073729 deg per hour

resonance factor for G: -0.000625
resonance factor for h: -0.002505
resonance factor for k: -0.001261
resonance factor for l: 0.000078
resonance factor for T: 0.001244

Latitude dependent elastic parameters

ellipsoidal latitude: 55.8550 deg

G is gravimetric factor delta
h is LOVE-number h
k is LOVE-number k
l is SHIDA-number l
T is tilt factor gamma

degree	order	G	h	k	l	T
2	0	1.162822	0.617774	0.305891	0.084757	0.688116
2	1	1.152244	0.607661	0.302421	0.081927	0.694761
2	2	1.156731	0.614934	0.306342	0.081931	0.691407
3	0	1.072800	0.294600	0.094200	0.014900	0.799600
3	1	1.072800	0.294600	0.094200	0.014900	0.799600
3	2	1.072800	0.294600	0.094200	0.014900	0.799600
3	3	1.068539	0.295878	0.097182	0.014900	0.801304
4	0	1.036300	0.180700	0.042700	0.010000	0.862000
4	1	1.036300	0.180700	0.042700	0.010000	0.862000
4	2	1.036300	0.180700	0.042700	0.010000	0.862000
4	3	1.036300	0.180700	0.042700	0.010000	0.862000
4	4	1.034649	0.181486	0.046160	0.010000	0.864674

Geodetic coefficients and phases for component 0
azimuth: 0.000000 degree

<u>GC</u>	2,0	367.45464182	nm/s**2	180.000000 deg
<u>GC</u>	2,1	563.57491609	nm/s**2	180.000000 deg
<u>GC</u>	2,2	191.74919699	nm/s**2	180.000000 deg
<u>GC</u>	3,0	212.48588045	nm/s**2	180.000000 deg
<u>GC</u>	3,1	1031.50577932	nm/s**2	180.000000 deg
<u>GC</u>	3,2	628.44973088	nm/s**2	180.000000 deg
<u>GC</u>	3,3	174.78061316	nm/s**2	180.000000 deg

<u>GC</u>	4,0	-272.56524048	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	4,1	1223.41487968	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	4,2	1252.41443739	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	4,3	577.04081789	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	4,4	139.06034652	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	5,0	-911.93544831	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	5,1	863.50333290	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	5,2	1813.58996028	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	5,3	1239.02442987	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	5,4	475.68211853	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	5,5	102.56630584	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	6,0	-1389.34524474	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	6,1	-92.00910308	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	6,2	1970.68694426	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	6,3	2023.34855608	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	6,4	1091.15154162	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	6,5	366.07271260	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg
<u>GC</u>	6,6	72.07125152	<u>nm/s**2</u>	180.000000	deg

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОЙ
НЕПРИЛИВНОГО ЭФФЕКТА

Оцениваемый фактор	Параметры модели	Стандартная ошибка определения параметров	t-статистики	Коэффициент значимости регрессии, p
Атмосферное давление	-0,259874	0,005442	-47,75752	<0,0001
Линейный тренд	0,001080	$2,73 \cdot 10^{-5}$	39,52180	<0,0001
Линейный тренд в квадрате	$-3,61 \cdot 10^{-8}$	$8,28 \cdot 10^{-10}$	-43,59244	<0,0001
Часовая цикличность (0:00)				
1:00	0,037681	0,031779	1,185740	0,2357
2:00	0,144098	0,045492	3,167535	0,0015
3:00	0,272460	0,056291	4,840235	<0,0001
4:00	0,408807	0,064974	6,291825	<0,0001
5:00	0,444871	0,072554	6,131549	<0,0001
6:00	0,431160	0,079602	5,416457	<0,0001
7:00	0,389723	0,085349	4,566232	<0,0001
8:00	0,381491	0,090487	4,215964	<0,0001
9:00	0,391685	0,096710	4,050097	0,0001
10:00	0,334118	0,101656	3,286757	0,0010
11:00	0,396190	0,106672	3,714088	0,0002
12:00	0,396164	0,105222	3,765036	0,0002
13:00	0,409069	0,104999	3,895911	0,0001
14:00	0,433646	0,099677	4,350531	<0,0001
15:00	0,462743	0,094682	4,887339	<0,0001
16:00	0,472856	0,089912	5,259109	<0,0001
17:00	0,413107	0,084953	4,862783	<0,0001
18:00	0,366437	0,080147	4,572051	<0,0001
19:00	0,299413	0,074891	3,997994	0,0001
20:00	0,182019	0,067736	2,687165	0,0072
21:00	0,093707	0,060330	1,553241	0,1204
22:00	0,035931	0,050258	0,714938	0,4747
23:00	0,002592	0,039538	0,065552	0,9477

Оцениваемый фактор	Параметры модели	Стандартная ошибка определения параметров	t-статистики	Коэффициент значимости регрессии, p
Месячная цикличность (январь)				
февраль	1,863668	0,255930	7,281950	<0,0001
март	3,777319	0,286500	13,18435	<0,0001
апрель	3,520799	0,312010	11,28425	<0,0001
май	4,508454	0,373913	12,05750	<0,0001
июнь	3,761690	0,159444	23,59257	<0,0001
июль	-0,262769	0,475108	-0,553073	0,5802
август	-4,780924	0,203881	-23,44962	<0,0001
сентябрь	-4,218871	0,228632	-18,45264	<0,0001
октябрь	-2,603618	0,181673	-14,33132	<0,0001
ноябрь	-1,083799	0,186379	-5,815015	<0,0001
декабрь	-0,272755	0,205510	-1,327207	0,1845
Константа	257,1658	5,481503	46,91519	<0,0001
Статистики модели				
Коэффициент детерминации R^2	0,849131	F-статистика		2946,012
Скорректированный коэффициент R^2	0,848843	P (F-статистика)		<0,0001

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ
НЕПРИЛИВНОГО ЭФФЕКТА

Оцениваемый фактор	Параметры модели	Стандартная ошибка определения параметров	t-статистики	Коэффициент значимости регрессии, p
Гидрологическая нагрузка				
Гидрология	30,99243	5,674834	5,461381	<0,0001
Гидрология (-1 час)	-24,99603	5,786529	-4,319693	<0,0001
Гидрология (-24 часа)	-3,209027	0,807961	-3,971759	0,0001
Гидрология (-48 часов)	-2,013569	0,458362	-4,392965	<0,0001
Линейный тренд	-0,000141	9,07*10 ⁻⁶	-15,51679	<0,0001
Часовая цикличность (0:00)				
1:00	0,051900	0,045969	1,129027	0,2589
2:00	0,171131	0,066889	2,558424	0,0105
3:00	0,301719	0,082629	3,651515	0,0003
4:00	0,448709	0,096015	4,673312	<0,0001
5:00	0,507823	0,108620	4,675207	<0,0001
6:00	0,525161	0,120796	4,347516	<0,0001
7:00	0,520028	0,132034	3,938596	0,0001
8:00	0,554966	0,141773	3,914478	0,0001
9:00	0,612931	0,150399	4,075373	<0,0001
10:00	0,604083	0,157751	3,829339	0,0001
11:00	0,694306	0,162198	4,280608	<0,0001
12:00	0,689084	0,158164	4,356769	<0,0001
13:00	0,660524	0,153580	4,300849	<0,0001
14:00	0,627105	0,144090	4,352187	<0,0001
15:00	0,591525	0,136109	4,345969	<0,0001
16:00	0,542149	0,129250	4,194569	<0,0001
17:00	0,442292	0,122302	3,616378	0,0003
18:00	0,368285	0,114366	3,220236	0,0013
19:00	0,291144	0,105531	2,758849	0,0058
20:00	0,167172	0,094845	1,762572	0,0780
21:00	0,074009	0,083214	0,889384	0,3738
22:00	0,016830	0,068684	0,245032	0,8064
23:00	-0,017913	0,051259	-0,349462	0,7267

Оцениваемый фактор	Параметры модели	Стандартная ошибка определения параметров	t-статистики	Коэффициент значимости регрессии, p
Месячная цикличность (январь)				
февраль	2,822069	0,499752	5,646939	<0,0001
март	2,721898	0,521404	5,220321	<0,0001
апрель	5,732774	0,472646	12,12910	<0,0001
май	7,624244	0,505129	15,09367	<0,0001
июнь	7,581414	0,507123	14,94985	<0,0001
июль	6,096469	0,534446	11,40707	<0,0001
август	4,302218	0,545304	7,889576	<0,0001
сентябрь	4,570107	0,517767	8,826567	<0,0001
октябрь	4,001754	0,554682	7,214496	<0,0001
ноябрь	2,210718	0,506384	4,365693	<0,0001
декабрь	1,621249	0,495941	3,269039	0,0011
Недельная цикличность (воскресенье)				
понедельник	0,041761	0,273638	0,152615	0,8787
вторник	-0,245609	0,283645	-0,865902	0,3866
среда	0,062621	0,268850	0,232921	0,8158
четверг	0,245320	0,268264	0,914474	0,3605
пятница	0,207257	0,275623	0,751957	0,4521
суббота	-0,029858	0,261861	-0,114023	0,9092
Константа	-3,967044	0,483210	-8,209768	<0,0001
Статистики модели				
Коэффициент детерминации R^2	0,686134	F -статистика		938,1148
Скорректированный коэффициент R^2	0,685402	P (F -статистика)		<0,0001

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
НЕПРИЛИВНОГО ЭФФЕКТА

Оцениваемый фактор	Параметры модели	Стандартная ошибка опре- деления пара- метров	t-статистики	Коэффициент значимости ре- грессии, p
Гидрология	0,673630	0,018735	35,95477	<0,0001
Атмосферное давление	-0,454732	0,087467	-5,198885	<0,0001
Атмосферное давление (-1 час)	0,170100	0,087328	1,947838	0,0514
Линейный тренд	0,000362	$3,19 \cdot 10^{-5}$	11,33769	<0,0001
Линейный тренд в квадрате	$-1,51 \cdot 10^{-8}$	$1,01 \cdot 10^{-9}$	-14,94183	<0,0001
Часовая цикличность (0:00)				
1:00	0,005933	0,027304	0,217303	0,8280
2:00	0,118722	0,037244	3,187666	0,0014
3:00	0,252274	0,046572	5,416897	<0,0001
4:00	0,391705	0,053519	7,318968	<0,0001
5:00	0,429453	0,058777	7,306491	<0,0001
6:00	0,417170	0,063381	6,581925	<0,0001
7:00	0,376312	0,067061	5,611460	<0,0001
8:00	0,360928	0,070017	5,154898	<0,0001
9:00	0,364154	0,074012	4,920232	<0,0001
10:00	0,304463	0,077826	3,912127	0,0001
11:00	0,363840	0,081869	4,444156	<0,0001
12:00	0,368764	0,080058	4,606212	<0,0001
13:00	0,388915	0,079694	4,880093	<0,0001
14:00	0,424133	0,075781	5,596795	<0,0001
15:00	0,459848	0,072698	6,325481	<0,0001
16:00	0,476921	0,070102	6,803221	<0,0001
17:00	0,415505	0,066813	6,218903	<0,0001
18:00	0,362506	0,062823	5,770283	<0,0001
19:00	0,287903	0,058568	4,915685	<0,0001
20:00	0,168159	0,052990	3,173382	0,0015

Оцениваемый фактор	Параметры модели	Стандартная ошибка опре- деления пара- метров	t-статистики	Коэффициент значимости ре- грессии, p
21:00	0,075771	0,047068	1,609809	0,1075
22:00	0,010581	0,038710	0,273330	0,7846
23:00	-0,027870	0,029874	-0,932917	0,3509
Месячная цикличность (январь)				
февраль	1,749206	0,236484	7,396735	<0,0001
март	3,994362	0,214050	18,66089	<0,0001
апрель	4,046141	0,205710	19,66914	<0,0001
май	5,401479	0,272387	19,83014	<0,0001
июнь	5,631229	0,204730	27,50564	<0,0001
июль	3,986685	0,330411	12,06585	<0,0001
август	3,052809	0,297073	10,27628	<0,0001
сентябрь	3,452981	0,280209	12,32288	<0,0001
октябрь	4,303753	0,269971	15,94156	<0,0001
ноябрь	4,251909	0,250095	17,00118	<0,0001
декабрь	3,375663	0,267112	12,63761	<0,0001
Константа	281,1752	4,353785	64,58179	<0,0001
Статистики модели				
Коэффициент детерминации R^2	0,914413	F -статистика		5300,625
Скорректированный коэффициент R^2	0,914240	p (F -статистика)		<0,0001

ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ
ОБРАБОТКИ МОНИТОРИНГОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

```
import os.path
import codecs
import pandas as pd
import glob
5 import re
from threading import Thread, Semaphore, Lock

threads_count = 16
path = '...'
# dir = ...'
10

def read_gphone_tsf(fname, ver):
    """
    Worker function
    """
15     with semaphore:
        cols = ['year', 'month', 'day', 'hour', 'minute', 'second',
                'g', 'g_result', 'c_tide', 'long_level', 'cross_level',
                'out_temp', 'in_temp',
                'pres', 'sensor_pres', 'beam_position', 'c_level',
20     'c_drift', 'c_sensor_pres',
                'c_baro', 'c_polar', 'c_ocean', 'velocity', 'position']

        skiprows = 45

25     if ver > 1:
        cols = ['year', 'month', 'day', 'hour', 'minute', 'second',
                'g', 'g_result', 'c_tide', 'long_level', 'cross_level',
                'out_temp', 'in_temp',
                'pres', 'sensor_pres', 'beam_position', 'c_level',
30     'c_drift', 'c_sensor_pres',
                'c_baro', 'c_temp', 'c_temp_in', 'c_polar', 'c_ocean',
                'velocity', 'position']
```

```

        skiprows = 90
35
        df = pd.read_table(fname, delim_whitespace=True,
                           skiprows=skiprows,
                           names=cols,
                           index_col=False,
40                           parse_dates={'time': [0, 1, 2, 3, 4, 5]}, en-
coding='ISO-8859-1')

        df['time'] = pd.to_datetime(df.time, format='%Y %m %d %H %M %S')
        df = df.set_index('time')
45

        with lock:
            list_.append(df)

            print(fname)
50

            return True

def get_file_version(fname):
    """
55    Get file version function
    """
    with codecs.open(fname, 'r', encoding='ISO-8859-1') as f:
        for i in range(3):
            line = f.readline().rstrip()
60

            ver = re.search(r'(\d\.\d+)\$', line).groups()[0]

            return float(ver)

65

    # %%
    # чтение всех файлов в папке

    dir = glob.glob(path + "*")
70    dir.sort()

    for diri in dir:
        semaphore = Semaphore(threads_count)

```

```

lock = Lock()
75 threads = []
    list_ = []
    k = 0

    if not os.path.exists(diri):
80         print('Папка отсутствует или пуста')
        exit()

    allFiles = glob.glob(diri + "/*.tsf")
    allFiles.sort()
85 frame = pd.DataFrame()

    for file_ in allFiles:
        # function_name = read_gphone_tsf
        ver = get_file_version(file_)
90
        # if ver > 1:
        #     function_name = read_gphone_tsf_v2

        thread = Thread(target=read_gphone_tsf, args=(file_, ver,))
95 thread.start()
        threads.append(thread)

    while True:
        i = 0
100 for thread in threads:
            i += 1 if not thread.is_alive() else 0

            if i == len(threads):
                print('Я сделяль!')
105 break

    frls = pd.concat(list_)

    frlh = frlhall[['g', 'pres', 'c_tide', 'c_polar', 'c_level']]
110
    k = k+1

    frlh.to_csv(f'.../{k}.csv')

```

```

115  #исключение выбросов данных

def hampel(y, window_size, simg=3):
    n = len(y)
    new_y = y.copy()
120    k = 3
    idx = []

    for i in range((window_size), (n - window_size)):
        r_median = np.median(y[(i - window_size):(i + window_size)])
125    #скользящая медиана
        r_mad = np.median(np.abs(y[(i - window_size):(i + window_size)] -
r_median)) #скользящий MAD
        if (np.abs(y[i] - r_median) > simg * r_mad):
            new_y[i] = r_median #замена выброса
130            idx.append(i)

    return new_y, idx

g = (frame['g']-frame['c_tide'])-((frame['g']-frame['c_tide'])).mean()
135 new_g, outliers = hampel(g, 3599)

#изменение частоты дискретизации
fr1hall = new_g.resample('1h').mean()

140 #учета линейного дрейфа нуля-пункта
g_dedrift = statsmodels.tsa.tsatools.detrend(g_new, order=1, axis=0)

g_dedrift.to_csv(f'.../final.csv')

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
НЕПРИЛИВНОГО ЭФФЕКТА