

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание ученой степени «доктор философии» (PhD) по специальности 6D070400 – «Вычислительная техника и программное обеспечение»

НАЗИРОВА АСЕМ БАКДАУЛЕТОВНА

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИМЕТРИИ)

Актуальность исследования. 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 съёмки 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.

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 сервисными 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.

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. 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.

На сегодняшний день традиционные *детерминированные* методы решения прямой задачи гравиметрии 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 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. А учитывая пространственную (координатно привязанную) природу данных мониторинга месторождения УВ, внедрять эти алгоритмы предстоит в оболочку ИС, используя средства и приёмы геоинформатики и смежных наук.

Целью диссертационной работы является 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, нормировки, сглаживания, 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 при выполнении проекта Satbayev University по теме «Разработка геоинформационной системы для решения задачи гравиметрического мониторинга состояния недр нефтегазоносных районов Казахстана на основе высокопроизводительных вычислений в условиях ограниченного объема экспериментальных данных» No. AP05135158 (грантовое финансирование научных проектов Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2018-2020 годы).

Практическая и теоретическая значимость полученных результатов. 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. Использование разработанной информационной системы на основе методов глобальной оптимизации позволяет сократить временные затраты на поиск параметров простых моделей геологической среды по данным гравитационного поля.

Теоретическая значимость результатов работы соискателя заключается в следующем:

— исследованы и показаны возможности применения генетического алгоритма и метода имитации отжига при решении прямой задачи гравиметрии;

— произведен достаточно точный поиск параметров аномалиеобразующих тел простой геологической формы, что позволяет производить уточнение геолого-геофизических моделей среды по гравитационному полю.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты исследования докладывались на многих международных научных конференциях:

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 2.0, квартиль Q3) и *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan, Series of geology and technical sciences* (импакт-фактор 2.0, 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 по контролю в сфере образования и науки МОН 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.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и приложений.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследований, определены основные задачи для достижения цели, отражена научная новизна и практическая ценность работы, дана общая характеристика работы.

Содержание диссертации построено по классическому принципу: обзор проблем – методика улучшения – разработка системы – тестирование и анализ результатов. Поэтому *первая глава* работы посвящена обзору причин и методов прогноза геодинамических явлений на месторождениях УВ, включая некоторые яркие примеры негативных последствий, а также анализу возможностей гравитационного мониторинга. Завершается обзор кратким анализом существующих информационных технологий для оценки техногенного влияния в местах добычи УВ средствами геофизики. Выводы к главе обобщают узкоцелевую направленность этих технологий и подтверждают актуальность исследований.

Вторая глава освещает методику оценки геодинамических процессов на примере процедур измерения и обработки данных гравиметрии сразу в среде разрабатываемой информационной системы (ИС), включая отбор, отбраковку, сглаживание, редукции, 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.

Описана обобщённая методика оценки параметров моделей среды посредством решения прямой задачи гравиметрии (ПЗГ) в детерминированной

постановке для ряда геометрически правильных тел. Дан обзор возможностей генетических методов стохастической глобальной оптимизации решения ПЗГ. Обоснован выбор конкретных алгоритмов (имитации отжига, генетического алгоритма), в том числе, как возможность одновременной оптимизации нескольких параметров геосреды, адаптации параметров к новым условиям, сокращения шагов априорного обуславливания начальной модели среды. Описана реализация шагов указанных выше алгоритмов для трёх различных математических моделей среды. Последовательный подбор параметров среды по нескольким ее начальным моделям является существенным преимуществом структуры разрабатываемой ИС.

В третьей главе отражена функциональная модель рабочих процессов ИС и ее различных компонент, а также результаты ее декомпозиции на различные уровни и функции (предобработка, расчёт аномалий, решение ПЗГ, визуализации, сводная база данных, оптимизация), включая функции картографической визуализации, более свойственной для ГИС. Общая диаграмма ИС представлена в подразделе, посвящённом аспектам создания базы данных, как основного компонента ИС, на основе PostgreSQL. Подробно освещена 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 и делает ее комплексной. Продемонстрирован интерфейс численных модулей для решения ПЗГ (ввод данных, расчёт) и аспекты визуализации данных (стилирование, векторное наложение). О дизайне экранных форм можно спорить, но их работоспособность доказана опытом. Итогом проектирования является логичная интеграция модулей в единую оболочку ИС.

Заключительная, *четвертая глава* посвящена тестированию рабочих процессов и численной устойчивости ИС с помощью решения серии тестовых задач. В результате решения и анализа ряда тестовых (синтетических) примеров показана хорошая устойчивость и приемлемая эффективность ИС по точности и скорости.

В *заключении* подведены итоги по проделанной работе в рамках диссертационной работы.

Содержание диссертации завершается *списком использованных источников и приложениями*.