

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

УДК 004.415.2:021

На правах рукописи

НАЗИРОВА АСЕМ БАКДАУЛЕТОВНА

**Разработка информационной системы для обработки данных
гравиметрического мониторинга с применением методов глобальной
оптимизации (на примере решения прямой задачи гравиметрии)**

6D070400 – Вычислительная техника и программное обеспечение

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты
кандидат технических наук,
доцент
Ф.Н. Абдолдина

кандидат физико-математических наук,
доцент
Ю.И. Дубовенко

Республика Казахстан
Алматы, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ | 4 |
| ОПРЕДЕЛЕНИЯ | 5 |
| ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ | 6 |
| ВВЕДЕНИЕ | 7 |
| 1 СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗРАБОТКИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ | 14 |
| 1.1 Обзор концепций и проблем обеспечения экологической безопасности добычи углеводородов..... | 14 |
| 1.2 Обзор методов оценки техногенного влияния добычи углеводородов на окружающую среду..... | 16 |
| 1.3 Обзор и анализ развития специализированных систем по работе с геоданными..... | 22 |
| 1.4 Обзор и анализ геоинформационных технологий для оценки и прогнозирования техногенного влияния на окружающую среду..... | 25 |
| Выводы по 1-му разделу..... | 29 |
| 2 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗРАБОТКИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО ДАННЫМ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА | 32 |
| 2.1 Первичная обработка данных вариаций гравитационного поля на нефтегазовом месторождении..... | 32 |
| 2.2 Оценка моделей среды путем решения прямых задач гравиметрии..... | 37 |
| 2.3 Решение обратной задачи путем решения серии прямых задач гравиметрии..... | 40 |
| 2.4 Глобальная оптимизация решений прямой задачи гравиметрии для простых моделей среды эвристическими методами..... | 41 |
| 2.4.1 Оптимизация методом имитации отжига (SA)..... | 44 |
| 2.4.2 Оптимизация генетическим алгоритмом (GA)..... | 52 |
| 2.5 Сравнение алгоритмов глобальной оптимизации..... | 61 |
| Выводы по 2-му разделу..... | 62 |
| 3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПО ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗРАБОТКИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИМЕТРИИ МЕТОДАМИ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ | 63 |
| 3.1 Моделирование рабочего процесса (workflow)..... | 63 |
| 3.2 Проектирование базы данных гравиметрических мониторинга..... | 70 |
| 3.3 Программная реализация модуля статистической обработки и отображения данных..... | 72 |
| 3.4 Программная реализация модуля решения прямых задач гравиметрии..... | 76 |
| 3.5 Интеграция модулей в информационную систему..... | 79 |

| | |
|---|------------|
| Выводы по 3-му разделу..... | 80 |
| 4 ТЕСТИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ... | 82 |
| 4.1 Разработка численного тестирования системы..... | 82 |
| 4.2 Анализ информативности результатов..... | 83 |
| Выводы по 4-му разделу..... | 85 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 87 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 89 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А – Апробация результатов исследования..... | 98 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Свидетельства об авторском праве на модули информационной системы..... | 100 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В – Таблицы значений аномалий для разных моделей среды..... | 102 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Проектирование и программная реализация модуля по отображению данных постобработки..... | 110 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Листинг основных модулей информационной системы..... | 115 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Листинг реализации решения задачи гравиметрии методом имитации отжига..... | 125 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Листинг реализации решения задачи гравиметрии генетическим алгоритмом..... | 131 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ И – Акт внедрения..... | 139 |

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

Инструкция по оформлению диссертации и автореферата», Высший аттестационный комитет. – Алматы, 2004 г., №377-3ж.

ГОСТ 7.32-2001. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. – Астана, 2001 г.

ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Информационная система – организационная система по сбору, управлению, хранению, обработке и распространению информации.

Геоинформационная система – система сбора, хранения, интерпретации, анализа пространственных данных.

Геодинамический мониторинг – система постоянных и непрерывных наблюдений, анализа и прогноза современного геодинамического состояния геологической среды

Гравиметрический мониторинг – повторные измерения значений силы тяжести на стационарно закрепленных пунктах.

Деформационный мониторинг – систематическое диагностирование и отслеживание изменений размеров объекта.

GPS-мониторинг – площадное картирование проседаний земной поверхности и горизонтальных сдвигов массивов горных пород.

Сейсмологический мониторинг – комплекс мер по выявлению сейсмических сигналов, возникших в результате естественных или техногенных воздействий.

Прямая задача гравиметрии – определение на основе известных параметров среды значение гравитационного поля.

Обратная задача гравиметрии – нахождение параметров объекта (формы, размеров, глубины залегания, эффективной плотности) по известному распределению (на профиле или на площади) элементов силы тяжести.

Эвристический алгоритм — алгоритм, выявляющий не гарантированно точные, но оптимальные решения, достаточные для достижения поставленной задачи.

Оптимизация – задача нахождения глобальных экстремумов (минимумов или максимумов) функции.

Алгоритм имитации отжига – общий алгоритмический метод решения задачи глобальной оптимизации, особенно дискретной и комбинаторной оптимизации.

Генетический алгоритм – эволюционный алгоритм поиска, основанный на механизмах эволюции и используемый для решения задач функциональной оптимизации.

Функция приспособленности – минимизируемая (целевая) функция.

Хромосома – некоторое значение подбираемого параметра.

Особь – набор хромосом, представляющих возможное решение.

Популяция – набор возможных решений.

Парсинг – процесс сбора данных в информационную систему с последующей их обработкой и анализом.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

| | |
|--------------|---|
| ИС | – Информационная система |
| GPS | – Global Positioning System (система глобального позиционирования) |
| GNSS | – Global Navigation Satellite System (глобальная навигационная спутниковая система) |
| УВ | – Углеводороды |
| CASE | – Computer-Aided Software/System Engineering (разработка программного обеспечения/систем с использованием компьютерной поддержки) |
| МОН РК | – Министерство образования и науки Республики Казахстан |
| НУ | – Нефтеуглеводороды |
| АВПД | – Аномально высокое пластовое давление |
| GNFE | – Global Network for the Forecasting of Earthquakes (глобальная сеть прогнозирования землетрясений) |
| InSAR | – Interferometric synthetic aperture radar (Интерферометрический радар с синтезированной апертурой) |
| ПО | – Программное обеспечение |
| АСОД | – Автоматизированная система обработки данных |
| ГИС | – Геоинформационная система |
| ЭВМ | – Электронная вычислительная машина |
| ESRI | – Environmental Systems Research Institute (Институт исследования экологических систем) |
| ГДМ | – Геодинамический мониторинг |
| ОГП | – Одногрупповые грузовые поезда |
| ГА | – Генетический алгоритм |
| WMN | – Wireless Mesh Network (Беспроводная ячеистая сеть) |
| GLP | – Good Laboratory Practice (Надлежащая лабораторная практика) |
| SA | – Simulated annealing («Имитация отжига») |
| GA | – Genetic algorithm (Генетический алгоритм) |
| DFD | – Data flow diagram (Диаграмма потоковых данных) |
| IDEF0 | – Function modeling (Методология функционального моделирования) |
| IDEF3 | – Integrated DEFinition for Process Description Capture Method (Методология моделирования и стандарт документирования процессов) |
| СУБД | – система управления базами данных |
| HTTP | – HyperText Transfer Protocol (Протокол передачи гипертекста) |
| ER-диаграмма | – Entity-Relationship diagram («Диаграмма сущность-связь») |
| UML | – Unified Modeling Language (Унифицированный язык моделирования) |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Согласно «Экологическому кодексу Республики Казахстан» [1] обязательным условием осуществления права недропользования является обеспечение предотвращения загрязнения недр и снижения вредного влияния операций недропользования на окружающую среду. Известно [2], что длительная разработка месторождений нефти и газа может привести к существенным негативным последствиям для окружающей среды.

Для экологически безопасной эксплуатации нефтегазовых месторождений необходимо осуществлять многометодный комплекс геологоразведочных работ. На протяжении последних десятилетий разработано множество компьютерных технологий по обработке и анализу геолого-геофизических данных. Разнообразные информационно-аналитические технологии на основе автоматизированных и геоинформационных систем существенно облегчают работу с большими объёмами данных, ускоряют доступ к необходимой информации, позволяют производить операции с разнородными объектами и моделями намного быстрее, чем в эпоху ранней компьютеризации геофизики. Исходя из этого, информационную систему (ИС), основанную на системах с открытым доступом, можно рассматривать как эффективное средство, реализующее основные процедуры, связанные с хранением, обработкой и анализом данных, а также обеспечить необходимое отображение результатов анализа.

Несмотря на наличие в ближнем и дальнем зарубежье целого ряда автоматизированных систем обработки данных геофизики (обзор некоторых из них будет приведён ниже), можно констатировать отсутствие полноценной легкодоступной узкоцелевой ИС сопровождения *мониторинга* потенциальных полей на нефтегазовом месторождении с целью его *контролируемой* эксплуатации. Такая ИС должна быть ориентирована, прежде всего, на решение актуальной задачи *обработки*, хранения и экспресс-интерпретации данных гравиметрических съёмок и сопутствующей геолого-геофизической информации (в частности, данных акустического мониторинга, нивелирования (т.е. изучения уровня деформаций), электроразведки и др.). Не менее важной целью ИС должно быть решение задач *прогнозирования* параметров месторождения углеводородов в процессе их эксплуатации по комплексу указанных выше данных измерений с целью оптимизации извлечения запасов углеводородов и предотвращения негативных геодинамических и экологических последствий вследствие изменения режима эксплуатации месторождения. Эти потребности обуславливают острую необходимость в разработке эффективной целостной информационной системы, в возможно наиболее полной степени, решающей вышеуказанные задачи.

Отметим, что под основными геодинамическими последствиями длительной эксплуатации месторождения углеводородов мы понимаем деформационные и сейсмические. Деформационные последствия разработки нефтегазовых месторождений проявляются в обширных просадках земной

поверхности и аномальной активизации разломных зон в пределах месторождения [3]. Сейсмические последствия проявляются в виде техногенных землетрясений. Достоверное априорное заключение о *вероятности* проявлении той или иной формы геодинамических событий без надлежащей системы поддержки принятия решений, основанной на специализированной ИС, сделать практически невозможно.

На сегодняшний день *моделирование* геодинамических последствий эксплуатации нефтегазовых месторождений актуально на глобальном уровне. А надлежащим основанием для их своевременного прогнозирования и предотвращения могут быть только результаты комплексного анализа данных многолетнего мониторинга состояния недр месторождения по комплексу тщательно отобранных признаков.

В нашей стране проведением комплексного геодинамического мониторинга занимаются сервисные специализированные компании имеющие необходимое оборудование и квалифицированных специалистов, такими компаниями являются Научно-производственный центр «ГЕОКЕН», многопрофильное предприятия «Азимут Геология», ТОО «GEO ENERGY GROUP» и др.

Существует множество готовых специализированных программных решений (OASIS MONTAJ, КОСКАД 3D, ZondMag3D, VECTOR, СИГМА 3D) реализующих широкий спектр работ с геолого-геофизическими данными для проведения геодинамического и гравиметрического мониторинга, но они являются дорогостоящими, не адаптированными под методики и условия проведения исследований, обработки, хранения и интерпретации данных отечественными сервисным компаниями, функционал готовых ПО используется на 15-30%, что является не эффективным.

В этой связи, в рамках темы исследования, актуальной является задача разработки отечественной целостной веб-ориентированной информационной системы, реализующей решение задачи гравиметрического мониторинга состояния недр по данным гравиметрии в реальном времени, т.е. сервис обработки и интерпретации вариаций гравитационного поля, в условиях ограниченного объема данных.

Для своевременного определения, прогнозирования негативных последствий добычи нефти и газа, сервисные компании, выполняющие геолого-геофизические работы, проводят гравиметрическое моделирование используя данные гравиразведки. Гравиметрическое моделирование позволяет построить плотностные разрезы геологической среды, на основе количественной интерпретации наблюденного гравитационного поля.

Основой теории интерпретации данных гравиразведки является решение прямых и обратных задач. Прямая задача гравиметрии состоит в нахождении аномалий силы тяжести и вторых производных потенциала по заданным значениям плотности и геометрических параметров источников. Обратная задача гравиметрии состоит в определении плотности и геометрических параметров аномальных тел по структуре аномалий гравитационного поля.

Хорошо известны научные исследования, связанные с задачами решения прямой и обратной задачи гравиметрии. В этом случае, можно отметить таких авторов из стран Дальнего и Ближнего зарубежья, как Страхов В.Н., Блох Ю.И., Мартышко П.С., Оганесян С.М., Старостенко В.И., Talwani M., Biswas A., Chakravarthi V. и других [4-15]. В Казахстане решением прямой и обратной задачи гравиметрии занималась команда ученых под руководством проф. Серовайского С.Я. [16, 17].

Главная роль в разрабатываемой ИС, для моделирования плотностного строения недр, отводится решению серии прямых задач гравиметрии, формулируемых в постановке для различных модельных *предположений* о строении исследуемой геологической среды [18-20]. Избранная методика разработки целостной ИС предусматривает горизонтальный принцип разработки приложений, согласно которому сначала система создается и тестируется для одного метода, а затем расширяется и апробируется данными других методов.

Исходя из этого, будем рассматривать в качестве опорного метода состояния месторождения углеводородов (УВ) именно гравиметрический мониторинг. Суть его заключается в периодическом измерении вариаций силы тяжести по определённой методике и последующей оценке по этим данным пространственного расположения ряда глубинных плотностных границ (поверхностей) или распределения плотностных неоднородностей различной природы в слоях продуктивных отложений месторождения УВ.

Благодаря аналитическим особенностям решения (*неоднородность* в смысле гладкости, *единственность* в смысле предсказуемости, *устойчивость* в смысле точности в пределах класса моделей, *универсальность* в смысле переносимости и т.д.) прямой задачи гравиметрии представляется возможным анализ природы гравитационных аномалий, в котором учитывается влияние геологических тел с известными физическими параметрами. В качестве этих параметров предварительно задают такие свойства исследуемой среды, как плотность, форма, глубина источника аномалии и т.д. Решение прямой задачи гравиметрии подразумевает определение аномального поля по заданному пространственному распределению этих параметров геологической среды (ниже поверхности наблюдений).

Поскольку выделенная аномалия поля силы тяжести представляет *интегральный* (собирательный) отклик (гравитационное влияние) изучаемой геосреды, содержащей тела *произвольной*, сколь угодно сложной формы, мы полагаем в основу математического моделирования такой среды аппроксимационный подход. Он состоит в доказанной возможности приближенного описания строения геосреды (с приемлемой для решения задач гравиметрии точностью) набором элементарных аппроксимирующих тел. В качестве таких тел выступают объекты регулярных геометрических очертаний (сфера, призма, цилиндр, уступ, пластина, пирамида или их сочетания), для которых на предыдущих этапах развития геофизики однозначно определены их гравитационные эффекты, как на плоскости (2D), так и в пространстве (3D).

Такой подход позволяет максимально приближённо описывать строение реальных геологических структур. Решение прямой задачи даёт возможность не только достоверно определять характер гравитационных аномалий, но и сокращает возможный набор (класс) моделей, подвергаемых анализу, ведь в функциональном смысле задача является гравитационной проверкой [21]. Многократное последовательное (итерационное) решение прямой задачи гравиметрии при различных сочетаниях параметров изучаемой среды лежит в основе одного из ведущих методов количественной интерпретации данных потенциальных геофизических полей – метода подбора. В общем, решение прямой задачи означает итерационный подбор оптимальных параметров математической модели геосреды до получения минимальной невязки между измеренными и рассчитанными значениями гравитационного поля [22].

На сегодняшний день традиционные *детерминированные* методы решения прямой задачи гравиметрии [23] едва ли удовлетворяют возросшим требованиям к точности и качеству решений, особенно в условиях ограниченного объёма исходных данных и в условиях слабо прогнозируемой динамической разгрузки геосреды, когда важна быстрота принятия решений. Использование многофакторного анализа для решения задачи методом подбора увеличивает ресурс времени, а применение эвристических моделей подразумевает постоянный пересмотр задачи с учётом появления новой информации. Кроме того, ограничения оперативной памяти компьютеров обуславливают использование минимального числа элементарных фигур, а ограничения в вычислительной мощности компьютеров в полевых экспедициях тормозят решение задачи и ограничивают перебор вариантов возможных решений. В связи с этим весьма актуально применение вероятностных методов глобальной оптимизации решений задач геофизики в постановке, в которой точечные источники аномалий описаны методом интегральных представлений. В работах [24, 25] показано, что в семействе генетических алгоритмов, которые способны решать задачи гравиметрии и отвечать вышеуказанным требованиям, наиболее приемлемы для наших целей метод имитации отжига и генетический алгоритм.

Цель работы – разработать информационную систему для мониторинга и моделирования экологического состояния месторождения углеводородов. ИС позволит моделировать состояние геолого-геофизической среды месторождения с помощью решения прямой задачи гравиметрии методами глобальной оптимизации для ряда простых математических моделей геологической среды месторождения в пределах заданного продуктивного слоя (диапазона глубин).

Задачи исследования. Основные задачи диссертационного исследования, с учётом всего изложенного выше, определены следующим образом:

– анализ существующих подходов и методик обработки и анализа данных гравитационных аномалий;

- исследование, выбор и обоснование выбора эффективных методов решения прямой задачи гравиметрии;
- анализ *принципов* построения ИС, правил моделирования данных и технологий обработки и системного анализа информации в существующих ИС для оценки параметров среды и техногенного влияния на окружающую среду, *проектирование* разрабатываемой ИС;
- разработка модуля ИС для автоматизации *методики* предварительной обработки первичных данных полевых исследований гравитационного поля;
- разработка модуля ИС для хранения, управления данными гравиметрических исследований, а также постобработки данных измерений и визуализации результатов;
- разработка численного модуля ИС для обработки данных гравиметрического мониторинга путем решения прямой задачи гравиметрии для ряда заданных моделей геологической среды (однородная сфера, горизонтальная призма, вертикальный уступ) методами глобальной оптимизации (метод имитации отжига и генетический алгоритм).

Объект исследования. Объектом исследования является процесс оценки и прогнозирования возможных негативных геодинамических последствий в результате длительной разработки нефтегазовых месторождений, на основе разработки целостной информационной системы.

Предмет исследования. Предметом исследования являются эффективные методы решения прямой задачи гравиметрии, как одной из фундаментальных задач теории интерпретации гравитационных полей.

Методы исследования. В диссертационной работе при разработке численных модулей были использованы следующие методы исследования: методы количественного решения прямой задачи гравиметрии (в частности, метод имитации отжига, генетический алгоритм); методы структурного анализа моделей; методы обработки информации (быстрой сортировки, фильтрации и т.д.); методы стандартной статистической обработки данных (осреднение, корреляция, факторизация, расчёт погрешностей). При создании оболочки ИС неявно (без документирования в тексте работы) использованы CASE-технологии проектирования и разработки информационных систем. В написании текста работы привлечены методы расширенного поиска ссылок, семантического анализа контента.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в том, что для решения прямой задачи гравиметрии впервые были применены метод имитации отжига и генетический алгоритм, являющиеся вероятностными методами глобальной оптимизации, проведена оценка эффективности работы применяемых методов и разработанных алгоритмов для решения задачи гравиметрии.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Эффективный метод решения прямой задачи гравиметрии с применением вероятностных методов глобальной оптимизации: метод имитации отжига, генетический алгоритм. Путем решения серии прямых задач

решается обратная задача гравиметрии. Предлагаемый метод позволяет с удовлетворительной точностью и высоким быстродействием определить параметры аномалиеобразующих тел простой геометрической формы по известному значению гравитационного поля.

2. Алгоритм автоматизированной пред- и пост- обработки первичных данных полевых исследований изменения гравитационного поля на месторождении углеводородов.

3. Архитектура новой целостной веб-ориентированной информационной системы, которая объединяет все этапы обработки и анализа данных гравиметрических исследований для моделирования плотностного строения недр изучаемой территории месторождения УВ.

Невзирая на наличие отдельных автоматизированных и информационных систем обработки данных геофизики и решений задач гравиметрии отдельными методами глобальной оптимизации для отдельных моделей среды, именно выбор из нескольких моделей среды, их анализ несколькими методами оптимизации, и интеграция моделей и методов вычислений в ИС – в целом – пока не имеет аналогов среди известных нам геофизических ИС.

Личный вклад автора. Автор работы принимала непосредственное участие в получении всех научных экспериментальных вычислений, изложенных в диссертации; разработала алгоритм работы модулей информационной системы GeoM; подготовила базу подбора оптимальных параметров аномалиеобразующих тел; проанализировала и предложила новый подход в решении серии прямых задач гравиметрии методами глобальной оптимизации. Автор также сверила все полученные результаты с натурными наблюдениями.

Связь темы с планами научно-исследовательских программ. Представленные результаты получены в процессе выполнения проекта Satbayev University «Разработка геоинформационной системы для решения задачи гравиметрического мониторинга состояния недр нефтегазоносных районов Казахстана на основе высокопроизводительных вычислений в условиях ограниченного объёма экспериментальных данных» No. AP05135158 (грантовое финансирование научных проектов Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2018-2020 годы).

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты исследования докладывались на многих международных научных конференциях (Приложение А):

1. Digital transformation and global society. First international conference DTGS 2016, St. Petersburg, *Russia* (2016, Scopus).

2. 18th International conference on geoinformatics: Theoretical and applied aspects, *Ukraine* (2019, Scopus).

3. 20th International conference on geoinformatics: Theoretical and applied aspects, *Ukraine* (2021, Scopus).

4. 22-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2020», *Russia* (2020, Scopus).

5. 20th International multidisciplinary scientific geoconference, SGEM, *Bulgaria* (2020, Scopus).

6. XVI International scientific conference “Monitoring of geological processes and ecological condition of the environment”, *Ukraine* (2022, Scopus).

Основные результаты исследования опубликованы в журналах *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* (импакт-фактор 2.2, квартиль Q3) и *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan, Series of geology and technical sciences* (импакт-фактор 1.5, квартиль Q3).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, из которых 2 статьи опубликованы в журналах, входящих в базы Scopus и Web of Science (обе статьи входят в Q3), 3 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных Комитетом науки Министерства науки и высшего образования РК, 5 статей в журналах, имеющих CiteScore в Scopus без присвоенного квартиля, 3 статьи опубликованы в сборниках международных научно-практических конференций. Оформлено 2 авторских свидетельства на результаты работы №13336 от 19 ноября 2020 г. и №28492 от 25 августа 2022 г. (Приложение Б).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и приложений, содержит 97 страниц основного текста (40 рисунков, 7 таблиц). Список использованных источников содержит 127 наименований источников.

1 СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗРАБОТКИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

1.1 Обзор концепций и проблем обеспечения экологической безопасности добычи углеводородов

Форсированная разработка месторождений углеводородов (УВ) в естественном режиме всегда сопровождается сложными геодинамическими процессами природного и техногенного характера. Особенно остро эти процессы проявляются на месторождениях УВ в пределах активных разломов. Причиной их активизации могут быть локальные изменения тектонической обстановки и геомеханические эффекты (вариации пластового давления). Они, в свою очередь, являются следствием высокой современной тектонической активности разломов и разрывных нарушений [26]. Кроме локальных тектонических геодинамических явлений (с различными формами их проявления), во многих нефтегазоносных бассейнах известны геодинамические события техногенного генезиса при разработке месторождений УВ, а именно – сейсмические подвижки, аномальные просадки земной поверхности, горизонтальные сдвиги массивов горных пород и поверхностное образование трещин. Также, существенные риски геодинамических катастроф и огромных экономических и материальных потерь при разведке углеводородов, связаны с медленными тектоническими движениями, которые случаются гораздо чаще, чем землетрясения, ощущаемые в той же местности. Эти движения приводят к изменению уровня земной поверхности и могут иметь весьма значительные потери в верхних слоях земной коры [27]. В связи с этим мониторинг вариации деформированного состояния крупных геологических объектов требует пристального внимания, а актуальность получения оперативных и достоверных сведений о геодинамическом состоянии разрабатываемых месторождений УВ является бесспорной.

В мировой практике известны случаи возникновения катастроф техногенного характера на разрабатываемых месторождениях углеводородов [27, р. 952-963]. Ниже приводятся случаи появления таких явлений:

- взрыв на *Ixtoc 1*, произошедшем 3 июня 1979 г. (в результате чего в воды Мексиканского залива было сброшено 140 миллионов галлонов нефти);
- выброс нефти на платформе месторождения *Новруз* в Персидском заливе, когда вылилось 140 миллионов галлонов нефти и были загрязнены морские воды (4 февраля 1983);
- выброс из пробной скважины 88 млн. галлонов нефти в *Ферганской долине* в Узбекистане (2 марта 1992);
- серия катастрофических землетрясений с 1976 по 1984 гг. в результате интенсивной разработки УВ Газлийского месторождения на западе Узбекистана;
- взрыв на нефтяной платформе *Deerwater Horizon* 20 апреля 2010 г., расположенного в Мексиканском заливе на месторождении *Макондо* повел за

собой разлив нефти. Данная авария считается одной из крупных в истории США техногенных катастроф.

Некоторые специалисты сходятся во мнении о возможных серьезных последствиях, которые могут ждать и Казахстан в результате активной добычи УВ на месторождениях нефти и газа. Предположения в первую очередь касаются Каспийского моря, где активно работает углеводородная система и, территория которой, может ждать участи аварии на Мексиканском заливе. Ведь Каспийское море, являясь объектом социально-экономического значения, хранит в себе существенные запасы углеводородного сырья и уникальную коллекцию подводного мира. Более того, не имея достаточной юридической международной защиты и финансовой ответственности в результате добычи УВ на Каспийском море, не может быть возмещен ущерб, наносимый в окружающую среду и здоровью людей [28].

Необходимо понимать о множестве скрытых процессов, происходящих в недрах земной коры. Расположение таких крупных нефтегазовых месторождений как Кашаган, Кайран, Актоты, Королевское и Тенгиз на тектонически активных участках, требуют особой наблюдательности за ними. На сегодняшний день наблюдается активная разработка залежей нефтеуглеводородов (НУ) на шельфе Каспийского моря. Находясь на глубине 4-5,5 тыс. м под аномально высоким пластовым давлением (АВПД), есть риск возникновения взрыва на данных резервуарах [29]. В связи с этим на территориях месторождений Каспийского моря наблюдаются активизация геодинамических процессов и регулярные колебания уровня воды вследствие непрерывного роста техногенных нагрузок на недра моря [30].

Одним из ярких примеров для Казахстана, демонстрирующий негативное воздействие техногенного влияния, является пережитый ранее нефтяной апокалипсис в Атырауской области. 25 июня 1985 г. №37 разведочная скважина месторождения Тенгиз потерпела выброс нефти и газа в атмосферу, повлекший за собой серьезный пожар, тушение которого заняло около 400 дней. В результате аварии в атмосферу было выброшено около 3 млн. т. нефти, 1-2 млн. т. горючих газов, 850 т. меркаптанов и 900 тыс. т. сажи [29, с. 15-20]. Более того, зафиксирована заболеваемость населения Атырауской области на 50%. Техногенная авария на месторождении Тенгиз принесла серьезный экономический и экологический ущерб.

Стоит отметить, что нефтегазовое месторождение «Тенгиз» разрабатывается с 1993 года. В связи с тем, что заполнение образовавшихся трещин и пустот в результате добычи углеводородов не компенсируется закачкой воды или газа, происходит нарушение статического состояния недр [28]. Исследование месторождения с помощью радиолокационных интерферометрических съемок показало возможные смещения и просадки [31]. Вышеуказанные условия могут являться факторами возбуждения техногенных землетрясений не только на Тенгизском месторождении, но и в Каспийском бассейне в целом.

Малоизвестное проседание земной поверхности на месторождениях «Каламкас» и «Каражанбас» на восточном побережье казахстанского сектора Каспийского моря еще один пример негативного техногенного воздействия. Катастрофа произошла в апреле 2000 года и повлекла за собой затопление огромных участков месторождений. В результате более ста скважин оказались под водой и были зафиксированы сдвиги береговой линии относительно исходного положения. Стоит принять во внимание факт нахождения в зоне тектонически активного участка земной коры месторождения «Каламкас», в результате чего могут происходить землетрясения до 6 баллов по Рихтеру.

Выброс газовой смеси в марте 2019 г. произошел на том же месторождении «Каламкас», расположенный в Мангистауской области. 13 грифонов-прорывов газа образовались вокруг буровой площадки, в результате осталось всего пять. Авария сопровождалась пожаром, ликвидированный в апреле 2019 г. [32].

Расположенная в казахстанском секторе Каспийского моря возле мыса Ракушечный самоподъемная плавучая буровая скважина (СПБУ) «60 лет Азербайджана» затонула почти 40 лет назад. 7 сентября 1983 года скважину оставили в зацементированном виде, а на следующее утро она была обнаружена в состоянии открытого фонтанирования. Столб фонтанирующей жидкости достиг 50 м. Деформация нижней части опор привело ее к полнейшему затоплению. Получение серьезных повреждений на СПБ «60 лет Азербайджана» исключило ее дальнейший ремонт и восстановление, а подъем платформы нецелесообразным.

Обобщение имеющихся данных показало, что аналогичные аварии могут происходить на нефтегазовых месторождениях, особенно на тех, которые расположены на больших глубинах. Реалии таковы, что на Каспийском море разработка нефтегазовых месторождений происходит в условиях взаимодействия сильных сейсмологических, природных геодинамических процессов и техногенных факторов. Допускаются риски возникновения техногенных землетрясений.

1.2 Обзор методов оценки техногенного влияния добычи углеводородов на окружающую среду

Многочисленные случаи возникновения сильных геодинамических событий (просадок земной поверхности, землетрясений, активизации разломов и др.) в период длительной разработки месторождений углеводородов делает проблему их прогнозирования актуальной в практическом отношении, так как они приводили к серьезным экономическим последствиям. Учитывая, что аномальные геодинамические процессы, связанные с разработкой месторождений углеводородов, могут проявляться в различных формах – землетрясения, просадки земной поверхности, горизонтальных сдвигов массивов горных пород, активизации разломов, то контроль за этими явлениями должен выполняться соответствующими методами.

Множество различных комплексов, в т.ч. геолого-геофизические, дистанционные, геохимические и другие методы являются основой для проведения оценки и анализа природно-техногенной геодинамики [33]. В действительности же, использование достаточного количества таких методов, суть которых не значительно отличается друг от друга, требует значительных финансовых затрат. С целью экономической целесообразности и высокой эффективности методов по контролю за развитием вышеуказанных процессов, необходимо использовать оптимальный состав методов мониторинга.

Определенно, невозможно сделать окончательное решение о характере проявления тех или иных геодинамических событий. Несмотря на это, стоит перечислить основные, наиболее часто встречаемые события техногенного характера на нефтегазовых месторождениях:

- 1) активные разломы, которые могут активизироваться под влиянием процессов разработки месторождений углеводородов;
- 2) обширное проседание земной поверхности;
- 3) горизонтальные сдвиги массивов горных пород;
- 4) землетрясения [33, с. 3-12].

Выбор комплекса мер по мониторингу вышеизложенных событий негативного геодинамического характера, базируется на характере возникновения природного и природно-техногенного плана. Выбранные методы мониторинга необходимо запланировать на весь период разработки месторождения углеводородов. Как правило, ориентируются на срок продолжительностью от 4 до 5 лет. Такими методами являются:

- деформационный мониторинг;
- GPS-мониторинг;
- гравиметрический мониторинг;
- сейсмологический мониторинг [33, с. 3-12; 34].

Построение и развитие систем мониторинга основывается на расположении скважин вблизи максимального извлечения нефти на нефтегазовом месторождении и в зависимости от объема накопленной добычи. Помимо этого, имеет значение размещение дополнительных объектов обустройства в пределах исследуемого месторождения.

Таким образом, система многофункционального мониторинга на территории разрабатываемого месторождения позволит избежать статических построений. Иными словами, создается гибкая система контроля за непрерывно меняющейся в пространстве и во времени геодинамической ситуацией в соответствии с непрерывно меняющейся промыслово-геологической ситуацией при разработке нефтегазового месторождения [33, с. 3-12].

Исходя из этого, перечисленный комплекс методов в тандеме с существующей информацией, станут достаточными для проведения необходимых исследований закономерностей пространственно-временного распределения параметров современной природно-техногенной геодинамики недр на территории нефтегазового месторождения. Наряду с этим, не стоит забывать о главном правиле при проведении данных работ – своевременное

выполнение мер по контролю возникновения и развития геодинамических явлений и оценка (прогнозирование) критического развития этих явлений [33, с. 3-12].

Результат обзора нижеследующих статей показывает использование различных подходов для оценки влияния техногенного влияния на окружающую среду согласно современным литературным источникам Дальнего и Ближнего Зарубежья. В вопросах прогнозирования землетрясений стоит выделить труды [35-37]. Зарубежный опыт реализации методов оценки проявления негативных геодинамических последствий, а именно гравитационных аномалий, в результате длительной разработки месторождений нефти и газа рассмотрен в работах [20, р. 54-60; 38-41]. В связи с тем, что исследование гравитационных аномалий неразрывно связано с решением прямой задачи гравиметрии, выделены труды авторов [42-46] в этой области.

Значительное количество добычи нефти и газа на резервуарах стали причиной неоднократных случаев проявления существенного отрицательного гравитационного эффекта. В статье [47] исследуется закономерность гравитационной аномалии в крупных нефтегазохранилищах на основе таких параметров, как амплитуда ловушки (H), толщина резервуара (h), радиус пласта (l), структурный радиус резервуара (L) и глубина залегания нефтегазового резервуара (z). С помощью различных моделей этих коллекторов имитируются случаи с поочередным изменением вышеперечисленных параметров. В результате было определено, что гравитационная аномалия, вызванная нефтью и газом, увеличивается относительно, по мере увеличения структурного радиуса или уменьшения структурной амплитуды, а увеличение же глубины залегания нефти и газа ведет к ослаблению гравитационной аномалии.

В статье [38, р. 1-8] для того, чтобы исследовать границы аномального поля для 3D модели прибегают к использованию метода с учетом известной информации о средней глубине плотности z_0 (уровня, относительно которого изменяется топография), глубине контуров в выбранных точках Δh и контрасте плотности σ . Гравитационная аномалия $\Delta g(x, y, 0)$ (далее сокращенно Δg) определяется по формуле (1.1):

$$\Delta g = G \iiint_V \frac{\sigma \zeta}{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + \zeta^2]^{\frac{3}{2}}} d\xi d\eta d\zeta \quad (1.1)$$

где G – гравитационная постоянная;

σ – контраст плотности между двумя средами (т.е. остаточная плотность).

Метод заключается в вычислении разницы между наблюдаемыми (g_{obs}) и рассчитанными значениями гравитационной аномалии (g_{cal}), которое определяется по формуле (1.2):

$$h^{n+1} = h^n + k \frac{g_{obs} - g_{cal}}{2\pi G \sigma} \left(\frac{z_0 + \Delta h}{z_0} \right)^\beta + h_{corr} \quad (1.2)$$

где k – коэффициент быстрой сходимости;
 β – регулируемые параметры;
 h_{corr} – коррекция ограничений глубины;
 h^{n+1} – глубина коррекции.

В случае значительного расхождения от предварительно заданного значения σ , итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто необходимое значение или при достижении максимального количества шагов итерации.

В статье [15, р. 955-965] определяют несоответствие между наблюдаемыми и теоретическими гравитационными аномалиями для антиклинальных и синклиналильных складок. Авторы используют методы оптимизации. Процесс оптимизации сводится к подгонке теоретических данных к наблюдаемым данным и дальнейшей оценкой параметров глубин к вершине и дну структуры (z_1, z_2), угла кромки складки (i).

В статье [20, р. 54-60] анализируют гравитационные аномалии осадочных бассейнов для оценки их параметров (глубины, плотности, толщины плиты). Благодаря использованию множества наблюдаемых значений гравитационной аномалии на профиле и рассчитанных значений можно определить структуру самого осадочного бассейна. Сравнивая значение наблюдаемой гравитационной аномалии (g_{obs}) и рассчитанной (g_{mod}), стремятся уменьшить разницу между ними и за счет этого улучшить показатель глубины. Метод проверялся как на искусственном примере, так и в реальных условиях.

В работе [48] авторы приводят результаты геодезических наблюдений, проводимых на комплексном геодинамическом полигоне в течение 2005-2008 гг на территории Астраханского газоконденсатного месторождения. За этот период на данном месторождении зафиксировано три техногенных землетрясения магнитудой до 3 баллов. Комплексный геодинамический полигон включал в себя сеть нивелирования и спутниковых наблюдений за деформациями земной поверхности, сеть сейсмоприемников, гравиметрических и атмосферных геохимических наблюдений. Наблюдения показали, что техногенному сейсмическому событию предшествуют поднятия поверхности и последующие интенсивные оседания, вызванные сбросом напряжений и разгрузкой массива. Данное явление можно рассматривать как деформационный предвестник и использовать для прогноза техногенных сейсмических явлений на месторождениях нефти и газа.

Существуют различные способы предсказания землетрясений, основанные на многолетних исследованиях различных геофизических, геологических, механических, метеорологических и других параметров среды [48, р. 427-433]. Одним из важных факторов при прогнозе землетрясения на основе геофизических параметров является исследование изменений аномальных вариаций гравитационного поля Земли.

Известны примеры исследований прогноза мощнейших землетрясений на основе зарегистрированных аномалий гравитационного поля Земли. Одним из таких исследований являются результаты Глобальной Сети Прогнозирования Землетрясений (GNFE) [35, р. 3-37]. Согласно GNFE геофизической станцией ATROPATENA было определено, что за 3 дня до крупного землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. магнитудой 8-9 баллов были зарегистрированы интенсивные аномальные вариации силы тяжести. Станциями прогнозирования землетрясений ATROPATENA, установленными в ряде стран, так же были зарегистрированы измеренные вариации в Исламабаде (Пакистан), Баку (Азербайджан) и Стамбуле (Турция), которые предсказали дальнейшие землетрясения. Стоит отметить, что данные исследования на 87-90% помогают определить вероятность землетрясения.

Согласно патенту [49] был изобретен краткосрочный способ прогнозирования землетрясений. Способ подразумевает под собой регистрацию аномальных вариаций значений гравитационной постоянной перед сильными землетрясениями. На основании полученных параметров аномалии и кинематики тектонических волн получают местоположение эпицентра, магнитуду, период возникновения и количество прогнозируемых землетрясений.

В статье [36, с. 84-87] рассмотрен вопрос возникновения неприливных вариаций силы тяжести. Неприливные вариации силы тяжести образуются в результате разности между наблюдаемыми значениями гравиметра и теоретическими значениями приливных лунно-солнечных вариаций силы тяжести, которые рассчитаны по формулам. В результате анализа полученных графиков неприливных вариаций силы тяжести были замечены пульсации в первой половине интервалов. Было определено, что источником таких изменений остаточной аномалии является солнечная активность. Подобный анализ поможет определить краткосрочный прогноз землетрясений.

Одной из причин проявления сейсмической активности на месторождениях нефти и газа является закачка воды в пласт жидкости под высоким давлением [37, с. 69-77]. К такому способу прибегают в связи со снижением пластового давления в результате длительной разработки месторождения. В процессе закачки воды возможно проникновение нагнетаемой жидкости в трещины, тем самым вызывая проявление техногенной сейсмичности.

Оценка потенциального геодинамического риска и возможных негативных последствий длительной разработки месторождений невозможна без комплексного геодинамического мониторинга месторождения УВ [50], в том числе, изучения динамики пластового давления. Оптимальный по точности и быстродействию комплекс методов для оценки геодинамических процессов сочетает мониторинг деформаций (нивелирование, спутниковая интерферометрия, InSAR) с гравиметрией. Последний метод, как недорогой, быстрый и эффективный метод геофизики, успешно используется в процессе разработки месторождения при оценке влияния флюидозамещения в

продуктивных пластах, изучении уплотнения коллектора и зон активизации разрывных нарушений, выделения участков повышенной промышленной и геодинамической опасности и т.д. [51]. В работе [23, с. 3-152] представлен пример комплексной оценки геодинамических процессов, происходящих при разработке месторождений углеводородов на основе нивелирования и спутниковых наблюдений.

Статья [40, р 87-95] посвящена определению формы осадочного бассейна с использованием гиперболической функции контраста плотности. Для этой цели рассматривается гравитационная аномалия и определяется ее глубина, т.к. она изменяется вместе с плотностью. Данное исследование будет полезно для предварительной оценки нефтегазового потенциала района и для планирования сейсмических и поисковых скважин.

Как известно, одним из способов в идентификации гравитационных аномалий является решение обратной задачи гравиразведки. В статье [16, с. 72-78] авторы рассматривают решение обратной задачи гравиразведки при анализе месторождений полезных ископаемых в Казахстане с применением методов оптимизации. В результате был получен функционал, который препятствует применению известных методов оптимизации для практического решения задачи. Более того, была выявлена высокая погрешность восстановления плотности гравитационной аномалии, что обусловлено условиями ограниченного объема экспериментальных данных. Таким образом, авторы предлагают использовать генетические алгоритмы, которые не связаны с вычислением производных, в задачах гравиметрии.

Выявление отклонений от нормы выявляются на первом этапе проведения мониторинга. На данном этапе определяются признаки связи появления деформационных процессов с разработкой месторождения углеводородов. В случае значимых, но не аномальных отклонений, структура методов мониторинга сохраняется на период следующей стадии мониторинга.

Таким образом, первый этап работ включает в себя проектирование системы наблюдений с редкостными, но рационально выбранными профилями месторождения и пунктами наблюдений. При этом, относительно редкая сеть такой системы должна полностью «покрывать» всю территорию месторождения и смежные с ним участки. Системы наблюдений должны охватывать также объекты обустройства, входящие в сферу воздействия возможных аномальных геодинамических событий, исходя из результатов априорного анализа имеющейся геолого-геофизической информации [33, с. 3-12].

Наличие же аномальных параметров в результате проведения мониторинга предусматривает на следующем этапе работ развитие систем мониторинга с большей пространственно-временной детальностью наблюдений для более детального контроля за развитием аномальных деформационных процессов природно-техногенного генезиса. При этом сохраняется комплекс базовых методов с возможным подключением, например, сейсмологического и геохимического мониторинга.

Проведенный обзор современных источников подтверждает актуальность исследования методов и моделей в оценке техногенного влияния на окружающую среду в районе добычи углеводородов, как в Казахстане, так и во всем мире.

1.3 Обзор и анализ развития специализированных систем по работе с геоданными

В настоящее время существуют множество разновидностей программного обеспечения (ПО) в задачах обработки и анализа данных, в т.ч. где реализуются алгоритмы решений по работе с геолого-геофизическими данными. Очевидны имеющиеся различия в построении таких программ со стороны их организационной структуры и смысла построения. Имеющиеся те или иные разнородные геолого-геофизические данные напрямую являются целевой составляющей при построении подобных систем.

Активное внедрение методов вычислительной математики стало отправной точкой в развитии ИС, специализирующихся по обработке и интерпретации геолого-геофизических данных. Периодом такого развития приходится на конец 1950-х гг. Значительный вклад в исследование методов численного решения задач в геологоразведке внесли такие ученые, как Алексидзе М.А., Ломтадзе В.В., Старостенко В.И., Страхов В.Н., Марченко В.В., Воронин Ю.А. и мн. др. [52-55].

Известны специализированные системы 1960-х годов на основе таких исследовательских экспедиций, как «Днепргеофизика», «Укргеофизразведка», «Киевгеология». Данные системы были разработаны для обработки геолого-геофизических данных. Преимуществами программ, ориентированных на обработку данных гравиметрии и магнитометрии, являются их точность и быстрое действие. Однако, стоит обратить внимание, что данные системы были адаптированы под отдельные типы ЭВМ, что требовало дополнительных финансовых затрат [56]. К тому же эти системы, находясь в закрытом доступе в личной собственности экспедиций, представляли сложности в их адаптации извне. Поэтому, являясь, фактически первоисточником создания специализированных систем в области геофизики, развитие таких автоматизированных специализированных систем активно продолжило свое развитие.

1970-е гг. характеризуются развитием специализированных систем [57]. Примерами таких систем являются «АСКИНТ», «АСОГ-ЕС», «КОМЭ». Данные системы ориентированы на решение прямых и обратных задач гравиметрии. Основным недостатком этих систем является их ограниченность в функциональной наполненности [56, с. 32-157].

Научно-техническая революция значительно повлияла на дальнейшее развитие специализированных систем. Это время ознаменовано сильнейшим прорывом в технических возможностях ЭВМ, тем самым дав толчок в построении автоматизированных специализированных систем. Для комплексного анализа геолого-геофизических данных такие системы должны

были объединять в себе современные машинные методы анализа и вычислительные системы. Таким образом, образовывается новая веха проектирования систем, в функции которых входили сбор, обработка, хранение и интерпретация данных, в так называемые автоматизированные системы обработки данных (АСОД). АСОД справлялись с задачами комплексного анализа геолого-геофизических данных в узких задачах разведочной геофизики [56, с. 32-157].

Для реализации широкого спектра работ с геолого-геофизическими данными, возникла необходимость создания единого образа программного обеспечения (ПО). Ломтадзе В.В. представил общее представление программного обеспечения при обработке разнородных геолого-геофизических данных, где необходимо следовать единому сценарию проектирования. Согласно рисунку, основную роль выполняет общесистемное программное обеспечение, которое объединяет в себе программное и информационное обеспечение геолого-геофизических данных [58].

Структура АСОД стала основой для создания таких систем как ГРАВИПАК/ГЕОКОМПАС, СЕЙСПАК, КОМПАК, COSCAD-3D, ПАНГЕЯ и мн. др. [59]. Система ГРАВИПАК позволяет обрабатывать данные гравиразведки и магниторазведки. Необходимость в создании системы ГРАВИПАК обосновывается созданием единого ПО с использованием систем управления базами данных (СУБД). Недостатком является то, что не было прямой зависимости обработанных от основных функциональных частей системы. Прогноз и поиск месторождений УВ реализованы в системе СЕЙСПАК. Прогноз и поиск рудных и нефтегазовых месторождений является целью для системы КОМПАК. Система КОМПАК основана на методах факторного и компонентного анализов [60]. Система COSCAD используется с целью поиска и прогноза месторождений углеводородов и рудных полезных ископаемых по комплексу атрибутов [61].

Отличительной особенностью системы ПАНГЕЯ [62], которая получила широкое распространение за рубежом, является возможность использования всех видов данных, несущих информацию о строении месторождений полезных ископаемых. В этой системы заложенные программы, способные решать задачи геокартрирования. Моделирования нефтегазовых объектов и их прогноза по комплексу сейсмических атрибутов [60, с. 25-227].

При моделировании магнитных аномалий направление намагниченности пород принимается совпадающим с направлением главного геомагнитного поля в регионе. Reist с этой целью вычисляет компоненты нормального геомагнитного поля. Результат моделирования – эффективные плотности и намагниченности (разности между их истинными значениями в каждой из элементарных призм и значениями в «базовой» призме, выбираемой автоматически).

Пакет Dvor в Сигма-3D позволяет из 3D модели физических свойств пород извлекать отдельные разрезы по глубине, погоризонтные планы. Для горной местности, где аномальные эффекты рельефа превышают полезные

сигналы искомых объектов, А.С. Долгаль создал программу Relgrv-Relmag для интерпретации данных грави- и магниторазведки с помощью стохастического моделирования методом Монте-Карло точности определения топопоправок при гравиметрической и магнитной съемках.

Также известны зарубежные технологии комплексной интерпретации данных каротажа скважин GeoFrame, Tigress, Landmark, программные пакеты сейсмической интерпретации Sharisma, IESX, Schlumberger Petrel.

Экспертные системы (ЭС) в геологии представляют новую ступень ее автоматизации через логический вывод, основанный на знаниях. ЭС Prospector (США) имеет более 1000 правил и более 1000 понятий, сложный пакет средств объяснения и обретения знаний. Кроме прогнозных задач, экспертные системы в геологии предназначены для расчленения и корреляции разрезов нефтегазовых скважин, построения фильтрационно-емкостной модели резервуара и модели флюидной системы, обработки и интегрирования данных каротажа скважин (Intellog), реконструкции условий осадконакопления на основе данных каротажа и керна с учетом решения таких задач в сходных геолого-геофизических условиях (Facies), идентификации условий осадконакопления через перебор характерных форм кривых—«электрофаций» по комплексу каротажа (Schlumberger Faciolog), оценки потенциальных ресурсов углеводородов (Elfin). ЭС Stepclass представляет функциональную среду для выявления знаний и экспертизы в задачах классификации в два этапа: структуризация проблемной области; классификация на основе знаний эксперта в рамках структуры и ее уточнение. Строится дерево решающих правил для их рационального представления и оптимального поиска. На базе Stepclass разработана ЭС Fluid для диагностики флюидальной системы.

Тем не менее, несмотря на многообразие геоинформационных технологий в геофизике, до настоящего времени не удавалось должным образом интегрировать в них стохастические расчёты, и, в частности, для решения задач гравиметрии. Не в последнюю очередь, это связано со сложностью сопряжения детерминированных и вероятностных подходов к мониторингу месторождений УВ, а также выбора и испытания оптимальных алгоритмов. Частичному решению этой задачи и будут посвящены следующие главы этой диссертации.

На основе проделанного обзора можно сделать вывод о том, что в разведочной геофизике нет готовой целостной ИС-системы, которая решала бы все задачи, связанные с обработкой, хранением и интерпретацией результатов гравиметрических исследований. В связи с этим, возникает острая необходимость создания эффективной информационной системы, которая была бы способна решать все вышеуказанные задачи [63]. Разработка такой системы и является целью данного исследования.

Развитие ИС, обрабатывающих пространственно распределённую (координатно привязанную) информацию начиналось в конце 1990-х гг. с оцифровки бумажной картографической информации и создания электронных атласов (наборов тематических карт). Такие ИС выполняли преимущественно задачи, свойственные географическим и геодезическим приложениям, что

отразилось в их названии – географические информационные системы (ГИС). С течением времени многие из этих систем стали использовать для целей других наук о Земле, прежде всего, геологии и геофизики. Таким образом, ИС, используемые для обработки геолого-геофизических данных, стали называть в литературе геоинформационными системами, а поскольку они выросли из географических ИС, то сохранилась общая аббревиатура ГИС. В следующей подглаве хотелось бы остановиться подробнее на обзоре возможностях современных ГИС-систем.

1.4 Обзор и анализ геоинформационных технологий для оценки и прогнозирования техногенного влияния на окружающую среду

Перечень freegis.org в настоящий момент насчитывает 356 открытых ГИС разного типа, из них несколько десятков обновляются. Здесь только перечислим упомянутые в этом очерке системы: GRASS, QGIS, uDIG, gvSIG, SAGA, ILWIS, PostGIS, MapWindow GIS, ArcView GIS, UMN MapServer, GeoServer, OpenLayers, GeoExt, GeoWebCache. Заметим, что открытое ПО ГИС не имеет альтернативы на начальном этапе разработки новых ИС, когда нужно протестировать её функции в рамках максимально широкого сообщества будущих пользователей.

Улучшение поддержки, участие отечественных разработчиков в международных проектах, ростом общих знаний о ГИС улучшает перспективы открытых ГИС. Подспорьем в этой области есть пилотные проекты, показывающие уровень готовности открытых ГИС к реальной работе в разных отраслях. Одним из таких проектов и является ИС мониторинга месторождения УВ по данным наблюдения вариаций силы тяжести, стартовая версия которой представлена в настоящей работе.

Обзор следующих статей рассматривает подходы с использованием различных инструментальных средств, которые используются при разработке месторождений нефти и газа, а также позволяющие оценить потенциал нефтегазового района, дать эффективные предложения по обработке данных в результате разведки.

В статье [39, р. 168-175] описан процесс моделирования различных геофизических методов с помощью графического интерфейса Comsol: гравитация, магнетизм, удельное сопротивление, индуцированная поляризация. Такие методы используют для определения структуры и состава поверхности Земли. Модели используют данные аномального поля и далее их сравнивают с лабораторными данными.

В статье [41, р. 301-312] усовершенствован метод сопряженного градиента Холецкого с использованием параллельного алгоритма на графическом процессоре NVIDIA Tesla C2050. Расчеты проведены на основе данных гравитационного градиометра, который все чаще используется при разведке нефти и газа. В результате было сокращено время обработки результатов (инверсии данных 3Д) и доказана эффективность предлагаемого метода.

На сегодняшний день активное применение также находят и геоинформационные системы (ГИС) как инструменты хранения, обработки и накопления разнородных данных в различных областях науки и образования. Немаловажное применение ГИС нашли и в области наук о Земле, поскольку подобные технологии являются важной составляющей исследований при оценке строения земной коры комплексом геофизических методов при проведении поисково-прогнозных работ. Необходимость интерпретации экспериментальных данных анализа геофизических данных при изучении глубинного строения Земли, построение картографических систем географических, геологических, топографических и др. карт назначения и стало основой для создания и активного применения геоинформационных систем [60, с. 225-227].

ГИС – это специализированный программный комплекс, состоящий из интерактивных электронных карт, базы данных и набора алгоритмов обработки данных [64]. Такие системы решают задачи не только информационно-поискового характера, но и задачи природопользования, таких как строение земной коры, мониторинг природных систем, поиски месторождений полезных ископаемых, геокартинг и т.д. [60, с. 225-227].

Основные направления, которые призвана решать геология и геофизика, как совокупности наук, исследующих строение Земли и земной поверхности, связана с анализом данных. Можно выделить основные задачи, связанные с анализом: выделение геологических тел, расчленение разрезов, корреляция разрезов, построение прогнозных карт, комплексная интерпретация геологических и геофизических данных и т.п. [65]. Исходя из вышесказанного, процесс решения геологической задачи сводится к составлению планового этапа реализации автоматизированной системы при помощи математической логики. Ключевыми этапами математических методов являются: постановка задачи, выбор объекта исследований, выбор описания объекта, оценка результата и его интерпретация [60, с. 225-227].

Рынок геоинформационных систем развивается довольно динамично. Как и в большинстве случаев, на этом рынке есть лидеры – как явные, так и второго плана. Есть и небольшие компании, чьи ГИС технологии предназначены для совсем небольших целей. На сегодняшний день Республика Казахстан претерпевает бурное развитие геоинформационных технологий по причине расширения нефтегазовых месторождений, появления большого объема данных для их дальнейшей обработки, доступность получения спутниковых снимков за приемлемую цену. Следует отметить, что наша страна оперирует несколькими развивающимися компаниями, которые занимаются созданием и сопровождением собственных ГИС проектов, а также внедрением уже имеющихся неоспоримых мировых лидеров по созданию геоинформационных технологий. Так, Казахстан является поставщиком одного из ведущих производителей геоинформационных систем – компании ESRI. Продукты компании ESRI распространены по всему миру и их пользователями являются

более миллиона людей. ГИС MapInfo так же завоевала наш рынок еще со времен получения нашей страной независимости [66].

Существует ряд зарубежных технологий, которые ориентированы на решение задач комплексного анализа космо- и аэросъемок, наряду с данными наземных геологических, геохимических, геофизических методов, такими системами являются ГИС-ПАРК и ГИС Интегро [67, 68]. Эти системы являются векторно-растровыми с сочетанием функций картографической, информационно-справочной, аналитической и прогнозирующих систем. Область применения подобных систем имеет достаточно широкое применение, поскольку они ориентированы на решение проблем геокартирования, структурно-тектонического районирования, прогноза и поисков месторождений твердых полезных ископаемых. Подобные задачи решаются на основе интегрирования разноуровневых и разнометодных по координатно привязанным пространственным геолого-геофизическим данным [66, с. 118-127].

ГИС ПАРК охватывает весь спектр геологических от номенклатуры листов карты до прогноза полезных ископаемых и при этом работает на маломощных компьютерах. Главные достоинства: включены все геологические стандарты (индексы, крапы, ролики карт). Недостатки: сложная в использовании, работает медленно и не всегда стабильна [60, с. 225-227].

Геоинформационная система ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА создана для обработки и интерпретации геофизических данных при решении геологических задач с учетом различных стадий геологоразведочного процесса. Отличительной ее особенностью является ряд программных и технологических процедур, позволяющих реализовать методику интерпретации данных комплекса геофизических методов при изучении глубинного строения земной коры [60, с. 225-227].

Немаловажную ценность составляет, разработанная в ОАО «Центральная геофизическая экспедиция», система динамической визуализации – SeisGEO [69], способную решать широкий круг задач, в частности задач динамического визуального анализа [60, с. 225-227].

Технология динамического визуального анализа активно применяется для исследования природных, метеорологических, экологических процессов, при мониторинге нефти и добыче полезных ископаемых для крупных месторождений. Визуальный анализ данных имеет место при нечетком видении решаемой проблемы с целью дальнейшего получения дополнительной информации об объекте исследования [60, с. 225-227].

Мощнейший программный продукт компании Geosoft Oasis Montaj – мировой лидер среди геофизических программ обработки данных и построения карт. Данный программный продукт предназначен для обработки данных и построения карт, который разработан для удовлетворения растущих потребностей геологической отрасли. Oasis montaj является средой для эффективного объединения, просмотра, импорта и сравнения больших объемов геофизических, геохимических и геологических данных. Программа ускоряет анализ данных и обеспечивает создание эффективных решений

большинства практических задач. Дополнительные модули Geosoft montaj добавляют в Oasis montaj геофизический и геохимический анализы, изображение скважин в 3D, фильтрацию данных магнитометрии и гравиметрии, уравнивание опорных сетей, решение обратных задач и многие другие функциональные возможности [60, с. 225-227; 70, 71].

Коммерческие системы ArcGis и ArcView так же являются системами, решающие задач по природопользованию, а именно землепользованию, экологии, недропользованию и т.д. Обе системы являются продуктами компании ESRI – стандартом в области геоинформационных технологий. ArcGis считается более профессиональной ГИС нежели ArcView, поскольку имеет больше возможностей по оформлению карт (индексы, редактирование, символов, линий, крапов, стилей). ArcGis более требовательна к ресурсам [60, с. 225-227; 72].

MapInfo – географическая информационная система, аналогичная ArcView, предоставляющая пользователям обширные функциональные возможности по визуализации и анализу пространственных данных. С MapInfo возможны сбор и хранение картографических данных в БД с учетом пространственных свойств и отношений объектов, а также их редактирование и обработка. Основное отличие от ArcView заключается в том, что объекты разной геометрии могут находиться в одном слое, можно настраивать вид для одного объекта вне общей легенды, пересматривать структуру баз данных в процессе работы. Главным преимуществом также является то, что система способна импортировать файлы формата ArcView (mid+mif) [60, с. 225-227; 73].

Построенная на основе методов математической логики, система TEST, используется в качестве прогноза и поиска рудных и нефтегазовых месторождений. Расчет и построение карт плотности изученности территории сейсморазведки можно осуществить благодаря этой системе [60, с. 225-227].






Интегрированная среда GIS – Isoline является еще одним примером системы, которая имеет расширенные возможности для геологии и недропользования [60, с. 225-227].

Составляющие технические характеристики ГИС, такие как системы управления базами данных (СУБД), операционные системы (ОС), Web-сервера и прочие характеризуют их собственными методиками и широтой использования. В таблице 1 продемонстрирована сравнительная характеристика крупнейших мировых ГИС систем с учетом некоторых их технических возможностей [60, с. 225-227].

Проведенный обзор литературных источников показал, что, определенно, ГИС-системы ориентированы на решение задач обработки и хранения разнородных данных с учетом их достаточного объема. Согласно определению по [73, р. 3-250], под ГИС понимается информационная система по обеспечению сбора, хранения, обработки и визуализации пространственных данных. Решая общие задачи манипуляций пространственными данными, ГИС-системы не предназначены для решения узких специализированных задач, особенно, учитывая ограниченный объем данных. Более того, известные ГИС-

системы являются чрезвычайно дорогостоящими, поскольку есть необходимость приобретения полного пакета услуг, предоставляемых ГИС-системами. В этой связи представляется целесообразным разработать целостную ИС для обработки результатов гравиметрического мониторинга на основе современных методов математического анализа с целью предотвращения возможных негативных геодинамических последствий на нефтегазовых месторождениях (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика технических возможностей ГИС

| Параметры | MapServer | GeoMixer | ArcGIS | Google Maps API | QGIS |
|----------------------|---|---|---|---|---|
| Тип лицензии | Бесплатное ПО | Условно-бесплатное ПО | Запатентованное ПО | Бесплатное ПО | Бесплатное ПО |
| Страна производитель | США | Российская Федерация | США | США | Volunteer community |
| Разработчик | University of Minnesota | RDC ScanEx | ESRI | Google | Volunteer community |
| Документация | Английский | Русский | Английский, Русский | Английский, Русский | English, Английский, Русский |
| Язык разработка | C/C++ | .NET, Flash | C#, Visual Basic, Python | JavaScript; Python | C++ и Python |
| Язык API | Java, .NET, Perl, PHP, Python, Ruby | JavaScript | JavaScript; Flex; Silverlight | JavaScript | QT, Python |
| Доступные службы OGC | WMS; WFS | WMS | WMS, WCS, WFS, WPS и WMTS | OGC KML, WMS, WFS | WMS, WFS, WCS, WFS, WFS |
| Work with tiles | Нет | Да | Да | Да | Да |
| Текущая версия | 6.4.1 от 02.01.2014 | 2.0 от 16.03.2014 | 10.2 от 30.07.2013 | Version 3 от 01.02.2013 | 2.12 «Lyon» |
| Официальный адрес | http://www.mapserver.org | http://geomixer.ru/ | http://www.esri.com | https://developers.google.com/maps/ | http://www.qgis.org |
| Скриншот |  |  |  |  |  |

Выводы по 1-му разделу

На сегодняшний день проблема изучения проявления геодинамических последствий на нефтегазовых месторождениях стоит на глобальном уровне. Несмотря на то, что подобные последствия могут быть представлены как в виде техногенных землетрясений, так и в виде просадок земной поверхности,

основанием для их прогноза должны служить многолетние исследования различных параметров среды.

На основании работ [38, р. 1-7; 47, р. 2949-2958] сделан вывод, что при оценке гравитационных аномалий необходимо учитывать известные параметры о глубине, плотности, координатах источников возмущения аномалии силы тяжести и другие. Процесс оптимизации алгоритма сводится к сравнению теоретических и рассчитанных данных по формулам, которые описаны в трудах [15, р. 955-965; 39, р. 168-175].

Анализ литературных источников показал, что методы оценки гравитационных аномалий сводится к решению прямой задачи гравиметрии. Решение прямой задачи с помощью геометрических фигур описаны в трудах [43, с. 97-99; 44, с. 105-109]. Статья [44, с. 105-109] содержит ценный обзор источников, посвященных методам решения прямой задачи гравиметрии и нахождения их оптимального решения.

Для программной обработки задач исследования гравитационных аномалий необходимо иметь ввиду особенности архитектуры современных вычислительных средств. Поскольку различные методы оценки гравитационных аномалий требуют различных вычислительных ресурсов, то, вполне объяснимо, что некоторые авторы делают акцент на определенных технических характеристиках ЭВМ. Так, авторы [39, р. 168-175; 41, р. 301-312] считают важным реализацию вопросов 3Д вычислений проводить с использованием графического интерфейса Comsol и NDIVIA Tesla C2050 соответственно. Авторы [15, р. 955-965; 40, р. 87-95] сводят эффективность и быстродействие своих методов в зависимости от быстродействия вычислительной системы.

Многоуровневый характер геолого-геофизических данных определили необходимость в развитии информационных систем. С каждым днем информационные системы становятся необходимым инструментом в решении задач природопользования. Широкий спектр информационных технологий имеет свои сильные стороны, которые направлены на решение конкретных задач в определенной сфере их применения. С учетом обзора возможностей информационных систем и технологий в разведочной геофизике можно сказать, что их основное назначение заключается в хранении и обработке разнородных данных, быстрого доступа к ним и построении карт различного содержания и назначения, проведения качественного мониторинга. Подводя итогу, можно сказать, что в основном, существующие информационные системы направлены на решение задач в определенной сфере их применения. В связи с этим каждая геоинформационная система сохраняют свою уникальность и направленность. На сегодняшний день бурное развитие информационных систем и технологий в сфере геофизических исследований в Республике Казахстан набирает стремительные обороты. В РК осуществляется разработка собственных территориальных ИС, которые, к сожалению, еще не способны конкурировать на мировом рынке. С развитием технологий и открытием новых возможностей, как на Земле, так и в космосе позволяет человечеству сохранить актуальность

развития методики исследований разработки ИС в геофизике не только в РК, но и во всем мировом сообществе [60, с. 225-227].

Проведя анализ существующих программных решений (Oasis montaj [74], КОСКАД 3D [75], ZondMag3D [76], VECTOR [77], СИГМА 3D [78]) можно заключить, что для решения рассматриваемой нами задачи доступные специализированные программы и автоматизированные системы малоэффективны, так как либо они требуют большого массива априорных данных, либо выполняют один-два этапа всего изучаемого процесса. Ввиду отсутствия полноценной ГИС, ориентированной на решение актуальной задачи обработки, хранения и интерпретации результатов геодинамического мониторинга состояния недр и сопутствующей геолого-геофизической информации, возникает острая необходимость в разработке эффективной информационной системы, в полной степени, решающей вышеуказанные задачи. Разработка такой системы и является целью данного исследования.

2 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗРАБОТКИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО ДАННЫМ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

2.1 Первичная обработка данных вариаций гравитационного поля на нефтегазовом месторождении

Проведение геодинамического мониторинга (ГДМ) состояния недр на месторождениях нефти и газа регламентировано нормативными законодательными документами РК и является обязательным мероприятием для компаний, которые ведут разработку месторождений.

Работы проводятся циклами – это результаты одного полевого сезона. Более чем 20-летний опыт показывает, что проведения одного цикла измерений в год бывает достаточным для накопления данных, на основе которых можно сделать выводы о наличии деформационно-напряженных состояний в недрах разрабатываемого нефтегазового месторождения [79-84].

В процессе разработки при замещении газа или нефти водой происходит изменение плотности пород коллектора. Зафиксировать его может современная геофизическая аппаратура, а высокоточный гравиметрический мониторинг при контроле над разработкой месторождений способен обеспечить недропользователю существенную экономию средств. Измерения производятся с помощью гравиметра — прибора для высокоточного измерения силы тяжести (рисунок 2.1). Перед началом работ гравиметр настраивается, проверяется правильность его работы, заносится информация о месторождении, номере гравиметра, дате проведения измерений и имя оператора, проводящего измерения.



Рисунок 2.1 – Гравиметр CG-5 AutoGrav

Для проведения гравиметрических измерений на месторождении устанавливаются гравиметрические пункты, распределенные по профилям. Профиля располагаются особым образом, например, пересекают все структурно-тектонические особенности месторождения: сводовую часть, разломы, скважины. На каждом гравиметрическом пункте измерения производятся двумя гравиметрами одновременно для повышения точности

наблюдений. Один полевой сезон по проведению гравиметрических исследований длится 2-3 дня [85].

По месторождению предоставляются первичные (сырые) данные из файла гравиметра в формате *.txt. Файлы гравиметра хранятся в папках, имя папки соответствует году проведения измерений, а имя файла соответствует дате проведения измерений и номеру гравиметра. Например, 26082015_116, где 116 – номер гравиметра, 26.08.2015 – дата.

В папке содержатся файлы с данными измерений одного полевого сезона, данные с нескольких гравиметров за несколько дней. Все наблюдения на территории месторождения выполняются по методике «центрального опорного пункта». В качестве центрального опорного пункта используется ОГП-Х. Продолжительность рейсов составляет 6-8 часов, смежного и текущего звеньев – не более 3-х часов. Рейсом считаются измерения от ОГП до ОГП. На каждом гравиметрическом пункте выполнены многократные измерения каждым гравиметром: не менее 4-х в серии. Продолжительность каждого измерения в серии 40 секунд. Контроль качества измерений осуществляется в течение смены выполнением контрольных измерений на одном пункте смежных звеньев, а также независимыми контрольными рейсами.

Автоматизирована следующая *методика обработки сырых данных*:

1. Отобрать в базу данных необходимую информацию из первичных (сырых) данных гравиметра по месторождению (из формата *.txt). К таким данным относятся: Название месторождения (Surveyname), Номер гравиметра (Instrument), Дата проведения гравиметрического исследования (Date), Номер пункта (STATION), Измерения гравиметра по пунктам (GRAV.), Чувствительность гравиметра к шумам (SD.), Температура гравиметра (TEMP), (TIDE), Время проведения измерения (TIME).

2. В процессе загрузки данных в базу программа должна отбраковать многократные измерения по каждому пункту, оставив только 4 значения, где расхождения между измеренными значениями силы тяжести (GRAV.) в сериях составляют 0,005 мГал, и отдать предпочтение тем значениям, в которых каждое последующее значение не будет повторяться с предыдущим. Необходимо учитывать время проведения измерения, так как на одном и том же ОГП может проводиться несколько замеров. Чтобы отличать замеры друг от друга, время между проведением замеров должно быть не менее 5 мин.

3. После определения 4-х измерений по пункту, необходимо рассчитать средние значения по данным GRAV, SD, TEMP, TIDE, TIME по каждому пункту. После расчетов средних значений, рассчитать значения dG по формуле (2.1):

$$dG = \frac{g_0 - g_{c1} - (g_{c2} - g_{c1})}{(t_{c2} - t_{c1}) * (t_0 - t_{c1})}, \quad (2.1)$$

где g_0 – значение вариаций силы тяжести на рядовом пункте;

g_{c1} – значений вариаций силы тяжести на первом контрольном пункте;

g_{c2} – значение вариаций силы тяжести на втором контрольном пункте;

- t_0 – значение времени на рядовом пункте;
 t_{c1} – значение времени на первом контрольном пункте;
 t_{c2} – значение времени на втором контрольном пункте.

При расчетах значение dG на ОГП должно быть равным 0.

В процессе вычислений, необходимо определить нуль-пункты, опорные пункты (ОГП), контрольные пункты и рядовые пункты. *Нуль-пунктом* называется пункт, с которого начинаются измерения гравиметра (нужен для того, чтобы ввести в действие гравиметр, подсветить красным цветом). *Опорным пунктом (ОГП)* называется пункт, относительно которого проводятся все расчеты, он идет сразу после нуль-пункта, может повторяться несколько раз в измерениях гравиметра (подсветить зеленым цветом). *Контрольными пунктами* называются пункты, на которых проводятся повторные независимые контрольные наблюдения (таких пунктов может быть несколько, подсветить синим цветом). *Рядовыми* называются все остальные пункты.

4. Прodelать шаги с 2-4 для всех файлов гравиметра и по всем дням.
5. Рассчитать оценку точности гравиметрических измерений, а именно:
 - рассчитать общее среднее по всем средним значениям dG с учетом двух гравиметров и всех дней;
 - рассчитать m по каждому пункту. m – количество dG по всем дням и по двум гравиметрам;
 - рассчитать отклонение от среднего по следующей формуле: Общее среднее dG -среднее dG по пункту;
 - отбраковать те отклонения от среднего, в которых значение превышает или равно 0,01. С учетом этого отбраковать значения средних dG и пересчитать значение m по каждому пункту;
 - рассчитать общую сумму всех m . Рассчитать n –количество всех пунктов;
 - рассчитать сумму квадратов отклонений (сумма всех отклонений от среднего с учетом отбракованных значений), затем точность рядовых по формуле (2.2):

$$\text{Точность рядовых} = (\text{Сумма квадратов отклонений}/m*n/(m-n))^{0.5} \quad (2.2)$$

Значение точности рядовых не должно превышать 0,07, иначе расчеты неверны. Если это значение лежит в допустимых пределах, идем дальше.

6. Построение графиков вариаций силы тяжести по определенным профилям.

Для визуального отображения результатов геодинимического мониторинга (ГДМ), необходимо сформировать консолидированную базу данных в формате Excel. В базе данных консолидируется полная информация о месторождении по всем проведенным циклам наблюдений: данные по высокоточному нивелированию; данные гравиметрических измерений; данные спутниковых наблюдений GPS, данные Заказчика, промысловые данные. Столбцы таблицы содержат следующую информацию:

1. А - Номер по порядку.
 2. В - Номер профиля.
 3. С и D столбцы содержат координаты (X, Y) нивелирной/гравиметрической точки наблюдения, добывающей/нагнетательной скважины, GPS-пункта (в UTM). Координаты точек наблюдения (нивелирного/гравиметрического/GPS-пункта) берутся из каталога координат, который был создан во время полевых работ после каждого цикла ГДМ.

4. E - Рассчитывается *расстояние между точками наблюдений* по формуле: $s_0 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$, где x_1 – координата первой точки по x, x_2 – координата второй точки по x; y_1 – координата первой точки по y; y_2 – координата второй точки по y; s_0 – расстояние между двумя точками.

5. F - Рассчитывается длина профиля от первой (нулевой точки) по формуле $s = s_{n-1} + s_{0(n+1)}$. Для первой (нулевой точки) $s_0 = 0$. Последняя цифра в данной графе покажет длину профиля, которая должна быть равна длине профиля, указанного в исходном файле каталога координат.

6. G, H, I, J - Следующие столбцы содержат данные об изменении значения гравиметрического поля (G). Вычисляются изменения гравитационного поля относительно значений последнего цикла измерений: G 5-1, G 5-2, G 5-3 и G 5-4. Количество столбцов должно соответствовать количеству циклов измерений минус 1. Например, если выполнено 5 циклов, то должны быть 4 столбца. Данные берутся из файла гравиметра

7. K – номера GPS, гравиметрических и нивелирных пунктов, добывающих и нагнетающих скважин.

8. L, M, N, O – содержат изменения значений высокоточного нивелирования (N). Так же, как и в 6 пункте, вычисляются изменения значений нивелирования относительно значений последнего цикла измерений: N 5-1, N 5-2, N 5-3 и N 5-4.

9. P, Q, R, S – содержат значения гравитационного поля с учетом поправки за рельеф местности. На гравиметрические наблюдения очень сильно влияет высота места, поэтому гравиметрические измерения нуждаются во введении поправок. Для того, чтобы определить поправку за высоту, по требованию ГДМ, гравиметрические пункты совмещаются с нивелирными пунктами. Тогда значения гравитационного поля с учетом поправки за рельеф местности определяется по формуле (2.3):

$$GN_{5-1} = 0,3086 * N_{5-1} + G_{5-1}, \quad (2.3)$$

где N_{6-1} – значение вертикальных движений земной поверхности за интервал времени между циклами 5 и 1;

G_{5-1} – значение вариаций силы тяжести за интервал времени между циклами 5 и 1;

GN_{5-1} – исправленное с учетом рельефа местности значение вариаций силы тяжести.

10. T, U, V, W – в данных столбцах на рисунке Г.9 содержится значения спутниковых измерений - GPS. Количество столбцов, так же как в предыдущих пунктах, должно соответствовать количеству циклов минус 1. Например, если выполнено 5 циклов, то должны в столбцах содержаться данные GPS 5-1, GPS 5-2, GPS 5-3, GPS 5-4. Данные берутся из исходных файлов, данных GPS.

11. X, Y, Z - В трех последующих графах идет промысловая информация о добыче: добыча нефти (m^3), добыча воды (Т), добыча газа (m^3). Информация берется из исходных файлов, данных о добыче.

12. AA - Для скважин обязательно дается информация по пластовому давлению.

13. AB – Закачка (нагнет.) тыс. m^3 .

Такая консолидированная сводная таблица формируется для каждого профиля отдельно. Информация для всех профилей храниться в одном Excel файле на разных листах.

На основе созданной сводной таблицы строятся графики вертикальных движений земной поверхности, вариаций силы тяжести, комплексные графики. Графики строятся с использованием программы Grapher. Grapher – это программа, позволяющая строить графики функций и наглядно представлять результаты решения уравнений.

Параметры для рисунка выбираются таким образом, чтобы все было читабельным на листе А4. Подписи выполняются в Arial 12. Для условных обозначений, названий циклов, обозначений разломов можно использовать 10 шрифт.

Как правило на графиках отображают сравнительную информацию изменения измеряемых параметров по отношению к последнему циклу наблюдений. Таким образом, при разработке компьютерной программы, необходимо предусмотреть возможность выбора номеров циклов для сравнения данных.

Интерпретатору результатов гравиметрических исследований бывает необходимо визуализировать результаты комплексного анализа данных за выполненный цикл работ. Тогда строятся комплексные графики геолого-геофизических и промысловых параметров. Данные нивелирования по месторождению за различные промежутки времени предоставляются в файле EXCEL.

Для оценки аномалий на нефтегазовых месторождениях, а также для прогноза риска возникновения негативных последствий добычи углеводородов проводят гравиметрический мониторинг. Сервисные компании, занимающиеся проведением гравиметрического мониторинга, хотели бы иметь в своем арсенале некую программу, которая могла бы проводить анализ данных гравиметрических исследований и определять причину возникновения гравиметрических аномалий.

2.2 Оценка моделей среды путем решения прямых задач гравиметрии

В основе гравиметрического мониторинга лежит измерение ускорения силы тяжести с помощью гравиметров [81, с. 3-200; 86]. Теоретическую основу при обработке данных гравиметра составляют математические модели рассматриваемых систем. Как известно, гравитационное поле относится к числу потенциальных полей и характеризуется скалярной функцией, называемой потенциалом гравитационного поля [87-90]. Потенциал гравитационного поля описывается уравнением Пуассона, в правую часть которого входит распределение плотности в рассматриваемой области (2.4). В этой связи под прямыми задачами гравиметрии понимают расчет потенциала гравитационного поля и его производных по известному распределению плотности, а под обратными задачами гравиметрии – восстановление распределения плотности по имеющейся информации о гравитационном поле [53, с. 3-120; 89, с. 5-300; 90, с. 3-440]. Такой информацией является показания гравиметров, измеряющих с чрезвычайно высокой степенью точности ускорение силы тяжести, которое с точностью до знака соответствует градиенту потенциала гравитационного поля.

$$\Delta\varphi = -4\pi G\rho, \quad (2.4)$$

При исследовании гравитационных аномалий на месторождениях нефти и газа значительное место занимает решение прямой задачи гравиметрии, которая помогает качественно определить гравитационные и магнитные аномалии. *Прямая задача гравиметрии* состоит в нахождении распределения потенциала поля при известном распределении плотности на основе решения уравнения Пуассона с соответствующими краевыми условиями. Суть прямой задачи заключается в вычислении элементов пространства с учетом заданных параметров аномального объекта (формы, размеры, глубина залегания, избыточная плотность и т.д.). *Обратная задача гравиметрии* состоит в восстановлении распределения плотности в месторождении по имеющейся информации о гравитационном поле. Зная распределение плотности можно получить значительную информацию о структуре месторождения.

Поскольку реальные аномальные геологические объекты не бывают идеальной формы из-за наличия плотностных неоднородностей, стараются аппроксимировать их на похожие геометрические тела простой формы или суммой этих тел. Например, в случае двумерного пространства к простым геометрическим телам можно отнести шар, горизонтальный и вертикальный цилиндры, трапецию, вертикальный уступ и т.д. с постоянной плотностью [91], а для трехмерных задач возможно использование призмы, сферических фигур и т.д. Для сложных геометрических форм с переменной плотностью прибегают к численному решению с помощью современных вычислительных средств. Таким образом, решение прямой задачи возможно для элементарных тел, которые имеют аналитическое решение.

Логика работы алгоритма серийных вычислений для прямой задачи гравиметрии проста: выбирается некоторое множество элементарных

аппроксимирующих тел с простой заданной геометрией внутри однородной слоистой среды. Предполагается, что эти тела располагаются в ограниченном слое, который содержит источники изучаемых аномалий силы тяжести. Все выше и ниже лежащие слои предполагаются однородными, с монотонным распределением плотности, которая имеет известную, постоянную в пределах каждого слоя величину. Математически подобное распределение удобно описывается известными линейными функциями в Гильбертовом пространстве. Исследователь изменяет параметры модели для предварительно выбранного по данным смежных методов опорного слоя. Решение прямой задачи осуществляется за счёт подбора оптимальных параметров для получения минимальной невязки между измеренными и расчётными значениями гравитационного поля [22, р. 939-1277].

Исходя из вышесказанного, математическую постановку задачи можно сформулировать таким образом. Необходимо решить прямую задачу гравиметрии для набора однородных сферических тел, горизонтальных призм и вертикальных уступов, нижняя кромка которых зафиксирована на предварительно заданной опорной глубине. Прямая задача требует *найти элементы поля силы тяжести по заданному распределению параметров* (форма, размеры, глубина залегания h , эффективная плотность $\Delta\sigma$) его источников. Известно, что решение прямой задачи гравиметрии в общем виде равно сумме притяжений $\Delta g_1 = \frac{Gdm(z-\zeta)}{r^3} = \frac{G\Delta\sigma(z-\zeta)dV}{r^3}$ всех элементарных избыточных точечных масс $dm = \Delta\sigma \cdot dV$, которыми представлено искомое аномалиеобразующее тело по формуле (2.5) [92]:

$$\Delta g_T = \int_V \frac{\Delta\sigma(z-\zeta)dV}{r^{3/2}} \quad (2.5)$$

В работе реализуется решение обратной задачи гравиметрии путем решения серии прямых задач на основании данных гравиметрических измерений. Метод реализован на примере простых математических моделей геологической среды: горизонтальная призма, однородная сфера, вертикальный уступ. Данная работа подразумевает решение серии прямых задач гравиметрии с помощью методов глобальной оптимизации, а именно с помощью метода имитации отжига и генетического алгоритма. Входными данными для этого этапа являются ранее обработанные данные гравиметрических измерений и геолого-литологическая характеристика. На выходе получаем численные результаты решения задачи. Полученные результаты лежат в основе следующего этапа работ, основанного на отображении данных по месторождению. Для осуществления данного этапа, необходимо использование данных из БД.

В таблице 2.1 приведены основные выражения для гравитационного и магнитного полей от тел правильной формы [79, с. 4-480].

Таблица 2.1 – Гравитационные и магнитные аномалии для тел простейшей формы

| Форма тела | Вид аномалии |
|--|--|
| Шар | Вертикальное притяжение: $V_z = \frac{fM\zeta}{(x^2 + \zeta^2)^{\frac{3}{2}}}$ |
| | Горизонтальный градиент: $V_{xz} = -\frac{3fM\zeta x}{(x^2 + \zeta^2)^{\frac{5}{2}}}$ |
| | Вертикальный градиент: $V_{zz} = \frac{fM(2\zeta^2 - x^2)}{(x^2 + \zeta^2)^{\frac{5}{2}}}$ |
| Горизонтальный однородный круглый цилиндр | $V_z = \frac{2f\lambda\zeta}{(x^2 + \zeta^2)}$ |
| | $V_{xz} = -\frac{4f\lambda\zeta x}{(x^2 + \zeta^2)^2}$ |
| | $V_{zz} = \frac{2f\lambda}{(\zeta^2 - x^2)(x^2 + \zeta^2)}$ |
| Тонкий вертикальный стержень | $V_z = \frac{f\lambda}{\sqrt{x^2 + \zeta^2}}$ |
| | $V_{xz} = -\frac{f\lambda x}{(x^2 + \zeta^2)^{\frac{3}{2}}}$ |
| | $V_{zz} = \frac{f\lambda\zeta}{(x^2 + \zeta^2)^{\frac{3}{2}}}$ |
| Бесконечная материальная вертикальная полоса | $V_z = \frac{-2f\mu x}{(x^2 + \zeta^2)}$ |
| | $V_{xz} = \frac{2f\mu\zeta}{(x^2 + \zeta^2)}$ |
| Бесконечная материальная горизонтальная полоса | $V_z = 2f\mu\left(\arctg\frac{x+l}{\zeta} - \arctg\frac{x-l}{\zeta}\right)$ |
| Вертикальные треугольные призмы | $V_z = f \iiint \rho(\zeta) \frac{(\zeta - z)}{\sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2}} d\xi d\eta d\zeta$ |
| Трапеция с вертикальными боковыми сторонами | $V_z = 2f \iint \rho(\xi, \zeta) \frac{(\zeta - z)}{(\xi - x)^2 + (\zeta - z)^2} d\xi d\zeta$ |
| Примечания: | |
| 1. f – константа гравитации. | |
| 2. ζ - глубины залеганий центра (осевой линии) аномальных тел. | |
| 3. λ, μ - линейная и поверхностная плотности. | |
| 4. M – масса шара. | |
| 5. ξ, η, ζ - переменные интегрирования. | |
| 6. $\rho(\xi, \zeta), \rho(\zeta)$ - распределение плотности | |

Решение прямой задачи гравиметрии играет значительную роль в исследованиях гравитационных аномалий на нефтегазовых месторождениях. Прямая задача гравиметрии подразумевает под собой определение характера гравитационного поля силы тяжести с учетом набора известных параметров среды (глубина, плотность, координаты источников аномалии, другие физические свойства среды) [93]. Аппроксимация на правильные геометрические тела простейшей формы неидеальных аномальных геологических объектов сводит их к решению прямой задачи гравиметрии.

В труде [66, с. 118-127] представлены основные выражения гравитационных и магнитных аномалий для тел простейшей формы. Наиболее подходящим геометрическим телом для аппроксимации в данной работе с учетом имеющихся данных гравиметрического мониторинга [94] на одном из нефтегазовых месторождений оказалась аппроксимация сумм пяти бесконечных горизонтальных призм. Формула решения прямой задачи для горизонтальной бесконечной призмы (формула 1), ограниченной плоскостями $x = \xi_1$ и ξ_2 , $z = \zeta_1$ и ζ_2 взята из формулы прямоугольного параллелепипеда и имеет вид (2.6):

$$U_z = G\sigma \left[\xi_1 \ln \left(\frac{\xi_1^2 + \zeta_2^2}{\xi_1^2 + \zeta_1^2} \right) - \xi_2 \ln \left(\frac{\xi_2^2 + \zeta_2^2}{\xi_2^2 + \zeta_1^2} \right) + 2\zeta_2 \left(\arctg \left(\frac{\xi_1}{\zeta_2} \right) - \arctg \left(\frac{\xi_2}{\zeta_2} \right) \right) + 2\zeta_1 \left(\arctg \left(\frac{\xi_2}{\zeta_1} \right) - \arctg \left(\frac{\xi_1}{\zeta_1} \right) \right) \right] \quad (2.6)$$

где G – гравитационная постоянная;

σ – плотность породы;

ξ_1 – начало профиля;

ξ_2 – конец профиля;

ζ_1 – верхняя кромка призматического тела;

ζ_2 – нижняя кромка призматического тела.

2.3 Решение обратной задачи путем решения серии прямых задач гравиметрии

В основе эффективной интерпретации гравитационных аномалий лежит комбинирование результатов наблюдения решения прямой и обратной задач гравиметрии. Как было ранее упомянуто, решение прямой задачи гравиметрии основано на определении значения гравитационного поля по имеющимся ее физическим параметрам. Данное диссертационное исследование, решая серию прямых задач гравиметрии, по сути, является основой для решения обратной задачи гравиметрии. Суть обратной задачи заключается в определении физических параметров среды на основе известных элементов гравитационного поля. Действительно, подход, используемый в данном исследовании, позволяет определять параметры геометрических тел простой формы на основе значения гравитационного поля. Ведь, оперируя известными измеренными значениями модельного распределения поля силы тяжести, возбуждаемым неким объектом,

определяется модель среды, как определённый набор параметров источника гравитационной аномалии (местоположение, геометрия, глубина и форма источника гравитационной аномалии).

По решению данной задачи известны труды таких авторов, как В.Н. Страхов, В.К. Иванов, П.С. Мартышко, Н.В. [95, 96]. Классическое решение обратной задачи основано на определении вертикальной производной потенциала гравитационного поля, где восстанавливается распределение плотности среды по известным результатам гравитационного поля. Реализуя задачу в таком подходе неоднократно было доказано, что решение обратной задачи имеет неединственность решений и является существенно некорректной [17, с. 124]. Если рассмотреть в задаче, что объем τ в трехмерном пространстве ограничен замкнутой поверхностью S , то потенциал его притяжения будет иметь следующий вид формула (2.7):

$$V(x, y, z) = G \iiint_{\tau} \frac{\sigma(\xi, \eta, \zeta)}{r} d\tau \quad (2.7)$$

где (x, y, z) – произвольная точка пространства R^3 ;

$$(\xi, \eta, \zeta) \in \tau; r = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2};$$

G – гравитационная постоянная.

Команда ученых под руководством проф. Серовайского С.Я. в результате решения обратной задачи выявили высокую погрешность восстановления плотности гравитационной аномалии, что обусловлено условиями ограниченного объема экспериментальных данных. Таким образом, было предложено наиболее эффективно решать обратную задачу с помощью оптимизационных методов, не требующих вычисления производной [16, с. 72-78].

В данной работе, путём последовательных приближений с помощью метода имитации отжига и генетического алгоритма, приведено решение обратной задачи гравиметрии посредством решения серии прямых задач для трех различных геометрических тел. Решая серию прямых задач гравиметрии, задаются параметры среды (глубина залегания, плотность объекта и т.д.), вычисляется значение гравитационного поля. Подбирая значения таких параметров, начинается минимизация расхождений между измеренными и рассчитанными значениями гравитационного поля. Получение минимальной разницы между реальными и модельными значениями гравитационного поля силы тяжести путем подбора оптимальных параметров плотности и длины профиля по имеющимся значениям гравитационного поля силы тяжести и глубины призмы и является целью данного диссертационного исследования.

2.4 Глобальная оптимизация решений прямой задачи гравиметрии для простых моделей среды эвристическими методами

В методике разведки полезных ископаемых как рудного, так и структурного типа ведущее место занимает оценка параметров залегания

аномальных тел, в частности, местоположения, геометрии источника, глубины и формы аномального источника. Обзор классических методов их решения (как детерминированных, так и вероятностных) дан в справочнике [97].

Особое место среди стохастических алгоритмов занимают методы глобальной оптимизации (генетические алгоритмы, нейронные сети, имитация отжига и мн. др.). Они широко применяются в решении геофизических задач с 1990-х гг. [98, 99]. В частности, эти методы активно используются в решении прямых и обратных задач геофизики (для потенциальных полей) в силу *допущения о случайном распределении* искомым параметров в исследуемых объектах [100].

Одним из таких методов является метод имитации отжига (simulated annealing) – метод глобальной оптимизации (поиска глобального минимума функции). Идея метода имитации отжига подсмотрена в процессе кристаллизации расплавленного вещества из жидкого состояния в твёрдое. В этом процессе атомы вещества, постепенно остывая на высоких температурах, замедляются, переходя в положение с наименьшей энергией. Математическая модель этого процесса позволяет распространить ее решение на множество его аналогов в других областях знаний. Преимущество метода относительно других методов оптимизации – способность избегать попадания в локальные минимумы, высокая скорость, малые затраты памяти. Это и определяет эффективное решение, в частности, для задач гравиметрии. Эффективное подтверждение этому тезису демонстрирует работа [14, p. 1-16].

При оценке параметров аномального тела имеет место применение метода глобальной оптимизации – метода имитации отжига. Возможность работы с несколькими параметрами одновременно является одним из преимуществ данного метода оптимизации [101]. В работе [93, с. 397-404] обосновано использование данного метода эвристической оптимизации для подбора значений по отсутствующим параметрам.

Цель программной реализации решения прямой задачи гравиметрии с применением методов глобальной оптимизации состоит в том, что, имея реальные значения гравитационного поля силы тяжести и параметры глубины (верхней и нижней кромок) призматического тела, подобрать оптимальные параметры плотности и длины (начала и конца профиля) призматического тела для получения минимальной нулевой разницы между модельными и реальными значениями гравитационного поля силы тяжести. Таким образом, решается обратная задача гравиметрии посредством решения серий прямых задач гравиметрии с помощью уникальных методов подбора параметров – метода имитации отжига и генетического алгоритма. Окончательным решением программы является получение следующих данных:

- количество возможных комбинаций при заданных параметрах;
- количество итераций;
- полученная разница между модельными и реальными значениями гравитационного поля силы тяжести;

- параметры плотности, начала профиля, конца профиля, при которых найдено модельное значение Δg ;
- полученное модельное значение гравитационного поля силы тяжести (Δg).

В труде [14, р. 1-16] дана оценка параметров источника аномалии (амплитуды k , формы q , местоположения x_0 , глубины z) методом сверхбыстрого отжига. Здесь к параметрам метода относят: начальную температуру, темп охлаждения, количество смещений на температуру, количество итераций. Получена модель средней точности после 10 итераций методом имитации отжига.

В решении задач гравиметрии в последнее время достаточно часто используют либо данные градиентометрии, либо трансформации полей в виде их разностных градиентов. И в том, и в другом случае приходится вычислять значения градиента исходного поля. Выражение градиента $V(x)$ грави- и магнитных аномалий для различных геологических структур в любой точке поверхности дано в труде [102] формула (2.8):

$$V(x) = \sum_{j=1}^M V_j(x_i) \quad (2.8)$$

В рамках эвристической оптимизации для оценки распределения аномалий силы тяжести авторы статьи ранее рассмотрели применение метода имитации отжига [85 р. 13-20], который также реализован в ИС GeoM. Метод реализован также на примере простых математических моделей геологической среды: горизонтальная призма, однородная сфера, вертикальная ступенька. Однозначно метод гарантированно находит оптимальное расхождение между измеренными и расчетными значениями гравитационного поля, но требует значительных вычислительных затрат. При уменьшении ресурсов, используемых для решения задачи, нахождение минимального остатка не гарантируется. В связи с этим возникла необходимость подвергнуть дополнительному решению прямой задачи гравитации простые математические модели с использованием другого метода глобальной оптимизации.

ГА был выбран как один из наиболее эффективных методов глобальной оптимизации [103]. Спектр применения ГА достаточно широк. ГА используется в разработке программного обеспечения, в системах искусственного интеллекта, сетевых технологиях, для расчета плана формирования поездов, строительства, для оптимизации токарной обработки и во многих других областях знаний. Итак, рассмотрим использование генетического алгоритма в различных задачах и решении задач, связанных с интерпретацией аномалий гравитационного поля силы тяжести.

В работе [104] с целью сокращения рутинных вычислений при проектировании моделей машинного обучения используется генетический алгоритм. Использование генетического алгоритма как способа оптимизации архитектуры двух моделей машинного обучения зарекомендовало себя с положительной стороны. Результатом статьи является достижение высокой

точности расчетов; кроме того, метод может быть легко распространен на задачи более сложного уровня. Несмотря на то, что метод может быть распространен на задачи более сложного уровня, в работе алгоритма также возникают трудности, что требует дополнительных вычислительных ресурсов.

В работе [105] объектом исследования являются беспроводные сенсорные сети, именно в работе рассматривается возможность повышения производительности этих сетей с помощью мобильных приемников. Моделирование мобильных приемников заключалось в использовании генетического алгоритма, который позволял собирать необходимые данные со статистических узлов. Примечательно, что в дополнение к изначально заданным параметрам для оптимизации было обнаружено, что в ходе расчетов в ГА могут быть добавлены дополнительные параметры для параллельной оптимизации. В данной работе эксперименты проводились с ограниченным объемом данных, что не может полностью подтвердить результаты исследования.

Еще одним примером использования ГА в сетевых технологиях является работа [106]. В данной работе была выполнена задача минимизации сетевых затрат в беспроводной ячеистой сети (WMN). В статье авторы также решают задачу с помощью другого метода оптимизации – метода имитации отжига (СА). Основным результатом работы является нахождение необходимого пути WMN, минимизирующего финансовые затраты. Недостатком работы является частое попадание в локальные минимумы из-за неоднородности целевой функции.

В статье [107] разработан метод расчета плана формирования одnogрупповых грузовых поездов (ОГП), который основан на использовании генетических алгоритмов. Авторы разработали оригинальный метод кодирования решения задачи расчета GLP в виде хромосом для использования с фитнес-функцией ГА. Метод использует концепцию разбиения множеств на непустые подмножества для представления комбинаций автомобильных потоков, проходящих через секции. Метод показал практическую ценность. Однако, как и в предыдущем исследовании, реализация генетического алгоритма не всегда находит глобальный минимум.

В статье [108] авторы предлагают уменьшить вес плотины за счет использования генетического программирования для поиска оптимальной бетонной конструкции. Процедура адаптации генетического программирования оказалась вычислительно эффективной, поскольку устраняется необходимость трудоемкого структурного анализа на каждом этапе расчета. Результаты показали оптимальные значения проектных переменных, которые удовлетворяют всем проектным ограничениям. Однако в работе не предусмотрена возможность адаптации исходных параметров к новым условиям. Этот недостаток делает реализацию алгоритма несколько ограниченной.

2.4.1 Оптимизация методом имитации отжига (SA)

Использование метода имитации отжига основывается на определении следующих трёх параметров [109]:

- 1) закон изменения температуры $T(k)$, где k – номер шага итерации;
- 2) порождающее семейство вероятностных распределений $G(x, T)$ со значениями в пространстве S ;
- 3) функция вероятности принятия решения $h(\Delta E, T)$ представлена в формуле (2.9):

$$h(\Delta E, T) = \frac{1}{1 + \exp(\Delta E/T)} \quad (2.9)$$

где ΔE – приращение функции энергии $f(x') - f(x)$;

x – новое состояние;

T – температура;

h – величина принятия нового состояния.

Алгоритм метода имитации отжига выглядит следующим образом [109]:

1. Случайно определить начальную точку $x = x_0$.
2. Вычислить целевую функцию $E = f(x_0)$.
3. Сгенерировать новую искомую точку x' .
4. Вычислить целевую функцию $E' = f(x')$.
5. Сгенерировать случайное число $\alpha \in (0; 1]$.
6. Если $\alpha < h(E' - E, T(k))$, то установить $x \leftarrow x'$, $E \leftarrow E'$ и перейти к следующей итерации. Иначе повторить шаг 2, пока не будет найдена подходящая точка x' .

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 2.2.

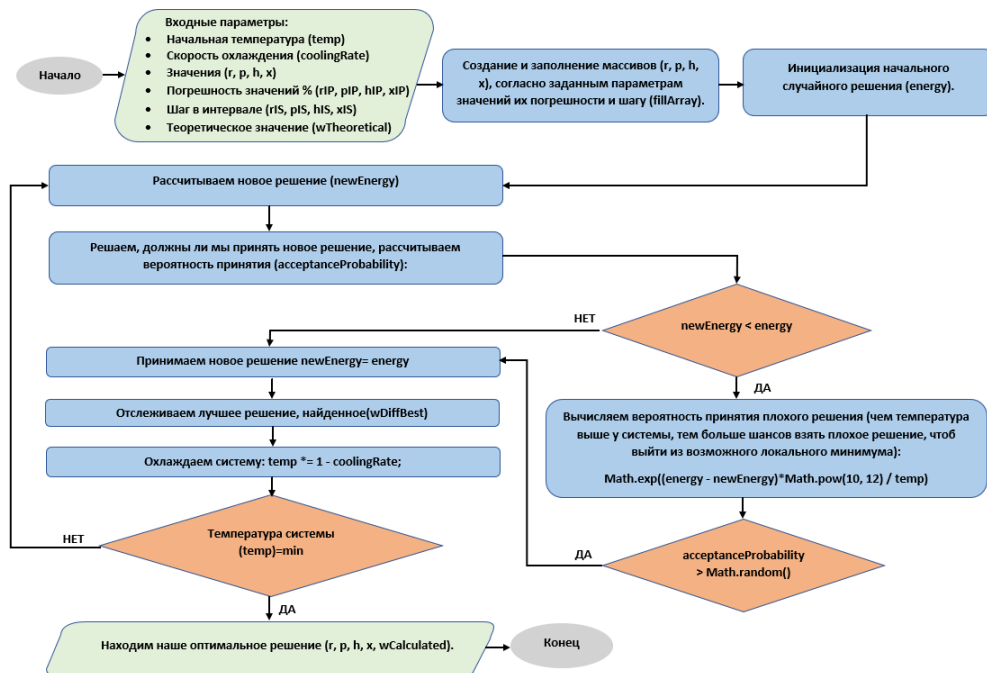


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритма имитации отжига

Существуют несколько видов метода имитации отжига. Самыми распространёнными являются *схема отжига Больцмана*, *метод быстрого отжига (распределение Коши)* и *метод сверхбыстрого отжига* [109, с. 133-148]. В этой работе даны примеры использования метода имитации отжига для интерпретации геофизических данных (оценки глубины источника аномалии) путём подбора полей.

Одна из модификаций метода имитации отжига – метод сверхбыстрого отжига (*very fast simulated annealing*), который находит широкое применение в исследованиях зарубежных авторов. Одним из основных преимуществ алгоритма, в отличие от других видов отжига, являются его высокая скорость убывания «температуры» и отдельная обработка параметров. Наглядно это можно увидеть в формуле изменения «температуры» формула (2.10):

$$T_i(x) = T_{(i;0)} \exp\left(-c_i k^{\frac{1}{b}}\right), c_i > 0 \quad (2.10)$$

где $c_i > 0$ и вычисляется по следующей формуле $c_i = m_i * \exp\left(-\frac{p_i}{b}\right)$;

p_i и m_i – дополнительные параметры алгоритма;

$T_i(x)$ – закон изменения температуры;

k – шаг итерации.

С учётом *априорных* геологических сведений о строении участка вдоль каждого конкретного профиля решалась прямая задача гравиметрии методом подбора для каждого профиля. Эта задача решалась для различных моделей геологической среды, содержащей в некотором горизонтальном слое источники аномалий силы тяжести. Основным методом решения избран скоростной метод отжига (*fast simulated annealing*) [98, р. 3-279; 99, р. 297-313] и, в качестве контрольного алгоритма, решение прямой задачи гравиметрии для уравнения Пуассона методом конечных разностей. Для дискретизации уравнения избрана разностная схема типа “крест” [110]. Исходные данные и априорные ограничения для обоих методов были одинаковые.

Алгоритм имитации отжига тестировался на примере решения одномерной (по профилю) прямой задачи гравиметрии для трёх распространённых классов тел: горизонтальная призма, сфера и вертикальный уступ. В качестве исходной модели среды принята горизонтально-слоистая модель с линейным изменением плотности внутри аномального слоя. Вне этого слоя предполагалась однородная вмещающая среда, которую описывает монотонное распределение плотности, имеющей постоянную заданную величину. Соответственно, математическая модель изучаемого слоя, содержащего источники аномалий, описывалась одним из трёх состояний: набор горизонтальных призм (с разной горизонтальной протяжённостью и плотностью); набор сферических тел (с различным радиусом и глубиной заложения центра масс); набор вертикальных уступов (с различной глубиной залегания и протяжённостью ступени).

В данной работе моделирование проводили методом подбора целевой

функции, последовательно подбирая расположение, размеры, форму и плотность σ аномалиеобразующих тел в программе расчёта гравитационных аномалий. Результаты моделирования представлены ниже.

В целом, результаты расчёта методом имитации отжига показали достаточно *устойчивое* решение при условии крайне ограниченного объёма исходных данных. В рамках последовательного подбора параметров получены итоговые модели изучаемой среды, обладающие приемлемым правдоподобием, точность решения по полю силы тяжести достигла 10^{-11} . Таким образом, метод имитации отжига позволяет быстро подобрать варианты подходящих решений с целью экспресс-анализа внутреннего строения геологической среды в границах изучаемого месторождения.

Ввиду небольшого количества данных результаты моделирования имеют ограниченную применимость и нуждаются в верификации с помощью других геофизических методов либо решения таких же задач на примере реальных данных существенно большей размерности.

Необходимым шагом для построения достоверных геолого-геофизических моделей является оценка и анализ распределения плотностных свойств моделируемых объектов по данным гравиметрической съёмки. С другой стороны, достаточным шагом является построение взаимно однозначного отображения параметров залегания аномальных тел в аномальном поле при условии минимальной невязки теоретического и измеренного полей является достаточным условием достоверного моделирования. Построение таких соответствий на предварительно выбранном классе геологических тел традиционно выполняется решением серии прямых задач гравиметрии. Сравнивая в нормированном пространстве по критерию невязки семейство рассчитанных и измеренных кривых гравитационного поля, можно подбирать сколь угодно сложные модели среды. При этом мы предполагаем, что изучаемое подпространство среды состоит из элементарных геометрических тел простой формы, аппроксимирующих геологический объект. Главным критерием последовательного сравнения искомым и измеренных значений поля является степень их совпадения с учётом доступной априорной информации об изучаемой среде [111].

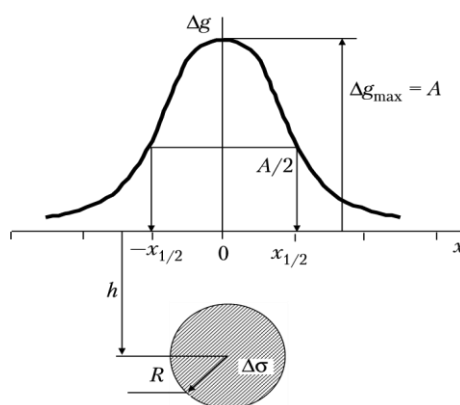


Рисунок 2.3 – Модель однородной сферы

Прямая задача над однородной сферой. Согласно рисунку 2.3 для решения прямой задачи гравиметрии для однородной сферы необходимо определить гравитационный эффект вдоль оси ОХ, проходящего через проекцию центра в начале координат. В этом случае, согласно Закону Всемирного тяготения, считается, что аномалия силы тяжести над однородной сферой и аномалия точечной массы, помещенной в его центре, совпадают.

Гравитационный эффект от однородного сферического тела радиусом R и объёмом V , с избыточной плотностью $\Delta\sigma$, расположенного на глубине h (рисунок 3б), в одномерном варианте рассчитывается по формуле (2.11):

$$g_c = \frac{G\Delta\sigma Vh}{R^3} = GM \frac{h}{(x^2+h^2)^{3/2}} \quad (2.11)$$

где $M = \Delta\sigma V = \Delta\sigma \frac{4}{3}\pi R^3$ – эффективная масса однородного сферического тела;

G – гравитационная постоянная;

h – глубина залегания тела;

x – центр сферического тела;

R – радиус;

σ – плотность.

Два параметра объекта (центр сферы x , радиус R) полагают известными и закрепляют, свободный параметр – *средняя* глубина h залегания аномального тел. Искомый параметр среды, подлежащий оптимизации в результате итерационного улучшения – плотность σ сферы. При необходимости (слабая сходимость, неудачное начальное приближение, большая невязка) освобождают параметры x и R , и повторяют цикл итераций.

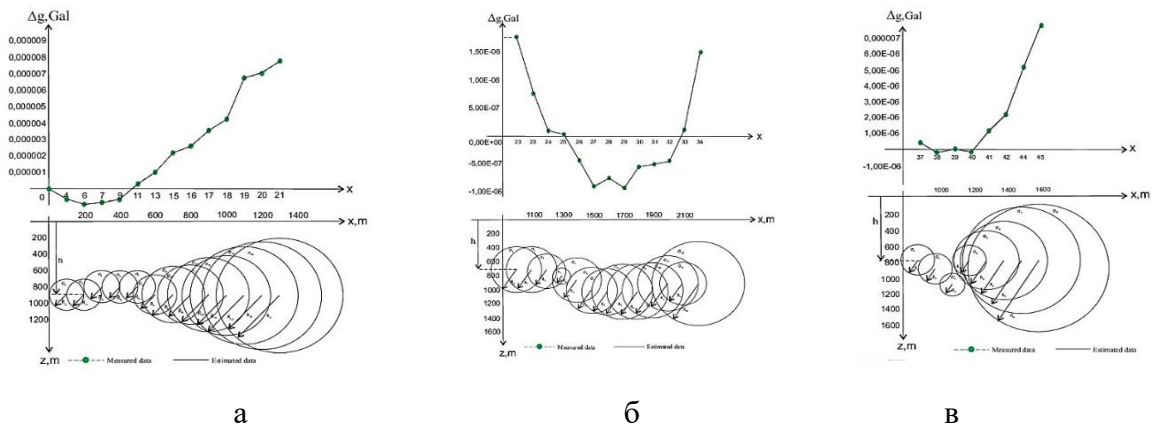
Расчёты, выполненные на глубине 900 м по профилю 3-3 показали, что решение (правая часть графика поля силы тяжести, начиная с пункта 41) имеет значительную невязку поля силы тяжести. Решено для всего графика провести дополнительное итерационное улучшение с подбором по другим свободным параметрам модели. В таблице В.1 (Приложение В) показаны значения аномалий для однородной сферы по трем профилям. В результате получена модель с хорошей невязкой поля силы тяжести вдоль всего участка (рисунок 2.4). Вычисления проводились при $T=1000^\circ$, скорости охлаждения 0.0001 м/с^2 , с погрешностью 15% для ζ_1 , x и σ , с шагом, равным 0.001. Относительная погрешность решения лежит в допустимых пределах, не более 0.12%. Средняя длительность вычислений составляет 6 с. Решение найдено за >69 000 итераций.

Прямая задача над горизонтальной призмой. Горизонтальная призма в качестве элементарного аппроксимирующего тела в пределах слоя является частным случаем прямоугольного параллелепипеда. В его основании лежит правильный прямоугольник, его численные параметры (длина, ширина, высота) задают в виде разности координат соответствующих точек в декартовой системе координат (рисунок 2.4). Для расчёта гравитационного влияния

горизонтальной призмы, ограниченной плоскостями $x = \xi_1$, $x = \xi_2$, $z = \zeta_1$, $z = \zeta_2$, используют формулу (2.12):

$$U_z(0,0) = G\sigma \left[\xi_1 \ln \left(\frac{\xi_1^2 + \zeta_2^2}{\xi_1^2 + \zeta_1^2} \right) - \xi_2 \ln \left(\frac{\xi_2^2 + \zeta_2^2}{\xi_2^2 + \zeta_1^2} \right) + 2\zeta_2 \left(\arctg \left(\frac{\xi_1}{\zeta_2} \right) - \arctg \left(\frac{\xi_2}{\zeta_2} \right) \right) + 2\zeta_1 \left(\arctg \left(\frac{\xi_2}{\zeta_1} \right) - \arctg \left(\frac{\xi_1}{\zeta_1} \right) \right) \right], \quad (2.12)$$

где G – гравитационная постоянная, σ – плотность тела.



а – вдоль профиля 1-1; б – вдоль профиля 2-2; в – вдоль профиля 3-3

Рисунок 2.4 – Гравитационная аномалия от модели в виде ряда сферических тел

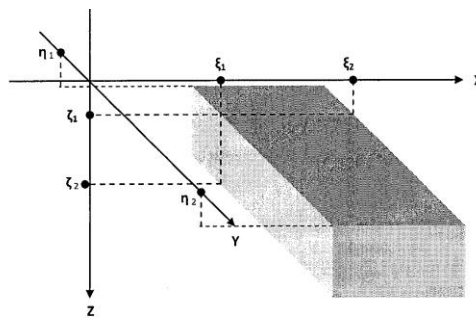


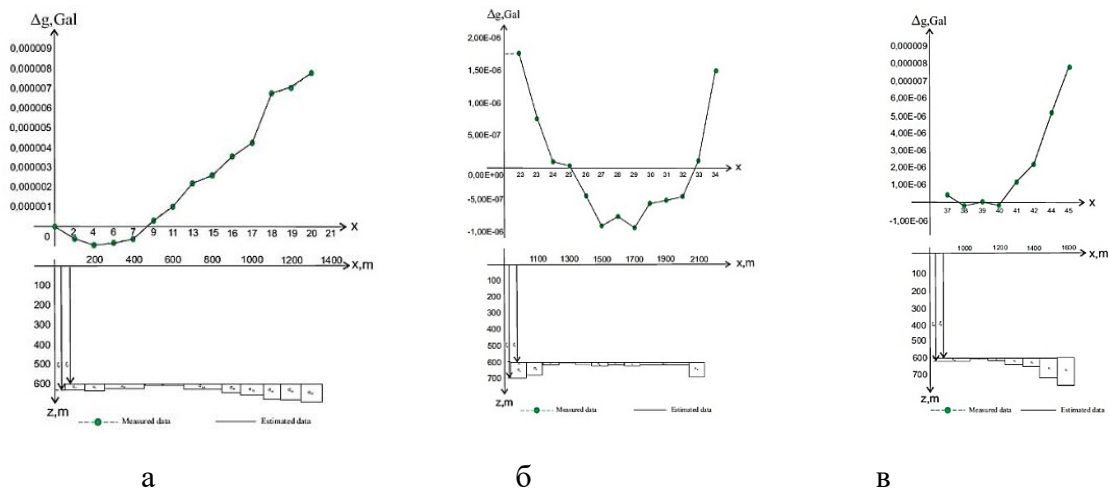
Рисунок 2.5 – Модель горизонтальной призмы

Рисунок 2.5, для расчёта в горизонтальной призме задают начальные параметры: глубина верхней ζ_1 и нижней ζ_2 кромок аномального тела и значения поля силы тяжести Δg , свободными параметрами являются значения начала ξ_1 и конца ξ_2 профиля, искомым параметром – оптимальное значение плотности σ .

Вычисления выполнены с шагом по профилю 100 м, учтены свойства горных пород и глубины их залегания. Получены графики гравитационных аномалий от модели в виде ряда горизонтальных призм вдоль трёх профилей (рисунок 2.6). В таблице В.2 (Приложение В) показаны значения аномалий для горизонтальной призмы по трем профилям. Для этой модели решение найдено

за 6905 итераций при $T=1000^\circ$ и скорости остывания 0.001 м/с^2 , с относительной погрешностью 15% для ζ_1 , ζ_2 и σ . Задача решалась с постоянным шагом в интервале для плотности σ и глубины залегания сферического тела, равным 0.001. Такой шаг определен ради обеспечения численной устойчивости алгоритма: чем меньше шаг итерации, тем точнее расчет.

С целью имитации погрешностей в исходных данных решалась прямая задача гравиметрии при различном уровне погрешностей измерений (5-20% от максимального значения аномалии). Погрешности симулированы датчиком псевдослучайных чисел с Гауссовым распределением (по типу AnyLogic или ArcGIS). Средняя длительность вычислений составляет 3 с, что доказывает быстрое действие алгоритма для матрицы данных малой размерности. Результаты вычислений для набора горизонтальных призм по трём профилям сведены в таблицу. Относительная погрешность вычислений равна 2.67% и говорит о точности метода.



а – вдоль профиля 1-1; б – вдоль профиля 2-2; в – вдоль профиля 3-3

Рисунок 2.6 – Гравитационная аномалия от модели в виде ряда горизонтальных призм

Прямая задача над вертикальным уступом. Вертикальный уступ мы определяем, как тело полубесконечного простираения, ограниченное двумя горизонтальными и прямоугольной вертикальной плоскостями (рисунок 2.7). Его гравитационный эффект выводится как частный случай эффекта для прямоугольного параллелепипеда. Аналитическое выражения для нахождения гравитационного поля $\Delta g_{уст}$ в точке x (вдоль оси x при $z=0$, $y=0$) следующее формула (2.13):

$$\Delta g_{уст}(x) = G\Delta\sigma \left[x \ln \frac{x^2+h_2^2}{x^2+h_1^2} + \pi(h_2 - h_1) + 2h_2 \arctg \frac{x}{h_2} - 2 \operatorname{arcth} \frac{x}{h_1} \right] \quad (2.13)$$

где G – гравитационная постоянная;
 σ – плотность;

x – координата вертикального сброса;
 h_1 – глубина нижней горизонтальной плоскости;
 h_2 – глубина верхней горизонтальной плоскости.

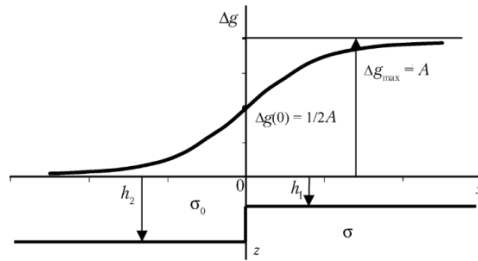
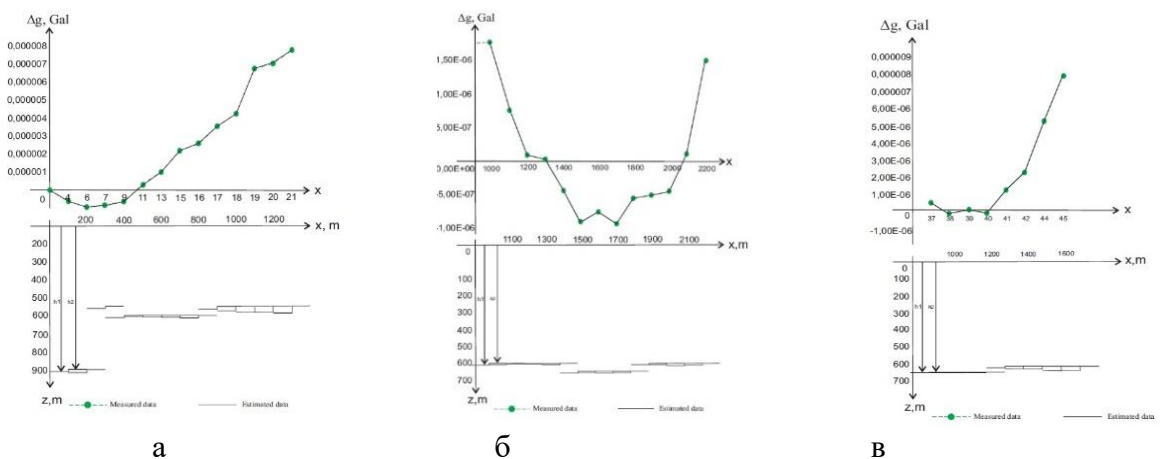


Рисунок 2.7 – Модель вертикального уступа

Для этой модели задают такие начальные параметры алгоритма: вертикальный сброс x , глубина нижней горизонтальной плоскости h_1 , измеренное значение поля силы тяжести Δg . Свободным параметром является глубина верхней горизонтальной плоскости h_2 , а искомым – плотность σ уступа. Впрочем, как и в других моделях, при необходимости свободные и закреплённые параметры можно менять местами.

Расчёты для вертикального уступа начинались с опорной глубины залегания 600 м по профилю. В таблице В.3 (Приложение В) показаны значения аномалий для модели вертикального уступа по трем профилям В начале профиля 1-1 возникла значительная невязка решения, и этот участок подвергли дополнительным расчётам. Итоговое решение (гравитационные эффекты от набора вертикальных уступов) по всем трём профилям получено в пределах допустимой погрешности (рисунок 2.8). Относительная погрешность измерений лежит в допустимых пределах, не более 1,26%. Расчёты выполнялись при $T=100^\circ$ и скорости охлаждения 00001. Средняя длительность вычислений составляет 17 с. Каждое решение найдено за >46 000 итераций.



а – вдоль профиля 1-1; б – вдоль профиля 2-2; в – вдоль профиля 3-3

Рисунок 2.8 – Гравитационная аномалия от модели в виде ряда вертикальных уступов

2.4.2 Оптимизация генетическим алгоритмом (GA)

На рисунке 2.9 представлена DFD-модель бизнес-процесса «Решение прямой задачи гравиметрии ГА». Процесс состоит из следующих подпроцессов:

- выбор математической модели;
- формирование начальной популяции;
- отбор;
- скрещивание;
- мутация;
- создание новой популяции;
- проверка результата на соответствие условиям;
- получение минимальной невязки между рассчитанными и теоретическими значениями гравитационного поля силы тяжести.

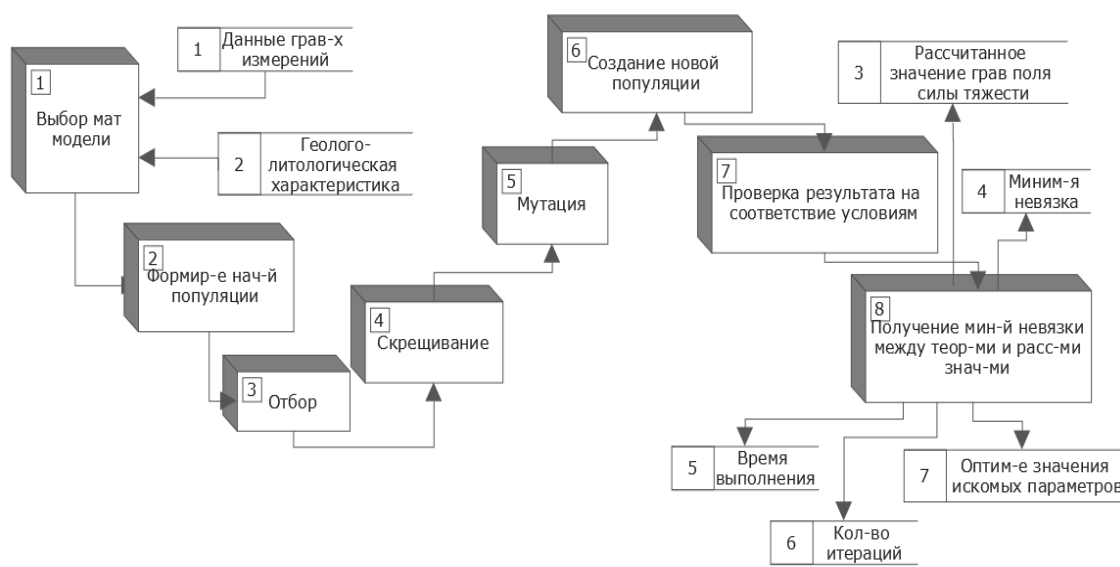


Рисунок 2.9 – DFD-модель бизнес-процесса «Решение прямой задачи гравиметрии ГА»

Для выполнения этих процессов необходимы: обработанные данные гравиметрических измерений, геолого-литологическая характеристика. На выходе получаем рассчитанное значение гравитационного поля силы тяжести, минимальную невязку, время выполнения расчета, количество проведенных итераций, оптимальные значения искомых параметров.

В данных исследованиях авторам методики было необходимо проверить работоспособность метода на реальных полевых данных. С этой целью были привлечены наблюдения силы тяжести, произведённые одной из компаний Республики Казахстан, которая длительное время занимается такого вида исследованиями. Исходные данные представляют собой цифровые записи измерения вариаций силы тяжести из файла гравиметра в пределах газонефтяного месторождения, очищены от погрешностей измерений и пересчитаны в редукции Буге ($\sigma_{пр} \approx 2.65 \text{ г/см}^3$). Данные хранились в ИС GeoM;

из общего каталога извлекалась выборка, необходимая для вычисления гравитационного эффекта для конкретного участка на каждом из трех изучаемых профилей.

Работоспособность метода производилась внедрением ГА для решения прямой задачи гравиметрии для трех различных моделей геологической среды. ГА называют метод оптимизации, возникший в результате наблюдений за функционированием биологических систем, а именно естественного отбора. Идею ГА высказал Дж. Холланд в 1975 г. [112]. Термин «генетические алгоритмы» ввел Д. Голдберг в 1975 г. [113, 114]. В его книге описывается теория ГА и возможные сферы их применения. Таким образом, генетический алгоритм — это одно из направлений исследований в области искусственного интеллекта, занимающееся созданием упрощенных моделей эволюции живых организмов для решения задач оптимизации.

Блок-схема алгоритма решения прямой задачи гравиметрии представлена на рисунке 2.10.

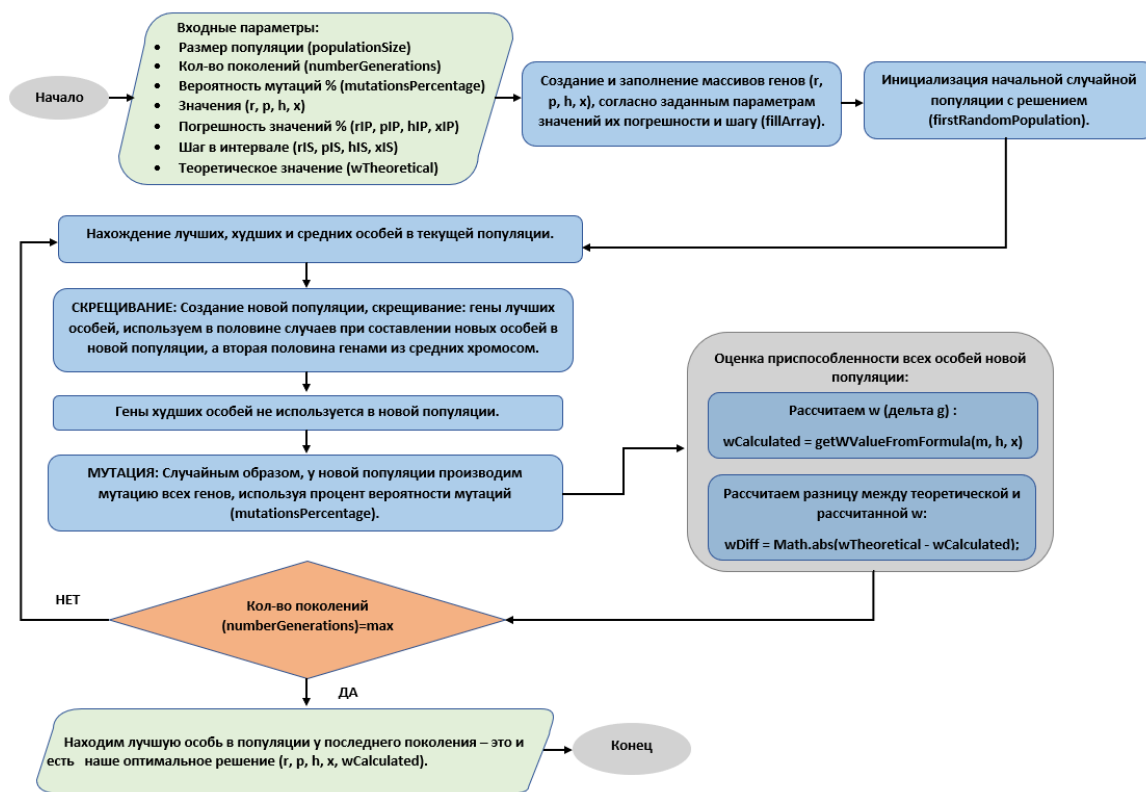


Рисунок 2.10 – Блок-схема алгоритма решения прямой задачи гравиметрии генетическим алгоритмом

Генерация первого поколения. Генетические алгоритмы основаны на механизмах естественного отбора и наследования. В них используется эволюционный принцип выживания наиболее приспособленных особей. Главной идеей данного алгоритма является отбор особей на каждом этапе популяции. Создание начальной популяции возможных решений является первым шагом в работе ГА. На этом этапе переменные генерируются

случайным образом [115]. В данной работе создается массив для каждой переменной рассматриваемых геометрических тел, который заполняется случайным образом. Для однородного сферического тела это будут массивы для таких переменных как x , h , R и σ ; для горизонтальной призмы - z_1, z_2, x_1, x_2 и σ ; для вертикального уступа – σ, x, h_1 и h_2 .

В ГА подобный массив из случайных цифр называют *хромосомами*. Хромосомы являются основными элементами, над которыми совершаются действия. Каждое полученное значение набора хромосом называют *геном* (рисунок 2.11). В зависимости от способа представления, гены могут быть представлены в виде бинарных значений, либо могут быть и не целыми значениями. В работе авторы используют представление генов в виде не целых чисел, которые и будут являться результатами значений, полученных из набора хромосом с плавающей точкой.

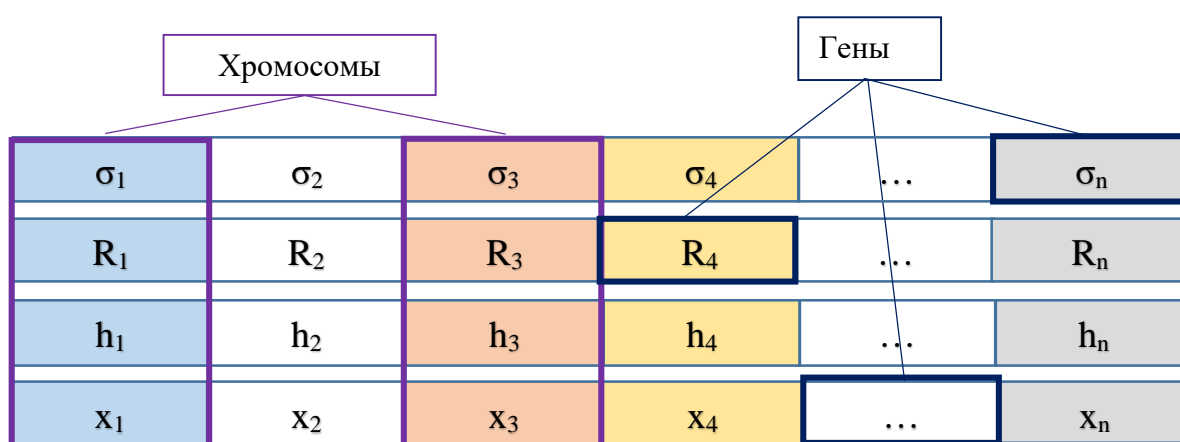


Рисунок 2.11 – Структура представления данных в ГА для параметров сферического тела

Таким образом, создание начальной популяции является первым и важным этапом для совершения дальнейших вычислений. На следующих этапах происходят операции видоизменения хромосом, а именно отбор, скрещивание и мутация.

Определение фитнес функции. Для оценки полученного результата относительно исходного значения, используют понятие функции приспособленности (фитнес функции) [116, 117]. Ее роль в работе ГА играет важное значение, поскольку представляет собой степень приспособленности отдельных особей в данной популяции. Наибольшее значение функции приспособленности будет говорить о наиболее приспособленной особи в популяции. Данный подход действительно сравним с эволюционным принципом выживания «сильнейших», заимствованном из биологии.

Для нашей задачи с точечным источником функция приспособленности будет определять невязку между расчетными и измеренными данными и выглядит следующим образом формула (2.14) [113, p. 3-400]:

$$\text{fitness} = |\Delta g_c - \Delta g_m| \quad (2.14)$$

где Δg_c – рассчитанное поле;

Δg_m – измеренное поле.

Параметры исходного поля заданы изначально, а параметры рассчитанного поля рассчитываются исходя из формул (2.7), (2.8), (2.9). Получение минимальной функции приспособленности будет говорить нам о получении лучшего решения.

Отбор. После вычисления функции приспособленности по каждой хромосоме, начинается процедура отбора, где происходит выбор родителей, у которых наивысшая степень пригодности. Если первый родитель (лучшее решение) не удовлетворяет критерию останова (минимально заданной невязке), то цикл работы алгоритма возвращается на этап видоизменения хромосом и повторяется до тех пор, пока индивидум с наименьшим значением *fitness* не будет приемлемым. Ввиду большого количества данных, полученных в результате работы ГА, было решено отбирать 10% лучших решений среди всевозможных для проведения над ними дальнейших операций. На рисунке 2.12 представлен пример представления операции отбора в ГА.

| | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-----------------|
| Родитель 1 | | | | |
| σ_1 | R_1 | h_1 | x_1 | $\max \Delta g$ |
| Родитель 2 | | | | |
| σ_2 | R_2 | h_2 | x_2 | \min |
| Родитель n | | | | |
| σ_n | R_n | h_n | x_n | Δg |

Рисунок 2.12 – Пример представления операции «Отбор» в ГА

Скращивание. При скращивании двух родителей новое потомство образуется путем объединения генов нескольких особей. Основная идея заключается в объединении генов двух родителей с целью создания нового потомства путем чередования частей родительских генов. Как следствие, может быть получено новое потомство с более высокими значениями приспособленности [116, р. 136-161; 118]. Среди полученных лучших решений первого поколения будем производить операцию скращивания согласно рисунку 2.13.

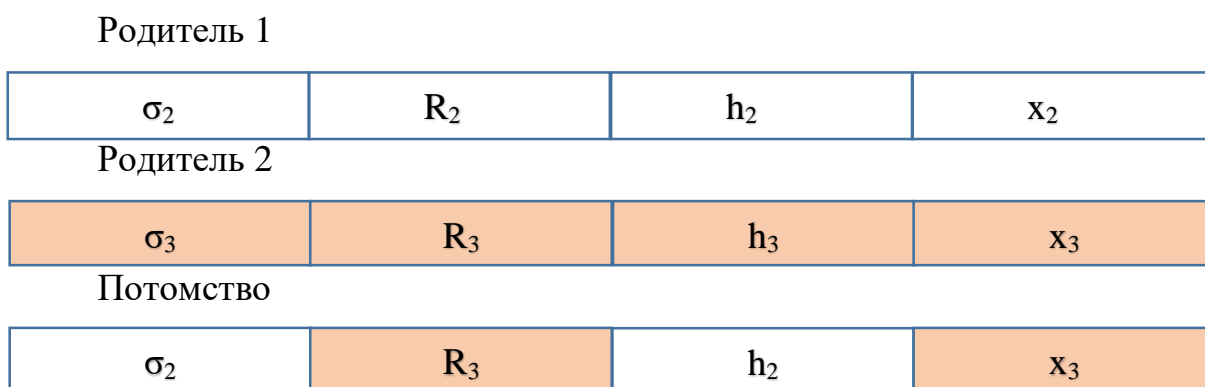


Рисунок 2.13 – Пример операции «Скращивание» в ГА

Мутация. Эта операция необходима для образования новых индивидуумов с параметрами, не существующими в популяции. Мутация помогает поддерживать разнообразие решений и избежать преждевременного попадания в локальный минимум.

В ГА мутация работает следующим образом:

1. Случайным образом выбирается один из параметров индивидуума и без какой-либо закономерности меняется на новый параметр [101, р. 1-4].
2. Выполняется проверка, не вышел ли параметр за пределы ограничивающего диапазона, если вышел, то индивидуум помечается как не “жизнеспособный” [110, р. 765-771; 118, р. 380-383] (рисунок 2.14).

Новое поколение



Рисунок 2.14 – Пример операции «Мутация» в ГА

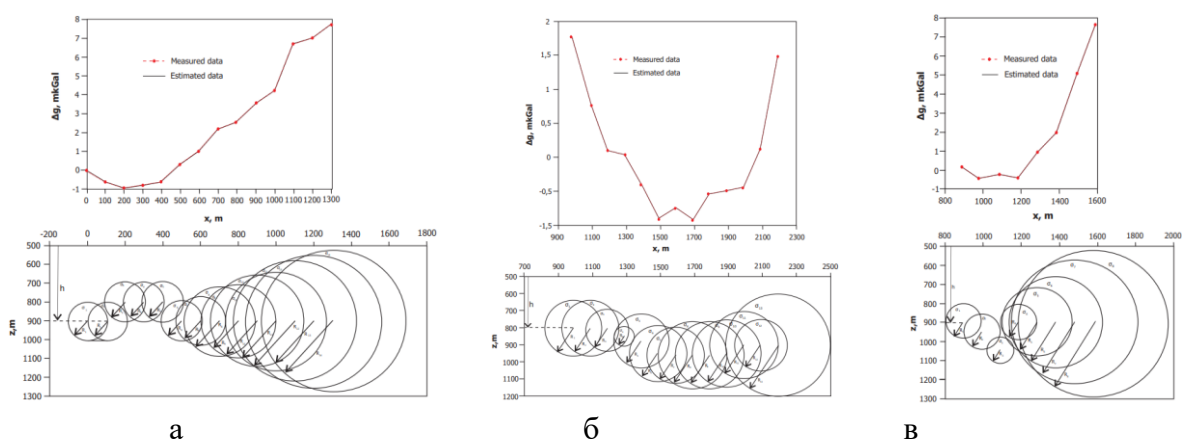
В данной работе частота применения данной операции («процент мутаций») напрямую зависит от параметра, заданным пользователем в информационной системе. Чем больше данный параметр, тем чаще происходит замена какого-либо гена в хромосоме. Операции будут происходить столько раз, сколько было указано пользователем количества поколений. Таким образом, создается новое уникальное потомство, которое удовлетворяет поставленной цели.

Ввиду высокой степени неоднородности коллекторов газонефтяного месторождения и ограниченного количества измерений, одним простым телом достаточно трудно показать реальное распределение плотностей в пространстве. В связи с этим в данной работе при интерпретации используют множество простых тел, расположенных на разной глубине, имеющую разную плотность и другие параметры, уникальные для каждого простого тела (например, у сферы есть радиус, в то время как горизонтальная призма и вертикальный уступы таких параметров не имеет). Для каждого тела решается

прямая задача, полученные поля складываются и сравниваются с исходным полем, полученным при полевых работах.

При подборе параметров простых тел с использованием ГА, необходимо учитывать то, что объекты обладают различными по количеству или свойству параметрами (сфера имеет 4 параметра: глубина залегания, радиус, центр тела и плотность; уступ имеет 4 параметра: глубина верхней и нижней кромки, положение края уступа, и плотность; у горизонтальной призмы 5 параметров: глубина верхней и нижней кромок, начало и конец профиля и плотность). Так же проблема может возникнуть при использовании одинаковых тел с одинаковым критерием поиска для динамических параметров. С учётом вышесказанного, представим результаты моделирования при известных начальных параметрах среды.

Прямая задача над однородной сферой. Учитывая геолого-литологическую характеристику месторождения с его высокой степенью неоднородностью, расчёты было решено начать с глубины сферы в 900 м с шагом по профилю в 100 м. Задача решалась с постоянным шагом в интервале для плотности σ и глубины залегания сферического тела, равным 0.001. Такой шаг определен ради обеспечения численной устойчивости алгоритма: чем меньше шаг итерации, тем точнее расчет.



а – вдоль профиля 1-1; б – вдоль профиля 2-2; в – вдоль профиля 3-3

Рисунок 2.15 – Гравитационная аномалия от модели в виде ряда сферических тел

В результате получения допустимых решений, лишь на некоторых участках параметр глубины подвергался изменению. На рисунке 2.15 продемонстрированы решения от модели в виде сферически тел, которые показали результаты с хорошей невязкой поля силы тяжести вдоль всего участка. В таблице В.4 (Приложение В) показаны значения аномалий для однородной сферы по трем профилям. Вычисления проводились при количестве поколений 100, размер популяций = 300, процент мутаций = 30. Относительная погрешность решения лежит в допустимых пределах, не более 0.25%. Средняя длительность вычислений составляет 12 с, количество

возможных комбинаций составляет в среднем 7 226 560 294 838 206 464
 Результаты измерений работы программы для однородной сферы по трем профилям сведены в таблицу 2.2.

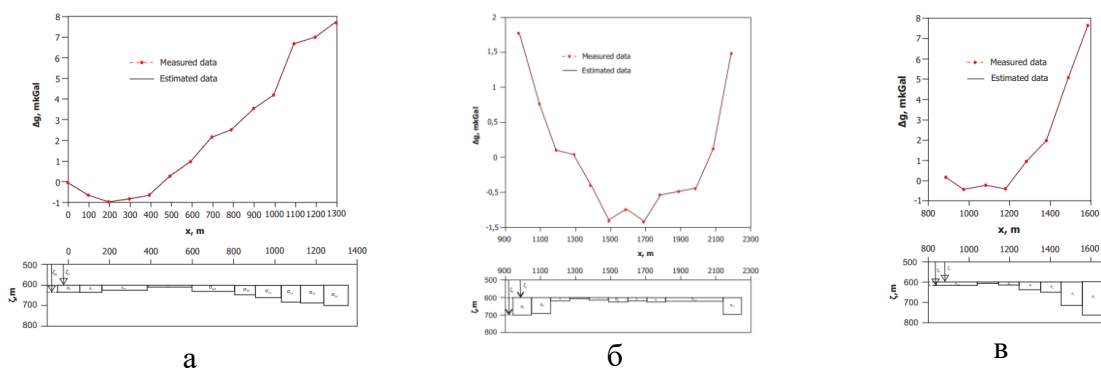
Таблица 2.2 – Основные параметры и результаты измерений для однородной сферы

| Параметр | Величина |
|---|---------------------------|
| Количество поколений | 100 |
| Размер популяций | 300 |
| Процент мутаций | 30 |
| Длительность вычислений, с | 12 |
| Максимальная относительная погрешность измерений, % | 0.25 |
| Количество возможных комбинаций | 7 226 560 294 838 206 464 |

Прямая задача над горизонтальной призмой. Для этой модели количество возможных комбинаций составляет 85 390 165 616 000 000 при количестве поколений 100, размере популяций = 100, проценте мутаций = 3. В таблице В.5 (Приложение В) показаны значения аномалий для модели горизонтальной призмы по трем профилям. Относительная погрешность решения лежит в допустимых пределах, не более 8.61%. Средняя длительность вычислений составляет 5с (таблица 2.3). Получены графики гравитационных аномалий от модели в виде ряда горизонтальных призм вдоль трёх профилей (рисунок 2.16).

Таблица 2.3 – Основные параметры и результаты измерений для горизонтальной призмы

| Параметр | Величина |
|---|------------------------|
| Количество поколений | 100 |
| Размер популяций | 100 |
| Процент мутаций | 3 |
| Длительность вычислений, с | 5 |
| Максимальная относительная погрешность измерений, % | 8.61 |
| Количество возможных комбинаций | 85 390 165 616 000 000 |



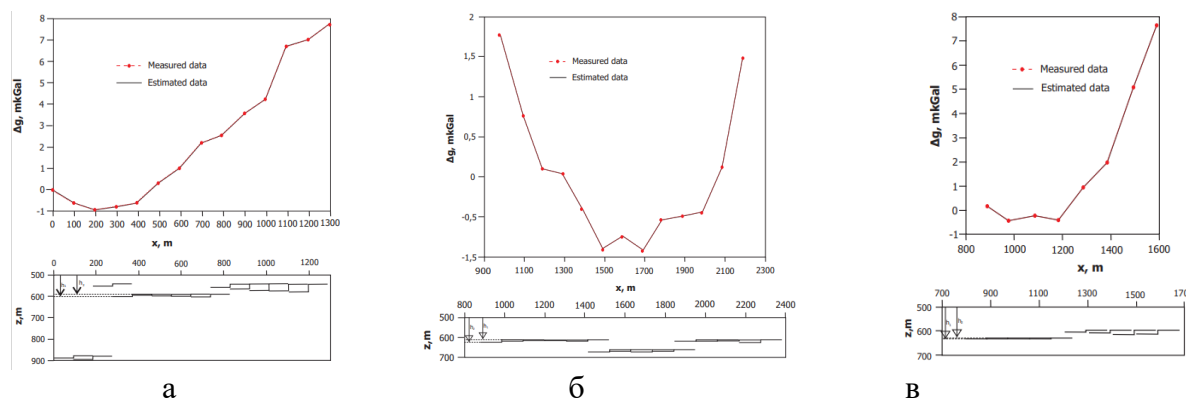
а – вдоль профиля 1-1; б – вдоль профиля 2-2; в – вдоль профиля 3-3

Рисунок 2.16 – Гравитационная аномалия от модели в виде ряда горизонтальных призм

Прямая задача над вертикальным уступом. Расчёты для вертикального уступа начинались с опорной глубины залегания 600 м по профилю. В начале профиля 1-1 возникла значительная невязка решения, и этот участок подвергли дополнительным расчётам. Итоговое решение (гравитационные эффекты от набора вертикальных уступов) по всем трём профилям получено в пределах допустимой погрешности (рисунок 2.17). В таблице В.6 (Приложение В) показаны значения аномалий для модели вертикального уступа по трем профилям. Относительная погрешность измерений лежит в допустимых пределах, не более 1,26%. Расчёты выполнялись при количестве поколений 100, размере популяций = 100, проценте мутаций = 10. Средняя длительность вычислений составляет 5 с. Количество возможных комбинаций составляет 1 440 000 400 000. В таблице 2.4 сведены основные параметры и результаты измерений для вертикального уступа.

Таблица 2.4 – Основные параметры и результаты измерений для вертикального уступа

| Параметр | Величина |
|---|-------------------|
| Количество поколений | 100 |
| Размер популяций | 100 |
| Процент мутаций | 10 |
| Длительность вычислений, с | 5 |
| Максимальная относительная погрешность измерений, % | 1.26 |
| Количество возможных комбинаций | 1 440 000 400 000 |



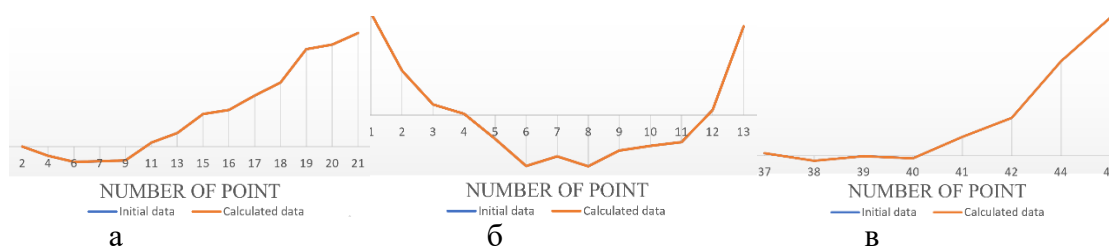
а – вдоль профиля 1-1; б – вдоль профиля 2-2; в – вдоль профиля 3-3

Рисунок 2.17 – Гравитационная аномалия от модели в виде ряда вертикальных уступов

Для модели вертикального уступа относительная погрешность измерений лежит в допустимых пределах, не более 1,26%. Расчёты выполнялись при следующих условиях: количество поколений 100, размер популяций = 100, процент мутаций = 10. Необходимо подобрать следующие динамические параметры: глубину верхней горизонтальной (h_1) и нижней горизонтальной (h_2) плоскостей вертикального уступа, лежащих в пределах между 500 и 1100 м,

плотность тела (σ) должна лежать в пределах от 1 до 2,8 г/см³. Средняя длительность вычислений составляет 5 с. Количество возможных комбинаций составляет 1 440 000 400 000.

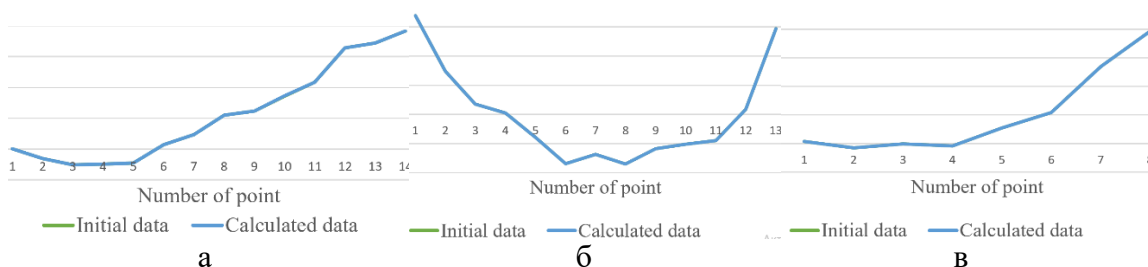
При сравнении минимизации невязки вариаций силы тяжести, была определена высокая точность в результатах исследования. На рисунке 2.18 представлены сравнительные графики разностной аномалии гравитационного поля между измеренными и расчетными данными по трем профилям для однородной сферы.



а – вдоль профиля 1-1; б – вдоль профиля 2-2; в – вдоль профиля 3-3

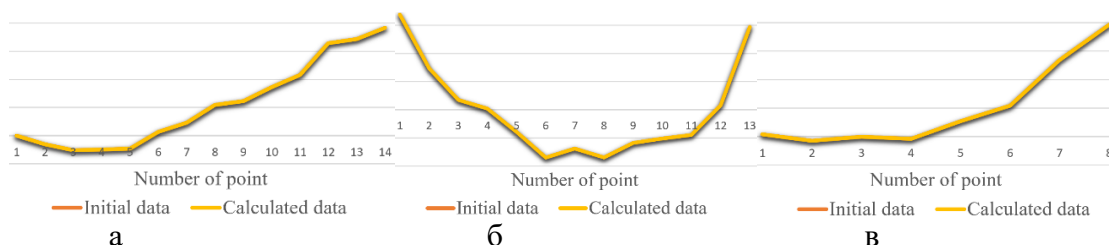
Рисунок 2.18 – Сравнительный график аномалии гравитационного поля между измеренными и расчетными данными для однородной сферы

Аналогичные сравнительные графики минимизации невязки вариаций силы тяжести для горизонтальной призмы представлены на рисунке 2.19.



а – вдоль профиля 1-1; б – вдоль профиля 2-2; в – вдоль профиля 3-3

Рисунок 2.19 – Сравнительный график аномалии гравитационного поля между измеренными и расчетными данными для горизонтальной призмы



а – вдоль профиля 1-1; б – вдоль профиля 2-2; в – вдоль профиля 3-3

Рисунок 2.20 – Сравнительный график аномалии гравитационного поля между измеренными и расчетными данными для вертикального уступа

Результаты исследования по вертикальному уступу представлены на рисунке 2.20.

Отлаженная программа показывает стабильные результаты, определяя распределения оптимальных параметров для трех аппроксимирующих тел, приближенные к заданному полю силы тяжести с точностью 10^{-11} . Таким образом, для решения задачи генетический алгоритм позволяет подобрать максимальное количество всевозможных допустимых решений за конечное количество итераций и время расчета.

2.5 Сравнение алгоритмов глобальной оптимизации

Как упоминалось ранее, прямая задачи гравиметрии авторами уже была решена другим методом оптимизации – методом имитации отжига [85]. Задача решалась при схожих условиях. В таблице 2.5 сведена сравнительная характеристика работы алгоритмов для решения прямой задачи гравиметрии.

Таблица 2.5 – Сравнительная характеристика методов глобальной оптимизации для решения прямой задачи гравиметрии

| Метод | Геологическая модель | Относительная погрешность измерений | Время выполнения | Количество возможных комбинаций |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------|---------------------------------|
| Генетический алгоритм | Однородная сфера | $\delta_c = 0.006$ | 12 | 7 226 560 294 838 206 464 |
| | Горизонтальная призма | $\delta_n = 0.8$ | 5 | 85 390 165 616 000 000 |
| | Вертикальный уступ | $\delta_y = 0.03$ | 5 | 1 440 000 400 000 |
| Метод имитации отжига | Однородная сфера | $\delta_c = 0.007$ | 6 | 401 436 840 000 |
| | Горизонтальная призма | $\delta_n = 0.09$ | 16 | 288 191 507 436 000 000 |
| | Вертикальный уступ | $\delta_y = 0.09$ | 2 | 144 279 792 901 |

При решении прямой задачи гравиметрии методом имитации отжига были так же получены устойчивые решения. Сравнение проводилось отдельно по каждой модели геологической среды отдельно по таким параметрам как относительная погрешность измерений, среднее время выполнения и количество возможных комбинаций. Проведенное сравнение показало, что генетический алгоритм может обрабатывать большее количество возможных комбинаций, затрачивая при этом меньше времени, чем это показывает работа метода имитации отжига. При этом, метод имитации отжига показал более надежные результаты, обходя локальные минимумы функции и достигая глобального минимума функции.

Вывод по 2-му разделу

Во второй главе описана методика отбора (отбраковки) измеренных данных по пунктам наблюдений при расчете вариаций силы тяжести, повышающая точность расчетов автоматизированного процесса обработки. Для качественного определения гравитационных и магнитных аномалий, которые могут возникать на нефтегазовых месторождениях, значительное место занимает решение прямой задачи гравиметрии. В данной главе предлагается решить прямую задачу гравиметрии для различных модельных предположений о строении исследуемой геологической среды с помощью последовательных приближений, исходя из заданного начального приближения среды.

Решение прямой задачи осуществляется за счёт подбора оптимальных параметров для получения минимальной невязки между измеренными и расчётными значениями гравитационного поля. Среди вероятностных методов указанным выше критериям отвечают так называемые методы глобальной оптимизации, в том числе методы состязательной оптимизации. Среди множества методов глобальной оптимизации наиболее приемлемым для наших целей является метод имитации отжига и классический генетический алгоритм.

Таким образом, была решена прямая задача гравиметрии для трех моделей геологической среды: однородной сферы, горизонтальной призмы, вертикального уступа. Решение задачи осуществляется за счёт подбора оптимальных параметров для получения минимальной невязки между измеренными и расчётными значениями гравитационного поля. Методы глобальной оптимизации обеспечивают решение прямой задачи гравиметрии для ряда математических моделей среды с удовлетворительной точностью. Результаты относительной погрешности минимальной невязки между измеренными и расчётными значениями гравитационного поля генетическим алгоритмом составили от 0,006, до 0,8%, методом имитации отжига – от – 0,007 до 0,9%. Точность расчетов в результате минимальной невязки достигла 10^{-11} .

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПО ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗРАБОТКИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИМЕТРИИ МЕТОДАМИ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

3.1 Моделирование рабочего процесса (workflow)

Необходимым шагом в описании бизнес-процессов любой деятельности является функциональное моделирование. Построение функциональной модели призвано решать задачи анализа и оценки бизнес-процесса организации. Существуют три основные методологии функционального моделирования:

1. IDEF0 (Integrated computer aided manufacturing DEFinition) методология описания бизнес-процессов.

2. IDEF3 (WorkFlow Diagram) методология документирования бизнес-процессов.

3. DFD (DataFlow Diagram) диаграмма потоковых данных [119].

На рисунке 3.1 представлена контекстная диаграмма создаваемой ИС, которая представляет общее описание бизнес-системы и ее взаимодействия с внешней средой. Использование методики IDEF0 позволяет создать функциональную модель, отображающую структуру и функции системы, а также потоки информации и материальных объектов, связывающих эти функции [120].



Рисунок 3.1 – Контекстная диаграмма IDEF0. Общее описание ИС

Контекстная диаграмма позволят показать, какая информация является входящей в систему, и какая является выходящей, т.е. результатом работы системы. В качестве входной информации системы будут использованы:

- данные об участке поведения гравиметрических исследований;
- координаты и контур месторождения;
- координаты гравиметрических пунктов;

- координаты пунктов нивелирования;
- координаты GPS пунктов;
- первичные данные гравиметрических исследований.

В качестве выходного результата процесса понимаются:

- отчетные документы, таблицы;
- числовые результаты решения задач;
- обработанные данные в графическом представлении (графики, карты, изолинии) [63, с. 5-130].

Механизмами являются:

- геофизик-оператор;
- геофизик-интерпретатор.

Ресурсы:

- методика проведения гравиметрических исследований;
- методика обработки первичных данных гравиметрических исследований;
- методика построения комплексных графиков;
- математические модели для решения прямой и обратной задачи гравиметрии;
- алгоритмы для решения прямой и обратной задачи гравиметрии;
- методы пространственной интерполяции [63, с. 5-130].

После описания контекстной диаграммы проводится функциональная декомпозиция – система разбивается на подсистемы, и каждая подсистема описывается отдельно.

На рисунке Г.1 (Приложение Г) представлена диаграмма декомпозиции первого уровня. Диаграмма декомпозиции предназначена для детализации функций бизнес системы и получается при разбиении контекстной диаграммы на крупные подсистемы, описывающие каждый подсистему и их взаимодействие.

Диаграмма декомпозиции первого уровня состоит из следующих трех основных функций: статистическая, пред- и пост-обработка данных гравиметрических исследований, численное решение математических моделей прямой и обратной задач гравиметрии, отображение данных по месторождению.

Для первого этапа моделирования предусмотрено использование 3 входных параметров: данные по профилям, промысловые данные и первичные данные гравиметрических исследований. Этот этап подразумевает реализацию методики проведения гравиметрических исследований, выходными данными будут отчетные данные и графическая визуализация комплексных графиков.

Второй этап подразумевает решение серии прямых задач гравиметрии с помощью метода имитации отжига, а также решение прямых и обратных задач на базе моделей высокопроизводительных численных алгоритмов. Входными данными для этого этапа являются ранее обработанные данные

гравиметрических измерений и геолого-литологическая характеристика. На выходе получаем численные результаты решения задачи [63, с. 5-130].

Диаграмма декомпозиции второго уровня (рисунок Г.2, Приложение Г) для первого модуля состоит из следующих функций: проведение полевых работ, сбор и обработка данных и оформление, и интерпретация данных. Проведение полевых работ подразумевает реализацию методики проведения гравиметрических измерений. Сбор и обработка первичных данных реализует методику проведения гравиметрических исследований, а на этапе оформления и интерпретации данных происходит построение комплексных графиков и отчетных документов [63, с. 5-130].

На рисунке Г.3 (Приложение Г) представлена реализация второго уровня второго модуля декомпозиции контекстной диаграммы. Согласно рисунку, второй модуль декомпозиции состоит из следующих этапов: построения математической модели, самого алгоритма имитации отжига и получения численных результатов. В этап построения математической модели входит проведение расчетов по трем сферическим телам: однородной сферы, вертикального уступа и горизонтальной призмы. Алгоритм имитации отжига реализует вычисление начальной и конечной целевых функций и расчет функции вероятности. В конечном итоге получаем определённую невязку между рассчитанными и теоретическими данными гравиметрических исследований [63, с. 5-130].

Рисунок Г.4 (Приложение Г) представляет реализацию второго уровня третьего модуля декомпозиции контекстной диаграммы. Согласно рисунку, третий модуль декомпозиции состоит из следующих этапов: публикация слоев в Geoserver, отображение данных гравиметрических исследований, построение изолиний по данным гравиметрических исследований. При публикации слоев необходимо предварительно определить слои для визуализации и стили для каждого объекта. В функцию отображения данных гравиметрических исследований входит функции отображения профилей и объектов. Построение изолиний по данным гравиметрических исследований подразумевает использование метода «Обратное взвешивание» [63, с. 5-130].

На рисунке 3.2 представлена DFD-модель бизнес-процесса «Статистическая, пред- и пост-обработка данных гравиметрических исследований».



Рисунок 3.2 – DFD-модель бизнес-процесса «Статистическая, пред- и пост-обработка данных гравиметрических исследований»

Диаграмма потоков данных (DFD) показывает, как каждый процесс преобразует свои входные данные в выходные, и выявляет отношения между этими процессами. DFD-диаграмма является дополнением к модели IDEF0 для обработки информации. Подобно IDEF0, DFD-модель представляет моделируемую систему как сеть связанных работ.

Процесс «Статистическая, пред- и пост-обработка данных гравиметрических исследований» состоит из следующих подпроцессов:

- сбор первичных (сырых) данных;
- импорт первичных (сырых) данных из файлов внутреннего формата гравиметра;
- отбор 4-х измерений по каждому пункту наблюдений;
- расчет по каждому пункту наблюдений средних значений: гравитационного поля, (Grav), уровней (TiltX, TiltY), стандарта отклонений (SD), отличие температуры гравиметра от уровня рабочей температуры (Temp);
- расчет приращений гравитационного поля (dG);
- оценка точности гравиметрических измерений;
- отбраковка некондиционных измерений;
- анализ повторных гравиметрических измерений на отбракованных пунктах;
- анализ повторных измерений [63, с. 5-130].

Для выполнения этих процессов необходимы: файлы гравиметра с первичными данными, данные по профилям, промышленная информация о добыче, данные по циклам наблюдений, данные нивелирования и GPS для пунктов наблюдений. На выходе получаем построение комплексных графиков.

На рисунке 3.3 представлена DFD-модель бизнес-процесса «Численное решение математической модели прямой задачи гравиметрии». Процесс состоит из следующих подпроцессов:

- выбор математической модели;
- выбор начальной точки целевой функции $f(x_0)$;

- вычисление новой целевой функции $f(x')$;
- генерация случайного числа α ;
- установить $E=E'$;
- расчет функции вероятности;
- проверка критерия останова [63].

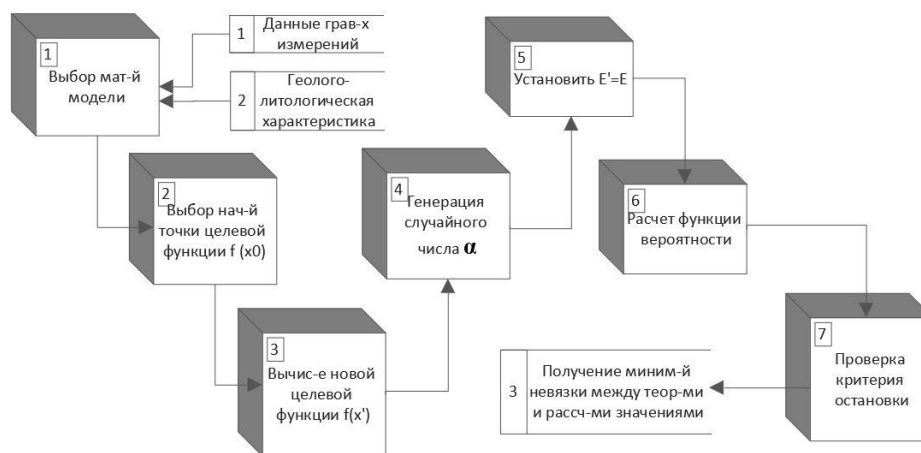


Рисунок 3.3 – DFD-модель бизнес-процесса «Численное решение математической модели прямой задачи гравиметрии»

Для выполнения этих процессов необходимы: обработанные данные гравиметрических измерений, геолого-литологическая характеристика. На выходе получаем минимальную невязку между теоретическими и рассчитанными значениями гравитационного поля силы тяжести.

Разрабатываемая информационная система будет создана на основе клиент-серверной технологии. Система будет состоять из трех частей:

- система управления базами данных;
- серверная часть;
- клиентская часть.

Все представленные части ИС будут создаваться на "open source" и "freeware" платформах.

Главной функциональностью веб-серверной части системы является получение данных из базы данных, а также их подготовка и обработка для дальнейшей передачи данных клиенту. Учитывая эти требования веб-серверную часть условно можно разделить на три части:

- веб-сервер, в который обрабатываются HTTP-запросы от пользователей и выдаются ответы, такие данные могут быть как POST и GET;
- интерактивная карта, где строятся все линии, полигоны и изолинии;
- веб-страница, в которой строится интерфейс программы для взаимодействия с пользователем [63, с. 5-130].

На рисунке 3.4 представлена DFD-модель бизнес-процесса «Решение прямой задачи гравиметрии методом имитации отжига». Процесс состоит из следующих подпроцессов:

- выбор математической модели;
- выбор начальной точки целевой функции $f(x_0)$;
- вычисление новой целевой функции $f(x')$;
- генерация случайного числа α ;
- установить $E=E'$;
- расчет функции вероятности;
- проверка критерия остановки;
- получение минимальной невязки между рассчитанными и теоретическими значениями гравитационного поля силы тяжести.

Для выполнения этих процессов необходимы: обработанные данные гравиметрических измерений, геолого-литологическая характеристика. На выходе получаем рассчитанное значение гравитационного поля силы тяжести, минимальную невязку, время выполнения расчета, количество проведенных итераций, оптимальные значения искомых параметров.



Рисунок 3.4 – DFD-модель бизнес-процесса «Решение прямой задачи гравиметрии методом имитации отжига»

Основное назначение данного подраздела состоит в интеграции модуля по решению прямой задачи гравиметрии генетическим алгоритмом в разработанную информационную систему GeoM. ИС GeoM предназначена для сбора, обработки, мониторинга, анализа и визуализации гравиметрических исследований. ИС GeoM позволяет осуществлять множество операций по выявлению закономерностей, проводить анализ, учет, прогноз, графически отображать результаты обработки. Дополнительно функционируют модули по решению прямой задачи гравиметрии методами глобальной оптимизации (методом имитации отжига и генетическим алгоритмом). При создании информационной базы гравиметрических данных было отдано предпочтение бесплатно распространяемому программному обеспечению PostgreSQL.

Для реализации разработанного модуля была спроектирована IDEF3 диаграмма, которая позволяет детально отображать процессы работы генетического алгоритма (рисунок 3.5) [63, с. 5-130].

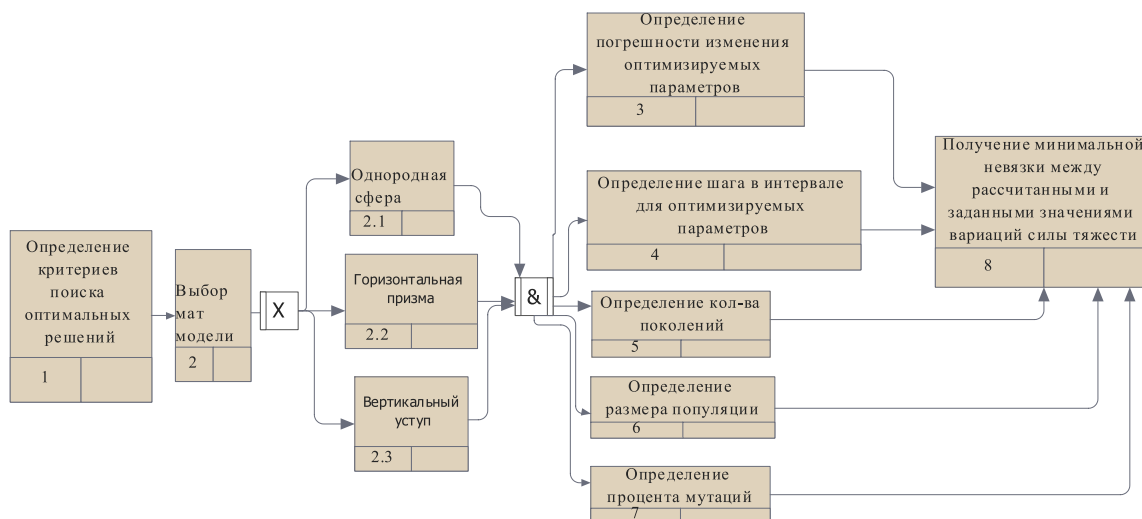


Рисунок 3.5 – Диаграмма IDEF3 для процесса «Решение прямой задачи генетическим алгоритмом»

В процессе разработки программного обеспечения, возникает необходимость системного проектирования. В этом случае, можно говорить о проектировании UML-диаграмм. На рисунке 3.6 представлена одна из разновидностей UML-диаграмм – диаграмма последовательности. Диаграмма последовательности помогает детально описать логику использования сценариев ИС. Диаграмма последовательности содержит в себе *объекты*, как основные элементы диаграммы, *вертикальные линии «жизни» (сообщения)*, как способ обмена информацией и *возвращаемые результаты*, как символ обмена между объектами [121].

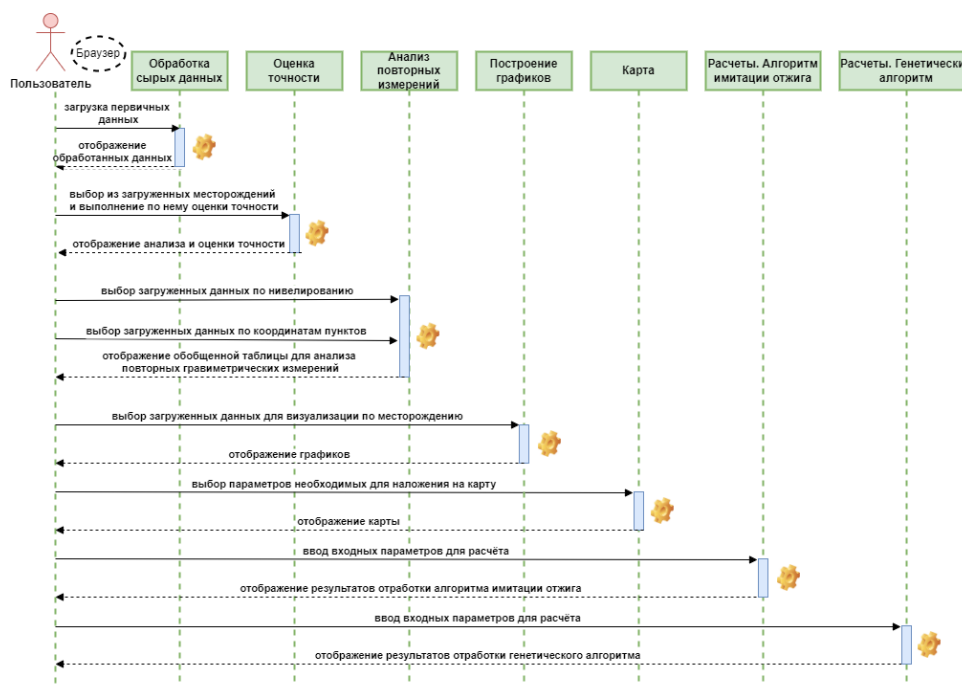


Рисунок 3.6 – UML-диаграмма последовательности

На рисунке 3.6 с помощью диаграммы последовательности на единой временной оси продемонстрирован весь жизненный цикл программы. В качестве горизонтальных прямоугольников в верхней части рисунка использованы объекты с их названиями. Вертикальные пунктирные линии визуально отделяют каждый последующий этап работы программы. Так называемые вертикальные линии «жизни» отображают выполнение основных функций имеющихся объектов. Они обозначаются вертикальными прямоугольниками на пунктирной линии «жизни». Стрелки выполнили функцию демонстрации процесса обмена сообщениями между объектами.

В самом начале пользователь с использованием браузера проходит процедуру регистрации и/или входа в систему по корпоративной почте. После прохождения первого этапа входа в систему, необходимо загрузить в систему первичные (сырые) данные данных гравиметрического мониторинга из файла *.txt, который уже должен быть сохранен на компьютере. Далее ИС обрабатывает данные и выдает пользователю обработанные данные согласно заданной ранее методике. Далее, результатом работы этапа «Оценки точности измерений» является отображение проанализированных данных и рассчитанной оценки точности. На третьем этапе «Анализа повторных измерений» пользователь получает обобщенный результат в табличном виде по анализу повторных гравиметрических измерений. На этапе «Построения графиков», пользователь получает визуализацию в виде рассчитанных на предыдущих этапах графики вариаций силы тяжести гравиметрических измерений, графики вариации силы тяжести с учетом высоты места наблюдения, графиками вариаций силы тяжести с введенной поправкой за рельеф местности, графиками вертикальных движений земной поверхности. На этапе «Карта» пользователь получает результаты вариаций гравитационного поля силы тяжести отдельно по данным гравиметрических, нивелирных данных и данных GPS на карте. На этапе «Решения задачи МИО» пользователь получает реализованный задачу гравиметрии путем решения серии прямых задач методом имитации отжига, получает результат вариации поля силы тяжести на основании гравиметрических измерений. На последнем этапе «Решения задачи генетическим алгоритмом» пользователь аналогичным образом получает результат вариации поля силы тяжести на основании гравиметрических измерений, решенный генетическим алгоритмом.

3.2 Проектирование базы данных гравиметрических мониторинга

Технологии и инструменты проектирования – основа проекта ИС. Для реализации используется CASE-технология, которая явно или неявно присутствует в каждом способе автоматизации действий. Технология проектирования – это совокупность 3 составляющих [122, 123]:

- *последовательность* пошаговых операций проектирования;
- *критерии* и правила оценки результатов выполнения операций;
- *нотации* (графические и текстовые) для описания проектируемой ИС.

Одним из важнейших этапов при проектировании информационной системы является моделирование автоматизируемых бизнес-процессов. Здесь представлены:

- результаты функционального моделирования – диаграмма IDEF0,
- описание бизнес процессов - диаграмма IDEF3,
- диаграмма потоков, данных DFD. DFD-модель бизнес-процесса «Обработка данных гравиметрического мониторинга».

Деятельность компании состоит из следующих элементов [124, 125]:

- проведение полевых работ;
- сбор и обработка первичных данных;
- подготовка отчетов.

На рисунке 3.7 представлена контекстная диаграмма, которая представляет общее описание бизнес-системы и ее взаимодействия с внешней средой. Использование методики IDEF0 позволяет создать функциональную модель, отображающую структуру и функции системы, а также потоки информации и материальных объектов, связывающих эти функции.



Рисунок 3.7 – Контекстная диаграмма деятельности компании

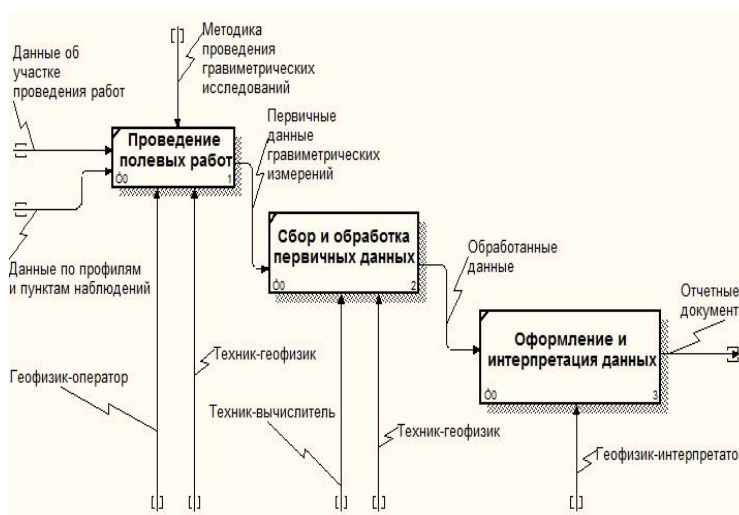


Рисунок 3.8 – Первый уровень декомпозиции контекстной диаграммы

На рисунке 3.8 представлена диаграмма декомпозиции контекстной диаграммы. Диаграмма декомпозиции предназначены для детализации

функций бизнес системы и получается при разбиении контекстной диаграммы на крупные подсистемы, описывающие каждый подсистему и их взаимодействие.

Диаграмма декомпозиции первого уровня состоит из следующих функций: проведение полевых работ, сбор и обработка первичных (сырых) данных, подготовка отчетов.

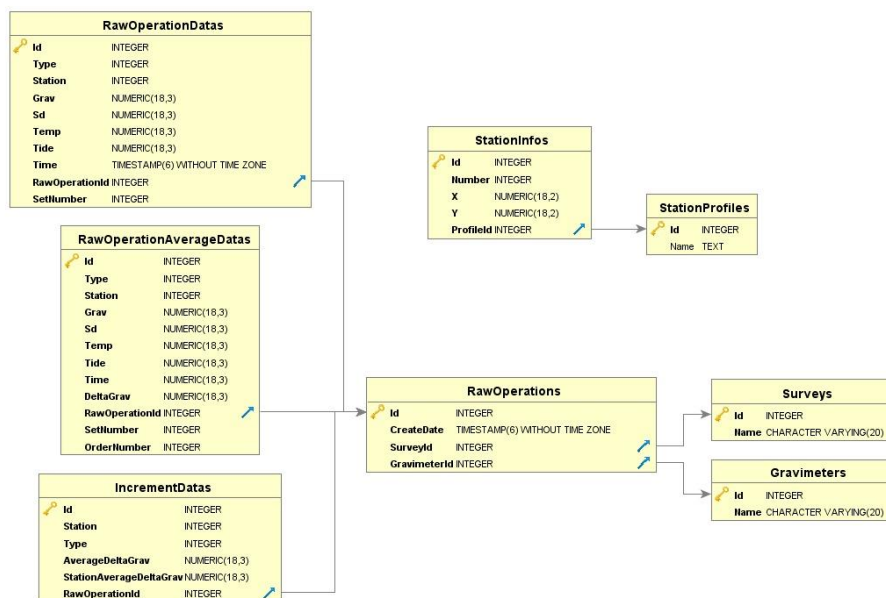


Рисунок 3.9 – Реляционная модель базы данных

На рисунке 3.9 представлена реляционная модель базы данных, созданная на этапе построения логической модели данных [63, с. 5-130].

3.3 Программная реализация модуля статистической обработки и отображения данных

При создании информационной базы гравиметрических данных было отдано предпочтение бесплатно распространяемому программному обеспечению PostgreSQL. Для проектирования структуры базы данных: таблиц, схемы взаимосвязей и ограничений, использовался свободно распространяемый pgModeler [126]. Система обработки первичных данных гравиметрического мониторинга реализована на основе объектно-ориентированного языка программирования C#.

GeoServer – это программный сервер на основе Java, который позволяет пользователям просматривать и редактировать геопространственные данные. Используя открытые стандарты, установленные Open Geospatial Consortium (OGC: WMS, WFS, WCS), GeoServer обеспечивает большую гибкость при создании карт и обмене данными. GeoServer поддерживает множество форматов, к которым можно отнести: JPEG, PNG, SVG, KML/KMZ, GML, PDF, ESRI Shapefile и другие. GeoServer построен на GeoTools – наборе инструментов Java GIS с открытым исходным кодом.

Информационная система GeoM для решения задач гравиметрического мониторинга реализована на языке C#. Развертывание Web-сервиса и приложения реализовано на платформе ASP.NET.

ASP.NET – это одна из технологий .NET Framework от компании Microsoft, необходимая для создания клиент-серверных интернет приложений. Одним из главных преимуществ, послужившим при выборе платформы для разработки web-приложения, является ее возможность использования любых языков программирования, в том числе C#, Visual Basic.NET и JScript .NET. Такие языки программирования как IronRuby, IronPython, PHP, Perl, Smalltalk, Haskell и др. могут быть установлены дополнительно.

В ASP.NET для организации программного кода была использована MVC (Model View Controller) схема. Основная идея MVC заключается в разделении данных приложения, пользовательского интерфейса и управляющей логики на три основных компонента: модель, представление и контроллер. На рисунке 3.10 представлены основные компоненты MVC схемы и существующие между ними связи.

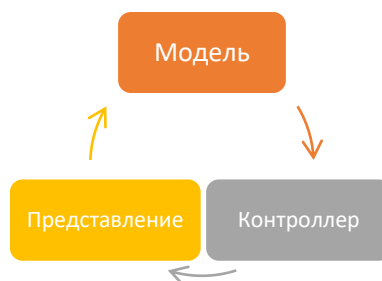


Рисунок 3.10 – Основные компоненты MVC

Компонент «*Модель*» в MVC представляет форму данных. Класс в C # используется для описания модели. В объектах модели хранятся данные, полученные из базы данных PostgreSQL. Таким образом компонент «*Модель*» представляет данные.

Компонент «*Представление*» – это пользовательский интерфейс, который отвечает за отображение данных модели пользователю. Представление в ASP.NET MVC – это HTML, CSS и некоторый специальный синтаксис (синтаксис Razor), который упрощает взаимодействие с моделью и контроллером.

Компонент «*Контроллер*» – это обработчик запросов пользователя. Обычно пользователь использует представление и создает HTTP-запрос, который будет обрабатываться контроллером. Контроллер обрабатывает запрос и возвращает соответствующее представление в качестве ответа.

На рисунке 3.11 показан поток запроса пользователя в ASP.NET MVC.

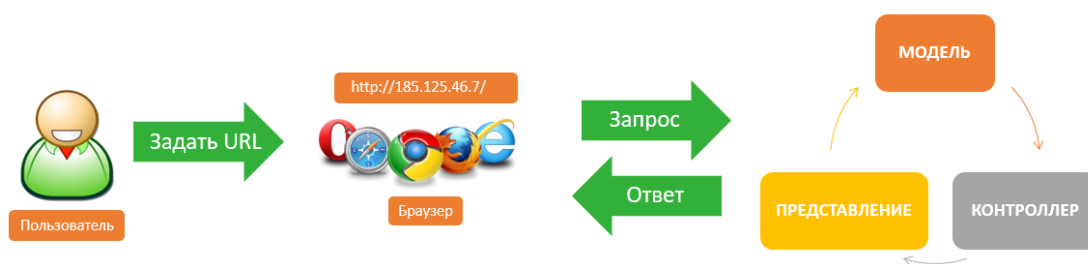


Рисунок 3.11 – Поток запросов в архитектуре MVC

Согласно приведенному выше рисунку, когда пользователь вводит URL-адрес в браузере (в нашем случае <http://185.125.46.7/>), он переходит на веб-сервер и перенаправляется на контроллер. Контроллер выполняет соответствующее представление и модели для этого запроса, создает ответ и отправляет его обратно в браузер.

Для размещения веб-сайта в публичное использование в качестве сервера используется казахстанский облачный сервер oblast.kz. Главным преимуществом облачных серверов в отличие от физических является его возможность распределения ресурсов, действующих как единое целое. Таким образом, облачные сервера более устойчивы к сбоям за счет распределения данных. Более того, облачные сервера обеспечивают более быстрое обслуживание и являются более экономичным вариантом, где цена за его использование намного ниже цены физических серверов.

Сервер проекта в облаке называется Gravimetry, его IP адрес: <http://185.125.46.7/>. В таблице 3.1 представлены ресурсы проекта в облаке.

Таблица 3.1 – Ресурсы проекта в облаке

| Параметр | Характеристика |
|--------------|--------------------------|
| Название | Gravimetry |
| ЦОД | Казахстан, Алматы, Ahost |
| ОС | CentOS 7.5 x64 |
| ЦП | 1 x 2 ГГц |
| ОЗУ | 768МБ |
| Диски | SAS 10 ГБ |
| IP-адрес | 185.125.46.7 |
| Сети | Общая IPv4 |
| Состояние | Включён |
| Заблокирован | Нет |

СУБД Postgre SQL является полнофункциональной системой с поддержкой не только географических данных, но и SQL Shape, json, многомерных массивов и многих других типов данных. Обобщенная схема функционирования ИС-системы представлена на рисунках 3.12, 3.13 демонстрирует каким образом происходит обращение СУБД PostgreSQL к Geosever.

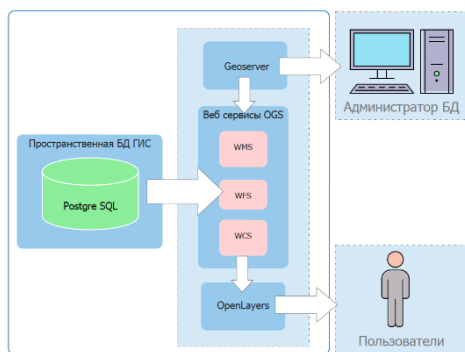


Рисунок 3.12 – Обобщенная схема функционирования ГИС

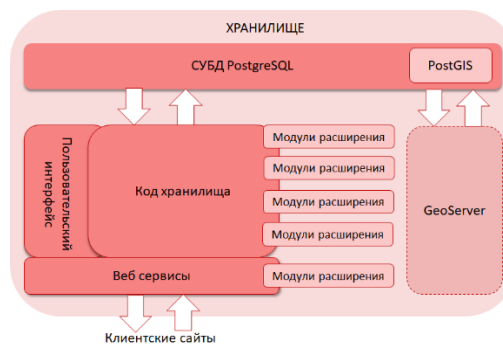


Рисунок 3.13 – Процедурная схема обращения PostGIS к PostgreSQL

На рисунке Г.5 (Приложение Г) представлен пример использования выбранной среды разработки для обработки первичных данных гравиметрического мониторинга. Поскольку первичные данные представляются в формате .txt из файла гравиметра, следовательно, необходима обработка каждой строки файла и занесения их в соответствующую таблицу базы данных.

После загрузки и обработки файла гравиметра на следующей странице системы можно увидеть соответствующие данные из файла уже в формате системы. После распределения данных по таблицам базы данных система переходит к исключению (отбраковке) несоответствующих строк (рисунок Г.6, Приложение Г).

Вычисление средних значений Grav, SD, Temp, Tide, Time, а также определение средних величин значения приращений гравитационного поля (dG) на каждом пункте является важным этапом в разработке системы. Рисунок Г.7 (Приложение Г) демонстрирует форму произведения оценки точности измерений.

На рисунке Г.8 (Приложение Г) представлены результаты вычисления измеренных приращений гравитационного поля с помощью двух гравиметров в течение нескольких дней по каждому пункту наблюдений. Рисунок Г.9 (Приложение Г) демонстрирует вычисление суммы квадратов отклонений методом наименьших квадратов.

Автоматизация обработки данных исключила ошибки, возникающие при переносе данных из файлов гравиметра, при отборе (отбраковке) измеренных данных по пунктам наблюдений и при расчете приращений гравитационного поля, тем самым повышая точность расчетов.

Таким образом, на этом этапе уже можно сделать вывод о том, насколько было важно автоматизировать процесс обработки данных гравиметрического мониторинга на нефтегазовых месторождениях. В (Приложении Д) приведен листинг парсинга первичных данных и обработки.

Информационная система позволяет рассчитанные данные отобразить в наглядном виде – в виде графиков, что в значительной степени помогает специалистам-геофизикам провести анализ изменения гравитационного поля.

Параметры построения графика задаются пользователем: название месторождения, номер профиля, на котором расположены пункты наблюдений, номера циклов по которым будет строиться график приращения гравитационного поля. В приложении Д приведен листинг кода программы для сбора данных в сводную таблицу.

На рисунке Г.10 (Приложение Г) показано окно программы с графиком, отображающим изменения гравитационного поля, произошедшие в период между 1 и 7 циклами наблюдений. На графике пунктирными линиями отражены вариации силы тяжести с учетом высоты места наблюдения. На рисунке Г.11 (Приложение Г) показано окно программы с графиками вариаций силы тяжести с введенной поправкой за рельеф местности по профилю 1-1 по всем семи циклам наблюдений. На рисунке Г.12 (Приложение Г) представлено окно программы с графиками вертикальных движений земной поверхности вдоль профиля 1-1 по нивелирным пунктам [63].

3.4 Программная реализация модуля решения прямых задач гравиметрии

3-я подсистема реализует решение обратной задачи гравиметрии путем решения серии прямых задач методом имитации отжига и генетическим алгоритмом на основании данных гравиметрических измерений. Методы глобальной оптимизации реализованы на примере простых математических моделей геологической среды: горизонтальная призма, однородная сфера, вертикальный уступ. Методы глобальной оптимизации позволяют подбирать значения одновременно по нескольким параметрам изучаемой среды.

В (Приложении Е) приведен листинг решения прямой задачи гравиметрии методом имитации отжига. В (Приложении Ж) приведен листинг решения прямой задачи гравиметрии генетическим алгоритмом.

GRAVIMETRY | ГЛАВНАЯ | ОБРАБОТКА СЫРЬХ ДАННЫХ | ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ | АНАЛИЗ ПОВТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Сфера

Геометрическое тело:

| | | | |
|-----------------------------------|--|---------------------|------------------------|
| Радиус, м (r) | <input type="text" value="100"/> | Начальное решение | 9.628584989200029e-09 |
| Плотность, кг/м3 (ρ) | <input type="text" value="-1800"/> | wDiff | 4.853641325518593e-12 |
| Глубина, м (h) | <input type="text" value="900"/> | Количество итераций | 6905 |
| Центр, м (x) | <input type="text" value="100"/> | При g | 100.0 |
| Погрешность изменения для c, % | <input type="text" value="0"/> | При m | -7602840133.116657 |
| Погрешность изменения для p, % | <input type="text" value="15"/> | При p | -1815.9649999482463 |
| Погрешность изменения для h, % | <input type="text" value="0"/> | При h | 900.0 |
| Погрешность изменения для x, % | <input type="text" value="15"/> | При x | 106.926000001047 |
| Шаг в интервале для g | <input type="text" value="0"/> | wTheoretical | -6.13030962233201e-07 |
| Шаг в интервале для p | <input type="text" value="0.001"/> | wCalculated | -6.130358158745265e-07 |
| Шаг в интервале для h | <input type="text" value="0"/> | Время расчета (с) | 1.6 |
| Шаг в интервале для x | <input type="text" value="0.001"/> | | |
| Теоретическое значение для W, Гал | <input type="text" value="-6.13030962233201E-07"/> | | |
| Начальная Температура | <input type="text" value="1000"/> | | |
| Скорость охлаждения | <input type="text" value="0.001"/> | | |

Рисунок 3.14 – Пример работы программы по решению прямой задачи гравиметрии методом имитации отжига для сферического тела

На рисунке 3.14 представлен пример работы программы по решению прямой задачи гравиметрии методом имитации отжига для однородного сферического тела. На рисунке 3.15 представлен пример работы программы по решению прямой задачи гравиметрии методом имитации отжига для горизонтальной призмы. На рисунке 3.16 представлен пример работы программы по решению прямой задачи гравиметрии методом имитации отжига для вертикального уступа. На рисунке 3.17 представлен пример работы программы по решению прямой задачи гравиметрии генетическим алгоритмом для однородной сферы. На рисунке 3.18 представлен пример работы программы по решению прямой задачи гравиметрии генетическим алгоритмом для горизонтальной призмы. На рисунке 3.19 представлен пример работы программы по решению прямой задачи гравиметрии генетическим алгоритмом для вертикального уступа [63, с. 5-130].

GRAVIMETRY [ГЛАВНАЯ](#) [ОБРАБОТКА СЫРЬХ ДАННЫХ](#) [ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ](#) [АНАЛИЗ ПОВТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ](#)

Призма

Геометрическое тело: Призма

| | | | |
|--|-----------------------|---------------------|------------------------|
| Плотность(предоставленное значение), кг/м3 (ρ) | 1000 | Начальное решение | 1.2347815479631253e-07 |
| Начало профиля, м (x1) | 100 | wDiff | 4.681866176920485e-12 |
| Конец профиля, м (x2) | 200 | Количество итераций | 6905 |
| Верхняя кромка, м (z1) | 600 | При x1 | 109.7270000011807 |
| Нижняя кромка, м (z2) | 630 | При x2 | 216.8720000002238 |
| Погрешность изменения для ρ, % | 15 | При ρ | 942.7359999978071 |
| Погрешность изменения x1, % | 15 | при z1 | 600.0 |
| Погрешность изменения x2, % | 15 | При z2 | 630.0 |
| Шаг в интервале, для ρ | 0.001 | wTheoretical | -6.13030962233201e-07 |
| Шаг в интервале, для x1 | 0.001 | wCalculated | -6.13026280347024e-07 |
| Шаг в интервале, для x2 | 0.001 | Время расчета (с) | 1.42 |
| Теоретическое значение для W | -6.13030962233201E-07 | | |
| Начальная Температура | 1000 | | |
| Скорость охлаждения | 0.001 | | |

Отправить

Рисунок 3.15 – Пример работы программы по решению прямой задачи гравиметрии методом имитации отжига для горизонтальной призмы

Уступ

Геометрическое тело: Уступ

| | | | |
|--|-----------------------|---------------------|------------------------|
| Плотность(предоставленное значение), кг/м3 (ρ) | 900 | Начальное решение | 4.2953006836267313e-08 |
| Начало профиля, м (x) | 100 | wDiff | 2.8162630638142096e-12 |
| Глубина, м (h1) | 910 | Количество итераций | 69075 |
| Глубина, м (h2) | 913 | При z1 | 910.0 |
| Погрешность изменения ρ, % | 15 | При ρ | -916.9000000027927 |
| Погрешность изменения x, % | 15 | При z2 | 913.0 |
| Шаг в интервале, для ρ | 0.001 | При x | 92.05300000003368 |
| Шаг в интервале, для x1 | 0.001 | wTheoretical | -6.13030962233201e-07 |
| Теоретическое значение для W | -6.13030962233201E-07 | wCalculated | -6.130337784962648e-07 |
| Начальная Температура | 1000 | Время расчета (с) | 6.36 |
| Скорость охлаждения | 0.0001 | | |

Отправить

Рисунок 3.16 – Пример работы программы по решению прямой задачи гравиметрии методом имитации отжига для вертикального уступа

Оптимизация Генетическим алгоритмом, Сфера;
Автор: Назирова Асем;

Введите данные для начала процесса Оптимизации:
r - Радиус(предоставленное значение):

500

r - Плотность(предоставленное значение):

789

h - Глубина(предоставленное значение):

4000

x - Пункт(предоставленное значение):

0

Погрешность изменения для r(Радиус):

10

Погрешность изменения для r(Плотность):

10

Погрешность изменения для h(Глубина):

10

Погрешность изменения для x(Пункт):

10

Шаг в интервале, для r(Радиус):

0.001

Шаг в интервале, для r(Плотность):

0.001

Шаг в интервале, для h(Глубина):

0.001

Шаг в интервале, для x(Пункт):

0.001

Теоретическое значение для W(предоставленное значение):

1.290889218749098E-6

Кол-во поколений:

100

Размер популяции:

300

Процент мутаций:

30

Запустить Генетический алгоритм

Рисунок 3.17 – Пример работы программы по решению прямой задачи гравиметрии генетически алгоритмом для однородной сферы

Оптимизация Генетическим алгоритмом, Плана;
Автор: Назирова Асем;

Введите данные для начала процесса Оптимизации:
r - Плотность(предоставленное значение):

500

x1 - Начало профиля, м

2

x2 - Конец профиля, м

3

r1 - Верхняя кромка, м

5

r2 - Нижняя кромка, м

4

Погрешность изменения для r(Плотность):

10

Погрешность изменения x1:

10

Погрешность изменения x2:

10

Шаг в интервале, для r(Плотность):

0.0001

Шаг в интервале, для x1:

0.0001

Шаг в интервале, для x2:

0.0001

Теоретическое значение для W(предоставленное значение):

5.641907338119008E-9

Кол-во поколений:

100

Размер популяции:

100

Процент мутаций:

3

Запустить Генетический алгоритм

Результат:

Количество возможных комбинаций: 240002400000

Оптимальное решение:

№Сиф: 1.252654123029104E-12

При r: 457.3068999916587

При x1: 2.174100000000346

При x2: 2.174000000000000

При r1: 5.0

При r2: 4.0

№Theoretical: 5.641907338119008E-9

№Calculated: 5.6431801879642934E-9

Рисунок 3.18 – Пример работы программы по решению прямой задачи гравиметрии генетически алгоритмом для горизонтальной призмы

Оптимизация Генетическим алгоритмом, Геометрическое тело: Уступ;
Автор: Назирова Асем;

Введите данные для начала процесса Оптимизации:
r - Плотность(предоставленное значение):

900

x - Начало профиля, м

100

h1 - Глубина, м

1000

h2 - Глубина, м

500

Погрешность изменения для r(Плотность):

10

Погрешность изменения x:

10

Шаг в интервале, для r(Плотность):

0.0001

Шаг в интервале, для h1:

0.0001

Теоретическое значение для W(предоставленное значение):

-9.155917932038842E-5

Кол-во поколений:

100

Размер популяции:

100

Процент мутаций:

10

Запустить Генетический алгоритм

Результат:

Количество возможных комбинаций: 360000200000

Оптимальное решение:

№Сиф: 6.401297898597348E-11

При r: 810.0317999999992

При x: 90.420500000001417

При h1: 1000.0

При h2: 500.0

№Theoretical: -9.155917932038842E-5

№Calculated: -9.15582433338741E-5

Рисунок 3.19 – Пример работы программы по решению прямой задачи гравиметрии генетически алгоритмом для вертикального уступа

3.5 Интеграция модулей в информационную систему

На рисунке 3.20 представлена структурная схема разработанной информационной системы GeoM. Данные хранятся на сервере базы данных, обработка производится на сервере приложений. Система состоит из трех модулей: модуль статистической, пред- и пост- обработки данных гравиметрических исследований, модуль численного решения математических моделей прямой и обратной задачи гравиметрии, модуль отображения данных о месторождении с пространственной привязкой [63, с. 5-130].

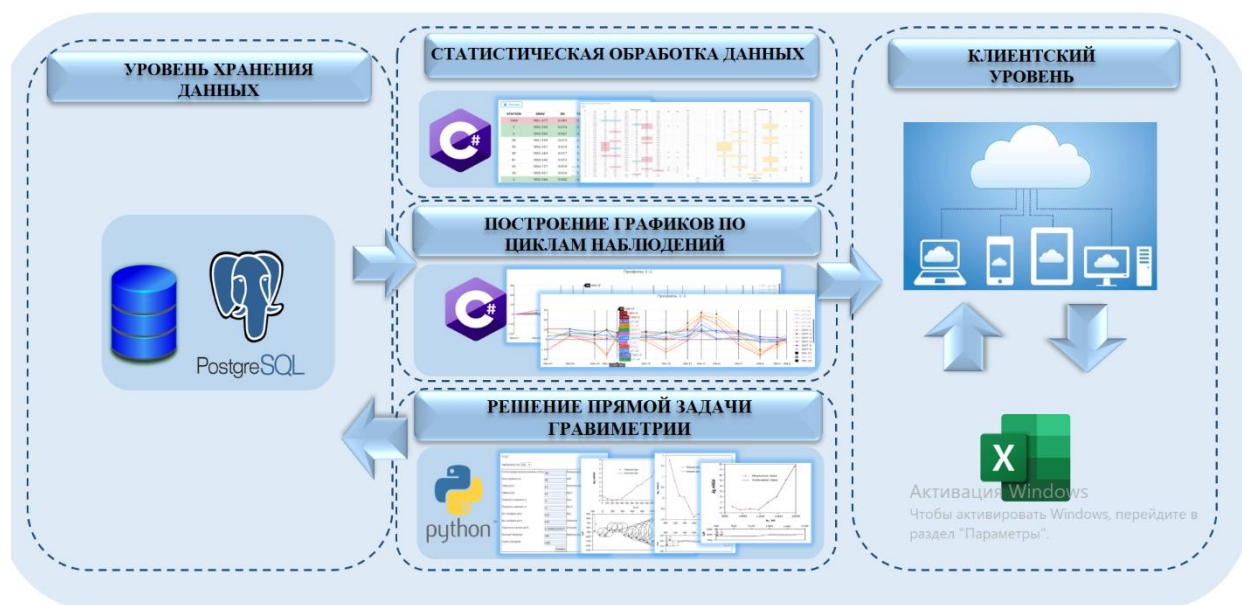


Рисунок 3.20 – Структурная схема ИС

Первый модуль, модуль обработки данных состоит из двух подсистем:

1-я подсистема выполняет статистическую, предобработку первичных (сырых) данных, полученных с гравиметра. На этом этапе также происходит наглядное отображение на графиках изменения гравитационного поля во времени. Например, изменения, произошедшие в промежуток времени между циклами наблюдений 6 и 7.

2-я подсистема строит комплексные графики, на которых отображается полная информация о месторождении: вариации силы тяжести, вариации силы тяжести с учетом вертикальных движений, вертикальные движения по данным нивелирования, вертикальные движения по данным GPS наблюдений, разломы, пластовое давление, нагнетающие и добывающие скважины, объемы добычи нефти и закачки воды [63, с. 5-130].

3-я подсистема реализует решение прямой задачи гравиметрии методами глобальной оптимизации: метод имитации отжига и генетический алгоритм на основании данных гравиметрических измерений. Методы реализованы на примере простых математических моделей геологической среды: горизонтальная призма, однородная сфера, вертикальный уступ. Данные методы глобальной оптимизации позволяют подбирать значения одновременно по двум параметрам изучаемой среды [63, с. 5-130].

Выводы по 3-му разделу

Создание ИС принято разбивать на стадии анализа, проектирования, непосредственного кодирования, тестирования и сопровождения. Известно, что исправление ошибок, допущенных на предыдущей стадии, обходится примерно в 10 раз дороже, чем на текущей, откуда следует, что наиболее критическими являются первые стадии создания ИС [120, с. 663-667]. Данный раздел посвящен моделированию автоматизируемых бизнес-процессов и дальнейшей программной реализации. Эффективные средства автоматизации на ранних этапах создания позволяют избежать дальнейших ошибок, которые могут возникнуть в ходе программной реализации. Качественно выполненное проектирование программного обеспечения является показателем функциональности и надежности.

На основе построенной функциональной модели деятельности компании была построена модель данных и определена функциональная часть создаваемой информационной системы. Результаты функционального моделирования позволили перейти к следующим этапам разработки информационной системы – проектированию и разработке программного обеспечения отдельных подсистем информационной системы. В итоге, разработана информационная система, автоматизирующая технологический процесс обработки данных гравиметрического мониторинга, а также позволяющая решить прямую задачу гравиметрии методами глобальной оптимизации.

В системе реализован полный цикл обработки гравиметрических данных от автоматизации ввода данных в систему, вычисления наблюдаемых значений силы тяжести до получения аномальных значений силы тяжести, вычисления трансформаций и графического изображения данных в виде графиков. Система реализует полный рабочий цикл обработки гравиметрических данных, визуализации результатов и обеспечивает:

- автоматизацию ввода данных;
- вычисление наблюдаемых значений для оценки аномальных вариаций силы тяжести
- вычисление преобразований силы тяжести;
- графическое представление вычислений;
- местоположение и статус скважин;
- расположений профилей месторождения.

Следует отметить, что на сегодняшний день на рынке геофизических исследований не существует универсальной ИС, способной решить все поставленные заказчиками задачи в единой программе. Процесс, протекающий от получения данных геологоразведки до вывода результатов из них, можно условно разделить на следующие этапы:

- 1) разработка систем хранения и управления данными геологоразведочных работ;

2) разработка программного обеспечения для компьютерного анализа построенных математических моделей с учетом имеющихся результатов эксперимента;

3) разработка методов представления результатов компьютерного анализа (визуализация и т.д.);

4) интерпретация полученных результатов.

В начале эпохи компьютеризации человеческой деятельности каждый из этих этапов был отдельной задачей в соответствующей области науки (ИТ-технология, математическая статистика, математическая физика, математическое моделирование, вычислительная математика и т.д.). Большинство исследователей придерживаются мнения о том, что нереально, да и не нужно добиваться того, чтобы все разработки велись в единой среде, тем более для такой обширной предметной области, границы которой по-разному понимаются различными группами специалистов. Поэтому на рынке геофизических исследований имеются много специализированных программ и автоматизированных систем, разрешающих задачи лишь одного или нескольких этапов.

Таким образом, разработанная система автоматизирует обработку гравиметрических данных и позволяет не только обрабатывать собранную информацию, но и выполнить анализ и прогноз, продемонстрировать результаты гравиметрических исследований в области нефтегазовой залежи при помощи специализированной ИС. Система контроля на нефтегазовом месторождении позволяет увеличивать качество обработки, интерпретацию гравиметрических данных и эффективность работы геофизиков. Развивающаяся информационная система будет полезна для компаний, которые заняты поисково-разведочными работами, мониторингом недр и другими работами, которые выполняются с использованием гравиметрических исследований.

4 ТЕСТИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

4.1 Разработка численного тестирования системы

В ходе интеграции модулей по решению прямых и обратных задач, возникла необходимость проверить соответствие между реальным и ожидаемым поведением системы на конечном наборе тестов. С этой целью система должна подвергнуться исследованиям и испытаниям на случай наличия ошибок и несоответствий.

Для *однородной сферы* решение началось с начального приближения, в котором опорная глубина центра масс сферических источников расположена на глубине 900 м по профилю 1-1 (рисунок В.1, Приложение В). В точках 3-5 полученные решения значительно превышали допустимую погрешность. Возможно, это обусловлено сложным неустойчивым характером среды на данном участке. Поэтому данный участок дополнительно подвергнут уточняющим итерациям с целью минимизации невязки поля силы тяжести. Мы предполагаем, что пласт, содержащий аномалию, образован огибающими линиями (построенными в виде аппроксимации кубическим сплайном) вдоль верхних и нижних кромок рассчитанных сфер.

Расчёты, выполненные на глубине 900 м по профилю 3-3 показали, что решение (правая часть графика поля силы тяжести, начиная с пункта 41) имеет значительную невязку поля силы тяжести. Решено для всего графика провести дополнительное итерационное улучшение с подбором по другим свободным параметрам модели. В результате получена модель с хорошей невязкой поля силы тяжести вдоль всего участка (рисунок В.1, Приложение В). Результаты вычислений сведены в таблицу В.1 (Приложение В). Вычисления проводились при $T=1000^\circ$, скорости охлаждения 0.0001 м/с^2 , с погрешностью 15% для ζ_1 , x и σ , с шагом, равным 0.001. Относительная погрешность решения лежит в допустимых пределах, не более 0.12%. Средняя длительность вычислений составляет 6 с. Решение найдено за >69 000 итераций.

Тестирование модуля, реализующего метод имитации отжига для решения серии прямых задач гравиметрии, для *горизонтальной призмы* началось с вычислений, где шаг по профилю составил 100 м, учтены свойства горных пород и глубины их залегания. Получены графики гравитационных аномалий от модели в виде ряда горизонтальных призм вдоль трёх профилей (рисунок В.2, Приложение В). Для этой модели решение найдено за 6905 итераций при $T=1000^\circ$ и скорости остывания 0.001 м/с^2 , с относительной погрешностью 15% для ζ_1 , ζ_2 и σ . Задача решалась с постоянным шагом в интервале для плотности σ и глубины залегания сферического тела, равным 0.001. Такой шаг определен ради обеспечения численной устойчивости алгоритма: чем меньше шаг итерации, тем точнее расчет.

С целью имитации погрешностей в исходных данных решалась прямая задача гравиметрии при различном уровне погрешностей измерений (5-20% от максимального значения аномалии). Погрешности симулированы датчиком псевдослучайных чисел с Гауссовым распределением (по типу AnyLogic).

Средняя длительность вычислений составляет 3 с, что доказывает быстроедействие алгоритма для матрицы данных малой размерности. Результаты вычислений для набора горизонтальных призм по трём профилям сведены в таблицу В.2 (Приложение В). Относительная погрешность вычислений равна 2.67% и говорит о точности метода.

Для вертикального уступа расчёты для вертикального уступа начинались с опорной глубины залегания 600 м по профилю. В начале профиля 1-1 возникла значительная невязка решения, и этот участок подвергли дополнительным расчётам. Итоговое решение (гравитационные эффекты от набора вертикальных уступов) по всем трём профилям получено в пределах допустимой погрешности (рисунок В.3, Приложение В). Результаты вычислений сведены в таблицу В.3 (Приложение В). Относительная погрешность измерений лежит в допустимых пределах, не более 1,26%. Расчёты выполнялись при $T=100^\circ$ и скорости охлаждения 00001. Средняя длительность вычислений составляет 17 с. Каждое решение найдено за >46 000 итераций.

Выбор вероятной плотностной модели из множества допустимых обусловлен тремя критериями: максимальная простота модели; максимальное совпадение измеренного и рассчитанного полей; значения избыточной плотности $\Delta\sigma$ не противоречат геологическим данным. Геологическая интерпретация полученных моделей пребывает за рамками настоящего исследования.

В целом, результаты расчёта методом имитации отжига показали достаточно устойчивое решение при условии крайне ограниченного объёма исходных данных. В рамках последовательного подбора параметров получены итоговые модели изучаемой среды, обладающие приемлемым правдоподобием, точность решения по полю силы тяжести достигла 10^{-11} . Таким образом, метод имитации отжига позволяет быстро подобрать варианты подходящих решений с целью экспресс-анализа внутреннего строения геологической среды в границах изучаемого месторождения.

4.2 Анализ информативности результатов

ИС GeoM изначально была разработана как программа для решения прикладных задач обработки данных гравиметрического мониторинга недр на нефтегазовом месторождении. В процессе реализации математического моделирования структур отдельных участков нефтегазового месторождения появилась потребность в оптимизации прямой задачи гравиметрии, что является трудоемкой задачей. В связи с этим были разработаны специализированные вычислительные модули по автоматизации данного процесса. В ИС GeoM решение прямой задачи гравиметрии реализовано двумя методами глобальной оптимизации: методом имитации отжига и генетическим алгоритмом. Реализация задачи первым способом была описана в работе [5, с. 3-78]. Программный код ИС GeoM методом имитации отжига защищен авторским правом №13336 [127]. По данной программе получен акт внедрения

(Приложение И). В результате потребности в уменьшении вычислительных затрат ЭВМ возникла необходимость подвергнуть дополнительному анализу решение прямой задачи гравиметрии другим методом глобальной оптимизации.

Предлагается новый простой и точный подход определения источника гравитационных аномалий на нефтегазовых месторождениях посредством оценки параметров гравитации, связанных с телами простой формы, такими как однородная сфера, горизонтальная призма и вертикальный уступ. Предлагаемый подход основан на решении прямой задачи гравиметрии для минимизации невязки вариаций силы тяжести методом имитации отжига и генетическим алгоритмом. Предложенный подход имеет ряд преимуществ:

1. Алгоритм могут одновременно оптимизировать нескольких параметров изучаемой среды. Во всех предложенных моделях были одновременно оптимизированы по три параметра геологической среды. В случае однородной сферы были оптимизированы одновременно глубина (h) залегания тела, плотность (σ) и радиус (r). Для горизонтальной призмы были оптимизированы глубины залегания верхней (ζ_1) и нижней (ζ_2) кромок тела и плотность (σ) тела. Для вертикального уступа были оптимизированы одновременно нижняя горизонтальная (h_1) и верхняя горизонтальная (h_2) плоскости, плотность тела (σ).

2. Метод имитации отжига и генетический алгоритм как одно из направлений исследований в области искусственного интеллекта, обеспечили решение прямой задачи гравиметрии для ряда гравитирующих объектов, заданных в виде элементарных аппроксимирующих тел, таких как сфера, горизонтальная призма и вертикальный уступ с точностью до 10^{-11} . Высокая точность в эксперименте были достигнуты за счет обхождения локальных экстремумов. Таким образом, метод имитации отжига и генетический алгоритм показали лучшие результаты для решения мультимодальной функции.

3. Использование предложенных подходов рекомендуется использовать при рутинном анализе гравитационных аномалий в попытках определить параметры решения, связанных с изучаемыми структурами. На сегодняшний день подбором оптимальных параметров для получения минимальной невязки между измеренными и расчётными значениями гравитационного поля занимаются вручную. Использование предложенного подхода значительно сократило временные и финансовые затраты в компаниях, занимающихся геодинамическим мониторингом на нефтегазовых месторождениях.

В рамках последовательного подбора параметров получены итоговые модели изучаемой среды, обладающие приемлемым правдоподобием, точность решения по полю силы тяжести достигла 10^{-11} . Согласно рисункам 2.20-2.22, 2.28-2.30 можно сделать вывод о том, что достигнута высокая точность результатов с теоретически заданными вычислениями для заданных моделей геологической среды. Таким образом, генетический алгоритм позволяет быстро подобрать варианты подходящих решений с целью экспресс-анализа внутреннего строения геологической среды в границах изучаемого месторождения.

Ввиду небольшого количества данных результаты моделирования имеют ограниченную применимость и нуждаются в верификации с помощью других геофизических методов либо решения таких же задач на примере реальных данных существенно большей размерности.

Согласно результатам таблицы 2.5, можно сделать вывод о том, что метод имитации отжига дает меньшее количество возможных комбинаций, затрачивая на это более количество времени. Результаты относительной погрешности измерений также говорит о том, что результаты, полученные генетическим алгоритмом более точные.

При наличии существенных преимуществ использования методов глобальной оптимизации, некоторые недостатки все же присутствуют. Например, для решения поставленной задачи необходимо изначально разработать представление потенциального решения. Так, невозможно начать процесс оптимизации, не имея предварительного представления о параметрах оптимизации. Также было замечено, что при работе алгоритма нет эффективных критериев окончания работы алгоритма. Только входе проведения экспериментальных данных возможно определить возможные параметры работы методов глобальной оптимизации.

Экспериментальные вычисления проводились на одном из нефтегазовых месторождений на территории Республики Казахстан. Ввиду небольшого количества данных, результаты моделирования имеют ограниченную применимость и нуждаются в верификации с помощью других геофизических методов, либо решения таких же задач на примере реальных данных существенно большей размерности. Возможность дальнейшего совершенствования метода связана с получением дополнительных данных по другим нефтегазовым месторождениям. Предложенный метод является гибким в исполнении и позволяет контролировать изменения, поэтому внесение определенных корректировок в работу алгоритма будет вполне доступной.

Выводы по 4-му разделу

В данной главе проведенный анализ результатов выявил, что использование методов глобальной оптимизации обеспечило решение прямой задачи гравиметрии для ряда математических моделей среды с удовлетворительной точностью. Учитывая количество итераций и количество возможных комбинаций параметров, методы доказал, что позволяют достаточно быстро находить оптимальные параметры для однородных тел правильной геометрической формы.

При сравнении решений для разных тел при одинаковом объеме исходных данных методом имитации отжига выявлено, что время расчёта зависит от выбора начальной температуры T и скорости остывания, т.е. начального приближения плотности в методе имитации отжига. Чем выше температура и ниже скорость остывания, тем дольше выполнялся расчёт. Так, для вертикального уступа средняя длительность расчётов составила 17 с при скорости остывания 0.0001 с. Но такая зависимость является общим свойством

всех методов поиска решения градиентного типа. Из всех указанных выше моделей быстрее всего рассчитана модель горизонтальных призм (3 с) на скорости остывания 0.001 с.

При решении прямой задачи гравиметрии генетическим алгоритмом сравнение решений для разных тел при одинаковом объёме исходных данных показало, что время расчёта значительно зависит от размера популяции, в то время как изменение процента мутаций не влечет за собой существенных изменений. Чем выше размер популяции, тем дольше выполнялся расчёт и тем большее количество возможных комбинаций будут получены. Так, для однородной сферы средняя длительность расчётов составила 12 с при размере популяции 300 и проценте мутаций 30%, когда для вертикального уступа и горизонтальной призмы среднее время выполнения расчетов составило 5 с при размере популяции 100. Учитывая количество итераций и полученное количество возможных комбинаций, метод сравнительно быстродействующий и находит оптимальные параметры для заданных моделей. Таким образом, доказана приемлемая эффективность применения метода имитации отжига и генетического алгоритма для моделирования глубинной структуры земной коры в пределах нефтегазовых месторождений со сравнительно несложным пластовым строением.

Таким образом, создан численный модуль для ИС GeoM, который позволяет подбирать подходящие параметры аномальных геологических тел посредством минимизации невязки поля силы тяжести методом имитации отжига и генетическим алгоритмом. Его тестирование на примере различных тел и измеренных значений поля силы тяжести позволило увеличить достоверность исходной модели на каждом профиле. Внедрение этих методов позволило повысить точности, быстроту и устойчивость решения прямых задач гравиметрии для многокомпонентной слоистой геологической среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы и проведенного исследования, разработана специализированная информационная система для обработки данных гравиметрического мониторинга (и сопутствующих исследований) с целью повышения эффективности обработки и анализа данных полевых гравиметрических исследований, проведения гравиметрического моделирования.

Приведён обзор причин и методов прогноза геодинамических явлений на месторождениях УВ, включая некоторые яркие примеры негативных последствий, дан анализ возможностей гравитационного мониторинга и существующих информационных технологий для оценки техногенного влияния в местах добычи УВ средствами геофизики. Обобщена узкоцелевая направленность этих технологий и тем подтверждена актуальность исследования.

Освящена методика оценки геодинамических процессов на примере процедур измерения и обработки данных гравиметрии в среде разработанной информационной системы, включая отбор, отбраковку, расчёт аномалий поля, оценку точности измерений, визуализацию и формирование базы данных. Обработка и сравнение данных мониторинга организованы по циклам измерений, а внутри цикла – по комплексам методов съёмки, в том числе, по данным геофизических исследований скважин.

Описана обобщённая методика оценки параметров моделей среды посредством решения прямой задачи гравиметрии (ПЗГ) в детерминированной постановке для ряда геометрически правильных тел. Дан обзор возможностей методов глобальной оптимизации решения ПЗГ. Обоснован выбор конкретных алгоритмов (имитации отжига, генетического алгоритма), в том числе, для одновременной оптимизации нескольких параметров геосреды, адаптации параметров к новым условиям, устранения априорного ограничения начальной модели среды. Эти алгоритмы реализованы для трёх различных математических моделей среды. Последовательный подбор параметров среды по нескольким ее начальным моделям является существенным преимуществом разрабатываемой ИС.

Изложена функциональная модель рабочих процессов ИС и ее различных компонент, а также результаты ее декомпозиции на различные уровни и функции (предобработка, расчёт аномалий, решение ПЗГ, визуализация, сводная база данных, оптимизация). Общая диаграмма ИС представлена в подразделе, посвящённом аспектам создания базы данных, – основного компонента ИС, на основе PostgreSQL. Освящена программная реализация процедуры обработки измерений по циклам наблюдений, включая обработку ошибок, введение поправок и создание сводных профилей вертикальных смещений по данным нивелирования. Последняя возможность существенно обогащает ИС, делая ее комплексной. Продемонстрирован интерфейс численных модулей для решения ПЗГ (ввод данных, расчёт) и аспекты визуализации данных (стилистика, векторное наложение). В итоге отдельные

модули интегрированы в единую оболочку ИС.

Протестированы рабочие процессы и численная устойчивость ИС путём решения серии тестовых задач. В результате решения и анализа тестовых примеров показана хорошая устойчивость и приемлемая эффективность ИС по точности и скорости. Решение поисковых задач сразу двумя методами глобальной оптимизации – одно из преимуществ предложенной технологии, поскольку даёт возможность дополнительного повышения точности и устойчивости подбора. Использование методов глобальной оптимизации позволило: осуществить подбор нескольких параметров среды одновременно и избежать (свойственного классическим градиентным методам подбора) влияния начальной конфигурации (априорных предположений о строении геосреды). Все это вместе сокращает время (и трудозатраты) на моделирование геодинамики среды и принятие соответствующих решений. В этом и есть основной вклад исследования в получение новых научных результатов на стыке геофизики и геоинформатики.

Практическая ценность исследования заключается в создании и апробации информационной системы, удовлетворяющей существующим стандартам, и решении с её помощью ряда тестовых задач при ограниченном наборе реальных исходных данных.

Перспектива развития ИС видится в последовательном добавлении сервисных функций, улучшении сопряжения с геосервером, внедрении модуля решения обратных задач, наполнении ИС отчётной и справочной информацией и постепенном ее превращении в информационно-аналитическую экспертную систему для обслуживания нужд нефтегазовой отрасли Республики Казахстан.

А историю проектирования, тестирования и внедрения данной ИС со временем вполне можно преобразовать в прикладную монографию.

В дальнейшем после некоторого периода опытной эксплуатации имеются предпосылки для превращения ИС в полноценную информационно-аналитическую систему поддержки принятия решений в процессе освоения месторождений УВ. При этом может потребоваться:

1) уточнить требования к архитектуре ИС в модуле отбора и обработки исходных данных измерений, и представления сводных результатов;

3) уточнить модель рабочих процессов вычислительных алгоритмов и структуру ИС в связи с добавлением новых методов решения прямых и обратных задач гравиметрии;

4) при создании справочной информации уточнить постановки и пределы применения задач гравиметрии и процедур их решения;

5) повысить производительность алгоритмов, подбирая условия тестирования для разных моделей среды, анализируя типы погрешностей, оптимизируя способы обхождения локальных экстремумов, варьируя критерии остановки итераций, тестируя различных гипотезы о поведении ошибок метода.

Другие перспективы (как и проблемы) развития, разработанной ИС будут возникать в процессе сотрудничества со смежными организациями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Кодекс Республики Казахстан. Экологический кодекс Республики Казахстан: принят 9 января 2007 года, №212-III (с изм. и доп. по состоянию на 26.12.2019 г.) // <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2100000400>. 10.04.2020.
- 2 Нестеренко Ю.М., Нестеренко М.Ю., Днистрянский В.И. и др. Влияние разработки месторождений углеводородов на геодинамику и водные системы Южного Предуралья // Литосфера. – 2010. – Т. 4. – С. 28-41.
- 3 Кузьмин Ю.О., Никонов А.И. Оценка геодинамических последствий разработки Бованенковского НГКМ // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2008. – Т. 2. – С. 34-40.
- 4 Страхов Н.В. К теории метода подбора // Известия АН СССР. – 1964. – Т. 4. – С. 494-509.
- 5 Блох Ю.И. Решение прямых задач гравиразведки и магниторазведки: учеб. пос. – М.: МГГА, 1993. – 79 с.
- 6 Мартышко П.С., Пруткин И.Л., Кокшаров Д.Е. Об одном алгоритме // Закономерности строения и эволюции геосфер: докл. 6-го междисцип. междунар. симпоз. – Хабаровск, 2004. – С. 1-3.
- 7 Мартышко П.С., Кокшаров Д.Е. О построении плотностных разрезов по гравитационному полю // Матер. 3-й всерос. конф. "Алгоритмический анализ неустойчивых задач". – Екатеринбург, 2004. – С.№ 352-353.
- 8 Martyshko P.S., Koksharov, D.E. On linear inverse gravimetric problem solution for layered media // Proceed. 2006 internat. conf. and Exhibition. – SPb., 2006. – P. 1-5.
- 9 Martyshko P.S., Fedorova N.V., Kolmogorova V.V. et al. Geophysical models of the Earth's crust structure of the Northern Urals // Proceed. 72nd European Association of Geoscientists and Engineers conf. and Exhibition 2010: A New Spring for Geoscience. Incorporating (SPE EUROPEC 2010). – Barcelona, 2010. – Vol. 7. – P. 5230-5234.
- 10 Martyshko P.S., Koksharov, D.E. New algorithm and computer technology for density model construction // Proceed. 10th internat. conf. on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects(Geoinformatics 2011). – Kyiv, 2011. – P. 1-6.
- 11 Оганесян С.М., Старостенко В.И. Тела нулевого внешнего гравитационного потенциала: о забытых работах современном состоянии теории // Физика Земли. – 1985. – Т. 3. – С. 49-62.
- 12 Gulenok R.Y., Isaev V.I., Kosygin V.Y. et al. Estimation of the oil-and-gas potential of sedimentary depressions in the Far East and West Siberia based on gravimetry and geothermy data // Russian Journal of Pacific Geology. – 2011. – Vol. 5, №4. – P. 273-287.
- 13 Talwani M. Non linear inversion of gravity gradients and the GGI gradiometer // Central European Journal of Geosciences. – 2011. – Vol. 3, №4. – P. 424-434.
- 14 Biswas A., Parija M.P., Kumar S. Global nonlinear optimization for the interpretation of source parameters from total gradient of gravity and magnetic

anomalies caused by thin dyke // *Annals of geophysics*. – 2017. – Vol. 2, №60. – P. 1-17.

15 Chakravarthia V., Sundararajan N. TODGINV—A code for optimization of gravity anomalies due to anticlinal and synclinal structures with parabolic density contrast // *Computers & Geosciences*. – 2008. – Vol. 34. – P. 955-966.

16 Азимов А.А., Кенжебаева М.О., Нурсеитов Д.Б. и др. Оптимизационные методы решения обратной задачи гравиразведки. // Матер. 14-го междунар. азиат. школы-семина. «Проблемы оптимизации сложных систем». – Иссык-Куль, 2018. – С. 72-79.

17 Нурсеитов Д.Б., Нурсеитова А.Т., Серовайский С.Я. Некоторые особенности прямых и обратных задач гравиметрии // Матер. традиц. междунар. апрель. матем. конф. в честь Дня работкниа Республики Казахстан и Workshop «Problems of modelling processes in electrical contacts», посв. 80-лет. юбилею С.Н. Харина. – Алматы, 2019. – С. 124-125.

18 Hinze W., Von Frese R., Saad A. Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 512 p.

19 Zhao L.S., Sen M., Stoffa P. et al. Application of Very Fast Simulated Annealing to the Determination of the Crustal Structure Beneath Tibet // *Geophysical Journal International*. – 2007. – Vol. 125. – P. 355-370.

20 Chakravarthi V., Kumar M.P., Batta R. et al. Automatic gravity modeling of sedimentary basins by means of polygonal source geometry and exponential density contrast variation: Two space domain based algorithms // *Journal of Applied Geophysics*. – 2016. – Vol. 124. – P. 54-61.

21 Osborne E.A., Osborne I.E., Rodionov E.A. et al. Application of Neural Networks in Nonlinear Inverse Problems of Geophysics // *Comput. Math. and Math. Phys.* – 2020. – Vol. 60. – P. 1025-1036.

22 Abdelrahman E.M., Sharafeldin S.M. A least-squares minimization approach to depth determination from numerical horizontal gravity gradients // *Geophysics*. – 1995. – Vol. 60. – P. 939-1278.

23 Шляховский В.А. Изучение нефтегазоперспективных структур с помощью диалоговой системы интерпретации гравитационных аномалий: дис. ... канд. геол.-минер. наук: 04.00.12. – Киев, 1984. – 153 с.

24 Jabri A. et al. Multipass Turning Operation Process Optimization Using Hybrid Genetic Simulated Annealing Algorithm // *Modelling and Simulation in Engineering*. – 2017. – Vol. 2017. – P. 1940635-1-1940635-10.

25 Asfahani J., Tlas M. Fair Function Minimization for Direct Interpretation of Residual Gravity Anomaly Profiles Due to Spheres and Cylinders // *Pure & Applied Geophysics*. – 2012. – Vol. 169. – P. 157-165.

26 Трофимов Д.М. и др. Современные микроамплитудные тектонические движения, дистанционные методы их изучения и значение для нефтегазовой геологии // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2016. – №4. – С. 6-11.

27 Vartanyan G.S. Regional Geodynamic Monitoring System for Ensuring Safety in Geological and Exploratory Production of Oil and Gas // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2010. – Vol. 8, № 46. – P. 952-964.

28 Диаров М. Риски возникновения катастрофических нефтегазовых выбросов при освоении морских гигантских подсолевых углеводородных ресурсов казахстанского сектора Каспийского моря. – Атырау, 2010. – 334 с.

29 Терлеева Н.В., Иванов А.Ю. Последствия и риски катастроф на морских месторождениях нефти и газа в каспийском море // *Экология и промышленность России*. – 2014. – №11. – С. 15-21.

30 Лобковский Л.И., Левченко Д.Г., Леонов А.В. и др. Геоэкологический мониторинг морских нефтегазоносных акваторий. – М.: Наука, 2005. – 325 с.

31 Жантаев Ж.Ш., Фремд А.Г., Иванчукова А.В. и др. Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности над нефтегазовым месторождением Тенгиз // *Геоматика*. – 2012. – Т. 1. – С. 61-71.

32 В Махачкале состоялась конференция по защите морской среды Каспийского моря // <http://casp-geo.ru/v-mahachkale-sostoyalas>. 05.05.2020.

33 Абетов А., Кудайбергенова С., Сидоров В.А. Создание геодинамических полигонов и технологии проведения геодинамического мониторинга на месторождениях углеводородов // *Вестник КазННТУ. Науки о Земле*. – 2021 – №2. – С. 3-13.

34 Кенесбаева А. Орынбасарова Э.О. О методах геодинамического мониторинга месторождений углеводородов // *Вестник Казахской головной архитектурно-строительной академии*. – 2012. – №3-4. – С. 280-284.

35 Khalilov E.N. *Global Network for the Forecasting of Earthquakes*. – London: SWB, 2010. – 38 p.

36 Антонов Ю.В. Структура неприливных вариаций силы тяжести // *Вестник Воронежского государственного университета*. – 2014. – №2. – С. 84-88.

37 Нурмагамбетов А. Техногенные процессы в земной коре Казахстана, обусловленные инженерно-хозяйственной деятельностью // *Геология и охрана недр*. – 2014. – Т. 2, №51. – С. 69-78.

38 Feng J., Sheng, Zh., Xiaohong M. Constraint 3D density interface inversion from gravity anomalies // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2016. – Vol. 9, №56. – P. 1-8.

39 Butler S.L., Sinha G. Forward Modeling of Applied Geophysics Methods Using Comsol and Comparison with Analytical and Laboratory Analog Models // *Journal Computers & Geosciences*. – 2012. – Vol. 42. – P. 168-176.

40 Sari C., Şalk M. Analysis of gravity anomalies with hyperbolic density contrast: An application to the gravity data of Western Anatolia // *Journal of the Balkan geophysical society*. – 2002. – Vol. 5, №3. – P. 87-96.

41 Tai-Han W., Da-Nian H., Guo-Qing M. et al. Improved preconditioned conjugate gradient algorithm and application in 3D inversion of gravity-gradiometry data // *Journal of applied geophysics*. – 2017. – Vol. 14, №2. – P. 301-313.

42 Серкеров С.А. Гравиразведка и магниторазведка: учеб. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 1999. – 437 с.

43 Муравина О.М., Лошаков Г.Г. Принципы решения прямых задач потенциала при моделировании строения литосферы // Вестник ВГУ. – 2015. – №3. – С. 97-100.

44 Пятаков Ю.В., Исаев В.И. Методы решения прямых задач гравиметрии // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, №1. – С. 105-110.

45 Старостенко В.И., Манукян А.Г. Решение прямой задачи гравиметрии на шарообразной Земле // Физика Земли. – 1983. – №12. – С. 34-50.

46 Chapman B., Jost G., Van Der Pas R. Using OpenMP: portable shared memory parallel programming. – Massachusetts: MIT press, 2008. – Vol. 10. – 353 p.

47 Xiaohong Ch., Zhan L., Gang Zh. et al. The Gravity Anomaly in Large Oil and Gas Reservoirs // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2012. – Vol. 17. – P. 2949-2959.

48 Kashnikov A.Yu., Ashikhmin S.G., Bukin V.G. et al. Deformation forerunners of earthquakes triggered off by development of hydrocarbon accumulations // Journal of Mining Science. – 2011. – Vol. 4, №47. – P. 427-434.

49 Пат. WO 2013/096997 A1 РФ. Способ прогнозирования землетрясений и устройство для его осуществления / Э.Н. Халилов; опубл. 29.04.13. – 41 с.

50 Shevelyova A. Integrated Geodynamic Monitoring and Risk Assessment of Occurrence of Seismic Deformation Processes Related to Development of Raw Hydrocarbon Deposits // Proceed. SPE Caspian Carbonates Technology conf. – Atyrau: Society of Petroleum Engineers, 2010. – P. 1-8.

51 Nurpeisova M., Bekbassarov Zh., Kenesbayeva A. et al. Complex evaluation of geodynamic safety in the development of hydrocarbon reserves deposits // News of NAS RK. – 2020. – Vol. 1, №439. – P. 90-98.

52 Страхов Н.В. Алгебраические методы в решении обратных задач гравиметрии (решение обратных задач без решения прямых задач) // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: тез. докл. – Апатиты, 2002. – С. 15-18.

53 Алексидзе М.А. Исследование некоторых вопросов решения граничных задач методом конечных разностей и полной автоматизации решения задачи Дирихле для уравнений Лапласа и Пуассона: дис. ... канд. физ-мат. наук: 01.00.00. – М., 1958. – 124 с.

54 Ломтадзе В.В. и др. Программное и информационное обеспечение геофизических исследований. – М.: Недра, 1993. – 268 с.

55 Старостенко В.И. Автоматизированная система оперативной обработки данных гравиметрии и магнитометрии. – Киев: Наукова думка, 1972. – 163 с.

56 Симанов А.А. Разработка и создание информационно-аналитической системы хранения, обработки и анализа гравиметрических данных: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.10. – М., 2008. – 160 с.

- 57 Дмитриев В.И., Морозов В.А., Жданов Н.С. и др. Вычислительные математика и техника в разведочной геофизике: справоч. геофизика. –Изд. 2-е, перер. и доп. – М.: Недра, 1990. – 498 с.
- 58 Никитин О.Л., Кузнецов А.А. Геоинформатика. – М.: Недра, 1992. – 301 с.
- 59 Бусыгин Б.С., Никулин С.Л. Специализированная геоинформационная система РАПИД: структура, технология, задачи // *Geoinformatika*. – 2016. – Т. 1, №57. – С. 22-36.
- 60 Назирова А.Б. Сравнительная характеристика существующих геоинформационных технологий в геофизике // Информационные и телекоммуникационные технологии: образование, наука, практика: тр. междунар. науч.-практ. конф. – Алматы, 2015. – Т. 1. – С. 225-228.
- 61 Черемисина Е.Н., Никитин А.А. Геоинформационные системы в природопользовании // *Геоинформатика*. – 2006. – №3. – С. 5-20.
- 62 ПАНГЕЯ – 10 лет: спец. вып. – М.: Геофизика, 2004. – 104 с.
- 63 Создание геоинформационной системы для визуализации результатов гравиметрического мониторинга: отчет о НИР (заключительный) / Satbayev University: рук. Нурсейтова А.Т.; исп.: Серовайский С.Я., Назирова А.Б. и др. – Алматы, 2020. – 135 с. – №ГР 0118РК00282. – Инв. №АР05135158.
- 64 Шипулин В.Д. Основные принципы геоинформационных систем: учеб. пос. – Харьков: ХНАГХ, 2010. – 337 с.
- 65 Косков В.Н., Косков Б.В. Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС: учеб. пос. – Перм, 2007. – 317 с.
- 66 Назирова А.Б. Методы оценки гравитационных аномалий на нефтегазовых месторождениях с применением информационных технологий // *Вестник Казахстанско-Британского технического университета*. – 2018. – Т. 15, №3. – С. 118-128.
- 67 Геоинформационная система ПАРК версия 6.01. Введение в систему и технологию. – М: ЛАНЕКО, 2000. – 98 с.
- 68 Финкельштейн М.Я., Деев К.В. Развитие инструментальных средств ГИС ИНТЕГРО // *Геоинформатика*. – 2003. – №2. – С. 49-51.
- 69 Перепечкин М.В. Технология построения геологических моделей по геолого-геофизическим данным в программном комплексе DVGeo: автореф. ... канд. техн. наук: 25.00.35. – М.: РГГРУ, 2007. – 22 с.
- 70 Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled seamless SRTM data V3 // <http://srtm.csi.cgiar.org/2006>. 15.09.2019.
- 71 Geosoft provides mapping software for geophysics, geology, geochemistry, environmental and other earth science applications in mineral exploration, petroleum and government // www.geosoft.com. 15.09.2019.
- 72 Коротаяев М.В., Правикова Н.В. Применение ГИС в геологии: учеб. – Изд. 2-е. – М: КДУ, 2010. – 172 с.
- 73 Shin J.E., Campbell M. *Geographic Information System Basics*. – Cambridge: Academic Press, 2009. – 252 p.

- 74 Преобразование данных в решения. Визуализация, анализ и интеграция всех ваших геологических данных // <https://www.seequent.com/ru/>. 23.09.2019.
- 75 Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D» // <http://coscad3d.ru/> 23.09.2019.
- 76 Пакет программ ZOND. <http://zond-geo.ru>. 23.09.2019.
- 77 Подразделения лаборатория геопотенциальных полей: системе VECTOR // http://mail.mi-perm.ru/about/podrazdelenie?show_id=12. 23.09.2019.
- 78 Сигма 3D // <http://sigma3d.com/index.php> 23.09.2019.
- 79 Сорокин Л.В. Гравиметрия и гравиметрическая разведка. – М: Нефтяная и горно-топливная литература, 1953. – 484 с.
- 80 Грушинский Н.П. Основы гравиметрии. – М: Наука, 1983. – 351 с.
- 81 Грушинский Н.П. Введение в гравиметрию и гравиметрическую разведку. – М: Издательство Московского университета, 1961. – 206 с.
- 82 Камбаров Н.Ш., Приходько В.А., Тараканов Ю.А. Интерпретация гравитационных аномалий. Спутниковая гравиметрия. – М: МГУ, 1987. – 151 с.
- 83 Jacoby W., Smilde, P. Gravity Interpretation: Fundamentals and Application of Gravity Inversion and Geological Interpretation. – Berlin: Springer Science & Business Media, 2009. – 395 p.
- 84 Торге В. Гравиметрия. – М.: Мир, 1999. – 428 с.
- 85 Abdoldina F.N., Nazirova A.N., Dubovenko Y.I. et al. Solution of the gravity exploration direct problem by the simulated annealing method for data interpretation of gravity monitoring of the subsoil conditions // News of the Nat. Academy of Sc. of the Republic of Kazakhstan. – 2021. – Vol. 1. – P. 13-21.
- 86 Виноградов В.Б., Болотнова Л.А. Гравиметры. – Екатеринбург: УГГУ, 2010. – 67 с.
- 87 Misner C., Thorne K., Wheeler J. Gravitation. – San Francisco: W.H. Freeman & Company, 1973. – 1279 с.
- 88 Иваненко Д.Д., Сарданишвили Г.А. Гравитация. – М: ЛКИ, 2012. – 200 с.
- 89 Хмелевской В.К., Костицын В.И. Основы геофизических методов. – Пермь: Перм. ун-т, 2010. – 400 с.
- 90 Орленок В.В. Основы геофизики: учеб. пос. – Калининград, 2000. – 446 с.
- 91 Гравиметрия: учебно-методический комплекс дисциплины для студентов 050711 - Геодезия и картография / сост. А.Ш. Шарапатов. – Алматы: КазНТУ, 2008. – 66 с.
- 92 Шмарева М.Б. Сборник лабораторных работ по дисциплинам «Разведочная геофизика» и «Полевая геофизика»: метод. указания для студентов специальностей 130201, 130202 и 130304. – Ухта: УГТУ, 2013. – 39 с.
- 93 Назирова А.Б., Абдолдина Ф.Н., Дубовенко Ю.И. и др. Применение метода имитации отжига для анализа данных гравиметрического мониторинга состояния недр нефтегазовых месторождений // Вестник Казахского

национального исследовательского технического университета им. К.И. Сатпаева. – 2019. – Т. 133, №3. – С. 397-405.

94 Nazirova A., Abdoldina F., Aymahanov M. et al. An automated system for gravimetric monitoring of oil and gas deposits // Digital Transformation and Global Society: 1st internat. conf. (DTGS 2016). – SPb., 2016. – P. 585-595.

95 Иванов В.К., Васин В.В., Танана В.И. Теория линейных некорректных задач и ее приложения. – М: Наука, 1978. – 206 с.

96 Мартышко П.С., Кокшаров Д.Е. Глубинное строение, геодинамика, мониторинг, тенловое поле Земли // Интерпретация геофизических полей: матер. 3-х науч. чт. Ю.П. Булашевича. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2005. – С. 92-94.

97 Мудрецова А., Веселова К.Е. Справочник геофизик. – Изд. 2-е, перер. и доп.: – М.: Недра, 1990. – 607 с.

98 Sen M., Stoffa P. Global Optimization Methods in Geophysical Inversion. Simulated annealing methods. – NY.: Cambridge University Press, 2013. – 280 p.

99 Singh A., Biswas A. Application of global particle swarm optimization for inversion of residual gravity anomalies over geological bodies with idealized geometries // Natural Resources Research, 2015. – Vol. 25, №3. – P. 297-314.

100 Натальчишин Т.А. Генетические алгоритмы и их применение для оценки параметров аномалиеобразующих объектов по данным гравиразведки и магниторазведки: автореф. ... канд. техн. наук: 25.00.10. – М., 2012. – 20 с.

101 Nazirova A., Abdoldina F., Dubovenko Y. et al. Development of GIS subsystems for gravity monitoring data analysis of the subsoil // Proceed. 18th internat. conf. “Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects”. – Kyiv, 2019 – P. 1-5.

102 Biswas A., Sharma S.P. Resolution of multiple sheet-type structures in self-potential measurement // Journal of Earth System Science. – 2014. – Vol. 4, №123. – P. 809-825.

103 Tabassum M., Mathew K. A Genetic Algorithm Analysis towards Optimization solutions // International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDIWC). – 2014. – Vol. 4. – P. 124-142.

104 Hamdia K.M., Zhuang X. & Rabczuk T. An efficient optimization approach for designing machine learning models based on genetic algorithm // Neural Computing and Applications. – 2021. – Vol. 33. – P. 1923–1933.

105 Abu Taleb A. Sink mobility model for wireless sensor networks using genetic algorithm // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2021. – Vol. 99. – P. 540-551.

106 Moheb R., Tarek M. et al. Solving the Wireless Mesh Network Design Problem using Genetic Algorithm and Simulated Annealing Optimization Methods // International Journal of Computer Applications. – 2014. – Vol. 96. – P. 1-10.

107 Butko T., Prokhorov V., Chekhunov D. Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 85, №3. – P. 55-61.

- 108 Baghlani A., Sattari M., Makiabadi M. Application of genetic programming in shape optimization of concrete gravity dams by metaheuristics // Cogent Engineering. – 2014. – Vol. 1. – P. 1-18.
- 109 Лопатин А.С. Метод отжига // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2005. – Т. 1. – С. 133-149.
- 110 Sheng Z., Xiaohong M., Minghua Z. et al. The improved residual node density based gravity forward method and its application // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 159. – P. 765-772.
- 111 Абдолдина Ф.Н., Назирова А.Б., Дубовенко Ю.И. и др. О решении прямой задачи гравиметрии для призмы методом имитации отжига // Матер. 22-й конф. по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (Геомодель 2020). – Геленджик, 2020. – С. 1-5.
- 112 Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. – Massachusetts: MIT Press, 1972 – 228 p.
- 113 Goldberg E.D. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Reading. – Boston: Addison-Wesley, 1989. – 412 p.
- 114 Hassanat A.B., Prasath V.B.S. et al. An Improved Genetic Algorithm with a New Initialization Mechanism Based on Regression Technique // Information. – 2018. – Vol. 9. – P. 167-1-167-30.
- 115 Yang M.D., Yang Y.F., Su T.C. et al. An efficient fitness function in genetic algorithm classifier for landuse recognition on satellite images // The Sciengific World Journal. – 2014. – Vol. 2014. – P. 264512-1-264512-9.
- 116 D'Angelo G., Palmieri F. GGA: A modified genetic algorithm with gradient-based local search for solving constrained optimization problems // Information Sciences. – 2021. – Vol. 547. – P. 136-162.
- 117 Verma A., Mittal N. Congestion Controlled WSN using Genetic Algorithm with different Source and Sink Mobility Scenarios // International Journal of Computer Applications. – 2014. – Vol. 101. – P. 8-15.
- 118 Lambora A., Gupta K., Chopr K. Genetic Algorithm- A Literature Review // In Proceed. of the internat. conf. on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon). – Faridabad, 2019. – P. 380-384.
- 119 Одинцов И.О. Профессиональное программирование. Системный подход. – СПб: БХВ-Петербург, 2004. – 624 с.
- 120 Ахатова К.А., Берлибаева А.Б., Абдолдина Ф.Н. и др. Построение функциональной модели процесса обработки данных гравиметрического мониторинга // Роль и место молодых ученых в реализации новой экономической политики Казахстана (Сатпаевские чтения-2015): матер. междунар. конф. – Алматы, 2015. – С. 663-668.
- 121 Бостанбеков К.А. Разработка геоинформационной системы для хранения, обработки и представления данных экологических исследований: дис. ... док. PhD: 6D070400. – Алматы, 2018. – 131 с.
- 122 Коцюба И.Ю., Чунаев А.В., Шиков А.Н. Основы проектирования информационных систем. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 206 с.

123 Проектирование информационной системы // <https://finswin.com/projects/proektirovanie/informacionnyh-sistem.html>. 23.09.2019.

124 Спирин Н.А., Лавров В.В., Бурькин А.А. и др. Технология и средства разработки информационно-моделирующих систем для решения технологических задач // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, №5. – С. 156-161.

125 Об утверждении Правил стадийности геологоразведки от 5.06.2018. – №342. // <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1800016996>

126 Virtanen H. Studies of earth dynamics with superconducting gravimeter: academic dissertation in geophysics. – Helsinki: University of Helsinki, 2006. – 45 p.

127 Пат. 13336 РК. Геоинформационная система “ГеоМ” для обработки данных гравиметрического мониторинга: программа для ЭВМ / Ф.Н. Абдолдина, А.Б. Назирова, Ю.И. Дубовенко и др.; опубл. 19.11.2020.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Апробация результатов исследования





Сертификат

Подтверждает, что

Назирова
Асем Бакдаулетовна
КазНИТУ им. К.И.Сатпаева

принял (а) участие с докладом в 22-й научно-практической конференции EAGE по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2020»

7-11 сентября 2020 г.

Marcel van Loon,
Executive Director
EAGE



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельства об авторском праве на модули информационной системы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ
МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ

КУӘЛІК

2020 жылғы «19» қараша № 13336

Автордың (лардың) жөні, иты, әкесінің иты (егер ол жеке басын куәландырағын құжатта көрсетілсе):
АБДОЛЛИНА ФАРИДА НАУРУЗБАЕВНА, НАЗИРОВА АСЕМ БАҚДАУЛЕТОВНА, ДУБОВЕНКО
ЮРИИ ПИВАНОВИЧ, УМИРОВА ГУЛЬЗАДА КУБАШЕВНА, ДЖАМАЛОВ ДЖАЛАЛ КУДРАТОВИЧ,
СЛЯХАН ҚУАНЫШ ДАУРЕНҰЛЫ

Авторлық құқық объектісі: ЭЕМ-ге арналған бағдарлама

Объектінің атауы: Геонавформационная система «GeoM» для обработки данных гравиметрического мониторинга

Объектіні жасаған күні: 30.10.2020



Құжат тілшісінің сайты: <http://www.kazpatent.kz/> сайтының
Авторлық құқық Белгілеріне тексеруге болары: <http://copyright.kazpatent.kz>
Подлинность документа возможно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz)
в разделе «Авторские права»: <https://copyright.kazpatent.kz>

ЭЦҚ қол қойылды

Оспанов Е.К.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ
МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ

КУӘЛІК

2022 жылғы «25» тамыз № 28492

Автордың (лардың) жөні, аты, әкесінің аты (егер ол жеке басын куәландыратын құжатта көрсетілсе):
НАЗИРОВА АСЕМ БАҚДАУЛЕТОВНА, Абдолдина Фарида Наурызбаевна, Дубовенко Юрий Иванович,
Умброва Гульзада Кубашевна

Авторлық құқық объектісі: ЭЕМ-ге арналған бағдарлама

Объектінің атауы: Информационная система по решению прямой задачи гравиметрии генетическим алгоритмом

Объектіні жасаған күні: 30.06.2021



Құжаттың нақты сандығын [http://www.kazpatent.kz/ru/ойынның_\"Авторылық_құқық\"_бөлімінде_тексеруге_болады](http://www.kazpatent.kz/ru/ойынның_\) <https://copyright.kazpatent.kz>

Подлинность документа возможно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz) в разделе «Авторское право» <https://copyright.kazpatent.kz>

ЭЦҚ қол қойылды

Н. Абулкаиров

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблицы значений аномалий для разных моделей среды

Таблица В.1 – Производные гравитационного потенциала для набора сферических тел, рассчитанные с помощью метода имитации отжига

| № грав. пун. | Радиус R, м | Глубина h, м | σ , кг/м ³ | Центр x, м | Изм. данные | Расч. данные | Отн. погр., % |
|--------------|-------------|--------------|------------------------------|------------|--------------|--------------|---------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Профиль 1-1 | | | | | | | |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 100 | 900 | -1800 | 100 | -6,130E-07 | -6,130E-07 | -0,29 |
| 6 | 100 | 800 | -2600 | 200 | -1,025E-06 | -1,025E-06 | 0,23 |
| 7 | 100 | 800 | -2600 | 300 | -9,803E-07 | -9,803E-07 | 0,05 |
| 9 | 105 | 800 | -2600 | 400 | -9,218E-07 | -9,218E-07 | 0,00 |
| 11 | 105 | 900 | 1000 | 500 | 2,776E-07 | 2,776E-07 | 0,00 |
| 13 | 120 | 900 | 2600 | 600 | 9,201E-07 | 9,201E-07 | 0,04 |
| 15 | 180 | 900 | 2200 | 700 | 2,189E-06 | 2,189E-06 | -0,04 |
| 16 | 190 | 900 | 2600 | 800 | 2,463E-06 | 2,463E-06 | 0,00 |
| 17 | 220 | 900 | 2600 | 900 | 3,443E-06 | 3,443E-06 | 0,03 |
| 18 | 250 | 900 | 2600 | 1000 | 4,319E-06 | 4,319E-06 | 0,00 |
| 19 | 300 | 900 | 2800 | 1100 | 6,571E-06 | 6,571E-06 | 0,01 |
| 20 | 320 | 900 | 2800 | 1200 | 6,869E-06 | 6,869E-06 | -0,05 |
| 21 | 350 | 900 | 2800 | 1300 | 7,656E-06 | 7,656E-06 | -0,12 |
| Профиль 2-2 | | | | | | | |
| 22 | 180 | 700 | 2800 | 988 | 1,69E-06 | 1,69E-06 | -0,02 |
| 23 | 180 | 700 | 1300 | 1088 | 7,36E-07 | 7,36E-07 | -0,01 |
| 24 | 120 | 730 | 1300 | 1188 | 1,73E-07 | 1,73E-07 | -0,01 |
| 25 | 60 | 800 | 1300 | 1288 | 1,94E-08 | 1,94E-08 | -0,01 |
| 26 | 170 | 830 | -1500 | 1388 | -3,95E-07 | -3,95E-07 | 0,01 |
| 27 | 180 | 1000 | -2800 | 1488 | -8,48E-07 | -8,48E-07 | -0,01 |
| 28 | 180 | 1070 | -2800 | 1588 | -6,89E-07 | -6,89E-07 | -0,01 |
| 29 | 200 | 1070 | -2800 | 1688 | -8,52E-07 | -8,52E-07 | -0,06 |
| 30 | 200 | 1070 | -2300 | 1788 | -5,90E-07 | -5,90E-07 | 0,01 |
| 31 | 200 | 1000 | -2300 | 1888 | -5,15E-07 | -5,15E-07 | 0,01 |
| 32 | 200 | 900 | -2300 | 1988 | -4,49E-07 | -4,49E-07 | -0,04 |
| 33 | 150 | 900 | 1200 | 2088 | 8,29E-08 | 8,29E-08 | 0,02 |
| 34 | 300 | 900 | 2800 | 2188 | 1,47E-06 | 1,47E-06 | -0,01 |
| 37 | 100 | 800 | 1150 | 893 | 1,48E-07 | 1,48E-07 | -0,02 |
| 38 | 100 | 900 | -2800 | 993 | -2,89752E-07 | -2,90E-07 | -0,04 |
| 39 | 70 | 1100 | -1000 | 1093 | -2,59069E-08 | -2,59E-08 | 0,00 |

Продолжение таблицы В.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--|-----|-----|-------|------|--------------|-----------|-------|
| 40 | 100 | 800 | -2000 | 1193 | -1,53015E-07 | -1,53E-07 | -0,06 |
| 41 | 190 | 800 | 2500 | 1293 | 1,08E-06 | 1,08E-06 | 0,09 |
| 42 | 240 | 800 | 2800 | 1393 | 2,16E-06 | 2,16E-06 | 0,03 |
| 44 | 345 | 800 | 2800 | 1493 | 5,38E-06 | 5,38E-06 | 0,05 |
| 45 | 400 | 900 | 2800 | 1593 | 7,85E-06 | 7,85E-06 | -0,02 |
| Среднее время расчёта, с (T=1000°, скорость охлаждения = 0.0001) | | | | | | 6 | |

Таблица В.2 – Производные гравитационного потенциала для набора горизонтальных призм, рассчитанные с помощью метода имитации отжига

| № грав. пун. | ξ_1 | ξ_2 | ζ_1 | ζ_2 | σ | Измер. данные | Рассч. данные | Отн. погр., % |
|--------------|---------|---------|-----------|-----------|----------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Профиль 1-1 | | | | | | | | |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 100 | 200 | 600 | 630 | 1000 | -6,13031E-07 | -6,13E-07 | -0,43 |
| 6 | 200 | 400 | 600 | 630 | 1000 | -1,02548E-06 | -1,03E-06 | 0,27 |
| 7 | 300 | 600 | 600 | 620 | 1200 | -9,80325E-07 | -9,80E-07 | -0,46 |
| 9 | 400 | 800 | 600 | 620 | 1100 | -9,21848E-07 | -9,22E-07 | -0,56 |
| 11 | 500 | 1000 | 600 | 608 | -800 | 2,7759E-07 | 2,78E-07 | 0,08 |
| 13 | 600 | 1200 | 600 | 608 | -2800 | 9,20123E-07 | 9,20E-07 | 0,05 |
| 15 | 700 | 1400 | 600 | 625 | -2000 | 2,18924E-06 | 2,19E-06 | 0,21 |
| 16 | 800 | 1600 | 600 | 625 | -2700 | 2,46279E-06 | 2,46E-06 | -0,08 |
| 17 | 900 | 1800 | 600 | 635 | -2800 | 3,44E-06 | 3,44E-06 | -0,01 |
| 18 | 1000 | 2000 | 600 | 645 | -2800 | 4,32E-06 | 4,32E-06 | -0,10 |
| 19 | 1100 | 2200 | 600 | 670 | -2800 | 6,57E-06 | 6,57E-06 | -0,12 |
| 20 | 1200 | 2400 | 600 | 675 | -2800 | 6,87E-06 | 6,87E-06 | 0,39 |
| 21 | 1300 | 2600 | 600 | 690 | -2800 | 7,66E-06 | 7,66E-06 | -1,69 |
| Профиль 2-2 | | | | | | | | |
| 22 | 988 | 1088 | 600 | 700 | -2800 | 1,69E-06 | 1,69E-06 | -0,05 |
| 23 | 1088 | 1288 | 600 | 680 | -1000 | 7,36E-07 | 7,36E-07 | 2,67 |
| 24 | 1188 | 1488 | 600 | 615 | -1000 | 1,73E-07 | 1,73E-07 | 1,55 |
| 25 | 1288 | 1688 | 600 | 601 | -1500 | 1,94E-08 | 1,94E-08 | 0,81 |
| 26 | 1388 | 1888 | 600 | 610 | 2800 | -3,95492E-07 | -3,96E-07 | -0,43 |
| 27 | 1488 | 2088 | 600 | 620 | 2800 | -8,47895E-07 | -8,48E-07 | -1,18 |
| 28 | 1588 | 2288 | 600 | 618 | 2800 | -6,88523E-07 | -6,89E-07 | -0,58 |
| 29 | 1688 | 2488 | 600 | 620 | 2800 | -8,51538E-07 | -8,52E-07 | -1,25 |
| 30 | 1788 | 2688 | 600 | 615 | 2800 | -5,89587E-07 | -5,90E-07 | 0,01 |

Продолжение таблицы В.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--|------|------|-----|-----|-------|--------------|-----------|-------|
| 31 | 1888 | 2888 | 600 | 615 | 2600 | -5,14792E-07 | -5,15E-07 | -1,08 |
| 32 | 1988 | 3088 | 600 | 615 | 2400 | -4,49208E-07 | -4,49E-07 | -0,71 |
| 33 | 2088 | 3288 | 600 | 605 | -1200 | 8,29E-08 | 8,30E-08 | 1,75 |
| 34 | 2188 | 3488 | 600 | 690 | -1200 | 1,47249E-06 | 1,47E-06 | 1,05 |
| Профиль 3-3 | | | | | | | | |
| 37 | 893 | 993 | 600 | 610 | -2500 | 1,48E-07 | 1,48E-07 | 0,45 |
| 38 | 993 | 1193 | 600 | 610 | 2800 | -2,89752E-07 | -2,90E-07 | -0,38 |
| 39 | 1093 | 1393 | 600 | 602 | 1100 | -2,59069E-08 | -2,59E-08 | 0,16 |
| 40 | 1193 | 1593 | 600 | 609 | 1200 | -1,53015E-07 | -1,53E-07 | 0,51 |
| 41 | 1293 | 1793 | 600 | 625 | -2800 | 1,08E-06 | 1,08E-06 | 0,20 |
| 42 | 1393 | 1993 | 600 | 645 | -2800 | 2,16E-06 | 2,16E-06 | 0,82 |
| 44 | 1493 | 2193 | 600 | 710 | -2800 | 5,38E-06 | 5,38E-06 | 0,09 |
| 45 | 1593 | 2393 | 600 | 760 | -2800 | 7,85E-06 | 7,85E-06 | -1,06 |
| Среднее время расчёта, с ($T=1000^\circ$, скорость охлаждения = 0.001) | | | | | | | 2 | |

Таблица В.3 – Производные гравитационного потенциала для набора вертикальных уступов, рассчитанные с помощью метода имитации отжига

| № грав. пун. | h_1 | h_2 | σ , кг/м ³ | x , м | Изм. данные | Рассч. данные | Отн. погр., % |
|--------------|-------|-------|------------------------------|---------|-------------|---------------|---------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Профиль 1-1 | | | | | | | |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 910 | 913 | -900 | 100 | -6,130E-07 | -6,130E-07 | -0,01 |
| 6 | 910 | 913,5 | -1300 | 200 | -1,025E-06 | -1,025E-06 | -0,06 |
| 7 | 550 | 553 | -1200 | 300 | -9,803E-07 | -9,803E-07 | 0,18 |
| 9 | 600 | 603 | -1100 | 400 | -9,218E-07 | -9,218E-07 | 0,08 |
| 11 | 600 | 601 | 1000 | 500 | 2,776E-07 | 2,776E-07 | 0,12 |
| 13 | 600 | 602,5 | 1100 | 600 | 9,201E-07 | 9,201E-07 | 0,05 |
| 15 | 600 | 603 | 2300 | 700 | 2,189E-06 | 2,189E-06 | -0,20 |
| 16 | 600 | 603,5 | 2100 | 800 | 2,463E-06 | 2,463E-06 | -0,14 |
| 17 | 550 | 554,5 | 2200 | 900 | 3,443E-06 | 3,443E-06 | -0,03 |
| 18 | 550 | 555,5 | 2200 | 1000 | 4,319E-06 | 4,319E-06 | -0,01 |
| 19 | 550 | 558 | 2300 | 1100 | 6,571E-06 | 6,571E-06 | -0,22 |
| 20 | 550 | 558,5 | 2200 | 1200 | 6,869E-06 | 6,869E-06 | 0,07 |
| 21 | 550 | 559 | 2300 | 1300 | 7,656E-06 | 7,656E-06 | 0,03 |
| Профиль 2-2 | | | | | | | |
| 22 | 600 | 602 | 2450 | 988 | 1,69E-06 | 1,69E-06 | -0,05 |
| 23 | 600 | 601 | 2100 | 1088 | 7,36E-07 | 7,36E-07 | -0,12 |

Продолжение таблицы В.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|-----|-------|-------|------|--------------|-----------|-------|
| 24 | 600 | 600,5 | 1000 | 1188 | 1,73E-07 | 1,73E-07 | 0,32 |
| 25 | 600 | 600,5 | 100 | 1288 | 1,94E-08 | 1,94E-08 | -0,67 |
| 26 | 600 | 601 | -1100 | 1388 | -3,95E-07 | -3,95E-07 | -0,02 |
| 27 | 650 | 652 | -1200 | 1488 | -8,48E-07 | -8,48E-07 | 0,09 |
| 28 | 650 | 651,5 | -1300 | 1588 | -6,89E-07 | -6,88E-07 | 0,43 |
| 29 | 650 | 652 | -1200 | 1688 | -8,52E-07 | -8,52E-07 | 0,23 |
| 30 | 650 | 651,5 | -1100 | 1788 | -5,90E-07 | -5,90E-07 | -0,25 |
| 31 | 600 | 601 | -1400 | 1888 | -5,15E-07 | -5,15E-07 | -0,29 |
| 32 | 600 | 601 | -1200 | 1988 | -4,49E-07 | -4,49E-07 | 0,08 |
| 33 | 602 | 602,5 | 450 | 2088 | 8,29E-08 | 8,29E-08 | 0,10 |
| 34 | 600 | 601,5 | 2600 | 2188 | 1,47E-06 | 1,47E-06 | 0,10 |
| Профиль 3-3 | | | | | | | |
| 37 | 640 | 640,5 | 880 | 893 | 1,48E-07 | 1,48E-07 | -0,03 |
| 38 | 640 | 640,5 | -1700 | 993 | -2,89752E-07 | -2,90E-07 | 1,26 |
| 39 | 640 | 640,5 | -150 | 1093 | -2,59069E-08 | -2,59E-08 | 0,00 |
| 40 | 640 | 640,5 | -890 | 1193 | -1,53015E-07 | -1,53E-07 | 0,36 |
| 41 | 610 | 612 | 1550 | 1293 | 1,08E-06 | 1,08E-06 | 0,02 |
| 42 | 610 | 614 | 1500 | 1393 | 2,16E-06 | 2,16E-06 | 0,04 |
| 44 | 610 | 620 | 1500 | 1493 | 5,38E-06 | 5,38E-06 | 0,04 |
| 45 | 610 | 619 | 2500 | 1593 | 7,85E-06 | 7,85E-06 | -0,53 |
| Среднее время расчёта, с (T=100°, скорость охлаждения = 0.0001) | | | | | | 17 | |

Таблица В.4 – Производные гравитационного потенциала для набора сферических тел, рассчитанные с помощью генетического алгоритма

| № грав. пун. | Радиус R, м | Глубина h, м | σ , кг/м ³ | Центр x, м | Изм. данные | Расщ. данные | Отн. погр., % |
|--------------|-------------|--------------|------------------------------|------------|-------------|--------------|---------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Профиль 1-1 | | | | | | | |
| 2 | 100 | 900 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 100 | 900 | -1800 | 100 | -6,130E-07 | 0,000E+00 | - |
| 6 | 100 | 800 | -2600 | 200 | -1,025E-06 | -6,130E-07 | -0,25 |
| 7 | 100 | 800 | -2600 | 300 | -9,803E-07 | -1,025E-06 | 0,00 |
| 9 | 105 | 800 | -2600 | 400 | -9,218E-07 | -9,803E-07 | 0,00 |
| 11 | 105 | 900 | 1000 | 500 | 2,776E-07 | -9,218E-07 | 0,00 |
| 13 | 120 | 900 | 2600 | 600 | 9,201E-07 | 2,776E-07 | 0,00 |
| 15 | 180 | 900 | 2200 | 700 | 2,189E-06 | 9,201E-07 | 0,00 |
| 16 | 190 | 900 | 2600 | 800 | 2,463E-06 | 2,189E-06 | 0,00 |
| 17 | 220 | 900 | 2600 | 900 | 3,443E-06 | 2,463E-06 | 0,00 |

Продолжение таблицы В.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--|-----|------|-------|------|--------------|-----------|-------|
| 18 | 250 | 900 | 2600 | 1000 | 4,319E-06 | 3,443E-06 | 0,00 |
| 19 | 300 | 900 | 2800 | 1100 | 6,571E-06 | 4,319E-06 | 0,00 |
| 20 | 320 | 900 | 2800 | 1200 | 6,869E-06 | 6,571E-06 | 0,00 |
| 21 | 350 | 900 | 2800 | 1300 | 7,656E-06 | 6,869E-06 | 0,00 |
| Профиль 2-2 | | | | | | | |
| 22 | 180 | 700 | 2800 | 988 | 1,69E-06 | 1,69E-06 | 0,00 |
| 23 | 180 | 700 | 1300 | 1088 | 7,36E-07 | 7,36E-07 | 0,00 |
| 24 | 120 | 730 | 1300 | 1188 | 1,73E-07 | 1,73E-07 | 0,00 |
| 25 | 60 | 800 | 1300 | 1288 | 1,94E-08 | 1,94E-08 | 0,00 |
| 26 | 170 | 830 | -1500 | 1388 | -3,95E-07 | -3,95E-07 | 0,00 |
| 27 | 180 | 1000 | -2800 | 1488 | -8,48E-07 | -8,48E-07 | 0,00 |
| 28 | 180 | 1070 | -2800 | 1588 | -6,89E-07 | -6,89E-07 | 0,08% |
| 29 | 200 | 1070 | -2800 | 1688 | -8,52E-07 | -8,52E-07 | 0,00 |
| 30 | 200 | 1070 | -2300 | 1788 | -5,90E-07 | -5,90E-07 | 0,00 |
| 31 | 200 | 1000 | -2300 | 1888 | -5,15E-07 | -5,15E-07 | 0,00 |
| 32 | 200 | 900 | -2300 | 1988 | -4,49E-07 | -4,49E-07 | -0,01 |
| 33 | 150 | 900 | 1200 | 2088 | 8,29E-08 | 8,29E-08 | -0,01 |
| 34 | 300 | 900 | 2800 | 2188 | 1,47E-06 | 1,47E-06 | -0,03 |
| Профиль 1-1 | | | | | | | |
| 37 | 100 | 800 | 1150 | 893 | 1,48E-07 | 1,48E-07 | 0,00 |
| 38 | 100 | 900 | -2800 | 993 | -2,89752E-07 | -2,90E-07 | 0,00 |
| 39 | 70 | 1100 | -1000 | 1093 | -2,59069E-08 | -2,59E-08 | -0,03 |
| 40 | 100 | 800 | -2000 | 1193 | -1,53015E-07 | -1,53E-07 | 0,00 |
| 41 | 190 | 800 | 2500 | 1293 | 1,08E-06 | 1,08E-06 | -0,05 |
| 42 | 240 | 800 | 2800 | 1393 | 2,16E-06 | 2,16E-06 | -0,01 |
| 44 | 345 | 800 | 2800 | 1493 | 5,38E-06 | 5,38E-06 | 0,00 |
| 45 | 400 | 900 | 2800 | 1593 | 7,85E-06 | 7,85E-06 | 0,00 |
| Среднее время расчёта, с (T=1000°, скорость охлаждения = 0.0001) | | | | | | 6 | |

Таблица В.5 – Производные гравитационного потенциала для набора горизонтальных призм, рассчитанные с помощью генетического алгоритма

| № грав. пун. | ξ_1 | ξ_2 | ζ_1 | ζ_2 | σ | Измер. данные | Рассч. данные | Отн. погр., % |
|--------------|---------|---------|-----------|-----------|----------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Профиль 1-1 | | | | | | | | |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| 4 | 100 | 200 | 600 | 630 | 1000 | -6,13031E-07 | -6,13E-07 | 1,04 |
| 6 | 200 | 400 | 600 | 630 | 1000 | -1,02548E-06 | -1,03E-06 | -6,91 |

Продолжение таблицы В.5

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|------|------|-----|-----|-------|--------------|-----------|-------|
| 7 | 300 | 600 | 600 | 620 | 1200 | -9,80325E-07 | -9,80E-07 | 0,16 |
| 9 | 400 | 800 | 600 | 620 | 1100 | -9,21848E-07 | -9,22E-07 | -0,66 |
| 11 | 500 | 1000 | 600 | 608 | -800 | 2,7759E-07 | 2,78E-07 | 3,49 |
| 13 | 600 | 1200 | 600 | 608 | -2800 | 9,20123E-07 | 9,20E-07 | 0,14 |
| 15 | 700 | 1400 | 600 | 625 | -2000 | 2,18924E-06 | 2,19E-06 | -1,36 |
| 16 | 800 | 1600 | 600 | 625 | -2700 | 2,46279E-06 | 2,46E-06 | 0,38 |
| 17 | 900 | 1800 | 600 | 635 | -2800 | 3,44E-06 | 3,45E-06 | 10,64 |
| 18 | 1000 | 2000 | 600 | 645 | -2800 | 4,32E-06 | 4,32E-06 | -0,41 |
| 19 | 1100 | 2200 | 600 | 670 | -2800 | 6,57E-06 | 6,57E-06 | -0,46 |
| 20 | 1200 | 2400 | 600 | 675 | -2800 | 6,87E-06 | 6,87E-06 | -0,80 |
| 21 | 1300 | 2600 | 600 | 690 | -2800 | 7,66E-06 | 7,66E-06 | 1,01 |
| Профиль 2-2 | | | | | | | | |
| 22 | 988 | 1088 | 600 | 700 | -2800 | 1,69E-06 | 1,69E-06 | -8,61 |
| 23 | 1088 | 1288 | 600 | 680 | -1000 | 7,36E-07 | 7,36E-07 | 2,25 |
| 24 | 1188 | 1488 | 600 | 615 | -1000 | 1,73E-07 | 1,73E-07 | -0,67 |
| 25 | 1288 | 1688 | 600 | 601 | -1500 | 1,94E-08 | 1,94E-08 | -4,23 |
| 26 | 1388 | 1888 | 600 | 610 | 2800 | -3,95492E-07 | -3,96E-07 | -4,30 |
| 27 | 1488 | 2088 | 600 | 620 | 2800 | -8,47895E-07 | -8,48E-07 | 1,93 |
| 28 | 1588 | 2288 | 600 | 618 | 2800 | -6,88523E-07 | -6,89E-07 | -3,43 |
| 29 | 1688 | 2488 | 600 | 620 | 2800 | -8,51538E-07 | -8,51E-07 | 1,40 |
| 30 | 1788 | 2688 | 600 | 615 | 2800 | -5,89587E-07 | -5,90E-07 | -2,97 |
| 31 | 1888 | 2888 | 600 | 615 | 2600 | -5,14792E-07 | -5,15E-07 | -2,88 |
| 32 | 1988 | 3088 | 600 | 615 | 2400 | -4,49208E-07 | -4,49E-07 | -0,91 |
| 33 | 2088 | 3288 | 600 | 605 | -1200 | 8,29E-08 | 8,29E-08 | -3,83 |
| 34 | 2188 | 3488 | 600 | 690 | -1200 | 1,47249E-06 | 1,47E-06 | -5,25 |
| Профиль 3-3 | | | | | | | | |
| 37 | 893 | 993 | 600 | 610 | -2500 | 1,48E-07 | 1,48E-07 | 1,27 |
| 38 | 993 | 1193 | 600 | 610 | 2800 | -2,89752E-07 | -2,90E-07 | 2,47 |
| 39 | 1093 | 1393 | 600 | 602 | 1100 | -2,59069E-08 | -2,59E-08 | -0,55 |
| 40 | 1193 | 1593 | 600 | 609 | 1200 | -1,53015E-07 | -1,53E-07 | -6,05 |
| 41 | 1293 | 1793 | 600 | 625 | -2800 | 1,08E-06 | 1,08E-06 | -0,22 |
| 42 | 1393 | 1993 | 600 | 645 | -2800 | 2,16E-06 | 2,16E-06 | -2,16 |
| 44 | 1493 | 2193 | 600 | 710 | -2800 | 5,38E-06 | 5,38E-06 | -2,47 |
| 45 | 1593 | 2393 | 600 | 760 | -2800 | 7,85E-06 | 7,85E-06 | 3,04 |
| Среднее время расчёта, с (T=1000°, скорость охлаждения = 0.001) | | | | | | | 2 | |

Таблица В.6 – Производные гравитационного потенциала для набора вертикальных уступов, рассчитанные с помощью генетического алгоритма

| № грав. пун. | h_1 | h_2 | σ , кг/м ³ | x , м | Изм. данные | Расщ. данные | Отн. погр., % |
|--------------|-------|-------|------------------------------|---------|--------------|--------------|---------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Профиль 1-1 | | | | | | | |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | #ДЕЛ/0! |
| 4 | 910 | 913 | -900 | 100 | -6,130E-07 | -6,130E-07 | 0,13 |
| 6 | 910 | 913,5 | -1300 | 200 | -1,025E-06 | -1,025E-06 | 0,03 |
| 7 | 550 | 553 | -1200 | 300 | -9,803E-07 | -9,803E-07 | 0,64 |
| 9 | 600 | 603 | -1100 | 400 | -9,218E-07 | -9,218E-07 | 0,06 |
| 11 | 600 | 601 | 1000 | 500 | 2,776E-07 | 2,776E-07 | -0,04 |
| 13 | 600 | 602,5 | 1100 | 600 | 9,201E-07 | 9,201E-07 | -0,25 |
| 15 | 600 | 603 | 2300 | 700 | 2,189E-06 | 2,189E-06 | -0,26 |
| 16 | 600 | 603,5 | 2100 | 800 | 2,463E-06 | 2,463E-06 | -0,41 |
| 17 | 550 | 554,5 | 2200 | 900 | 3,443E-06 | 3,443E-06 | -0,07 |
| 18 | 550 | 555,5 | 2200 | 1000 | 4,319E-06 | 4,318E-06 | 0,44 |
| 19 | 550 | 558 | 2300 | 1100 | 6,571E-06 | 6,571E-06 | -0,14 |
| 20 | 550 | 558,5 | 2200 | 1200 | 6,869E-06 | 6,869E-06 | 0,11 |
| 21 | 550 | 559 | 2300 | 1300 | 7,656E-06 | 7,656E-06 | 0,29 |
| Профиль 2-2 | | | | | | | |
| 22 | 600 | 602 | 2450 | 988 | 1,69E-06 | 1,69E-06 | -0,48 |
| 23 | 600 | 601 | 2100 | 1088 | 7,36E-07 | 7,36E-07 | 0,09 |
| 24 | 600 | 600,5 | 1000 | 1188 | 1,73E-07 | 1,73E-07 | -0,06 |
| 25 | 600 | 600,5 | 100 | 1288 | 1,94E-08 | 1,94E-08 | 0,06 |
| 26 | 600 | 601 | -1100 | 1388 | -3,95E-07 | -3,95E-07 | 0,04 |
| 27 | 650 | 652 | -1200 | 1488 | -8,48E-07 | -8,48E-07 | -0,41 |
| 28 | 650 | 651,5 | -1300 | 1588 | -6,89E-07 | -6,89E-07 | 0,27 |
| 29 | 650 | 652 | -1200 | 1688 | -8,52E-07 | -8,52E-07 | 0,04 |
| 30 | 650 | 651,5 | -1100 | 1788 | -5,90E-07 | -5,90E-07 | 0,23 |
| 31 | 600 | 601 | -1400 | 1888 | -5,15E-07 | -5,15E-07 | -0,16 |
| 32 | 600 | 601 | -1200 | 1988 | -4,49E-07 | -4,49E-07 | 0,18 |
| 33 | 602 | 602,5 | 450 | 2088 | 8,29E-08 | 8,29E-08 | 0,01 |
| 34 | 600 | 601,5 | 2600 | 2188 | 1,47E-06 | 1,47E-06 | 0,08 |
| Профиль 3-3 | | | | | | | |
| 37 | 640 | 640,5 | 880 | 893 | 1,48E-07 | 1,48E-07 | 0,32 |
| 38 | 640 | 640,5 | -1700 | 993 | -2,89752E-07 | -2,90E-07 | -0,15 |
| 39 | 640 | 640,5 | -150 | 1093 | -2,59069E-08 | -2,59E-08 | 0,03 |
| 40 | 640 | 640,5 | -890 | 1193 | -1,53015E-07 | -1,53E-07 | 0,12 |
| 41 | 610 | 612 | 1550 | 1293 | 1,08E-06 | 1,08E-06 | -0,16 |
| 42 | 610 | 614 | 1500 | 1393 | 2,16E-06 | 2,16E-06 | 0,03 |
| 44 | 610 | 620 | 1500 | 1493 | 5,38E-06 | 5,38E-06 | 0,02 |

Продолжение таблицы В.6

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|-----|-----|------|------|----------|----------|-------|
| 45 | 610 | 619 | 2500 | 1593 | 7,85E-06 | 7,85E-06 | -1,50 |
| Среднее время расчёта, с (T=100°, скорость охлаждения = 0.0001) | | | | | | 17 | |

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Проектирование и программная реализация модуля по отображению данных постобработки

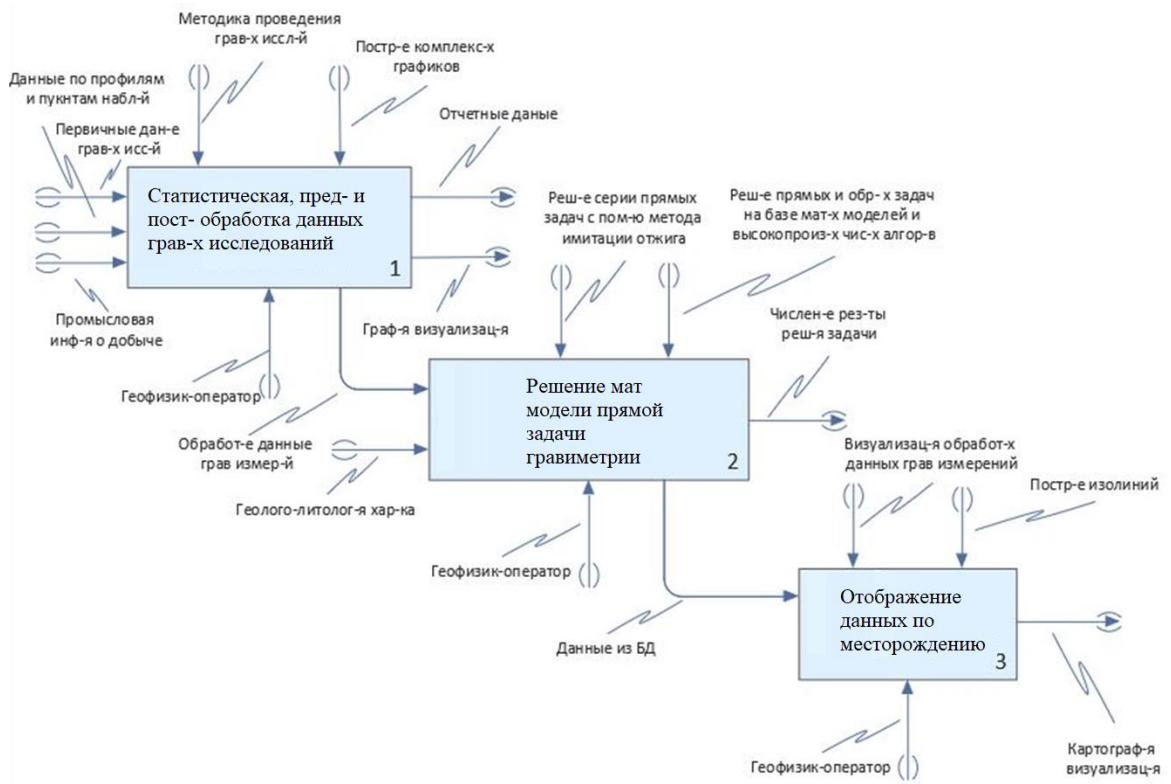


Рисунок Г.1 – Первый уровень декомпозиции контекстной диаграммы

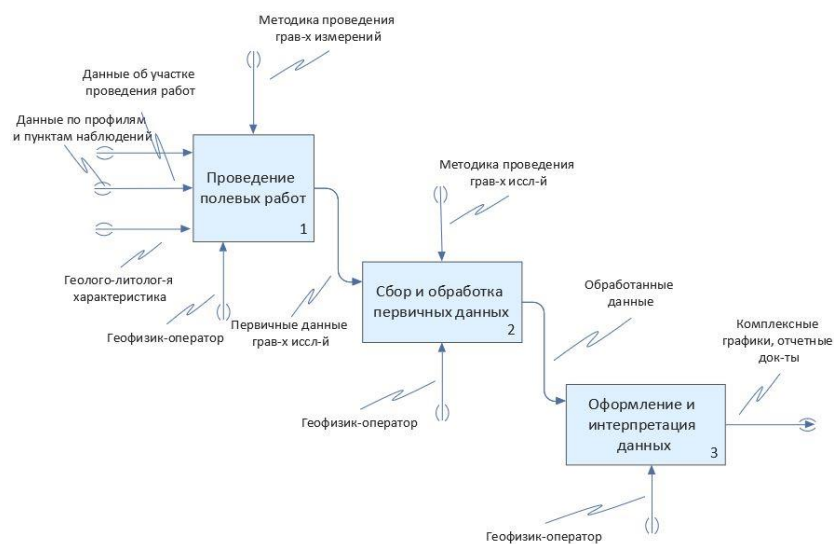


Рисунок Г.2 – Второй уровень декомпозиции контекстной диаграммы для процесса «Статистическая, пред- и пост-обработка данных гравиметрических исследований»

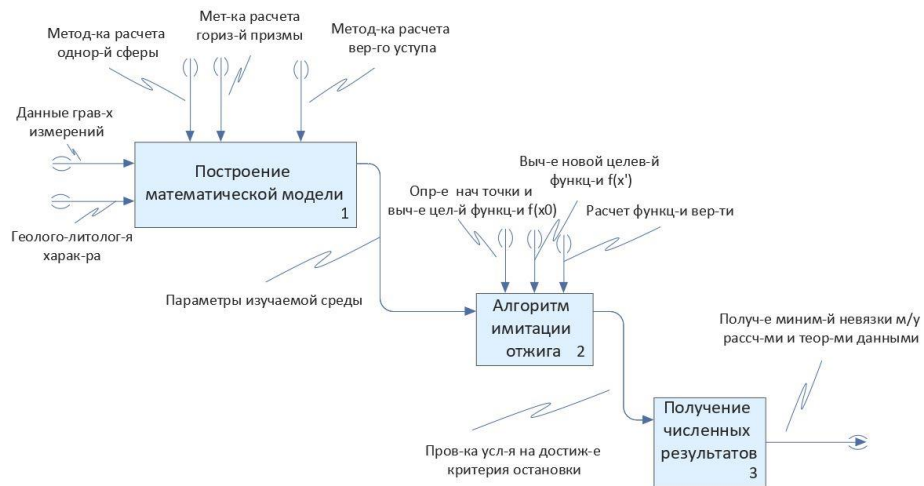


Рисунок Г.3 – Второй уровень декомпозиции контекстной диаграммы для процесса «Численное решение математических моделей прямой и обратной задач гравиметрии»

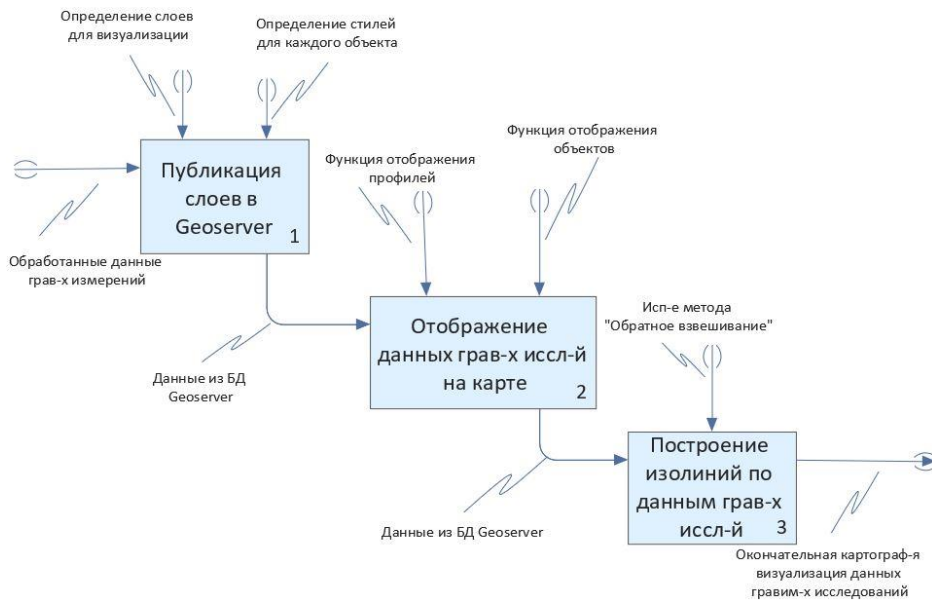


Рисунок Г.4 – Второй уровень декомпозиции контекстной диаграммы для процесса «Отображение данных по месторождению»

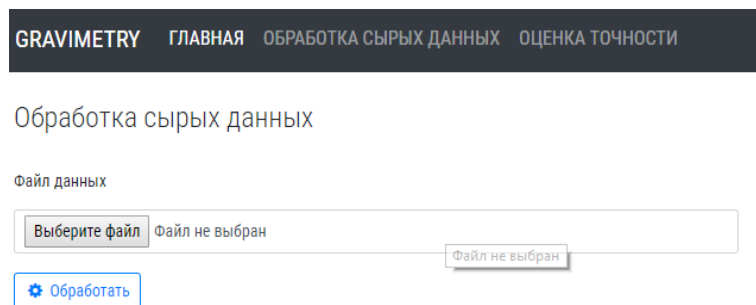


Рисунок Г.5 – Загрузка первичных данных в систему

Выборка данных на 01.05.2013 - Месторождение: , Гравиметр: 40680

[← Назад](#)

[Экспорт](#)

| STATION | GRAV | SD | TEMP | TIDE | TIME |
|---------|----------|-------|--------|--------|---------------------|
| 1000 | 1851.874 | 0.089 | -0.590 | -0.065 | 01.05.2013 08:08:35 |
| 1000 | 1851.877 | 0.031 | -0.570 | -0.065 | 01.05.2013 08:10:32 |
| 1000 | 1851.879 | 0.035 | -0.560 | -0.065 | 01.05.2013 08:11:21 |
| 1000 | 1851.878 | 0.047 | -0.560 | -0.065 | 01.05.2013 08:12:50 |
| 2 | 1852.559 | 0.019 | -0.440 | -0.065 | 01.05.2013 08:26:25 |
| 2 | 1852.559 | 0.019 | -0.440 | -0.065 | 01.05.2013 08:26:25 |
| 2 | 1852.559 | 0.019 | -0.440 | -0.065 | 01.05.2013 08:26:25 |
| 2 | 1852.559 | 0.019 | -0.440 | -0.065 | 01.05.2013 08:26:25 |
| 2 | 1852.558 | 0.017 | -0.430 | -0.065 | 01.05.2013 08:28:43 |
| 2 | 1852.558 | 0.017 | -0.430 | -0.065 | 01.05.2013 08:28:43 |

Рисунок Г.6 – Отбраковка несоответствующих строк

GRAVIMETRY [ГЛАВНАЯ](#) [ОБРАБОТКА СЫРЫХ ДАННЫХ](#) [ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ](#)

Оценка точности измерений

Год

Выберите год

[Выполнить](#)

Рисунок Г.7 – Форма произведений оценки точности измерений

[Экспорт](#)

| STATION | GRAV | SD | TEMP | TIDE | TIME | ΔGRAV |
|---------|----------|-------|--------|--------|-------|--------|
| 1000 | 1851.877 | 0.051 | -0.570 | -0.065 | 0.341 | -0.681 |
| 2 | 1852.559 | 0.019 | -0.438 | -0.065 | 0.352 | 0.000 |
| 2 | 1852.560 | 0.021 | -0.505 | -0.065 | 0.357 | 0.000 |
| 30 | 1851.959 | 0.015 | -0.508 | -0.066 | 0.371 | -0.602 |
| 33 | 1852.651 | 0.014 | -0.498 | -0.066 | 0.380 | 0.089 |
| 40 | 1852.404 | 0.017 | -0.478 | -0.065 | 0.389 | -0.158 |
| 41 | 1853.642 | 0.012 | -0.500 | -0.065 | 0.396 | 1.079 |
| 42 | 1854.727 | 0.019 | -0.513 | -0.065 | 0.402 | 2.163 |
| 16 | 1855.031 | 0.016 | -0.508 | -0.064 | 0.409 | 2.466 |
| 2 | 1852.566 | 0.022 | -0.463 | -0.063 | 0.423 | 0.000 |

Рисунок Г.8 – Расчет приращений гравитационного поля (dG)

Сумма трассы за период с 23.04 до 01.05.2013

| Пит | Дата | Измеренные значения | | | | Дата | Итого | Средн | Расчетные значения | | | | Итого | Средн |
|-----|---------|---------------------|------|---------|------|------|-------|-------|--------------------|------|------|------|-------|-------|
| | | 4040 | 4027 | 4040 | 4027 | | | | 4040 | 4027 | 4040 | 4027 | | |
| 4 | 2013-05 | 4879 | 4879 | 2013-05 | 4879 | 4879 | 4879 | 4879 | 4879 | 4879 | 4879 | 4879 | 4879 | 4879 |
| 5 | 2013-05 | 4280 | 4280 | 2013-05 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 |
| 7 | 2013-05 | 4279 | 4279 | 2013-05 | 4279 | 4279 | 4279 | 4279 | 4279 | 4279 | 4279 | 4279 | 4279 | 4279 |
| 9 | 2013-05 | 4300 | 4300 | 2013-05 | 4300 | 4300 | 4300 | 4300 | 4300 | 4300 | 4300 | 4300 | 4300 | 4300 |
| 11 | 2013-05 | 4220 | 4220 | 2013-05 | 4220 | 4220 | 4220 | 4220 | 4220 | 4220 | 4220 | 4220 | 4220 | 4220 |
| 13 | 2013-05 | 4313 | 4313 | 2013-05 | 4313 | 4313 | 4313 | 4313 | 4313 | 4313 | 4313 | 4313 | 4313 | 4313 |
| 15 | 2013-05 | 4240 | 4240 | 2013-05 | 4240 | 4240 | 4240 | 4240 | 4240 | 4240 | 4240 | 4240 | 4240 | 4240 |
| 16 | 2013-05 | 4248 | 4248 | 2013-05 | 4248 | 4248 | 4248 | 4248 | 4248 | 4248 | 4248 | 4248 | 4248 | 4248 |
| 17 | 2013-05 | 4247 | 4247 | 2013-05 | 4247 | 4247 | 4247 | 4247 | 4247 | 4247 | 4247 | 4247 | 4247 | 4247 |
| 18 | 2013-05 | 4280 | 4280 | 2013-05 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 | 4280 |
| 19 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 20 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 21 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 22 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 23 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 24 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 25 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 26 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 27 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 28 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 29 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 30 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 31 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 32 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 33 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 34 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 35 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 36 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 37 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 38 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 39 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 40 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 41 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 42 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 43 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 44 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |
| 45 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 2013-05 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 | 4260 |

Рисунок Г.9 – Вычисление суммы квадратов отклонений методом наименьших квадратов

Профиль 1-1

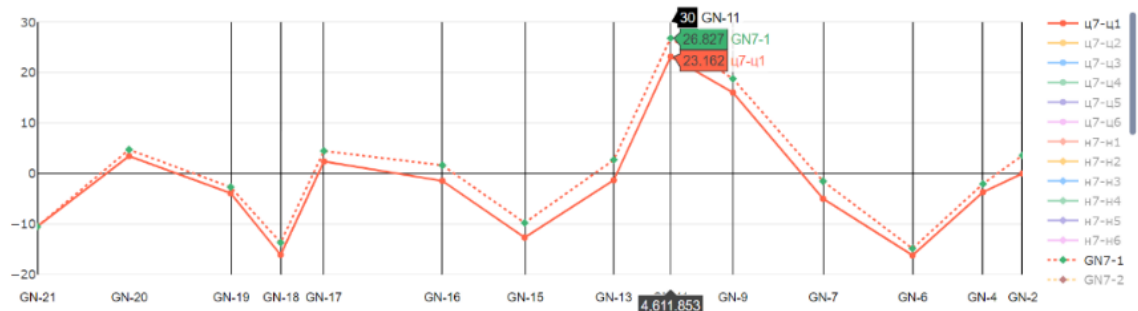


Рисунок Г.10 – Графики вариаций силы тяжести с введенной поправкой за рельеф местности по профилю 1-1 за цикл 7 и 1

Профиль 1-1

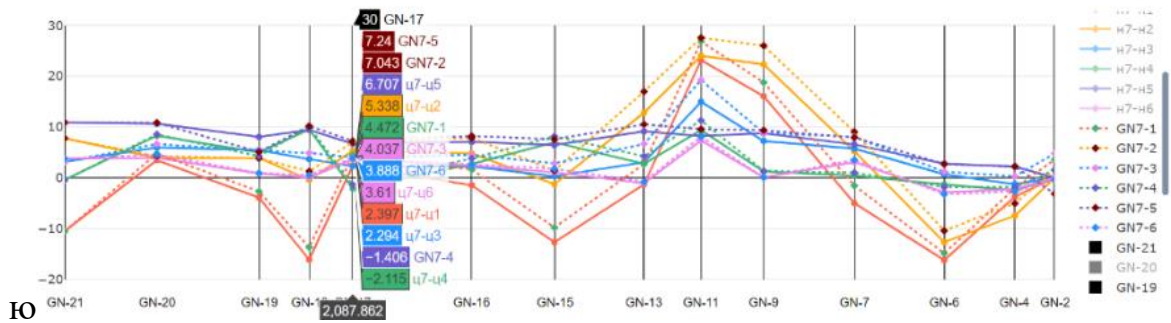


Рисунок Г.11 – Графики вариаций силы тяжести с введенной поправкой за рельеф по профилю 1-1 по всем циклам наблюдений

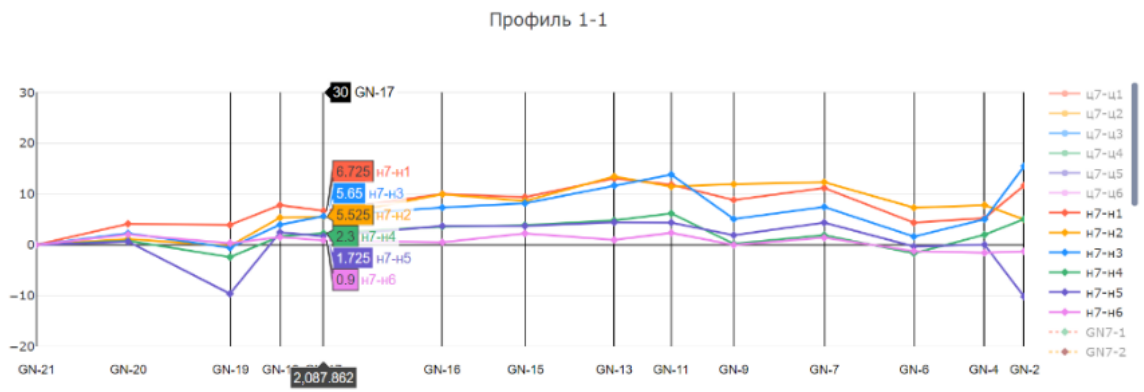


Рисунок Г.12 – Графики вертикальных движений земной поверхности вдоль профиля 1-1 по нивелирным пунктам

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Листинг основных модулей информационной системы

```
// Парсинг сырых данных
public async Task ParseAsync(string input)
{
    string[] content = input?.Split("\r\n",
StringSplitOptions.RemoveEmptyEntries);
    if (content == null || !content.Any())
        throw new Exception("Данные отсутствуют");
    #-----
    // Извлекаем название месторождения
    var surveyName = content.FirstOrDefault(e => e.Contains("Survey
name:"))?.Split('\t')[2];
    if (string.IsNullOrEmpty(surveyName))
        throw new Exception("Не удалось получить название
месторождения");
    #-----
    // Извлекаем номер гравиметра
    var gravimeterRaw = content.FirstOrDefault(e => e.Contains("Instrument
S/N:"));
    var gravimeter = ExtractValue<int>(gravimeterRaw?.Split('\t')[2]);
    if (!gravimeter.HasValue)
        throw new Exception("Не удалось получить номер гравиметра");
    #-----
    // Извлекаем дату измерений
    var createDateRaw = content.FirstOrDefault(e => e.Contains("Date:"));
    var createDate = ExtractValue<DateTime>(createDateRaw?.Split('\t')[2]);
    if (!createDate.HasValue)
        throw new Exception("Не удалось получить дату измерений");
    var surveyEntity = await db.Surveys.FirstOrDefaultAsync(e => e.Name ==
surveyName);
    if (surveyEntity == null)
    {
        surveyEntity = new Survey { Name = surveyName };
        db.Surveys.Add(surveyEntity);
        await db.SaveChangesAsync();
    }
    var gravimeterEntity = await db.Gravimeters.FirstOrDefaultAsync(e =>
e.Name == gravimeter.ToString());
    if (gravimeterEntity == null)
    {
        gravimeterEntity = new Gravimeter { Name = gravimeter.ToString() };
    }
}
```

```

        db.Gravimeters.Add(gravimeterEntity);
        await db.SaveChangesAsync();
    }
#-----
// Строки файла с данными
    var dataRows = content.SkipWhile(e =>
!e.Contains(DataHeader)).Skip(1)?.ToList();
    if (dataRows == null || !dataRows.Any())
        throw new Exception("Файл имеет некорректный формат");
#-----
// Парсим данные из текстовых строк с данными
    var data = ExtractData(dataRows, createDate.Value, out List<string>
errors);
    if (errors.Any())
        throw new Exception(string.Join(";", errors));
    if (!data.Any())
        throw new Exception("Не удалось извлечь данные из файла");
#-----
// Присваиваем пунктам типы
    AssignTypes(data);
#-----
// Формируем наборы данных
    var sets = GenerateSets(data);
    using (var trans = db.Database.BeginTransaction())
    {
        try
        {
            var operation = new RawOperation
            {
                SurveyId = surveyEntity.Id,
                GravimeterId = gravimeterEntity.Id,
                CreateDate = createDate.Value
            };
            db.RawOperations.Add(operation);
            await db.SaveChangesAsync();
// Отбраковываем данные в наборах
            var rejectedData = RejectSets(sets);
            var operationData = rejectedData
                .SelectMany(e => e.Item2)
                .Select(e => new RawOperationData
                {
                    RawOperationId = operation.Id,
                    Grav = e.Grav,
                    Sd = e.Sd,

```

```

        SetNumber = e.SetNumber,
        Station = e.Station,
        Temp = e.Temp,
        Tide = e.Tide,
        Time = e.Time,
        Type = e.Type
    }).ToList();
    db.RawOperationDatas.AddRange(operationData);
    await db.SaveChangesAsync();
// Рассчитываем среднее арифметическое
    var averagedData = CalculateAverage(rejectedData);
    averagedData.ForEach(e => e.RawOperationId = operation.Id);
    db.RawOperationAverageDatas.AddRange(averagedData);
    await db.SaveChangesAsync();
    trans.Commit();
}
catch
{
    trans.Rollback();
    throw;
}
}
}
#-----
//Анализ
public async Task<IActionResult> Index()
{
    var stationInfos = await db.StationInfos
        .Include(e => e.Profile)
        .ToListAsync();
    var data = await db.IncrementDatas
        .Include(e => e.RawOperation)
        .Include(e => e.RawOperation.Gravimeter)
        .ToListAsync();
    var stations = data.GroupBy(e => e.Station).ToList();
    var analysis = new List<AnalysisDataViewModel>();
    foreach(var station in stations)
    {
        var stationInfo = stationInfos.FirstOrDefault(e => e.Number ==
station.Key);
        var analysisItem = new AnalysisDataViewModel
        {
            Station = station.Key,
            Profile = stationInfo?.Profile?.Name,

```

```

        X = stationInfo?.X,
        Y = stationInfo?.Y
    };
    var cycles = station.GroupBy(e =>
e.RawOperation.CreateDate.Year);
    foreach(var cycle in cycles)
    {
        analysisItem.Cycles.Add(new CycleDataViewModel
        {
            Cycle = cycle.Key,
            AverageDeltaGrav = cycle.First().StationAverageDeltaGrav
        });
    }
    analysis.Add(analysisItem);
}
foreach(var analysisItem in analysis)
{
    if (!analysisItem.Cycles.Any() || analysisItem.Cycles.Count == 1)
        continue;
    var cycles = analysisItem.Cycles.OrderByDescending(e =>
e.Cycle).ToList();
    var startCycle = cycles.First();
    for(var i = 1; i < cycles.Count; i++)
    {
        analysisItem.Variations.Add(new VariationDataViewModel
        {
            Cycle = startCycle.Cycle,
            PreviousCycle = cycles[i].Cycle,
            Value = (startCycle.AverageDeltaGrav -
cycles[i].AverageDeltaGrav) * 1000
        });
    }
}
analysis = analysis.OrderBy(e => e.Station).ToList();
return View(analysis);
}

#-----
//Оценка точности
public async Task<List<IncrementData>> ProcessAsync(int year)
{
    var result = new List<IncrementData>();
    var settings = config.Value;
    var rawOperations = await db.RawOperations
.Include(e => e.Gravimeter)

```

```

        .Include(e => e.AverageData)
        .Where(e => e.CreateDate.Year == year).ToListAsync();
if (!rawOperations.Any())
    throw new Exception($"Нет обработок за {year} год");

List<RawOperationAverageData> allAverageData =
rawOperations.SelectMany(e => e.AverageData).ToList(),
    averageData = allAverageData
        .Where(e => !ExcludeStationTypes.Contains(e.Type)).ToList();
// Группируем по значению STATION
var stations = averageData.GroupBy(e => e.Station).OrderBy(e => e.Key);
foreach (var station in stations)
{
    var stationIncrementData = new List<IncrementData>();
    // Группируем по значению CreateDate
    var days = station.GroupBy(e =>
e.RawOperation.CreateDate.Date).OrderBy(e => e.Key);
    foreach (var day in days)
    {
        // Получаем номера гравиметров
        var gravimeters = day.Select(e =>
e.RawOperation.Gravimeter).DistinctBy(e => e.Id).OrderBy(e => e.Name);
        foreach (var gravimeter in gravimeters)
        {
            var types = day.Where(e => e.RawOperation.GravimeterId
== gravimeter.Id).Select(e => e.Type).Distinct().ToList();
            var averageDailyDeltaGrav = day.Where(e =>
e.RawOperation.GravimeterId == gravimeter.Id).Average(e => e.DeltaGrav);
            var incrementData = new IncrementData
            {
                Station = station.Key,
                AverageDeltaGrav = averageDailyDeltaGrav,
                RawOperationId = day.First(e =>
e.RawOperation.GravimeterId == gravimeter.Id).RawOperationId,
                Type = types.Count == 1 && types[0] ==
StationType.Control ? IncrementDataType.Control : IncrementDataType.None
            };
            stationIncrementData.Add(incrementData);
        }
    }
    var initialStationAverageDeltaGrav = stationIncrementData.Average(e
=> e.AverageDeltaGrav);
    stationIncrementData.Where(e => Math.Abs(e.AverageDeltaGrav) -
Math.Abs(initialStationAverageDeltaGrav) > settings.IncrementDataThreshold)

```

```

        .ToList()
        .ForEach(e => e.Type = IncrementDataType.Break);
        var stationAverageDeltaGrav = stationIncrementData.Where(e =>
e.Type != IncrementDataType.Break).Average(e => e.AverageDeltaGrav);
        stationIncrementData.ForEach(e => e.StationAverageDeltaGrav =
stationAverageDeltaGrav);
        result.AddRange(stationIncrementData);
        db.IncrementDatas.AddRange(stationIncrementData);
    }
    await db.SaveChangesAsync();
    return result;
}
#-----
// Сбор данных для графиков
var profileData = new ResultGraphViewModel { ProfileName = profile };
for (int j = 1; j <= sheet.LastRowNum; j++)
{
    var row = sheet.GetRow(j);
    if (row != null)
    {
        if (row.GetCell(0)?.NumericCellValue != null)
        {
            profileData.N.Add(row.GetCell(12)?.StringCellValue ?? "");
            profileData.s.Add(Math.Round(row.GetCell(5)?.NumericCellValue ?? 0, 3));
            profileData.cycle7_1.Add(Math.Round(row.GetCell(6)?.NumericCellValue
?? 0, 3));
            profileData.cycle7_2.Add(Math.Round(row.GetCell(7)?.NumericCellValue
?? 0, 3));
            profileData.cycle7_3.Add(Math.Round(row.GetCell(8)?.NumericCellValue
?? 0, 3));
            profileData.cycle7_4.Add(Math.Round(row.GetCell(9)?.NumericCellValue
?? 0, 3));
            profileData.cycle7_5.Add(Math.Round(row.GetCell(10)?.NumericCellValue
?? 0, 3));
            profileData.cycle7_6.Add(Math.Round(row.GetCell(11)?.NumericCellValue
?? 0, 3));
            profileData.n7_1.Add(Math.Round(row.GetCell(13)?.NumericCellValue ??
0, 3));
            profileData.n7_2.Add(Math.Round(row.GetCell(14)?.NumericCellValue ??
0, 3));
            profileData.n7_3.Add(Math.Round(row.GetCell(15)?.NumericCellValue ??
0, 3));
            profileData.n7_4.Add(Math.Round(row.GetCell(16)?.NumericCellValue ??
0, 3));

```



```

        profileData.n7_5.Add(Math.Round(row.GetCell(17)?.NumericCellValue ??
0, 3));
        profileData.n7_6.Add(Math.Round(row.GetCell(18)?.NumericCellValue ??
0, 3));
        profileData.GN7_1.Add(Math.Round(row.GetCell(19)?.NumericCellValue ??
0, 3));
        profileData.GN7_2.Add(Math.Round(row.GetCell(20)?.NumericCellValue ??
0, 3));
        profileData.GN7_3.Add(Math.Round(row.GetCell(21)?.NumericCellValue ??
0, 3));
        profileData.GN7_4.Add(Math.Round(row.GetCell(22)?.NumericCellValue ??
0, 3));
        profileData.GN7_5.Add(Math.Round(row.GetCell(23)?.NumericCellValue ??
0, 3));
        profileData.GN7_6.Add(Math.Round(row.GetCell(24)?.NumericCellValue ??
0, 3));
    }
}
}
profiles.Add(profileData);
#-----
// Построение графика
function drawChart(profile) {
    var traces = [];
    var steps = profile.n.length;
    // Циклы
    var c71 = {
        x: profile.s,
        y: profile.cycle7_1,
        mode: 'lines+markers',
        name: 'ц7-ц1'
    };
    var c72 = {
        x: profile.s,
        y: profile.cycle7_2,
        mode: 'lines+markers',
        name: 'ц7-ц2'
    };
    var c73 = {
        x: profile.s,
        y: profile.cycle7_3,
        mode: 'lines+markers',
        name: 'ц7-ц3'
    };
};

```

```

var c74 = {
  x: profile.s,
  y: profile.cycle7_4,
  mode: 'lines+markers',
  name: 'ц7-ц4'
};
var c75 = {
  x: profile.s,
  y: profile.cycle7_5,
  mode: 'lines+markers',
  name: 'ц7-ц5'
};
var c76 = {
  x: profile.s,
  y: profile.cycle7_6,
  mode: 'lines+markers',
  name: 'ц7-ц6'
};
// N
var n71 = {
  x: profile.s,
  y: profile.n7_1,
  mode: 'lines+markers',
  name: 'н7-н1',
  line: {
    dash: 'dot'
  }
};
var n72 = {
  x: profile.s,
  y: profile.n7_2,
  mode: 'lines+markers',
  name: 'н7-н2',
  line: {
    dash: 'dot'
  }
};
var n73 = {
  x: profile.s,
  y: profile.n7_3,
  mode: 'lines+markers',
  name: 'н7-н3',
  line: {
    dash: 'dot'
  }
};
var n74 = {

```

```

    x: profile.s,
    y: profile.n7_4,
    mode: 'lines+markers',
    name: 'H7-H4',
    line: {
        dash: 'dot'
    }
  });
var n75 = {
  x: profile.s,
  y: profile.n7_5,
  mode: 'lines+markers',
  name: 'H7-H5',
  line: {
    dash: 'dot'
  }
};
var n76 = {
  x: profile.s,
  y: profile.n7_6,
  mode: 'lines+markers',
  name: 'H7-H6',
  line: {
    dash: 'dashdot'
  }
};
// GN
var gn71 = {
  x: profile.s,
  y: profile.gN7_1,
  mode: 'lines+markers',
  name: 'GN7-1',
  line: {
    dash: 'dashdot'
  }
};
var gn72 = {
  x: profile.s,
  y: profile.gN7_2,
  mode: 'lines+markers',
  name: 'GN7-2',
  line: {
    dash: 'dashdot'
  }
};
var gn73 = {
  x: profile.s,
  y: profile.gN7_3,
  mode: 'lines+markers',
  name: 'GN7-3',

```

```

    line: {
        dash: 'dashdot'
    }
    });
var gn74 = {
    x: profile.s,
    y: profile.gN7_4,
    mode: 'lines+markers',
    name: 'GN7-4',
    line: {
        dash: 'dashdot'
    }
    });
var gn75 = {
    x: profile.s,
    y: profile.gN7_5,
    mode: 'lines+markers',
    name: 'GN7-5',
    line: {
        dash: 'dashdot'
    }
    });
var gn76 = {
    x: profile.s,
    y: profile.gN7_6,
    mode: 'lines+markers',
    name: 'GN7-6',
    line: {
        dash: 'dashdot'
    }
    });
traces.push(c71, c72, c73, c74, c75, c76);
traces.push(n71, n72, n73, n74, n75, n76);
traces.push(gn71, gn72, gn73, gn74, gn75, gn76);
var layout = {
    title: profile.profileName,
    xaxis: {
        title: "",
        showticklabels: false,
        showgrid: false,
        range: [profile.s[0], profile.s[profile.s.length - 1]],
        autorange: false
    },
    yaxis: {
        title: ""
    },
    annotations: []
};
for (var i = 0; i < profile.n.length; i++) {
    var trace0 = {
        type: 'bar',

```

```

        x: [profile.s[i]],
        y: [50],
        base: [-20],
        width: [0.1],
        name: profile.n[i],
        marker: {
            color: 'rgb(0, 0, 0)'}
traces.push(trace0);
var annotaion = {
    xref: 'paper',
    yref: 'paper',
    x: profile.s[i] / profile.s[profile.s.length - 1],
    y: 0,
    xanchor: 'center',
    yanchor: 'top',
    showarrow: false,
    text: profile.n[i],
    font: {
        family: 'Arial',
        size: 12,
        color: 'black'    },,};
layout.annotations.push(annotaion);
}
return { traces: traces, layout: layout };

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Листинг реализации решения задачи гравиметрии методом имитации отжига

```
package AnnealingMethod;
// Рассчитать вероятность принятия
public static double acceptanceProbability(double energy, double
newEnergy, double temperature) {
    // Если новое решение лучше, примите его
    if (newEnergy < energy) {
        return 1.0;
    }
    // Если новое решение хуже, вычисляем вероятность принятия
    System.out.println("acceptanceProbability e-n =" + (energy - newEnergy));
    System.out.println("acceptanceProbability =" + Math.exp((energy -
newEnergy)*Math.pow(10, 12) / temperature));
    return Math.exp((energy - newEnergy)*Math.pow(10, 12) / temperature);
}
public static double roundHalfUp(double num, int signs) {
    return (new java.math.BigDecimal(num).setScale(signs,
java.math.BigDecimal.ROUND_HALF_UP)).doubleValue();
}
//Заполнение массива по интервалу, шагу и предоставленному
значению
public static List<Double> fillArray(double intervalPercent, double
intervalStep, double providedValue) {
    System.out.println("fillArray start");
    System.out.println("fillArray start" +intervalPercent +"; "+intervalStep +";
"+providedValue +"; ");
    List<Double> array = new ArrayList<>();
    double intervalRightValue = providedValue + Math.abs(providedValue) *
intervalPercent / 100;
    double intervalLeftValue = providedValue - Math.abs(providedValue) *
intervalPercent / 100;
    if (intervalPercent == 0 || intervalStep == 0) {
        array.add(intervalRightValue);
    } else {
        for (double i = intervalLeftValue; i <= intervalRightValue; i = i +
intervalStep) {
            array.add(i);
        }
    }
    System.out.println("fillArray end");
    return array;
}
```

```

    }
    // Получаем случайное значение из массива
    public static double getRandomValue(List<Double> array) {
        Random rand = new Random();
        Double randomValue = array.get(rand.nextInt(array.size()));
        return randomValue;
    }
    // Получаем Массу объекта по формуле
    public static double getMassValueFromFormula(double r, double p) {
        // System.out.println("r="+r);
        // System.out.println("p="+p);
        // System.out.println("PI="+PI);
        double massValue = (double)4/3 * PI * Math.pow(r, 3) * p;
        // System.out.println("massValue="+massValue);
        return massValue;
    }
    // Получаем w(дельта g) объекта по формуле
    public static double getWValueFromFormula(double massValue, double h,
double x) {
        // System.out.println("massValue="+massValue);
        // System.out.println("h="+h);
        // System.out.println("x="+x);
        // System.out.println("G="+G);
        double w = G * massValue * (h / (Math.pow(Math.sqrt(Math.pow(x, 2) +
Math.pow(h, 2)), 3)));
        // System.out.println("w="+w);

        return w;
    }
    public static Solution getWDiffRandom(List<Double> rArr, List<Double>
pArr, List<Double> hArr, List<Double> xArr, double wTheoretical, Solution
currentSolution) {
        double r = getRandomValue(rArr);
        double p = getRandomValue(pArr);
        double h = getRandomValue(hArr);
        double x = getRandomValue(xArr);
        // Рассчитаем массу объекта:
        double m = getMassValueFromFormula(r, p);
        // Рассчитаем w (дельта g)
        double wCalculated = getWValueFromFormula(m, h, x);
        // Рассчитаем разницу между теоретической и рассчитанной w
        double wDiff = Math.abs(wTheoretical - wCalculated);
        currentSolution.setR(r);
        currentSolution.setP(p);
    }

```

```

        currentSolution.setH(h);
        currentSolution.setX(x);
        currentSolution.setM(m);
        currentSolution.setwCalculated(wCalculated);
        currentSolution.setwTheoretical(wTheoretical);
        currentSolution.setwDiff(wDiff);
        return currentSolution;
    }
    public String startCalc(
        double rProvidedValue, double pProvidedValue, double
hProvidedValue, double wTheoretical, double rIntervalPercent, double
pIntervalPercent,
        double hIntervalPercent, double rIntervalStep, double pIntervalStep,
double hIntervalStep, double temp, double coolingRate,
        double xProvidedValue,
        double xIntervalPercent,
        double xIntervalStep

    )
        throws Exception {
    System.out.println("Start startCalc: ");
    // Сгенерируем по интервалу и шагу, все возможные вариации r, p, h.
    Для дальнейшего случайного изъятия значения из этого массива:
    // Создадим Массив:
    List<Double> rArr = new ArrayList<>();// Массив r (радиусы)
    List<Double> pArr = new ArrayList<>();// Массив p (плотностей)
    List<Double> hArr = new ArrayList<>();// Массив h (глубин)
    List<Double> xArr = new ArrayList<>();// Массив x (глубин)
    // Заполнение массивов согласно заданным параметрам:
    rArr = fillArray(rIntervalPercent, rIntervalStep, rProvidedValue);
    pArr = fillArray(pIntervalPercent, pIntervalStep, pProvidedValue);
    hArr = fillArray(hIntervalPercent, hIntervalStep, hProvidedValue);
    xArr = fillArray(xIntervalPercent, xIntervalStep, xProvidedValue);
    long rArrl = rArr.size();
    long pArrl = pArr.size();
    long hArrl = hArr.size();
    long xArrl = xArr.size();

    System.out.println("rArr.size(): " + rArrl);
    System.out.println("pArr.size(): " + pArrl);
    System.out.println("hArr.size(): " + hArrl);
    System.out.println("xArrl.size(): " + xArrl);

```



```

        long possibleCombinationCount = pArr1 * xArr1;
        System.out.println("possibleCombinationCount " +
possibleCombinationCount);
        // начальную температуру temp;
        // Скорость охлаждения coolingRate
        // Инициализация начального решения
        // Выбираем случайное значение r,p,h из заполненного массива:
        Solution currentSolution = new Solution();
        getWDiffRandom( rArr, pArr, hArr, xArr, wTheoretical, currentSolution);
        System.out.println("Начальное решение: " +
currentSolution.getwDiff());
        // Установить в качестве текущего лучшего
        Solution wDiffBest = currentSolution;
        int iterations = 0;
        //////////////////////////////////////
        // Цикл, пока система не остынет
        while (temp > 1) {
            Solution wDiffCurrentSolution = currentSolution;
            Solution wDiffNewSolution = new Solution();
            getWDiffRandom(rArr, pArr, hArr, xArr, wTheoretical,
wDiffNewSolution);
            // Получить энергию решений
            double currentEnergy = wDiffCurrentSolution.getwDiff();
            double newEnergy = wDiffNewSolution.getwDiff();
            //System.out.println("newEnergy: " + wDiffNewSolution.getwDiff());
            // Решаем, должны ли мы принять новое решение
            if (acceptanceProbability(currentEnergy, newEnergy, temp) >
Math.random()) {
                wDiffCurrentSolution = wDiffNewSolution;
                //////////////////////////////////////
                //Втыкаем данные на график
                series1.add(temp, wDiffCurrentSolution.getwDiff());
                //////////////////////////////////////
            }
            // Отслеживаем лучшее решение, найденное
            if (wDiffCurrentSolution.getwDiff() < wDiffBest.getwDiff()) {
                wDiffBest = wDiffCurrentSolution;
            }
            //Охлаждаем систему
            // temp = temp - coolingRate;
            temp *= 1 - coolingRate;
            //System.out.println("temp =" + temp);
            iterations++;
        }

```

```

        String result = "Количество возможных комбинация: " +
possibleCombinationCount + "\n"
        + "Решение найдено за: " + iterations + " итераций\n"
        + "Окончательное решение:\n"
        + "wDiff: " + wDiffBest.getwDiff() + "\n"
        + "При r: " + wDiffBest.getR() + "\n"
        + "При p: " + wDiffBest.getP() + "\n"
        + "При m: " + wDiffBest.getM() + "\n"
        + "При h: " + wDiffBest.getH() + "\n"
        + "При x: " + wDiffBest.getX() + "\n"
        + "wTheoretical: " + wDiffBest.getwTheoretical() + "\n"
        + "wCalculated: " + wDiffBest.getwCalculated() + "\n";
        System.out.println("result: " + result);
        dataset.addSeries(series1);
        ScatterPlot example = new ScatterPlot("График изменение W от
температуры", dataset);
        example.setSize(800, 400);
        example.setLocationRelativeTo(null);
        //
example.setDefaultCloseOperation(WindowConstants.EXIT_ON_CLOSE);
        example.setVisible(true);
        return result;
    }
}

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Листинг реализации решения задачи гравиметрии генетическим алгоритмом

```
package GeneticAlgorithm;
// Рассчитать вероятность принятия
public static double acceptanceProbability(double energy, double
newEnergy, double temperature) {
// Если новое решение лучше, примите его
if (newEnergy < energy) {
return 1.0;
}
// Если новое решение хуже, то вычисляем вероятность принятия
System.out.println("acceptanceProbability e-n =" + (energy - newEnergy));
System.out.println("acceptanceProbability =" + Math.exp((energy -
newEnergy) * Math.pow(10, 12) / temperature));
return Math.exp((energy - newEnergy) * Math.pow(10, 12) / temperature);
}
public static double roundHalfUp(double num, int signs) {
return (new java.math.BigDecimal(num).setScale(signs,
java.math.BigDecimal.ROUND_HALF_UP)).doubleValue();
}
//Заполняем первую популяцию случайными значениями(хромосомами)
public static HashMap<Integer, Chromosome>
fillRandomPopulation(List<Double> rArr, List<Double> pArr, List<Double> hArr,
List<Double> xArr, double wTheoretical, double populationSize) {
System.out.println("fillRandomPopulation start");
HashMap<Integer, Chromosome> currentRandomPopulation = new
HashMap<>();
for (int i = 0; i < populationSize; i = i + 1) {
Chromosome randomChromosome = new Chromosome();
randomChromosome = getWDiffRandom(rArr, pArr, hArr, xArr,
wTheoretical, randomChromosome);
currentRandomPopulation.put(i, randomChromosome);
System.out.println("fillRandomPopulation randomChromosome = " +
randomChromosome.getwDiff());}
System.out.println("fillRandomPopulation end");
return currentRandomPopulation;}
//Новая популяция на основе старой
public static HashMap<Integer, Chromosome>
fillNewPopulation(List<Double> rArr, List<Double> pArr, List<Double> hArr,
List<Double> xArr, double wTheoretical, double populationSize,
Map<Integer, Double> topPopulation, Map<Integer, Double> avgPopulation,
HashMap<Integer, Chromosome> oldPopulation, double mutationsPercentage) {
```

```

System.out.println("fillNewPopulation start");
// Создадим Массив:
List<Double> rArrFromPopulation = new ArrayList<>();// Массив r
(радиусы)
List<Double> pArrFromPopulation = new ArrayList<>();// Массив p
(плотностей)
List<Double> hArrFromPopulation = new ArrayList<>();// Массив h
(глубин)
List<Double> xArrFromPopulation = new ArrayList<>();// Массив x
(глубин)
// Заполняем массив генов лучших 10%
// Создадим Массив генов лучших, сначала всеми значениями:
List<Double> rArrFromPopulationPreTOP = new ArrayList<>();// Массив r
(радиусы)
List<Double> pArrFromPopulationPreTOP = new ArrayList<>();// Массив p
(плотностей)
List<Double> hArrFromPopulationPreTOP = new ArrayList<>();// Массив h
(глубин)
List<Double> xArrFromPopulationPreTOP = new ArrayList<>();// Массив x
(глубин)
for (Map.Entry<Integer, Double> entry : topPopulation.entrySet()) {
rArrFromPopulationPreTOP.add(oldPopulation.get(entry.getKey()).getR());
pArrFromPopulationPreTOP.add(oldPopulation.get(entry.getKey()).getP());
hArrFromPopulationPreTOP.add(oldPopulation.get(entry.getKey()).getH());
xArrFromPopulationPreTOP.add(oldPopulation.get(entry.getKey()).getX());
System.out.println("all TOP rArrFromPopulationPreTOP =" +
oldPopulation.get(entry.getKey()).getR());}
int topPopulationSize = (int) populationSize * 1 / 2; // 50% популяции
System.out.println("topPopulationSize" + topPopulationSize);
System.out.println("topPopulation size" + topPopulation.size());
System.out.println("Math.random() * 100" + Math.random() * 100);
for (int i = 0; i <= topPopulationSize; i = i + 1) {
if ((Math.random() * 100) <= mutationsPercentage) {
rArrFromPopulation.add(getRandomValue(rArr));
} else {
rArrFromPopulation.add(getRandomValue(rArrFromPopulationPreTOP));
}
if ((Math.random() * 100) <= mutationsPercentage) {
pArrFromPopulation.add(getRandomValue(pArr));
} else {
pArrFromPopulation.add(getRandomValue(pArrFromPopulationPreTOP));}
if ((Math.random() * 100) <= mutationsPercentage) {
hArrFromPopulation.add(getRandomValue(hArr));
} else {

```

```

hArrFromPopulation.add(getRandomValue(hArrFromPopulationPreTOP));}
if ((Math.random() * 100) <= mutationsPercentage) {
xArrFromPopulation.add(getRandomValue(xArr));
} else {
xArrFromPopulation.add(getRandomValue(xArrFromPopulationPreTOP));}
System.out.println("topPopulationSize rArrFromPopulation =" +
rArrFromPopulation.get(i));}
// Заполняем массив генов средних 80%
// Создадим Массив генов средних, сначала всеми значениями:
List<Double> rArrFromPopulationPreAVG = new ArrayList<>();// Массив r
(радиусы)
List<Double> pArrFromPopulationPreAVG = new ArrayList<>();// Массив p
(плотностей)
List<Double> hArrFromPopulationPreAVG = new ArrayList<>();// Массив h
(глубин)
List<Double> xArrFromPopulationPreAVG = new ArrayList<>();// Массив x
(глубин)
for (Map.Entry<Integer, Double> entry : avgPopulation.entrySet()) {
rArrFromPopulationPreAVG.add(oldPopulation.get(entry.getKey()).getR());
pArrFromPopulationPreAVG.add(oldPopulation.get(entry.getKey()).getP());
hArrFromPopulationPreAVG.add(oldPopulation.get(entry.getKey()).getH())
xArrFromPopulationPreAVG.add(oldPopulation.get(entry.getKey()).getX())
System.out.println("all avg rArrFromPopulationPreAVG =" +
oldPopulation.get(entry.getKey()).getR());
}
//А теперь Заполняем оставшиеся 50% - 80тью% средних генов
случайным образом из rArrFromPopulationPreAVG
System.out.println("Math.random() * 100" + Math.random() * 100);
for (int i = topPopulationSize; i <= populationSize; i = i + 1) {
if ((Math.random() * 100) <= mutationsPercentage) {
rArrFromPopulation.add(getRandomValue(rArr));
} else {
rArrFromPopulation.add(getRandomValue(rArrFromPopulationPreAVG));}
if ((Math.random() * 100) <= mutationsPercentage) {
pArrFromPopulation.add(getRandomValue(pArr));
} else {
pArrFromPopulation.add(getRandomValue(pArrFromPopulationPreAVG));
}
if ((Math.random() * 100) <= mutationsPercentage) {
hArrFromPopulation.add(getRandomValue(hArr));
} else {
hArrFromPopulation.add(getRandomValue(hArrFromPopulationPreAVG));
}
if ((Math.random() * 100) <= mutationsPercentage) {

```

```

xArrFromPopulation.add(getRandomValue(xArr));
} else {
xArrFromPopulation.add(getRandomValue(xArrFromPopulationPreAVG))}
System.out.println("50% avg rArrFromPopulationPreAVG =" +
rArrFromPopulation.get(i));}
HashMap<Integer, Chromosome> newPopulation =
fillRandomPopulation(rArrFromPopulation, pArrFromPopulation,
hArrFromPopulation, xArrFromPopulation, wTheoretical, populationSize);
System.out.println("fillNewPopulation end");
return newPopulation;}
// Получаем случайное значение из массива
public static double getRandomValue(List<Double> array) {
Random rand = new Random();
Double randomValue = array.get(rand.nextInt(array.size()));
return randomValue;}
// Получаем Массу объекта по формуле
public static double getMassValueFromFormula(double r, double p) {
// System.out.println("r="+r);
// System.out.println("p="+p);
// System.out.println("PI="+PI);
double massValue = (double) 4 / 3 * PI * Math.pow(r, 3) * p;
// System.out.println("massValue="+massValue);
return massValue;}
// Получаем w(дельта g) объекта по формуле
public static double getWValueFromFormula(double massValue, double h,
double x) {
// System.out.println("massValue="+massValue);
// System.out.println("h="+h);
// System.out.println("x="+x);
// System.out.println("G="+G);
double w = G * massValue * (h / (Math.pow(Math.sqrt(Math.pow(x, 2) +
Math.pow(h, 2)), 3)));
// System.out.println("w="+w);
return w;}
public static Chromosome getWDiffRandom(List<Double> rArr,
List<Double> pArr, List<Double> hArr, List<Double> xArr, double wTheoretical,
Chromosome currentChromosome) {
double r = getRandomValue(rArr);
double p = getRandomValue(pArr);
double h = getRandomValue(hArr);
double x = getRandomValue(xArr);
// Рассчитаем массу объекта:
double m = getMassValueFromFormula(r, p);
// Рассчитаем w (дельта g)

```

```

double wCalculated = getWValueFromFormula(m, h, x);
    // Сгенерируем по интервалу и шагу, все возможные вариации r, p, h.
Для дальнейшего случайного изъятия значения из этого массива:
    // Создадим Массив:
    List<Double> rArr = new ArrayList<>(); // Массив r (радиусы)
    List<Double> pArr = new ArrayList<>(); // Массив p (плотностей)
    List<Double> hArr = new ArrayList<>(); // Массив h (глубин)
    List<Double> xArr = new ArrayList<>(); // Массив x (глубин)
    // Инициализация начальной случайной популяции с решением
    HashMap<Integer, Chromosome> firstRandomPopulation =
fillRandomPopulation(rArr, pArr, hArr, xArr, wTheoretical, populationSize);
    System.out.println("Начальное решение: " +
firstRandomPopulation.size());

    HashMap<Integer, Chromosome> newPopulation =
firstRandomPopulation;
    //////////////////////////////////////
    // Находим лучшее и худшее решение
    // Все решения
    HashMap<Integer, Double> currentPopulation = new HashMap<>();
    for (Map.Entry<Integer, Chromosome> entry :
newPopulation.entrySet()) {
        Chromosome chromosome = entry.getValue();

        currentPopulation.put(entry.getKey(), chromosome.getwDiff());
        System.out.println(String.valueOf(i) + "currentRandomPopulation:
Key:" + entry.getKey() + "; Value:" + entry.getValue().getwDiff());
    }

    Map<Integer, Double> sortedMapPopulation
    = currentPopulation.entrySet().stream()
        .sorted(Entry.comparingByValue())
        .collect(Collectors.toMap(Entry::getKey, Entry::getValue,
            (e1, e2) -> e1, LinkedHashMap::new));

    for (Map.Entry<Integer, Double> entry :
sortedMapPopulation.entrySet()) {
        System.out.println("sortedMap: Key:" + entry.getKey() + "; Value:"
+ entry.getValue());
    }
    // 10% лучших
    Map<Integer, Double> topPopulation
    = currentPopulation.entrySet().stream()
        .sorted(Map.Entry.comparingByValue())

```

```

        .limit(1)
        .collect(Collectors.toMap(
            Map.Entry::getKey, Map.Entry::getValue, (e1, e2) -> e1,
LinkedHashMap::new));
        for (Map.Entry<Integer, Double> entry : topPopulation.entrySet()) {
            System.out.println("topTenRandomPopulation: Key:" +
entry.getKey() + "; Value:" + entry.getValue());
        }
        // 10% худших
        Map<Integer, Double> badPopulation
            = currentPopulation.entrySet().stream()

.sorted(Map.Entry.comparingByValue(Comparator.reverseOrder()))
        .limit(10)
        .collect(Collectors.toMap(
            Map.Entry::getKey, Map.Entry::getValue, (e1, e2) -> e1,
LinkedHashMap::new));
        for (Map.Entry<Integer, Double> entry : badPopulation.entrySet()) {
            System.out.println("badTenRandomPopulation: Key:" +
entry.getKey() + "; Value:" + entry.getValue());
        }
        //80% средних
        Map<Integer, Double> avgPopulation = sortedMapPopulation;
        for (Map.Entry<Integer, Double> entry2 : topPopulation.entrySet()) {
            avgPopulation.remove(entry2.getKey());
        }
        for (Map.Entry<Integer, Double> entry3 : badPopulation.entrySet()) {
            avgPopulation.remove(entry3.getKey());
        }
        for (Map.Entry<Integer, Double> entry : avgPopulation.entrySet()) {

            System.out.println("avgTenRandomPopulation: Key:" +
entry.getKey() + "; Value:" + entry.getValue());
        }
        //Новая популяция
        //гены 10% лучших используем в 50% при составлении новой
популяции
        newPopulation = fillNewPopulation(rArr, pArr, hArr, xArr,
wTheoretical, populationSize, topPopulation, avgPopulation, newPopulation,
mutationsPercentage);
        System.out.println("Generations end=" + String.valueOf(i));
        //Втыкаем данные на график
        HashMap<Integer, Double> bestPopulation = new HashMap<>();

```



```

        for (Map.Entry<Integer, Chromosome> entry :
newPopulation.entrySet()) {
            Chromosome chromosome = entry.getValue();
            bestPopulation.put(entry.getKey(), chromosome.getwDiff());
            System.out.println("bestPopulation: Key:" + entry.getKey() + ";
Value:" + entry.getValue().getwDiff());
        }
        Map<Integer, Double> bestTopOnePopulation
            = bestPopulation.entrySet().stream()
                .sorted(Map.Entry.comparingByValue())
                .limit(1)
                .collect(Collectors.toMap(
                    Map.Entry::getKey, Map.Entry::getValue, (e1, e2) -> e1,
LinkedHashMap::new));
        int key = 0;
        for (Map.Entry<Integer, Double> entry :
bestTopOnePopulation.entrySet()) {
            key = entry.getKey();
            System.out.println("bestTopOnePopulation: Key:" + entry.getKey()
+ "; Value:" + entry.getValue());
        }
        Chromosome bestChromosome = newPopulation.get(key);
        System.out.println("series1: numberGenerations:" + i + "; y:" +
bestChromosome.getwDiff());
        series1.add(i, bestChromosome.getwDiff());
        ////////////////////////////////////////////////////
        }
        // Находим лучшее решение
        HashMap<Integer, Double> lastPopulation = new HashMap<>();
        for (Map.Entry<Integer, Chromosome> entry : newPopulation.entrySet()) {
            Chromosome chromosome = entry.getValue();
            lastPopulation.put(entry.getKey(), chromosome.getwDiff());
            System.out.println("lastPopulation: Key:" + entry.getKey() + "; Value:"
+ entry.getValue().getwDiff());
        }
        Map<Integer, Double> lastTopOnePopulation
            = lastPopulation.entrySet().stream()
                .sorted(Map.Entry.comparingByValue())
                .limit(1)
                .collect(Collectors.toMap(
                    Map.Entry::getKey, Map.Entry::getValue, (e1, e2) -> e1,
LinkedHashMap::new));
        int key = 0;

```

```

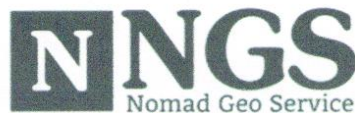
        for (Map.Entry<Integer, Double> entry :
lastTopOnePopulation.entrySet()) {
            key = entry.getKey();
            System.out.println("lastTopOnePopulation: Key:" + entry.getKey() + ";
Value:" + entry.getValue());
        }
        Chromosome lastChromosome = newPopulation.get(key);
//         // Отслеживаем лучшее решение, найденное
//         if (wDiffCurrentChromosome.getwDiff() < wDiffBest.getwDiff()) {
//             wDiffBest = wDiffCurrentChromosome;

```

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Акт внедрения

Nomad Geo Service LTD
Republic of Kazakhstan
050007, Almaty,
Kopernika St. 124B,
e-mail: info@ngs.kz
website: ngs.kz
Tel: +7 727 397 52 56



TOO «Nomad Geo Service»
Республика Казахстан
050007, г.Алматы,
Ул. Коперника 124 Б,
e-mail: info@ngs.kz
website: ngs.kz
Тел: +7 727 397 52 56

Исх. №101 от 14.12.2022 г.

TOO «Nomad Geo Service»

Акт внедрения

АКТ

внедрения научных результатов диссертационной работы PhD Докторанта Satbayev University Назировой Асем Бакдаулетовны на тему «Разработка информационной системы для обработки данных гравиметрического мониторинга с применением методов глобальной оптимизации (на примере решения прямой задачи гравиметрии)», представленную на соискание ученой степени доктора PhD по специальности 6Д070400 – «Вычислительная техника и программное обеспечение» в TOO «Nomad Geo Service»

Настоящий акт составлен о том, что результаты научно-исследовательской работы PhD докторантки Satbayev University Назировой А.Б. по теме «Разработка информационной системы для обработки данных гравиметрического мониторинга с применением методов глобальной оптимизации (на примере решения прямой задачи гравиметрии)» на соискание ученой степени доктора PhD по специальности 6Д070400 – «Вычислительная техника и программное обеспечение» внедрены и используются в работе TOO «Nomad Geo Service» в виде информационной системы (ИС) GeoM для обработки, хранения и интерпретации данных гравиметрического мониторинга.

Разработанная информационная система (ИС) «GeoM» позволила автоматизировать процесс обработки данных гравиметрического мониторинга, исключая ошибки при переносе данных из файла гравиметра и повышая точность расчетов. Информационная система (ИС) GeoM обеспечивает решение и при ограниченном количестве априорных данных, при этом выполняя все процессы автоматизации данных из первичного файла гравиметра. ИС GeoM доказала свою эффективность в полной мере, решая актуальные задачи обработки, хранения и интерпретации результатов геодинамического мониторинга состояния недр и сопутствующей геолого-геофизической информации.

Более того, были оправдано применение методов глобальной оптимизации, а именно метода имитации отжига и генетического алгоритма, при моделировании глубинной структуры земной коры в пределах нефтегазовых месторождений со сравнительно несложным пластовым строением. Данные методы обеспечили решение прямой задачи гравиметрии с удовлетворительной точностью, что позволило найти оптимальные параметры залегания аномальных тел для трех различных фигур (однородной сферы, горизонтальной призмы и вертикального уступа).

Научные результаты диссертационной работы являются актуальными и представляют практический интерес. ИС GeoM позволяет осуществлять множество

Nomad Geo Service LTD
Republic of Kazakhstan
050007, Almaty,
Kopernika St. 124B,
e-mail: info@ngs.kz
website: ngs.kz
Tel: +7 727 397 52 56



ТОО «Nomad Geo Service»
Республика Казахстан
050007, г. Алматы,
Ул. Коперника 124 Б,
e-mail: info@ngs.kz
website: ngs.kz
Тел: +7 727 397 52 56

операций по выявлению закономерностей, проводить анализ, учет, прогноз, и непосредственно графически отображать результаты обработки.

Генеральный директор
ТОО «Nomad Geo Service»

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M.O. Pajdin', written over a horizontal line.

Пайдин М.О.



2017