

На правах рукописи

Чистякова Екатерина Александровна



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

1.6.22. Геодезия

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Государственный университет по землеустройству» (ГУЗ).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Баранов Владимир Николаевич.

Официальные оппоненты:

Непоклонов Виктор Борисович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», профессор кафедры высшей геодезии;

Голдобин Денис Николаевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», доцент кафедры космической и физической геодезии.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук (г. Москва).

Защита диссертации состоится 5 декабря 2023 г. в 15 час. на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»:

<https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/chistyakova-ekaterina-aleksandrovna/>

Автореферат разослан 20 октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 29.09.2023. Формат 60 × 84 1/16.
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 126.
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 10.
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 гравиметрических 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 неприливно-ые 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 неприливных 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 неприливных составляющих вариаций ускорения силы тяжести. С использованием методов математического моделирования, высшей геодезии и геодезической гравиметрии разработана методика учета влияния неприливных 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, гляциоизостазии 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 основа-

ниях» – 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во *введении* обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены научные положения, выносимые на защиту.

В *первом разделе* выполнен анализ современного состояния и существующих методик учета временных вариаций ускорения силы тяжести на фундаментальных пунктах.

На значение ускорения силы тяжести, фиксируемое гравиметром, действует множество факторов, имеющих различную физическую природу и характеристики, и выявление их методом простой фильтрации не представляется возможным. Нестабильность значения ускорения силы тяжести во времени значительно превышает инструментальную точность современных гравиметров. Поэтому ведущие отечественные и зарубежные научные организации занимаются изучением временных вариаций ускорения силы тяжести.

В общем виде временные вариации, фиксируемые гравиметром, можно представить в следующем виде:

$$\Delta g = \Delta g_{tide} + \Delta g_{Pol} + \Delta g_{notide} + \Delta g_{drift} + \varepsilon_i, \quad (1)$$

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;

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

Наиболее существенный вклад в изменение ускорения силы тяжести вносят приливные и неприливные вариации. Для учета приливного воздействия существует ряд глобальных моделей. Среди них стоит выделить синтетические глобальные модели, вычисляемые в программе ATLANTIDA, разработанной Спиридоновым Е. А. (ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук). Модели ATLANTIDA являются наиболее точными для исследуемой территории: средняя абсолютная ошибка составляет 15 мкГал в сравнении с измеренными значениями. В результате исследования, проведенного в рамках данной диссертационной работы, доказана необходимость получения локальных параметров земных приливов для пунктов, располагающихся на территории Российской Федерации.

Неприливные вариации ускорения силы тяжести сегодня представляют наибольший интерес для исследователей гравитационного поля Земли. Физическая природа основных факторов, вызывающих неприливные измерения параметров гравитационного поля Земли, определена множеством исследователей последних лет, однако параметры учета остаются актуальным предметом исследования. Известно, что величина вариаций ускорения силы тяжести под влиянием изменений атмосферного давления и гидрологического режима достигает 30 мкГал.

Для изучения влияния вариаций означенных эффектов на изменения ускорения силы тяжести в диссертационной работе рассмотрены характеристики временных вариаций атмосферного давления и гидрологического режима в районе наблюдений (г. Москва), а также существующие методики учета влияния атмосферы и гидрологии на временные ускорения силы тяжести. Обоснована необходимость исследования влияния данных эффектов на локальные особенности временных вариаций ускорения силы тяжести на пунктах ГФГС. Доказано, что применение сложных моделей состояния атмосферы на сегодняшний день неце-

лесообразно, так как это не приведет к повышению точности в сравнении с использованием локальных данных об атмосферном давлении. Обоснован выбор гидрологической модели MERRA2 для проведения дальнейшего анализа.

Во *втором разделе* обоснован выбор используемого оборудования (относительный приливный гравиметр gPhoneX и абсолютный баллистический гравиметр FG5 производства Microg LaCoste, США). Обоснована необходимость выявления и учета дрейфа нуля-пункта приливного гравиметра gPhoneX (Δg_{drift}) с учетом его конструктивных особенностей. Рассмотрены существующие методики учета дрейфа нуля-пункта, предлагаемые в существующих исследованиях. Обосновано применение техники «удаления-восстановления» и выбор методики линейной аппроксимации с периодическим контролем абсолютными определениями.

На основе рекомендаций зарубежных исследователей и анализа экспериментальных данных обоснованы требования к пункту наблюдений и к методике измерений.

Приведенный в тексте диссертационной работы анализ существующих методик и программных продуктов, предназначенных для обработки результатов мониторинговых наблюдений ускорения силы тяжести, показал, что единой методики и/или ее реализации в виде единого программного продукта не существует. Обработка подобных наблюдений на сегодняшний день довольно трудоемка, занимает много времени и требует высокой квалификации исполнителя. Таким образом, доказана необходимость разработки унифицированной методики предварительной обработки результатов мониторинговых наблюдений приливным гравиметром.

Третий раздел посвящен разработке комплексной методики учета неприливных эффектов и созданию локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести для фундаментального пункта ГФГС. Разработка и реализация на программном уровне комплексной методики направлены на решение следующих задач:

- полная автоматизация процесса обработки результатов наблюдений гравиметрами приливного типа;
- создание локальной модели временных вариаций ускорения силы тяжести с учетом неприливных эффектов для фундаментального пункта ГФГС с точностью не хуже 8 мкГал;
- апробация разработанной комплексной методики по результатам мониторинговых относительных и регулярных абсолютных гравиметрических определений.

Комплексную методику можно представить в виде блок-схемы (рисунок 1).

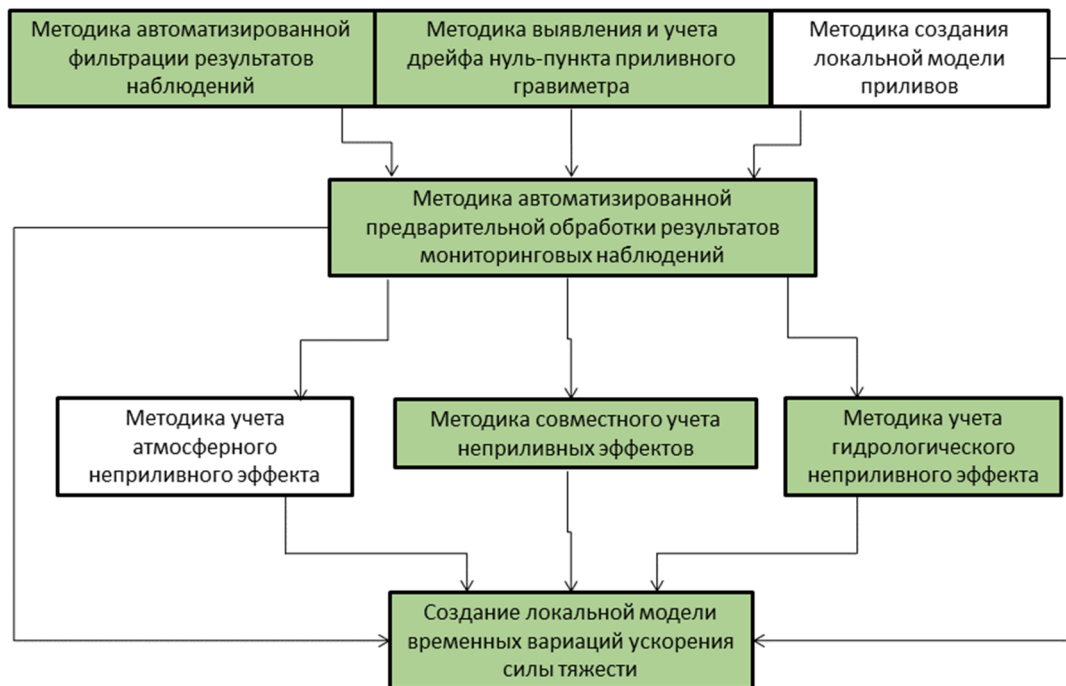


Рисунок 1 – Блок-схема комплексной методики. Цветом выделены блоки, разработанные в результате диссертационного исследования

Локальную модель временных вариаций ускорения силы тяжести, получаемую в результате реализации разработанной комплексной методики, можно представить в аналитическом виде:

$$\Delta g = \Delta g_{tide} + \Delta g_{Pol} + \Delta g_{drift} + [\Delta g_{bar} + \Delta g_{hydro}] + \Delta g_{res} + \varepsilon_i, \quad (2)$$

где $[\Delta g_{bar} + \Delta g_{hydro}]$ – совместный неприливный эффект, оказываемый изменением атмосферного давления и гидрологического режима.

Предлагаемую *методику автоматизированной предварительной обработки мониторинговых наблюдений* можно описать следующим алгоритмом.

1 Отбраковка некачественных данных, которая подразумевает исключение случайных выбросов, выбор временных интервалов с наименьшим содержанием выбросов в соответствии с разработанными критериями.

2 Прореживание секундных данных до 1 измерения в час (в соответствии с теоремой Котельникова). Часовой частоты данных достаточно для изучения рассматриваемых неприливных эффектов. Фильтрация полученных данных.

3 Учет движения земных полюсов по данным IERS.

4 Выявление и учет дрейфа нуля-пункта приливного гравиметра.

5 Учет приливных вариаций ускорения силы тяжести с использованием локальной модели земных приливов.

С целью реализации методики автоматизированной предварительной обработки мониторинговых наблюдений разработаны критерии для выявления случайных выбросов, обусловленных землетрясениями; подобран оптимальный алгоритм фильтрации шумов; выбрана оптимальная частота дискретизации временного ряда для дальнейшей обработки. Разработан алгоритм выявления и учета дрейфа нуля-пункта гравиметра. Методика реализована на языке программирования Python 3.10.

В результате использования разработанной автоматизированной предварительной обработки измерений приливным гравиметром получен временной ряд неприливных вариаций ускорения силы тяжести на фундаментальном пункте ГФГС. Ошибка определения неприливных вариаций составляет 1,1 мкГал. Разброс временных вариаций ускорения силы тяжести достигает 30 мкГал, что является существенной величиной при проведении высокоточных гравиметрических определений. В связи с этим можно сделать вывод, что необходим дальнейший анализ временных вариаций ускорения силы тяжести и учет неприливных эффектов.

Методика учета атмосферного неприливногo эффекта предназначена для выявления и учета влияния изменения атмосферного давления в результаты определений ускорения силы тяжести. Атмосферный неприливный эффект состоит из суммы гравитационного притяжения аномальной атмосферной плотностью и нагрузки, вызванной вертикальными деформациями земной поверхности, и оценивается с помощью локального атмосферного дельта-фактора (коэффициента линейной зависимости ускорения силы тяжести от давления). Резолюцией Международной ассоциации геодезии № 9 от 1983 г. принят средний атмосферный дельта-фактор, равный $-0,3$ мкГал/мбар, при этом локальное уточнение предполагается методом простой линейной регрессии атмосферного давления и ускорения силы тяжести.

В рамках диссертационного исследования был проведен анализ ковариации ускорения силы тяжести и атмосферного давления для пункта ГФГС TSNI (г. Москва). По результатам корреляционного анализа атмосферное давление имеет статистически значимую заметную обратную связь с ускорения силы тяжести. Коэффициент корреляции равен $-0,569$ (уровень значимости $p < 0,001$). По результатам регрессионного анализа получена модель атмосферного неприливногo эффекта, описывающая 85 % неприливных вариаций. При увеличении атмосферного давления на 1 мбар ускорение силы тяжести снижается в среднем на $0,26$ мкГал при прочих равных условиях. Аналитически модель атмосферного неприливногo эффекта можно представить в виде:

$$\Delta g_{bar} = -0,26\Delta P. \quad (3)$$

Среднее абсолютное отклонения фактического значения ускорения силы тяжести от прогнозного составляет $1,8$ мкГал. Динамика фактических, прогнозных значений и остатков модели на примере измерений, выполненных в 2022 г., представлена на рисунке 2.

Методика учета гидрологического неприливногo эффекта предназначена для выявления и учета влияния изменения гидрологических параметров в результате определений ускорения силы тяжести после учета атмосферного эффекта.

Сезонные изменения уровня грунтовых вод и влажности почв вызывают перемещения масс в теле Земли, которые, в свою очередь, приводят к изменению ускорения силы тяжести.

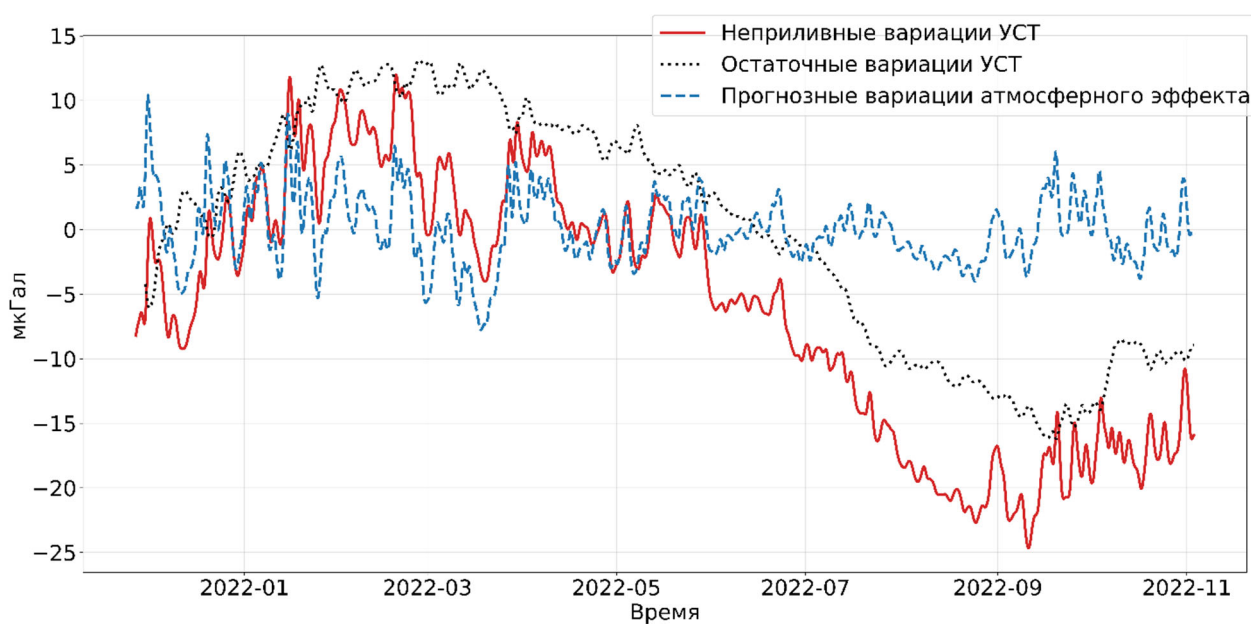


Рисунок 2 – Результаты учета атмосферного неприливногo эффекта

Изменение уровня грунтовых вод носит сезонный характер, что вызывает сезонные изменения ускорения силы тяжести. Величина гидрологического эффекта может быть различной в зависимости от многих локальных особенностей места наблюдений.

Локальный эффект вычисляется аналогично притяжению простого слоя аномалии Буге. 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 мо-

дели гидрологии по функциям Грина; его величина вдвое меньше прямого эффекта, однако все же существенна. Для учета полного гидрологического эффекта необходимо привлечение не только локальных, но и глобальных гидрологических данных. Поэтому в работе использована готовая модель гидрологической нагрузки.

Проведенные в рамках диссертационной работы исследования показали, что необходим тщательный выбор оптимальной гидрологической модели для каждого пункта наблюдений, а также калибровка модели гидрологического эффекта на результаты гравиметрических определений. В результате выполненных исследований установлено, что наиболее точной для пункта, расположенного на территории города Москвы, является модель MERRA2, которая и будет взята за основу для создания локальной модели.

В результате проведенного корреляционного анализа установлено, что коэффициент корреляции ускорения силы тяжести и гидрологического эффекта, вычисленного с использованием модели гидрологии MERRA2 Δg_{m2} , составляет +0,722 (при уровне значимости $p < 0,001$), что демонстрирует высокую прямую связь между ними. По результатам регрессионного анализа создана модель для локального уточнения гидрологического эффекта. Результаты анализа свидетельствуют о том, что гидрологический эффект, вычисленный с использованием модели гидрологии MERRA2, переоценивает влияние гидрологии на ускорения силы тяжести, а также не учитывает локальное запаздывание: на ускорения силы тяжести влияют предшествующие значения гидрологического эффекта от часового до 48-часового запаздывания (Δg_{m2}^{t-1} , Δg_{m2}^{t-24} , Δg_{m2}^{t-48}). При этом при увеличении гидрологического непривливно эффекта, вычисленного по модели гидрологии, на 1 мкГал, ускорение силы тяжести растет в среднем на 0,76 мкГал.

Локализованную модель гидрологического эффекта можно представить в аналитическом виде:

$$\Delta g_{hydro} = 30,99 \Delta g_{m2} - 24,99 \Delta g_{m2}^{t-1} - 3,2 \Delta g_{m2}^{t-24} - 2,0 \Delta g_{m2}^{t-48}. \quad (4)$$

Средняя абсолютная ошибка прогноза по данной модели, составляет 2,57 мкГал. 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 атмосферы MERRA2 с учетом поправочного коэффициента и задержки по (4).

На рисунке 3 показаны результаты учета гидрологического неприливногo эффекта по локализованной модели гидрологии.

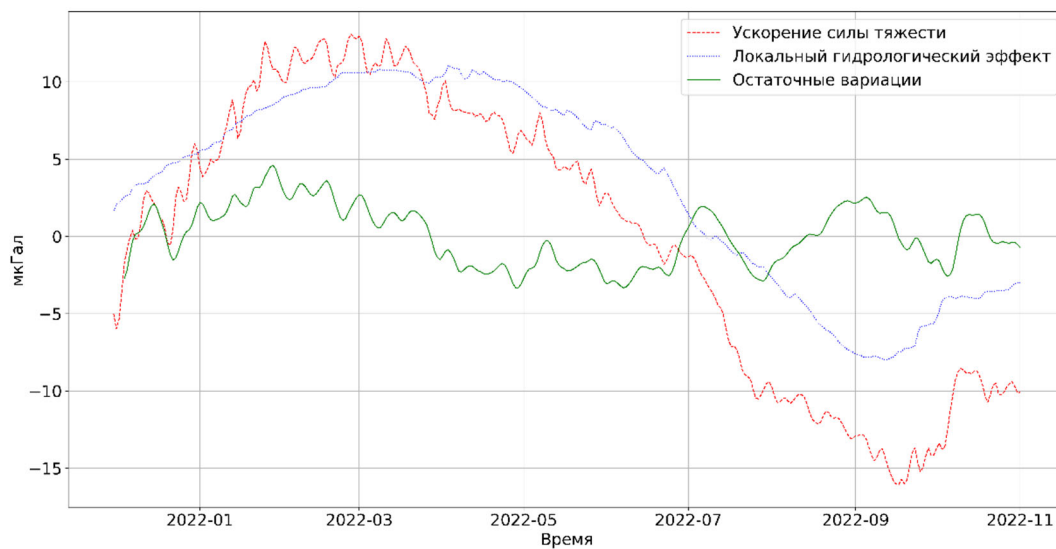


Рисунок 3 – Результаты учета гидрологического неприливногo эффекта

Большинство существующих методик учета неприливных эффектов предполагает последовательный учет сначала атмосферного, а затем гидрологического воздействия. Поскольку гидрологические и атмосферные параметры в некоторой степени связаны между собой общей физической (климатической) природой, представляется возможным совместный учет атмосферного и гидрологического неприливных эффектов. В связи с этим, возникает необходимость создания *методики совместного учета неприливных эффектов*.

Созданная модель учета 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 неприливного эффекта на 1 мкГал ускорение силы тяжести растет на 0,67 мкГал; при повышении атмосферного давления на 1 мбар – снижается на 0,45 мкГал при прочих равных условиях. Также прослеживается влияние на ускорение силы тяжести атмосферного давления в предшествующий час.

В виде аналитическом виде полученную модель можно представить следующим образом:

$$\Delta g_{notide} = 0,67\Delta g_{m2} - 0,45\Delta P + 0,17\Delta P^{t-1}, \quad (5)$$

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

Средняя абсолютная ошибка прогноза по данной модели составляет 1,36 мкГал. На рисунке 4 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.

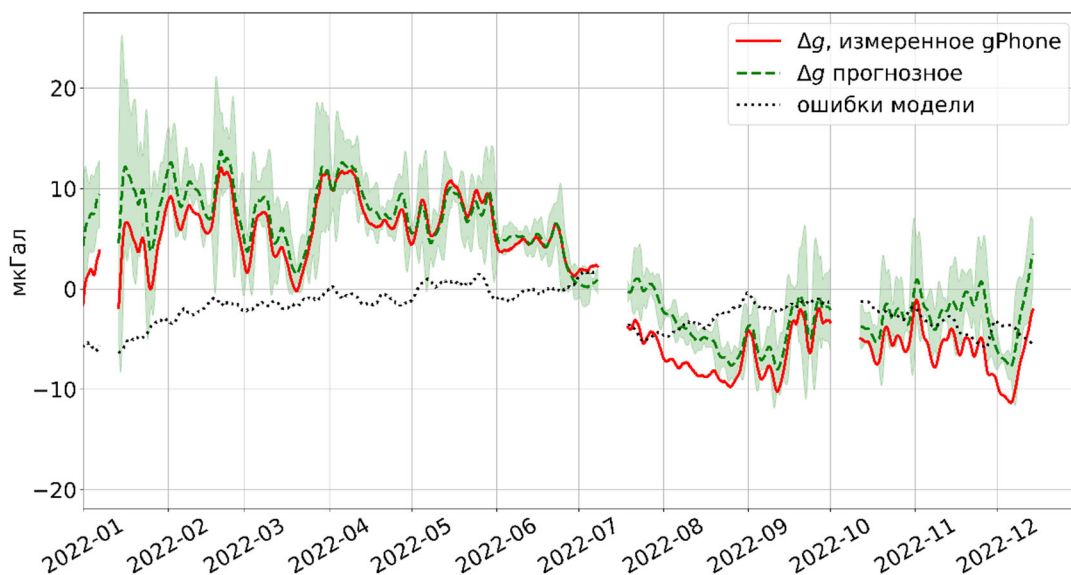


Рисунок 4 – Результаты совместного учета неприливного эффекта

В четвертом разделе представлена апробация разработанной комплексной методики.

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; неприливно-эффекты.

Априорная оценка точности локальной модели может быть получена из формулы (2) и быть оценена (при учете атмосферного и гидрологического неприливных эффектов по отдельности):

$$m_g^2 = m_{tide}^2 + m_{Pol}^2 + m_{drift}^2 + m_{bar}^2 + m_{hydro}^2 + m_{\varepsilon}^2, \quad (6)$$

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;

$m_{bar} = 3,2$ мкГал – ошибка учета атмосферного неприливно-эффекта;

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

$m_{\varepsilon} = 1,0$ 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 (6) будет преобразовано:

$$m_g^2 = m_{tide}^2 + m_{Pol}^2 + m_{drift}^2 + m_{notide}^2 + m_{\varepsilon}^2. \quad (7)$$

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 учете влияния атмосферного и гидрологического непривливаемых эффектов.

Выполнена оценка репрезентативности исходных данных. Сделан вывод, что минимальный и достаточный эталонный интервал для моделирования составляет 12 месяцев. Далее рекомендуется выполнять 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. На рисунке 5 представлены результаты сравнений прогнозных значений непривливаемых вариаций ускорения силы тяжести и результатов абсолютных определений баллистическим гравиметром FG5 на пункте TSNI.

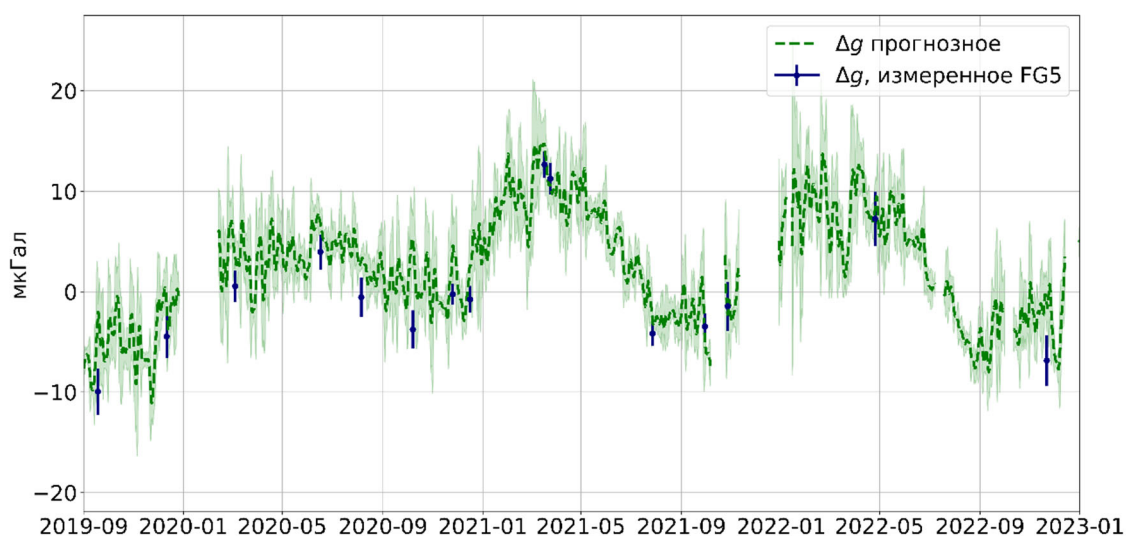


Рисунок 5 - Непривливаемые прогнозные вариации ускорения силы тяжести и результаты абсолютных определений

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 приливным гравиметром данными, предварительно подготовленными по разработанной методике автоматизированной предварительной обработки.

Результаты и оценка качества моделирования для эталонного интервала (2022 г.) представлены на рисунке 4. На рисунке 6 приведены результаты для самого удаленного от эталонного интервала: август–декабрь 2015 г.

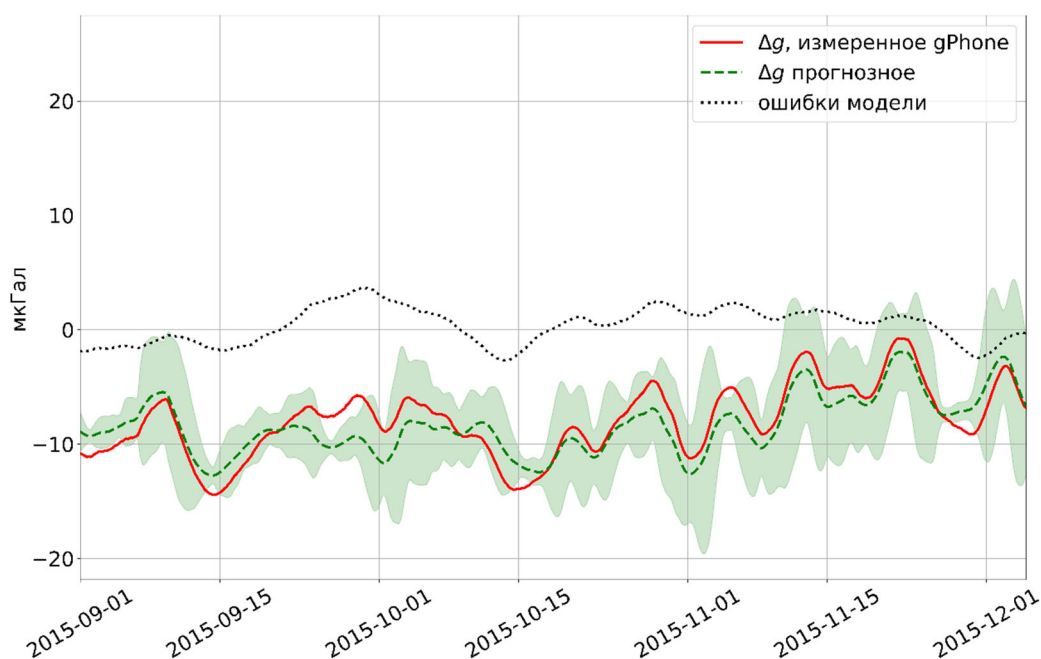


Рисунок 6 – Результаты моделирования для интервала август-декабрь 2015 г.

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 неприливногo эффекта выполнялось с использованием данных регрессионной модели, представленной уравнением (5). Результаты моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты совместного моделирования неприливногo 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 (7).

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 уровня грунтовых вод. В связи с этим рекомендуется выполнять наблюдения ускорения силы тяжести в весенне-летний и осенний периоды.

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ
ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 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.

2 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.

3 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.

4 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.

5 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.