

*На правах рукописи*



Боярчук Матвей Александрович

**Разработка и исследование метода отображения векторного гравитационного поля Земли для геоинформационного анализа**

Специальность: 25.00.35 – Геоинформатика

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

МОСКВА – 2020

Работа выполнена на кафедре вычислительной техники и автоматизированной обработки аэрокосмической информации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Журкин Игорь Георгиевич

Официальные оппоненты: Конешов Вячеслав Николаевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук», заведующий VI отделением, заведующий лабораторией гравиинерциальных измерений, заместитель директора

Никишин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии Наук, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научный геоинформационный центр РАН»

Защита диссертации состоится «14» мая 2020 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский переулок, д. 4., Зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии и на сайте МИИГАиК (<http://www.miigaik.ru/science/councils/dissertation/>).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Вшивкова Ольга Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Гравитационное поле Земли (ГПЗ) и его аномалии оказывают существенное влияние на орбиты космических аппаратов, траектории полёта ракет, работу навигационных систем, результаты геодезических измерений и геофизических исследований. Характеристики гравитационного поля несут в себе важную информацию о внутреннем строении Земли, движениях земной коры, процессах в океане и атмосфере. Ввиду роста объёмов и сложности задач в области поиска и разведки полезных ископаемых, глобального и регионального мониторинга геофизической обстановки и состояния окружающей среды, предупреждения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, исследования Арктики, освоения ресурсов Мирового океана и космического пространства требования науки и практики к эффективности использования данных о гравитационном поле Земли при решении этих задач постоянно повышаются. В связи с развитием космических исследований, освоением дальнего космоса, планированием перспективных космических миссий повышается потребность в изучении гравитационного поля Луны и планет.

Данная работа направлена на решение задачи повышения эффективности использования данных о внешнем гравитационном поле Земли, получаемых по геодезическим измерениям, материалам гравиметрических съёмок и дистанционного зондирования Земли, в интересах развития критических технологий поиска и разведки месторождений полезных ископаемых, мониторинга и прогнозирования геофизической обстановки и состояния окружающей среды, а также развития критических технологий в области информационных и навигационных систем, в первую очередь, систем, использующих геопространственные данные.

Актуальность работы обусловлена необходимостью устранения дисбаланса между растущими требованиями науки и практики к эффективности использования данных о гравитационном поле Земли и возможностями

удовлетворения этих требований на базе существующих теоретических положений, методов и алгоритмов обработки измерительной информации и моделирования характеристик пространственного распределения гравитационного поля Земли.

Отмеченные обстоятельства обуславливают актуальность исследования на основе развития традиционных подходов, теоретических основ и методологии создания и использования нового класса моделей гравитационного поля Земли и планет – так называемых геоинформационных моделей, включая использование этих моделей для отображения гравитационного поля на цифровых и электронных картах, в контексте решения проблемы повышения эффективности использования данных о гравитационном поле, получаемых по геодезическим измерениям, материалам гравиметрических съёмок и дистанционного зондирования Земли и планет.

На данный момент визуализация геофизических полей (ГФП) в ГИС разработана слабо. Для отображения ГФП широко применяются методы, перешедшие из картографии, например, изолинии или визуализация с помощью цветовых шкал, составляющие группу прямых методов. Данные методы позволяют визуализировать ограниченное количество параметров поля одновременно, не отвечая, таким образом, в полной мере требованию полноты отображаемой информации. В современных ГИС нет метода, позволяющего визуализировать одновременно такие параметры, как величина и направление вектора силы тяжести или любого другого геофизического поля, описываемого векторными полями.

Также актуальность исследования подтверждается указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899, в котором утверждены приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечень критических технологий Российской Федерации.

Диссертационная работа соответствует направлениям «Информационно-телекоммуникационные системы», «Перспективные виды вооружения, военной и

специальной техники» и «Транспортные и космические системы», входящим в перечень приоритетных направлений развития науки.

В качестве критических технологий РФ, прописанных в вышеупомянутом указе, определены 27 технологий, относящихся к различным областям деятельности, в том числе представляющие особый интерес для исследований и разработок в МИИГАиК. Выполняемая работа относится к таким критическим технологиям РФ, как: «Технологии информационных, управляющих, навигационных систем», «Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи», а также «Технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем».

Помимо прочего, можно сделать вывод, что данная диссертационная работа является стратегически важной для Российской Федерации, опираясь на Основные положения Основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу, утверждённые Президентом Российской Федерации от 19 апреля 2013 г. № Пр-906.

**Степень разработанности научной проблемы.** Основной объём исследований и разработок в области моделирования ГПЗ выполняется в настоящее время за рубежом (США, Франция, ФРГ и др.). Ведущими зарубежными центрами являются Потсдамский институт геоисследований, Лаборатория спутниковой геодезии Космического агентства Франции, Техасский университет, Лаборатория реактивного движения Национального аэрокосмического агентства США и ряд других.

В нашей стране основной вклад в развитие этого направления вносят ИФЗ РАН, ВНИИМ им Д.И. Менделеева, ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД». Использование методов математического моделирования для изучения локальных динамических вариаций гравитационного поля Земли, особенно в сочетании с геоинформационными технологиями, а также геоинформационное

моделирование ГПЗ практически не развито, или такая информация отсутствует в открытой печати.

**Цели и задачи.** Основной целью исследования является разработка метода визуализации гравитационного поля Земли на плоскости при помощи цвета для дальнейшего использования в ГИС ГПЗ. Для достижения заявленных целей в рамках исследовательских мероприятий были поставлены следующие задачи:

- аналитический обзор тематической литературы в рамках настоящего исследования; анализ методов визуализации ГФП с позиций геофизической картографии, научной визуализации и геоинформатики; обзор существующих ГИС ГФП и анализ используемых в них способов визуализации;
- разработка метода представления векторных полей с помощью математического аппарата кватернионов для дальнейшей визуализации; анализ и выбор моделей цвета для целей визуализации данных, представленных в виде кватернионов; разработка метода преобразования компонент кватернионов в координаты цветового пространства для отображения на плоскости;
- разработка количественного критерия для оценки аномальности поля, а также отношения аномальности по амплитуде и направлению;
- анализ современных программных средств для создания ГИС ГПЗ, использующей предложенный метод визуализации, разработка требований и перечня необходимого функционала такой системы; проведение экспериментальных исследований для проверки работоспособности разработанного метода отображения ГПЗ на плоскости.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является гравитационное поле Земли. Предметом исследования являются способы представления и визуализации гравитационного поля в ГИС.

**Научная новизна.** Разработанный метод визуализации гравитационного поля Земли основан на использовании математического аппарата кватернионов и в отличие от существующих методов визуализации позволяет одновременно отображать величину и направление векторов поля на плоскости, что позволяет говорить о переходе от моделирования ГПЗ как скалярного поля потенциала к моделированию его как векторного поля.

**Теоретическая значимость работы** заключается в расширении предметной области геоинформатики на геофизические поля Земли, рассматриваемые как векторные поля, в отличие от традиционного их рассмотрения в виде потенциальных полей.

**Практическая значимость работы.** Предложен новый метод представления ГПЗ в ГИС, позволяющий отображать трёхмерные векторные поля на поверхности Земли без потери информации. Используемый математический аппарат кватернионов позволяет эффективно решать задачи преобразования системы координат, нахождения поля равнодействующих сил и интерполяции.

**Методология и методы исследования.** Использованы методы математического моделирования ГФП в виде векторных полей и при помощи кватернионов; сравнительного анализа методов визуализации трёхмерных векторных полей, цветовых моделей для их визуализации на плоскости и программных платформ для создания перспективной ГИС ГПЗ, использующей разработанный метод отображения; геоинформационного моделирования ГПЗ.

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Метод представления гравитационного поля Земли при помощи кватернионов;
2. Метод отображения трёхмерных векторных полей на плоскости при помощи цвета, позволяющий отображать как направления векторов, так и их величины;

3. Результаты экспериментальных исследований разработанного метода визуализации, как на модельных тестовых данных, так и на реальных данных, восстановленных по аналитической модели ГПЗ EGM2008.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 25.00.35 – «Геоинформатика»: 3 – «Геоинформационные системы (ГИС) разного назначения, типа (справочные, аналитические, экспертные и др.), пространственного охвата и тематического содержания», 6 – «Математические методы, математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение для ГИС», 7 – «Геоинформационное картографирование и другие виды геомоделирования, системный анализ многоуровневой и разнородной геоинформации», 8 – «Компьютерные геоизображения новых видов и типов, анимационные, мультимедийные, виртуальные и другие электронные продукты».

### **Степень достоверности и апробация результатов:**

Достоверность результатов работы подтверждается:

- логикой постановки задач настоящего исследования, научной аргументированностью положений и выводов;
- всесторонним анализом ранее выполненных исследований и разработок по исследуемому предмету;
- применением апробированных теоретических положений, корректным использованием математического аппарата;
- большим объёмом выполненных экспериментальных исследований.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – грант 16-05-00720 «Геоинформационное моделирование и картографическое отображение гравитационного поля Земли».

**Участие в конференциях.** Основные положения и результаты настоящего исследования докладывались на:



- 7-ом Международном летнем студенческом семинаре ISPRS GEOMIR 3S-2016, 15-19 августа 2016 г., Университет Тунцзи, Шанхай, Китайская Народная Республика;
- Конференции «Навигация по гравитационному полю Земли и её метрологическое обеспечение», 14-15 февраля 2017 г., ФГУП «ВНИИФТРИ», Московская область, Солнечногорский район, р.п. Менделеево, Российская Федерация;
- 72-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных МИИГАиК, посвященной Дню космонавтики, 12-13 апреля 2017 г., МИИГАиК, Москва, Российская Федерация;
- 73-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных МИИГАиК, посвященной Дню космонавтики, 3-4 апреля 2018 г., МИИГАиК, Москва, Российская Федерация;
- Международной научно-технической конференции «Пространственные данные как основа развития цифровой экономики России», посвящённой 239-летию основания МИИГАиК, 28 мая 2018 г., МИИГАиК, Москва, Российская Федерация;
- Международной научно-технической конференции «Пространственные данные – основа стратегического планирования, управления и развития», посвящённой 240-летию основания МИИГАиК, 28 мая 2019 г., МИИГАиК, Москва, Российская Федерация.

**Объём и структура диссертационной работы.** Общий объём диссертации 128 страниц. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованных источников из 89 наименований, двух приложений; содержит 6 таблиц и 46 рисунков.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, степень достоверности и апробация результатов исследования.

**В первой главе** рассмотрено понятие геофизического поля Земли, приведена классификация таких полей. Также рассмотрены основные параметры гравитационного поля Земли (ГПЗ). Отмечено, что по своей природе ГПЗ является силовым (векторным) полем, однако при картографировании оно зачастую сводится к некому скалярному параметру.

По результатам исследования существующих ГИС ГФП и используемых в них методов визуализации сделан вывод, что данное направление развито слабо, крупные ГИС обладают ограниченным функционалом для работы с геофизическими полями, а методы их визуализации перешли из картографии с незначительными изменениями и не отвечают требованию полноты отображаемой информации. Так для геомагнитного и гравитационного поля зачастую используются способы изолиний, цветового кодирования или векторных символов, что не позволяет одновременно и точно отображать как величины действующих сил, так и их направления. При этом используемая в ГИС цифровая модель исследуемого геофизического поля представляет собой сеточную поверхность, в узлах которой помещаются проинтерполированные значения картографируемого параметра, например, аномалии силы тяжести или высоты квазигеоида.

Анализ исследований в области визуализации векторных полей показал, что, хотя данная область и активно разрабатывается в различных направлениях, большинство исследований нацелены на вопросы визуализации гидродинамических векторных полей и их результаты могут быть слабо приспособлены для работы с ГПЗ и не учитывать необходимую специфику. В данном контексте выделяют четыре основных класса методов визуализации векторных полей, основывая классификацию на принципе получения итогового изображения: прямые методы, методы, основанные на характерных признаках, текстурные методы и геометрические методы.

Картографические методы визуализации ГФП продолжают развиваться с применением современных компьютерных технологий, однако наиболее

разработанной областью является отображение рельефа, а такие поля, как геомагнитное и гравитационное зачастую рассматриваются лишь как скалярные, являясь на самом деле силовыми полями. Зачастую для передачи информации о характеристиках поля в картографии используется традиционный подход визуализации – изолинии, представленный в нескольких вариантах: с заполнением ступеней между изолиниями цветом, без фоновой окраски и метод теневой пластики. Кроме того, своё применение для отображения геофизических полей Земли находят качественный и количественный фон, а также точечные и линейные знаки.

**Во второй главе** описан предлагаемый способ представления поля силы тяжести, который базируется на представлении векторной величины в каждой точке на поверхности Земли кватернионом:

$$Q = a + bi + cj + dk, \quad (1)$$

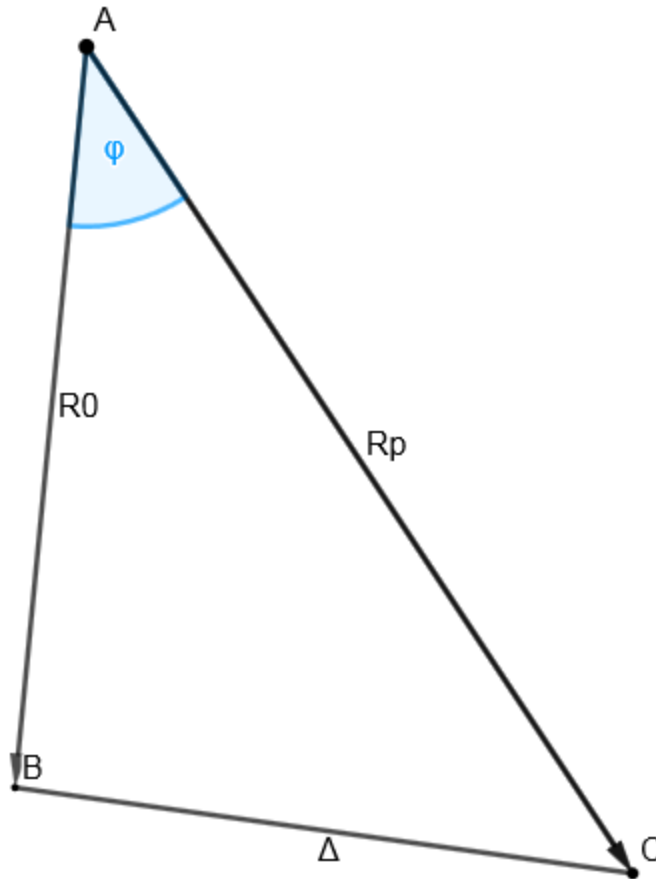
где  $a, b, c, d$  – вещественные числа, а  $i, j, k$  – мнимые единицы, при этом  $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$ . Число  $a$  называют скалярной частью кватерниона, а  $bi + cj + dk$  – векторной,  $i, j, k$  можно рассматривать как орты в прямоугольной системе координат. Над кватернионами могут быть произведены операции сложения и умножения. Математический аппарат кватернионов содержит как элементы векторной, так и комплексной алгебры. Кроме того, вследствие своей размерности они хорошо подходят для описания трёх- и четырёхмерных Евклидовых пространств и удобны для соотнесения с распространёнными цветовыми системами координат. Данный математический аппарат находит широкое применение в компьютерной графике, инерциальной навигации и вычислительной механике.

Таким образом, векторное поле в исследуемой области земной поверхности описывается множеством  $K$  кватернионов вида (1). Благодаря известным свойствам кватернионов, таким как наличие определённых операций сложения и умножения на действительное число, множество  $K$  можно считать четырёхмерным линейным пространством. Кватернионы являются линейным

оператором в указанном пространстве  $K$ . Сумма квадратов компонент кватерниона равна его модулю, как и для комплексного числа.

Связав векторные компоненты кватерниона с пространственными данными, можно перейти к задаче отображении вектора, заданного в трёхмерном пространстве, на плоскости, причём это отображение должно быть взаимно однозначным и наглядным. Для её решения предлагается использовать цветовое представление, основой которого служит четырёхмерная модель в виде кватерниона (1), где координаты при мнимых единицах  $i, j, k$  непосредственно определяют цвет в заданной системе координат, а координата  $a$  связана с выбором начала отсчёта или равна модулю вектора. Данный способ позволяет отображать пространственные векторные поля на плоскости при помощи цвета. При этом выбор математического аппарата кватернионов даёт возможность установления взаимно однозначного соответствия между пространственным распределением векторного поля и его цветовым представлением на плоскости.

При проведении высокоточных геодезических измерений аномальность гравитационного поля зачастую характеризуется следующими величинами: уклонения отвесных линий в меридиане ( $\xi$ ) и первом вертикале ( $\eta$ ), аномалия высоты ( $\zeta$ ) и аномалия силы тяжести ( $\Delta g$ ). Представление аномалии гравитационного поля по направлению в виде двух составляющих УОЛ не очень удобно при оценке её вклада в ходе геоинформационного моделирования гравитационных аномалий. Поэтому целесообразно сформировать более простые критерии оценки аномальности векторного поля.



*Рисунок 1: Нормальный и аномальный вектор силы тяжести*

На рисунке 1 изображены нормальный ( $R_0$ ) и фактический ( $R_p$ ) вектора силы тяжести. Вектор аномалии определяется ( $\Delta$ ) как разность между ними. Согласно теореме косинусов, его длина:

$$\|\Delta\|^2 = \|R\|_0^2 + \|R\|_p^2 - 2\|R\|_0\|R\|_p \cos\varphi \quad (2)$$

Разделив выражение (2) на произведение длин нормального и фактического вектора, можно отделить составляющие аномалии, зависящие от угла и длин векторов:

$$\frac{\|\Delta\|^2}{\|R\|_0\|R\|_p} = \frac{\|R\|_0}{\|R\|_p} + \frac{\|R\|_p}{\|R\|_0} - 2\cos\varphi \quad (3)$$

В выражении (3) левая часть может быть обозначена как  $E_\Delta$ , амплитудная и угловая составляющие – как  $\Delta_A$  и  $\Delta_\varphi$  соответственно:

$$E_\Delta = \Delta_A + \Delta_\varphi \quad (4)$$

Для оценки вклада угловой и амплитудной составляющих можно перейти к относительным аномалиям:

$$\delta_A = \frac{\Delta_A}{E_\Delta}, \quad \delta_\varphi = \frac{\Delta_\varphi}{E_\Delta} \quad (5)$$

Таким образом, сформированные критерии позволяют оценить вклад угловой и амплитудной составляющих в суммарную аномалию, что также можно использовать как оценку информативности этих составляющих.

С практической точки зрения существенным является выбор системы координат цветовых измерений, в которой, фактически, и будут вычисляться значения  $b, c, d$  в формуле (1). С целью выбора наиболее подходящей системы представления цвета был проведён анализ наиболее распространённых систем. Основные характеристики наиболее значимых из рассмотренных цветовых моделей представлены в Таблица .

*Таблица 1: Характеристики основных моделей цвета*

Система	Тип	Количество компонент	Компоненты
RGB	Аддитивная	3	Красный, зелёный, синий
XYZ	Аддитивная	3	Условные цвета
LAB	Перцепционная	3	Яркость, координаты в плоскости ab
HSB	Перцепционная	3	Тон, насыщенность, яркость
HSL	Перцепционная	3	Тон, насыщенность, светлота
CMYK	Субтрактивная	4	Голубой, пурпурный, жёлтый, чёрный

В результате проведённого анализа была выбрана модель цвета HSL (Hue, Saturation, Lightness — тон, насыщенность, светлота, являющаяся перцепционной). В геометрическом представлении HSL соответствует конусу с двумя концами. Такой конус ближе к определённым описаниям цвета в виде сферы – цветового шара Рунге и сферы Манселла.

Были рассмотрены основные вопросы и понятия геоинформационного моделирования ГПЗ, которое может принимать различные формы, например, математическое, цифровое и визуальное моделирование. Были также рассмотрены

технические вопросы метода представления и визуализации ГПЗ, такие как выбор системы цвета для визуализации, описание формата файла для хранения и обмена данными, а также обеспечение визуализации, на зависящей от используемого устройства. Выгружаемые данные предложено сохранять в собственный вариант ASCII-grid сети, сформированный с учётом опыта использования существующих форматов цифровых моделей Земли.

В целях повышения эффективности использования данных о гравитационном поле Земли, сформулированы основные характеристики и требования к перспективной ГИС для геоинформационного моделирования гравитационного поля Земли и планет. Проведено исследование возможности использования графических движков в целях визуализации ГПЗ, представленного в виде кватернионов, однако предпочтение отдаётся использованию открытых средств для создания web-ГИС, таких как CesiumJS, в связи с лучшей приспособленностью подобных решений к обработке геоданных.

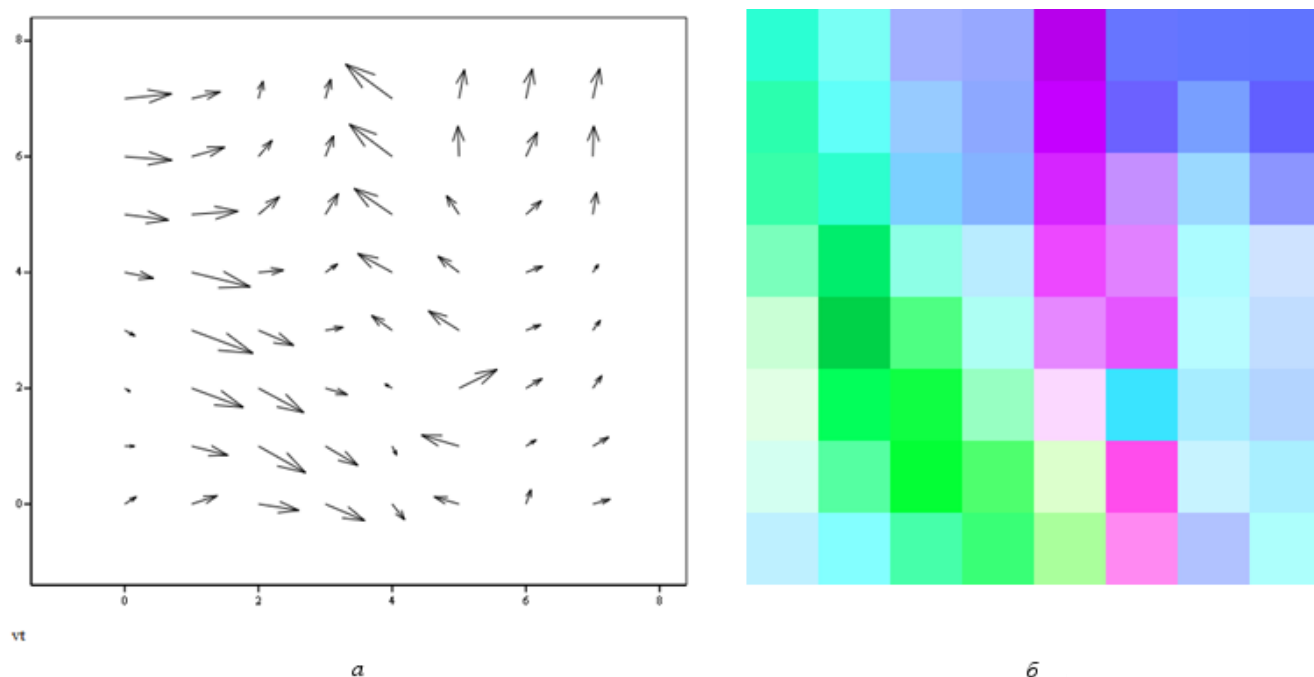
Исходя из проведённого анализа сделан вывод, что библиотека CesiumJS наиболее подходит для реализации разрабатываемого метода визуализации ГПЗ в ГИС ввиду следующих особенностей: во-первых, данная библиотека разработана для визуализации геоданных, а, следовательно, должна содержать необходимые инструменты для работы с ними; во-вторых, данная библиотека имеет встроенную поддержку кватернионов как типа данных; в-третьих, она поддерживает возможность визуализации небесных тел (Луны и Солнца), которые оказывают воздействие на гравитационное и магнитное поле на Земле, что может оказаться полезным при анализе динамики данных геофизических полей.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментов по отображению ГПЗ разработанным методом визуализации.

В первом эксперименте визуализации подлежало заданное матрицей комплексных чисел двумерное векторное поле, вектора которого расположены в определённой плоскости. Изначально компоненты векторов непосредственно соотносились с цветовыми координатами в системе RGB, однако такой подход не

позволяет различать коллинеарные вектора противоположного направления. Эту проблему удалось решить, используя систему HSL. При этом угол вектора в плоскости соотносится с параметром Hue, причём таким образом, что положительному направлению оси  $x$  сопоставлен красный цвет, отрицательному направлению оси  $y$  – зелёный, а положительным – голубой и синий соответственно. Модуль же вектора отображается изменением светлоты каждого пикселя.

Разработанный метод отображения двумерных векторных полей был также апробирован на основе реальных данных по УОЛ для района Москвы и Подмосковья (рисунок 2). Составляющие УОЛ были вычислены по гравитационной модели EGM2008 до 2190-й степени разложения геопотенциала по сферическим функциям.

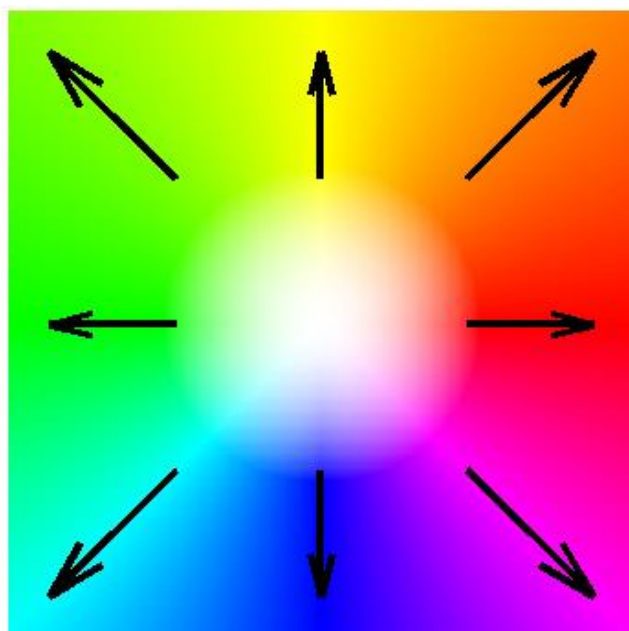


*Рисунок 2: Отображение реальных данных УОЛ цветом*

Стоит отметить, что в двумерном случае стрелочная визуализация оказалась более наглядной. Однако разработанный метод в первую очередь разработан для визуализации поля трёхмерных векторов. Именно такие поля и визуализируются в последующих экспериментах. Перевод компонент кватернионов в координаты цветового пространства при этом производится следующим образом: скалярная часть кватерниона, равная модулю векторной части, сопоставляется с параметром



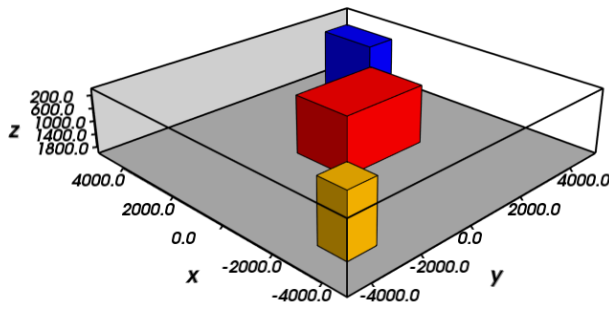
насыщенности (Saturation); из первых двух компонент векторной части кватерниона находится угол проекции вектора на горизонтальную плоскость относительно оси  $x$  и сопоставляется с параметром цветового тона (Hue); величина проекции последней компоненты на ось  $z$  определяет светлоту (Lightness). При этом основным направлениям координатных осей на плоскости соответствуют те же цвета, что и в двумерном случае (Рисунок 3).



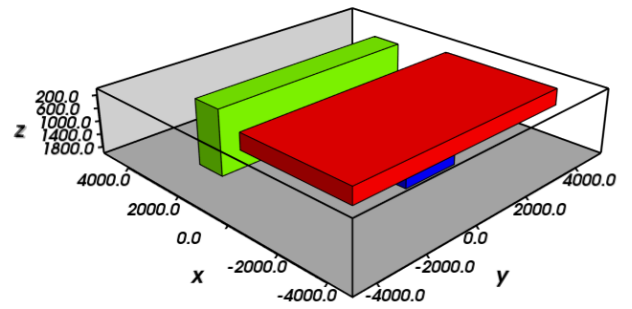
*Рисунок 3: Соответствие углов проекции вектора на плоскость с цветом*

Предлагаемый способ визуализации был также апробирован на модели двух гравитационных аномалий, создаваемых плотными телами под поверхностью Земли. В качестве плотных тел использовались призмы заданного размера, плотности и глубины залегания (

Рисунок 4), расположенные при этом так, чтобы создаваемые ими аномалии примерно соответствовали некоторым реальным случаям. Подобное расположение призм может затруднять нахождение слабых аномалий на фоне более сильных, особенно при наличии помех.



а



б

Рисунок 4: Расположение модельных тел, создающих гравитационные аномалии

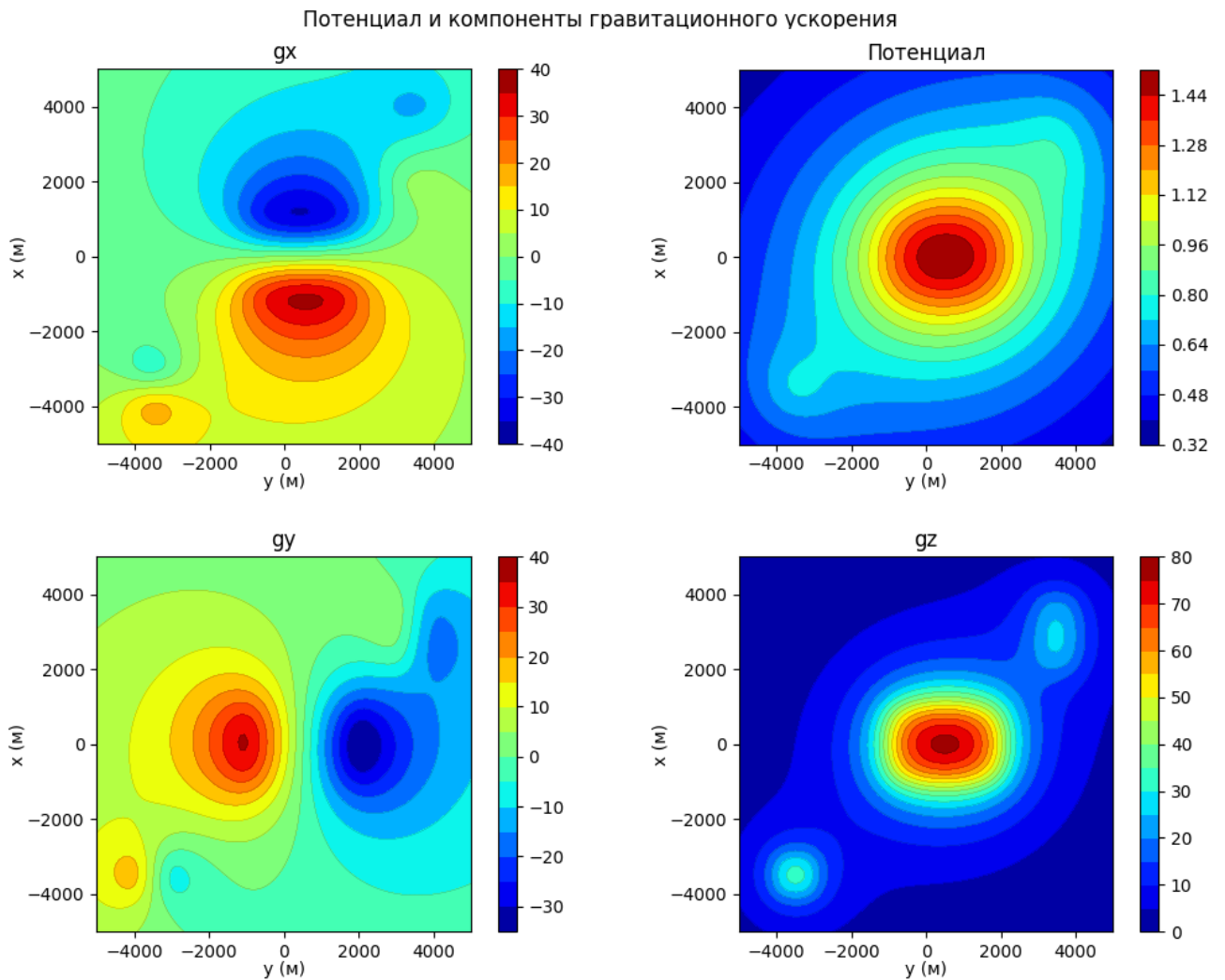
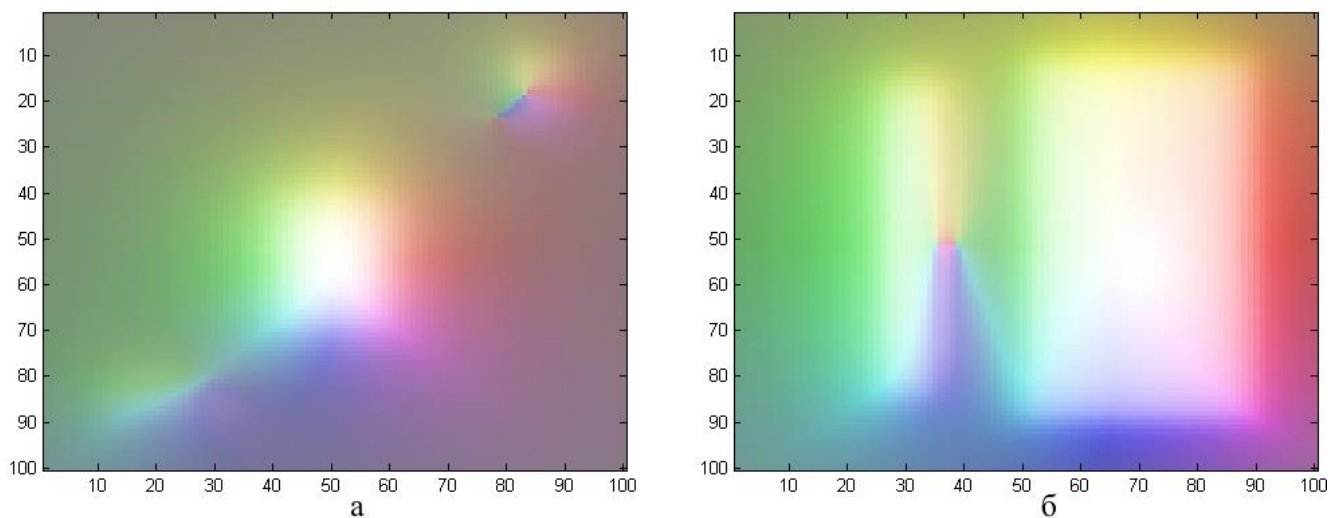


Рисунок 5: Потенциал и компоненты гравитационного ускорения первой модели (рисунок 4а)

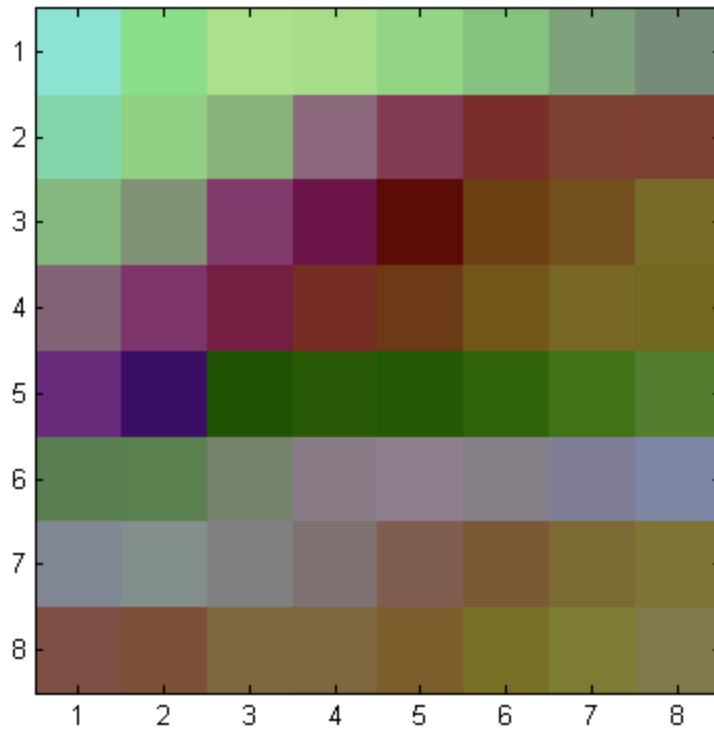
Результаты визуализации данных моделей представлены на Рисунок .



*Рисунок 6: Результат визуализации модельных полей предлагаемым методом*

Для проверки разработанного метода отображения на данных, вычисленных по модели EGM2008, необходимо дополнить данные по УОЛ, использовавшиеся для двумерного случая, данными о вертикальной составляющей ГПЗ. Они могут быть получены при помощи калькулятора параметров ГПЗ, предоставляемого порталом ICGEM, рассмотренным в первой главе.

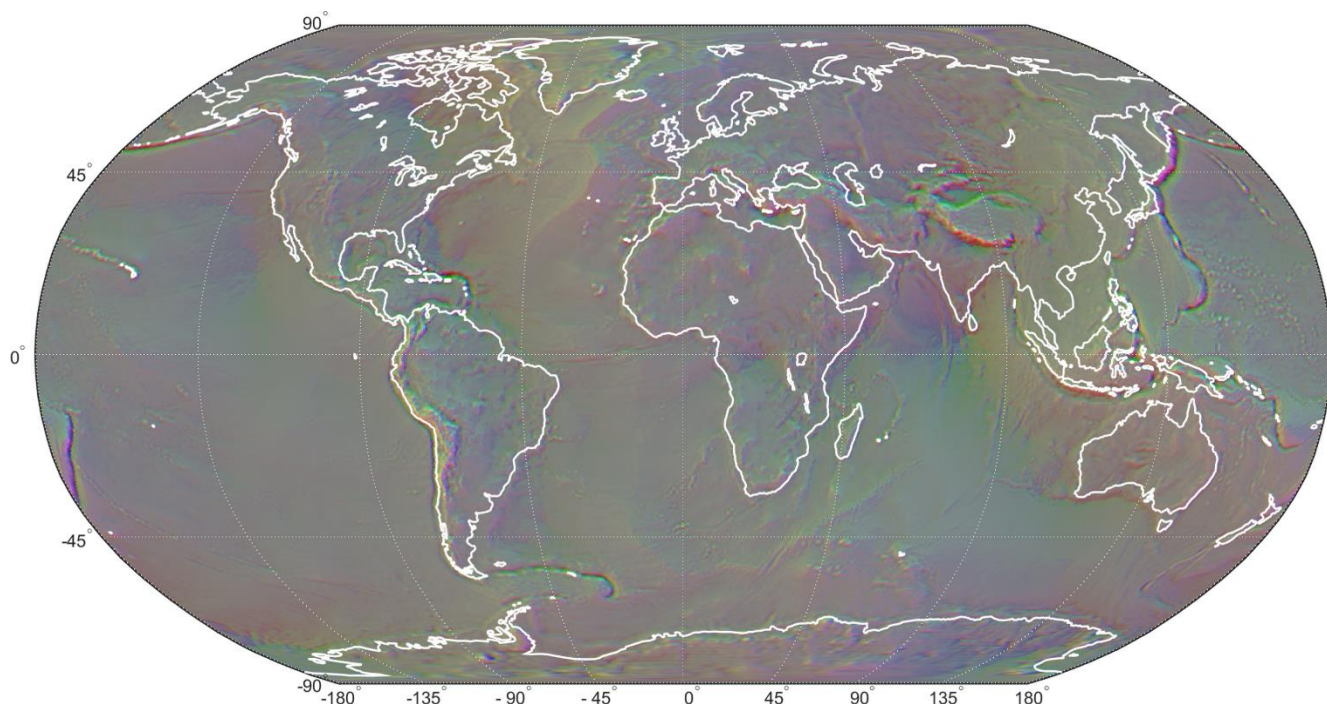
Результат визуализации набора данных, составленного из УОЛ и гравитационной аномалии, представлен на Рисунок . Как и ранее, цветовой тон в каждой точке характеризует направление векторов силы тяжести в горизонтальной плоскости, а светлота соответствует величине вектора аномалии и его направлению относительно вертикальной оси – сонаправленные ей вектора имеют большее значение светлоты, направленные противоположно – меньшее (данное правило можно заставить работать наоборот, выполнив действие  $k = k * (-1)$  после загрузки исходных данных).



*Рисунок 7: Визуализация УОЛ и гравитационной аномалии*

В качестве другого примера реального ГПЗ было выбрано поле векторов аномалии силы тяжести, восстановленное из модели глобального гравитационного поля Земли EGM96. Созданное таким образом векторное поле имело размеры 1001x1001, что позволяет оценивать глобальное пространственное распределение векторов аномалии силы тяжести на всей поверхности Земли (Рисунок).

Разработанный метод может быть использован для визуализации не только ГПЗ, но и других векторных (силовых) геофизических полей. В одном из экспериментов в качестве входных данных использовались горизонтальные и вертикальные компоненты магнитного поля Земли, вычисленные при помощи сервиса Geomagnet.ru ([https://www.geomagnet.ru/geomagnetic\\_calculator.html](https://www.geomagnet.ru/geomagnetic_calculator.html)), рассмотренного в первой главе (старое название - GIMS Calculator), на тот же район, что и в экспериментах по рассчитанному по модели EGM2008 гравитационному полю.



*Рисунок 8: Поле векторов чистой аномалии силы тяжести Земли, представленное посредством разработанного метода визуализации (проекция Робинсона)*

Для некоторых упомянутых выше экспериментов была выполнена обратная задача по нахождению отображаемых параметров исследуемого поля из известных координат в цветовом пространстве произвольно выбранного пикселя. Успешное решение этой задачи позволяет говорить о возможности использования предложенного метода для свободного перехода от исходных данных о ГПЗ к цветным изображениям и обратно.

Полученные результаты были частично опубликованы с использованием прототипа геопортала, построенного на основе библиотеки Cesium, и позволяющего отображать сформированные растровые слои, поддерживающие прозрачность, на виртуальном глобусе. Данный прототип доступен в сети Интернет по адресу: <https://recondite-warlock.glitch.me/>.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По итогам выполненного исследования сделан вывод, что разработанный метод показал свою работоспособность в результате серии экспериментов. К его достоинствам относится возможность одновременного отображения направления

и величины векторов аномального гравитационного поля на плоскости при помощи цвета, даже в случае, когда их горизонтальные компоненты намного меньше вертикальной.

### **Основные итоги исследований:**

1) Изучено текущее состояние геоинформационного моделирования ГФП, рассмотрены некоторые тематические ГИС-проекты. Отдельное внимание уделено методам визуализации информации о ГПЗ. Кроме того, были проанализированы подходы к визуализации трёхмерных векторных полей с точки зрения научной визуализации и геофизической картографии. Проведённый анализ показал недостаточную разработанность методов визуализации ГПЗ в ГИС.

2) Рассмотрены вопросы геоинформационного моделирования гравитационного поля Земли и планет, сущность и разновидности таких моделей, а также проанализировано само понятие геофизического поля, описаны основные изучаемые параметры гравитационного поля и чётко сформирован объект визуализации разработанного метода.

3) Представлен метод использования кватернионов для геоинформационного моделирования ГПЗ, описан метод визуализации ГПЗ как трёхмерного векторного поля на плоскости с использованием цвета, проанализированы существующие системы цвета в целях отображения ГПЗ. Предложен формат хранения кватернионной модели ГПЗ в виде файла.

4) Разработан количественный критерий для оценки амплитудной и угловой составляющих аномального поля.

5) Сформированы основные требования к перспективной web-ГИС ГПЗ, использующей разработанный метод визуализации, описан её функционал и тематическое наполнение. Проанализированы средства для создания такой системы и возможность использования графических движков для моделирования отображения ГПЗ.

б) Разработанный метод испытан как на двумерных, так и на трёхмерных тестовых полях. Тестовые материалы включают произвольные поля, поля, рассчитанные по аналитической модели ГПЗ EGM2008, модель гравитационной аномалии, создаваемой плотными телами под поверхностью Земли, и, наконец, данные о геомагнитном поле, позволяющие показать применимость разработанного метода и к другим векторным ГФП.

7) Полученные результаты частично опубликованы с помощью прототипа геопортала, разработанного на основе библиотеки Cesium. Данный прототип доступен в сети Интернет по адресу: <https://recondite-warlock.glitch.me/>.

#### **Перспективы дальнейших исследований:**

исследования по геоинформационному моделированию других физических полей Земли;

исследования по геоинформационному моделированию физических полей в околоземном космическом пространстве и на поверхности космических тел.

#### **Рекомендации по использованию результатов:**

Полученные результаты могут быть использованы при разработке общих и тематических геоинформационных систем, предназначенных для работы с геофизическими полями.

#### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

Боярчук, М. А. Концепция графического метода отображения гравитационного поля земли на плоскости / Боярчук М.А., Журкин И.Г., Непоклонов В.Б. // Научная визуализация. – 2019. – № 11.1 – С. 70 - 79, DOI: 10.26583/sv.11.1.06

Боярчук, М. А. Анализ методов визуализации геофизических полей в геоинформационных системах / М.А. Боярчук, И.Г. Журкин, В.Б. Непоклонов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 1. –С. 108-113.

Боярчук, М. А. Двухмерная визуализация трехмерных геофизических полей в задачах геоинформационного моделирования [Текст] / М. А. Боярчук, И. Г. Журкин, Д. В. Учаев, Дм. В. Учаев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63. – № 6. – С. 718 – 728. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-000-000.

Грузинов, В. С. Геоинформационное моделирование и отображение гравитационного поля Земли. / Грузинов В.С., Журкин И.Г., Боярчук М.А. // Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение. Тезисы докладов научно-технической конференции. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», – 2017. – С. 54-55.