

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Одинцова Анастасия Александровна

**РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВ ОСВОЕНИЯ
НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ПРОВИНЦИЙ**

Специальность 1.6.20 – «Геоинформатика, картография»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор кафедры геологии и маркшейдерского дела
чл.-корр. РАН Татаринов Виктор Николаевич

Москва – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время возрастает потребность в развитии методов поиска и разведки уникальных и крупных месторождений нефти, в том числе в Арктическом регионе Российской Федерации. Решение этой проблемы осуществляется в рамках «*Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года*». В соответствии с постановлением Правительства РФ от 4 марта 2025 года № 500-р предусмотрены внедрение и использование цифровых технологий обработки геологических данных, а также проведение региональных исследований на всех этапах геологоразведочных работ, включая создание прогностических моделей в рамках обоснования и выбора стратегий развития нефтегазоносных провинций (пункт 31).

Комплексный анализ геолого-геофизических данных и эффективное управление ими играют ключевую роль в повышении производительности, уровня промышленно-экологической безопасности, снижении инвестиционных и эксплуатационных издержек при поиске и разведке жидких и газообразных углеводородных ресурсов. Высокая степень детализации геолого-геофизической информации, разнообразие источников и форматов междисциплинарных данных требуют применения современных подходов к их сбору, обработке и хранению.

Развитие геоаналитических методов способствует выявлению объективных закономерностей в больших массивах разнотипных данных, повышает точность прогноза и обеспечивает надежное длительное хранение информации. Тем не менее сохраняется необходимость в специализированных системах, предназначенных для решения прикладных задач нефтегазовой отрасли и охватывающих весь цикл обработки пространственно-ориентированных данных – от их хранения и упорядочения до комплексного анализа, интерпретации и визуализации.

Одним из ключевых направлений работ является выявление фундаментальных закономерностей локализации крупнейших месторождений нефтегазоносных провинций (НГП) мира. Рассматриваемые в диссертации месторождения обобщены термином «крупнейшие» и включают в себя уникальные и крупные месторождения нефти согласно общепринятой в РФ классификации. Под крупнейшими НГП понимаются провинции, к которым приурочены приведенные в работе крупнейшие месторождения нефти.

Использование геоинформационных технологий значительно повышает эффективность обработки больших объемов геологической, технологической, экологической и другой информации. Важным аспектом становится создание интуитивно понятных интерфейсов и инструментов для предварительной обработки данных непосредственно в веб-среде (фильтрация, классификация, сортировка и др.). Эти же технологии обладают высоким потенциалом для совершенствования образовательного процесса при подготовке специалистов-геологов.

В этой связи разработка геоинформационного комплекса для анализа геопространственных данных в районах концентрации крупнейших месторождений нефти, обоснования перспектив и стратегий их освоения и эксплуатации является актуальной научной задачей. Ее решение позволит повысить качество и скорость

обработки координатно-привязанной геолого-геофизической информации, улучшить обоснованность производственных и технологических решений при разведке нефтяных месторождений крупнейших нефтегазоносных провинций, а также расширить возможности их комплексного анализа.

Цель исследования – разработка современного геоинформационного обеспечения, предназначенного для выявления базовых закономерностей локализации крупнейших месторождений нефти и обоснования перспектив освоения нефтегазоносных провинций.

Идея работы заключается в использовании системного подхода, объединяющего методы геоинформатики и комплексного анализа междисциплинарных геоданных, к разработке специализированной базы данных, дополненной системой их оценки, интерпретации и визуализации.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **основные задачи**:

1. Провести анализ существующего базового научно-методического и программно-аналитического обеспечения геоинформационных технологий и опыта их применения при поиске и разведке нефтяных месторождений;

2. Исследовать геопространственные закономерности локализации крупнейших НГП на основе комплексного анализа геолого-геофизических данных;

3. Разработать классификацию крупнейших НГП, основанную на выявленных закономерностях их пространственного распределения;

4. Интегрировать данные по крупнейшим месторождениям нефти из разных источников информации в единую унифицированную базу данных на платформе NextGIS QGIS;

5. Разработать методологический подход интегральной рейтинговой оценки перспективности крупнейших нефтяных месторождений в пределах НГП на основе геолого-технологических показателей и индекса относительной капиталоемкости ($CAPEX_{rel}$) для обоснования эффективности их освоения и эксплуатации;

6. Разработать геоинформационный веб-сервис, обеспечивающий длительное централизованное хранение, обработку, анализ и визуализацию пространственных данных, а также удобный пользовательский доступ к ним;

7. Разработать технические и программные решения визуализации на базе цифровой демонстрационной системы со сферическим проекционным экраном, предназначенные для высокоинформативного представления пространственного распределения и закономерностей локализации нефтяных месторождений в научно-аналитических целях;

8. Провести процедуру валидации и верификации разработанного геоинформационного обеспечения, предназначенного для выявления базовых закономерностей локализации крупнейших месторождений нефти в пределах НГП и повышения эффективности геолого-аналитических исследований в целях обоснования перспектив и стратегий их освоения и эксплуатации.

Методы исследования включают: анализ научной и методической литературы; сбор данных по крупнейшим месторождениям нефти России и мира; математические

методы обработки данных; методы системного анализа и квалиметрии; технологии объектно-ориентированного программирования для разработки веб-сервисов; программные средства NextGIS QGIS.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Предложена процедура разработки геоинформационного обеспечения для обоснования перспектив освоения крупнейших месторождений нефти, основанная на систематизации и классификации нефтегазоносных провинций с применением комплексного анализа геолого-геофизических данных и выявлением закономерностей их пространственного распределения, обеспечивающая повышение эффективности изучения нефтяных месторождений.

2. Разработано геоинформационное обеспечение, включающее специализированную базу данных и ГИС-проект для интеграции, визуализации и анализа нефтяных месторождений, в котором реализован метод интегральной оценки технологичности освоения месторождений и относительных капитальных затрат ($CAPEX_{rel}$), что позволяет обосновывать рациональную очередность их освоения.

3. Разработан аппаратно-программный комплекс, интегрированный с геоинформационным обеспечением, реализующий многомерное картографическое представление и интерактивное взаимодействие с результатами анализа нефтяных месторождений на базе цифровой системы визуализации со сферическим проекционным экраном для расширения возможностей верификации, апробации и представления результатов геоинформационного анализа.

Научная новизна работы:

1. Разработана структура базы данных, обеспечивающая унификацию и сопоставимость разнородных параметров для проведения комплексных аналитических исследований НГП.

2. Систематизированы и классифицированы условия локализации крупнейших нефтяных месторождений в пределах НГП для выявления базовых закономерностей и обоснования перспективности их освоения и эксплуатации.

3. Представлена процедура формирования геоинформационного обеспечения, включающего базу данных, ГИС-проект и интегрированный веб-сервис, для оценки перспектив развития нефтегазоносных провинций, в том числе в Арктической зоне России.

4. Создан аппаратно-программный комплекс, формирующий информационно-аналитическую среду для сравнительного изучения нефтяных месторождений на базе цифровой системы визуализации со сферическим проекционным экраном, что обеспечивает высокоинформативное и наглядное представление пространственных данных для научных исследований.

Соответствие диссертации паспорту специальности: диссертационная работа выполнена в рамках специальности 1.6.20 «Геоинформатика, картография». В работе представлено современное геоинформационное обеспечение для пространственного

анализа условий локализации и оценки стратегических направлений развития крупнейших нефтяных месторождений в пределах нефтегазоносных провинций, что соответствует области исследований данной специальности. Диссертационная работа соответствует следующим направлениям паспорта специальности 1.6.20:

3. Модели и структуры пространственных данных. Базы пространственных данных, пространственные метаданные. Классификация и кодирование картографической информации. Цифровые карты.

7. Картографические и геоинформационные методы и технологии анализа пространственных данных, моделирования пространственных явлений, объектов, процессов, отношений и систем.

12. Методы и технологии визуализации пространственных данных. Создание анимационных, виртуальных геоизображений и других мультимедийных продуктов на основе пространственных данных. Геоинформационное картографирование.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается:

– согласованностью полученных результатов с трудами других исследователей и внутренней непротиворечивостью результатов исследования их фундаментальным основам;

– использованием достоверных и проверенных данных;

– применением апробированных методик математической и геоинформационной обработки данных, статистики, системного анализа;

– апробацией результатов исследования на конференциях и публикациями в открытой печати.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования заключается:

– в развитии геоинформационных методических подходов, обеспечивающих создание базы данных крупнейших нефтяных месторождений с учетом ключевых геолого-геофизических характеристик;

– в разработке геоинформационного обеспечения, включающего специализированную базу данных, ГИС-проект и веб-сервис, которое позволяет осуществлять комплексный анализ геопространственных характеристик нефтегазоносных провинций, включая решение производственных задач нефтегазовой отрасли;

– в создании аппаратно-программного комплекса на базе цифровой системы визуализации со сферическим экраном для анализа информации о геологических условиях, характеристиках залежей, технологических параметрах и ресурсных запасах месторождений нефти.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях и симпозиумах: Международная конференция «Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies» (18–21 июля 2016 г., г. Сочи, Россия); Международная конференция «Global Challenges and

Data-Driven Science», 8–13 октября 2017 г., г. Санкт-Петербург, Россия; VIII Российская молодежная научно-практическая школа «Новое в познании процессов рудообразования» (26–30 ноября 2018 г., г. Москва, Россия); Международная конференция «Информационные технологии для наук о Земле и приложения для геологии и горной промышленности и экономики ITES&MP-2019» (14–18 октября 2019 г., г. Москва, Россия); Международная конференция комитета по данным для науки и техники CODATA «Towards next-generation data-driven science: policies, practices and platforms» (18–19 сентября 2019 г., г. Пекин, Китай); Международная конференция «Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision «GraphiCon 2020» (20–25 сентября 2020 г., г. Санкт-Петербург, Россия); VI Всероссийская конференция с международным участием «Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности» (ITES2022) (3–7 октября 2022 г., г. Владивосток, Россия); Международная конференция «Data Science, Geoinformatics and Systems Analysis in Geosciences» (25–27 сентября 2024 г., г. Суздаль); XXXIV Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2026» (2–6 февраля 2026 г., г. Москва, Россия), а также на научных семинарах кафедр Горного института НИТУ МИСИС.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 7 научных статьях в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, из них 5 – в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus/Web of Science, 2 – в научных изданиях базы RSCI. Получено 4 авторских свидетельства на базы данных и 2 – на программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений. Общий объем работы составляет 173 страницы и включает 50 иллюстраций, 12 таблиц, а также список цитируемой литературы, состоящий из 224 источников.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю чл.-корр. РАН В. Н. Татаринovu за неоценимый вклад в проведение данного исследования. Автор благодарен академику А. Д. Гвишиани, чл.-корр. РАН В. А. Петрову, чл.-корр. РАН А. А. Соловьеву, д. г.-м. н. Ю. В. Ростовцевой, д. ф.-м. н. Б. А. Дзедобоеву, Ю. И. Николовой, А. Ю. Ооржаку, А. И. Рыбкиной, Г. С. Бояршинову, А. И. Маневичу за помощь в подготовке работы и обсуждение научных результатов, а также коллективу ГЦ РАН за атмосферу доброжелательности и возможность ведения эффективной научной деятельности.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, приводится общая характеристика диссертационной работы, раскрыта степень ее научной разработанности, сформулированы цель, основная идея, задачи, а также научные положения, выносимые на защиту, обоснована ее научная новизна и практическая значимость, приведены сведения о степени достоверности и об апробации работы.

В **первой главе** обозначена проблематика и проанализировано современное состояние геоинформационных технологий для работы с геопространственными данными. Выполнен анализ отечественного и международного опыта использования геоинформационных технологий для анализа данных и управления ими. Приведены современные подходы к сбору и интеграции геологической информации. Изучены технологии обработки и анализа геоданных для геокартирования, прогноза и поиска нефтяных месторождений.

Многочисленные ГИС широко используются в геологоразведке, добыче полезных ископаемых, горных науках для решения разного рода задач: от создания геологических карт и атласов до оценки запасов, подготовки отчетности и принятия бизнес-решений. Специализированные ГИС и сопутствующие программные комплексы, такие как Leapfrog Geo, ENVI, GOCAD, SARscape, ArcGIS, PSP-IfSAR, QGIS, Petrel, NextGIS и др., обеспечивают полный цикл обработки и интеграции данных. При этом выявлен недостаток существующих решений – отсутствие специализированных модулей, ориентированных на интеграцию и анализ данных по крупнейшим месторождениям полезных ископаемых, в том числе углеводородов. Поэтому, несмотря на наличие множества эффективных инструментов для работы с геологическими данными, отсутствует специализированное комплексное обеспечение, которое бы позволяло управлять данными и анализировать их.

В отчетах ведущих мировых консалтинговых компаний, таких как IBM Global Services, PwC, McKinsey & Company, специализированных компаний-разработчиков новых цифровых решений и IT-консалтинга нефтегазовой отрасли Innowise, Rebellion Energy Solutions, а также ведущих отраслевых компаний России и мира, все чаще поднимается вопрос актуальности интеграции данных в единой системе для обеспечения к ним доступа специалистов различных направлений – геологов, геофизиков, геохимиков, инженеров.

В настоящее время все больше внимания уделяется поиску новых направлений использования данных, которые генерирует нефтегазовая отрасль. Предполагается возможность автоматизации принятия простых (мягких) решений и наличие подспорья для принятия жестких управленческих и стратегических решений, что в конечном итоге может снизить риски и затраты при проведении производственных работ. Однако при всем многообразии программных средств специализированных сервисов, используемых для интеграции данных, отмечается недостаток универсальных комплексов, включающих в себя как программную часть, так и аппаратную, обеспечивающих полный цикл работы с данными: начиная от их систематизированной унифицированной интеграции и далее представления, анализа и обеспечения возможности работы с ними. Более того, внутренние узкоспециализированные данные каждой из нефтяной компании для проведения более масштабных, стратегически важных исследований нуждаются в дополнении информацией, полученной из внешних источников для обеспечения комплексного всеобъемлющего подхода.

Существует целый ряд БД по полезным ископаемым (ПИ), которые имеют как схожие, так и различные признаки: Российская государственная информационная система

«Геология»; БД Всероссийского нефтяного научно-исследовательского геологоразведочного института ВНИГРИ; БД Геологической службы США Mineral Resources Data System; статистические данные о добыче минералов в мире Mineral Industry Data; Европейская платформа для обмена геологическими данными, включающая информацию о полезных ископаемых European Geological Data Infrastructure; информация о месторождениях и ресурсах Канады Mineral Deposit Database; БД Американской ассоциации геологов-нефтяников (the American Association of the Petroleum Geologists, AAPG) по крупнейшим месторождениям нефти и газа мира «Giant oil and gas fields of the world» и многие другие.

Однако, несмотря на активное развитие направления по созданию баз данных по различным дисциплинам наук о Земле, остается ряд вопросов, которые необходимо решить: обеспечение доступа широкому кругу пользователей онлайн; создание новых баз данных с целью привлечения к ним высокого научного и прикладного интереса не только на российском, но и на международном уровне; использование новейших средств визуализации пространственных данных, имеющих географическую привязку, путем создания цифровых карт в ГИС-среде; оснащение подобных баз данных специальными программными инструментами, обеспечивающими пользователю простой и удобный доступ для аналитической работы с представленными данными.

Вторая глава посвящена анализу условий концентрации нефтяных месторождений в нефтегазоносных провинциях, изучению характеристик крупнейших нефтегазоносных провинций и важнейших признаков концентрации крупнейших месторождений.

Изучением особенностей нефтегазовых провинций и поиском в них месторождений углеводородов в разные годы занимались выдающиеся российские ученые различных направлений в области наук о Земле: академик И. М. Губкин, который впервые разработал базировавшиеся в основном на геотектонической основе принципы выделения региональных нефтегазоносных территорий, подразделив их на провинции, области и районы, А. А. Бакиров, И. О. Брод, Н. Б. Вассоевич, И. В. Высоцкий, М. Ф. Мирчинк, Л. П. Зоненшайн, В. Ф. Раабен, А. Э. Конторович, Ю. А. Косыгин, С. П. Максимов, В. Д. Наливкин, И. И. Нестеров, Б. А. Соколов, А. А. Трофимук, А. В. Ульянов, Н. Ю. Успенская, В. Е. Хаин и многие другие. Установлено, что формирование крупных месторождений определяется совокупностью геолого-исторических, генетических и структурно-тектонических условий, а также рядом локальных факторов, повышающих вероятность их выявления. Анализ обширного фактического материала показал, что около 90% месторождений-гигантов сосредоточено в восточном полушарии и преимущественно приурочено к осадочным бассейнам.

Наибольшее количество крупнейших скоплений углеводородов связано с мезозойскими отложениями и располагается на глубинах 750–3000 м. Преобладающими являются структурные ловушки антиклинального типа, а основная часть ресурсов приурочена к платформенным областям. В литологическом отношении значительная доля запасов сосредоточена в песчаных и карбонатных коллекторах.

Выделены основные факторы формирования крупнейших месторождений: крупные размеры ловушек, тектоническая стабильность, благоприятные условия накопления

органического вещества, преимущественно морской генезис осадков, определенный возраст резервуаров и геотермический режим.

Показано, что крупнейшие месторождения образуют пространственно-сгруппированные кластеры, приуроченные к отдельным нефтегазоносным провинциям. Наиболее значимые из них локализованы в пределах Западно-Сибирской и Волго-Уральской провинций, а также в провинции Персидского залива (Рисунок 1). Их сопоставление свидетельствует о доминирующей роли платформенных структур при наличии различий в геологической истории и строении, обусловленных возрастом и эволюцией соответствующих платформ.

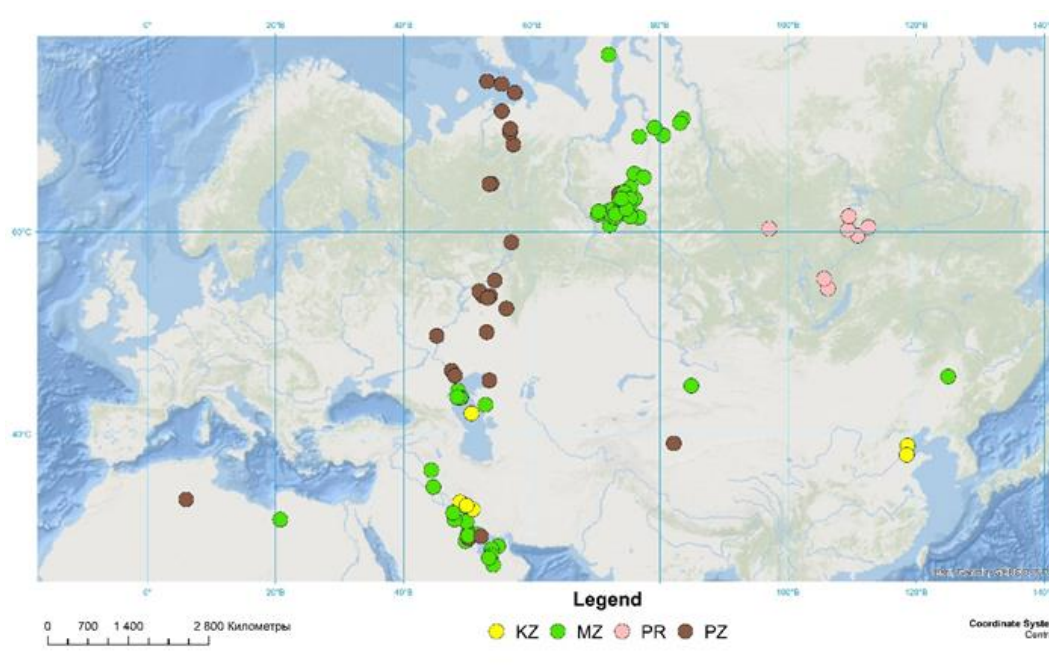


Рисунок 1 – Кластеры локализации крупнейших месторождений нефти и газа, представленных в созданной БД

Нефтегазоносные провинции по тектоническому принципу и приуроченности к крупным тектоническим структурным элементам разделяются на категории и группы (Рисунок 2), а также бассейны и районы, каждый из которых имеет свою историю геологического развития и набор продуктивных пластов.

Результаты проведенного анализа закономерностей размещения и факторов формирования крупнейших месторождений нефти послужили методологической основой для разработки классификации условий локализации крупнейших нефтяных месторождений в пределах нефтегазоносных провинций для выявления их базовых закономерностей и стали важной составляющей последующего этапа исследования, связанного с систематизацией и интеграцией разнородных геоданных. Разработанная классификация включает типизацию по тектоническому строению и геодинамическим условиям, возрасту и составу продуктивных отложений, характеристикам коллекторов и осадочных комплексов, а также особенностям миграции и накопления углеводородов.



Рисунок 2 – Схема классификации нефтегазоносных провинций по приуроченности к тектоническим структурным элементам

Выявленные пространственно-структурные особенности и критерии классификации месторождений обусловили требования к структуре и содержанию разрабатываемого геоинформационного обеспечения.

В **третьей главе** приведено описание процесса интеграции геоданных в единую геоинформационную среду и их анализ. Описана разработанная база данных, содержащая перечень объектов одного типа – месторождений нефти, имеющих одинаковый набор свойств.

Структура базы данных реализована в виде многоуровневой системы, включающей три уровня – 1.0, 2.0, 3.0 (Рисунок 3). Уровень 1.0 содержит российские и мировые месторождения с запасами >1000 млн т нефти (44 объекта); уровень 2.0 – месторождения России с запасами 100–1000 млн т (36 объектов); уровень 3.0 – месторождения России с запасами 30–100 млн т (18 объектов).

Общее число объектов составляет 98 и включает в себя уникальные и крупные (согласно приложению Приказа Министерства природных ресурсов Российской Федерации) месторождения нефти, поиск и ввод в эксплуатацию которых пришлось на 20 и 21 вв.

Для формирования верифицированной базы данных был проведен комплексный анализ более чем 600 открытых специализированных российских и зарубежных источников, ввиду чего БД оснащена хорошо описанными метаданными, а также библиографическим справочником для проверки подлинности, выявления происхождения и оценки качества данных для оптимизации повторного использования данных. Предварительный анализ перечня верифицированных источников позволил составить

характеристики месторождения на определенный момент времени и позволяют отслеживать изменение параметров, выявлять тренды и закономерности: *методы добычи, технологии добычи, технологические особенности, дебит скважин, дополнительная информация, ключевые слова*. Изменения динамических параметров проводятся с интервалом в 1 год (либо с бóльшим интервалом при отсутствии данных) при этом статические параметры остаются неизменными.

Представленные в разработанной БД данные по крупнейшим месторождениям были оформлены в виде атрибутивных таблиц БД созданного ГИС-проекта в среде NextGIS. Использование геоинформационной системы NextGIS QGIS для создания ГИС-проекта в целях визуализации созданной БД позволило представить все объекты – крупнейшие месторождения нефти – в виде единой карты с возможностью выбора различных карт-подложек (базовых карт), а также обеспечить пользователю возможность проведения анализа данных с помощью пространственных алгоритмических инструментов (Рисунок 4).

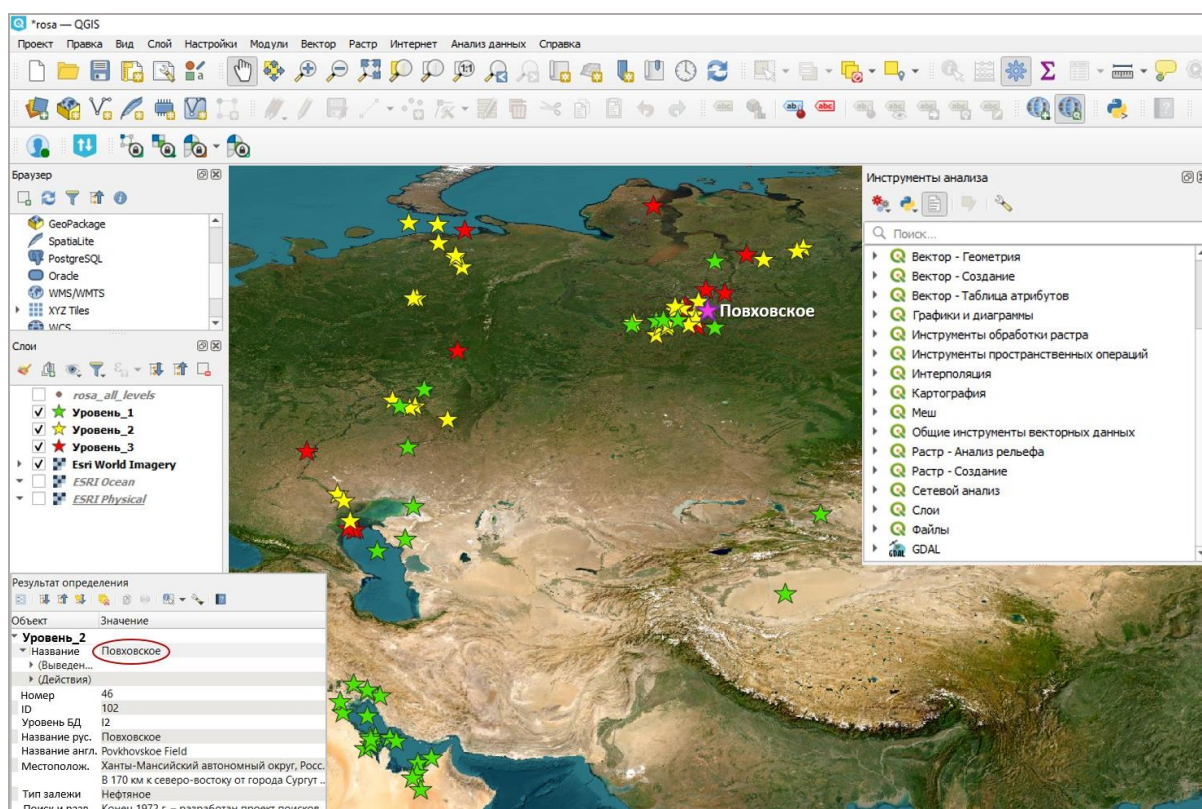


Рисунок 4 – Страница ГИС-проекта в среде NextGIS QGIS на примере Повховского месторождения

Для обработки и сортировки данных по крупнейшим месторождениям согласно требуемым параметрам применялись встроенные методы пакета программного обеспечения NextGIS QGIS, представленные в панели инструментов.

Созданный ГИС-проект по крупнейшим месторождениям нефти обеспечивает:

- улучшение восприятия информации – визуализация позволяет наглядно представить гетерогенные пространственные данные по каждому месторождению, что облегчает их понимание и интерпретацию;
- обнаружение закономерностей и взаимосвязей – графическое представление месторождений в пространстве и времени помогает выявить тенденции, связи и отклонения в данных, которые трудно заметить при работе с табличными или текстовыми форматами;
- повышение возможностей анализа – визуальные инструменты позволяют удобнее и эффективнее оценивать геоданные, что ускоряет процесс работы с ними;
- интеграция данных из разных источников в единой среде – возможность объединения разнородных данных (текстовые, числовые, графические) для комплексного анализа и пр.

Таким образом, разработанное геоинформационное обеспечение – база данных и ГИС-проект – создает основу для последующих практических действий, направленных на выявление закономерностей формирования уникальных нефтяных объектов.

На последующем этапе была выполнена апробация разработанного научно-методического подхода на основе систематизации крупнейших нефтяных месторождений и созданного ГИС-проекта с целью формирования единого критериального пространства для сравнительной оценки нефтегазоносных провинций. В основу положен экспертный подход к расчету интегральных показателей, отражающих условия освоения, ресурсный потенциал и относительную капиталоемкость разработки, с последующим формированием сводного рейтинга перспективности НПП.

Оценка перспективности освоения НПП рассматривается как многокритериальная задача, решаемая в условиях высокой неопределенности геологической информации. Для снижения влияния субъективных факторов использован экспертно-аналитический подход с формализацией частных критериев и их интеграцией в ГИС. В качестве пространственно-нормированного экономического индикатора применен относительный показатель $CAPEX_{rel}$, отражающий соотношение капитальных затрат на освоение и масштаба развития НПП:

$$CAPEX_{rel} = (D_{norm} + \rho_{norm}) / 2,$$

где D_{norm} – нормированная глубина залегания, м; ρ_{norm} – нормированная плотность нефти, кг/м³.

Его использование позволяет учитывать экономическую составляющую без привлечения конфиденциальных стоимостных данных. Интегральная оценка эффективности НПП выполнена на основе моделей полной эффективности, агрегирующих разнородные показатели в единый индекс пригодности (Таблица 1). Совместный анализ интегральных показателей и $CAPEX_{rel}$ позволил сформировать типовые сценарии

стратегического развития НГП и сгруппировать их по уровню технологичности условий освоения и инвестиционной привлекательности.

На Рисунке 5 представлено ранжирование нефтегазоносных провинций по параметру $CAPEX_{rel}$ на освоение соответствующих им крупнейших месторождений.

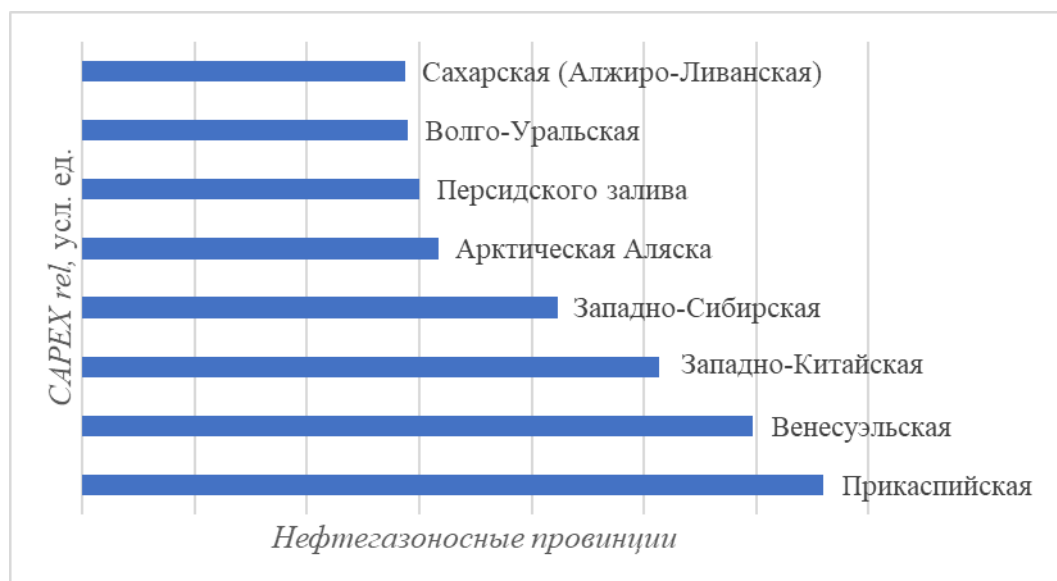


Рисунок 5 – Ранжирование нефтегазоносных провинций по среднему уровню капитальных затрат $CAPEX_{rel}$

Минимальные значения $CAPEX_{rel}$ характерны для Волго-Уральской, Сахарской и провинции Персидского залива, что свидетельствует о высокой инвестиционной привлекательности данных регионов и целесообразности их первоочередного вовлечения в разработку. Провинции Западной Сибири и Арктической Аляски занимают промежуточное положение, что обусловлено сочетанием значительных запасов углеводородов и повышенных инфраструктурных и климатических затрат. Максимальные значения $CAPEX_{rel}$ характерны для Венесуэльской и Прикаспийской провинций, требующих селективного подхода к инвестированию, что согласуется с опубликованными оценками их высокой капиталоемкости и технологической сложности разработки.

Таблица 1 – Рейтинговая оценка месторождений крупнейших НГП по ключевым характеристикам
(с рассчитанным $CAPEX_{rel}$)

НГП	Месторождение	Преобладающий коллектор и возраст	Пористость коллектора, %	Проницаемость коллектора, мД	Плотность нефти, кг/м ³	Вязкость, сР	Глубина залегания, м	Пластовое давление, МПа	Температура, °С	Площадь залежи, км ²	Тип ловушки, структура ловушки	Технологические особенности	Климатические особенности	Оценка ¹ (рейтинг) в баллах	Индекс пригодности месторождения (I), баллы	$CAPEX_{rel}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Западно-Сибирская	Самотлорское	Песчаники и алевролиты, J–K	20–25	~500	850	Низкая	1600–2500	20	~70–90	2500–3000	Антиклинальная складка	Поддержание пластового давления (ППД), газлифт, инфраструктура	Резко континентальный	8,9,7,7,8,8,7,7,7,8	76	30
	Федоровское	Песчаники и алевролиты, J	15–25	10–100	860–910	1–5	1888–3188	20	~70–90	~1900	Брахиантикалиная	Глубокие скважины, ППД	Резко континентальный	7,8,7,7,8,8,7,7,7,7	73	38
	Приобское	Терригенные песчаники, J–K	5–20	0,03–15	Легкая	Низкая	3000–4000	23,5–25	~70–80	5466	Комбинированная антиклиналь	Газлифт, насосы, закачка воды	Субарктический	6,6,7,7,8,8,6,6,6,7	67	59
Волго-Уральская	Ромашкинское	Песчаники, D–C	~19	~375	800–820	5–20	1600–1800	20–30	60–80	4200	Структурная антиклиналь	Водонагнетание, оптимизация скважин	Умеренно континентальный	7,8,7,7,8,7,7,7,7,8	73	28
	Арланское	Песчаники, P–C	~10–18	10–100	840–894	~30	1500–2500	15–30	60–80	1320	Структурная антиклиналь	Водонагнетание, сепарация	Умеренно континентальный	6,7,7,7,7,7,7,6,6,7	67	32
	Туймазинское	Песчаники	15–25	10–100	890	10–30	1000–1700	15–30	30–50	800	Антиклинальная	Законтурное	Умеренно континентальный	7,7,7,7,7,7,7,6,6,7	68	27

¹ В столбце 14 суммируются **параметры**, которые экспертно оценивались: 1. Пористость коллектора, 2. Проницаемость коллектора, 3. Плотность нефти, 4. Вязкость нефти, 5. Глубина залегания, 6. Пластовое давление, 7. Температура, 8. Площадь залежи, 9. Тип ловушки / структура, 10. Технологические особенности

		карбонаты, D–C									сводовая	комбинированное заводнение, управление обводнением	тальный	7		
Персидского залива	Гавар	Карбонаты, J	Высокая	Высокая	Легкая	Низкая	1500–3000	51,7	80–120	8400	Структурная антиклиналь	Водонагнетание	Пустынный, субтропический	9,9,9,9,9,9,9,9,9	90	31
	Большой Бурган	Флювиальные песчаники, K–J	25–30	500–3000	857–872	Средняя	1100–2600	Высокое	70–90	1000	Антиклинальная	Водонагнетание	Пустынный	8,9,8,8,8,8,8,8,8	81	32
	Сафания	Песчаники мелководно-морские, K	22,8–33,5	14–9700	880–890	6–8	1200–2100	Высокое	60–90	750	Структурная антиклиналь	Водонагнетание	Морской, аридный	8,9,8,8,9,8,8,8,8,8	82	27
Арктической Аляски	Прадхобэй	Сланцевидные и песчаниковые, J	14–27	<5–100	850–880	0,8	2400–2700	30–31	85–115	865	Структурная антиклиналь	Водонагнетание	Арктический, мерзлота	8,7,7,7,7,7,8,8,8,7	74	42
	Купарук-Ривер	Мелководные шельфовые песчаники, K	Средняя	Умеренная	882	4–6	1830–2130	25	22	520	Структурно-стратиграфическая	Вторичные методы	Арктический	7,7,7,7,7,7,7,7,7,7	70	36
	Алпайн	Песчаники, J	15–23	1–160	874–848	Низкая	900–1200	20–25	60–65	14	Локальная антиклиналь	Вторичные методы	Арктический	6,6,6,6,6,6,6,6,6,6	60	17
Венесуэльская	Бояка	Песчаники, N	25–35	Очень высокая	950–1020	Очень высокая	200–1000	5–10	40–55	10000–12000	Пластово-линзовидная	Термические методы, апгрейдинг	Тропический	8,8,8,8,8,8,8,8,8,8	80	66
	Боливар	Песчаники, миоцен-плиоцен	30–40	1000–8000	860–920	5–20	600–1500	12–18	50–65	1500–2000	Многорярусная	ППД, вторичная добыча	Тропический	8,8,8,8,8,8,8,8,8,8	80	52
	Эль-Фурриал	Песчаники, N	Средняя	Умеренная	840–880	Низкая	3000–5000	35–50	90–120	500–700	Антиклинальная, многорярусная	Газосбор, вторичная добыча	Тропический влажный	7,7,7,7,7,7,7,7,7,7	70	61
Сахарская	Хасси-Мессауд	Песчаники, D–J	Высокая	Высокая	870–880	10–12	600–1500	15–20	50–60	2000	Многорярусная антиклин	Заводнение, ППД	Жаркий, засушливый	8,8,8,8,8,8,8,8,8,8	80	31

(Алжир-Ливанская)	Серир	Песчаники, К	Высокая	Высокая	850–870	Низкая	1300–1800	18–25	55–65	10000–12000	Антиклинальная протяженная	Заводнение, ППД	Жаркий, песчаные бури	8,8,8,8,8,8,8,8,8	80	33
	Шарара	Песчаники, PZ	12–20	Высокая	Легкая и средняя	1–5	1200–2000	15–25	60–90	200–300	Антиклинальная	Заводнение, ППД	Экстремально жаркий и сухой	7,7,7,7,7,7,7,7,7	70	22
Прикаспийская	Тенгиз	Карбонаты, D	6,3	10	789	2,1	3800–5400	82	100–120	365	Брахиангилиная	Многослойное бурение, горизонтальные скважины, реинжекция газа	Континентальный	7,7,7,7,7,7,7,7,7	70	91
	Кашаган	Карбонаты, D–C	0,1–10,8	Низкая	Легкая	Низкая	4200	86	80	1360	Структурно-стратиграфическая	Высокое давление, сложные платформы	Резко континентальный	6,6,6,6,6,6,6,6,6	60	61
	Карачаганак	Карбонаты, D–P	9,7–11,7	≈15	810–888	Умеренно-низкая	2000–4000	55–60	70–95	65	Массивная карбонатная антиклиналь	Реинжекция газа, управление давлением	Сухой климат	6,6,6,6,6,6,6,6,6	60	46
Западно-Китайская	Тахэ	Карбонаты, D–C	Низкая	Трещиноватость	Средняя	Маловязкая	2000–3500	18,8–36,2	80–120	1200–1500	Антиклиналь	Гидроразрыв, сложное бурение	Резко континентальный пустынный	6,6,6,6,6,6,6,6,6	60	38
	Карамай	Песчаники и карбонаты, D–T	Средняя	Высокая	Средняя и тяжелая	Высокая вязкость	800–1200	10–12	40–50	400–600	Антиклинальные залежи	Водонагнетание, вторичные методы	Континентальный пустынный	6,6,6,6,6,6,6,6,6	60	16
	Тажонг	Плотные карбонаты, D ₁ –D ₂	Низкая	Низкая	Средняя	Умеренная вязкость	4000–6000	70–120	120–160	1000–1300	Антиклинальные поднятия	Сверхглубокое бурение, вторичное извлечение	Пустынный аридный	5,5,5,5,5,5,5,5,5	50	100

Четвертая глава описывает разработку сервисного сопровождения геопространственного анализа. Одним из его компонентов является веб-сервис, который представляет собой функциональный инструмент для наглядной визуализации объектов специализированной базы данных крупнейших нефтяных месторождений и их атрибутивных характеристик, а также обеспечивает интерактивный анализ пространственно-распределенных данных. Веб-сервис предоставляет пользователям возможность работы с картографическими слоями, таблицами и графическими материалами, что позволяет выявлять пространственные взаимосвязи между объектами и формировать аналитические выводы.

В качестве технологической основы использована геоинформационная платформа NextGIS, обеспечивающая управление геопространственными данными, онлайн-картографирование и пространственный анализ. Интеграция настольного приложения NextGIS QGIS с веб-платформой NextGIS Web реализована посредством модуля NextGIS Connect, что позволило автоматизировать публикацию данных, их синхронизацию и обновление.

Разработка веб-сервиса включала формирование и структурирование статических и динамических данных по крупнейшим нефтяным месторождениям, их геопространственную привязку, создание единой системы визуального оформления, подготовку метаданных и публикацию тематических слоев в онлайн-среде. Реализованный функционал обеспечивает выбор и фильтрацию слоев, просмотр атрибутивной информации, текстовый и пространственный поиск, измерительные операции, одновременное отображение нескольких слоев, а также экспорт данных в распространенных геоформатах с учетом прав доступа пользователей.

Разработанный веб-сервис (Рисунок 6) обеспечивает удаленный доступ к результатам геопространственного анализа и формирует единую информационно-аналитическую среду для сравнительного изучения крупнейших нефтяных месторождений. Его применение повышает наглядность интерпретации данных, расширяет возможности пространственного анализа и поддерживает принятие аналитических и стратегических решений в области изучения и освоения нефтегазовых ресурсов. Веб-сервис доступен по адресу <https://geology-gis.gcras.ru/> и предоставляет пользователям возможность работы с картографическими слоями, таблицами и графическими материалами через интернет-браузер, что позволяет выявлять пространственные взаимосвязи между объектами и формировать аналитически обоснованные выводы без установки специализированного программного обеспечения.

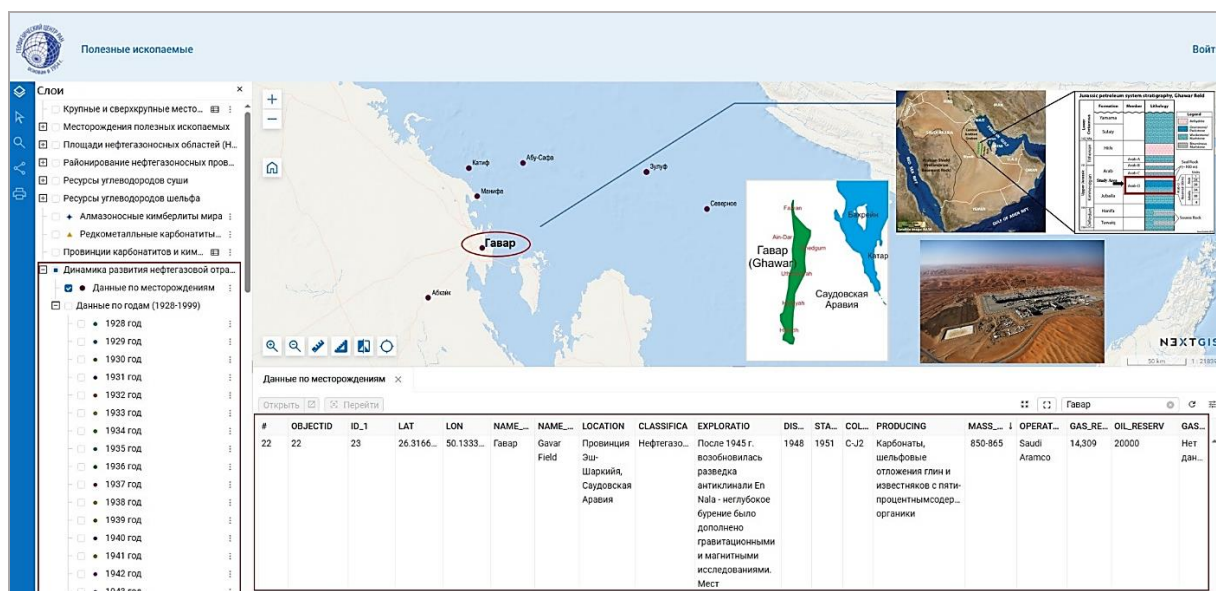


Рисунок 6 – Общий вид веб-сервиса с отображенным месторождением Гавар в среде NextGIS QGIS

На заключительном этапе исследования разработана система визуализации на базе цифрового глобуса ORBUS (Рисунок 7), обеспечивающая наглядное и динамичное представление крупнейших нефтяных месторождений и формирование комплексного представления об их глобальном распределении.

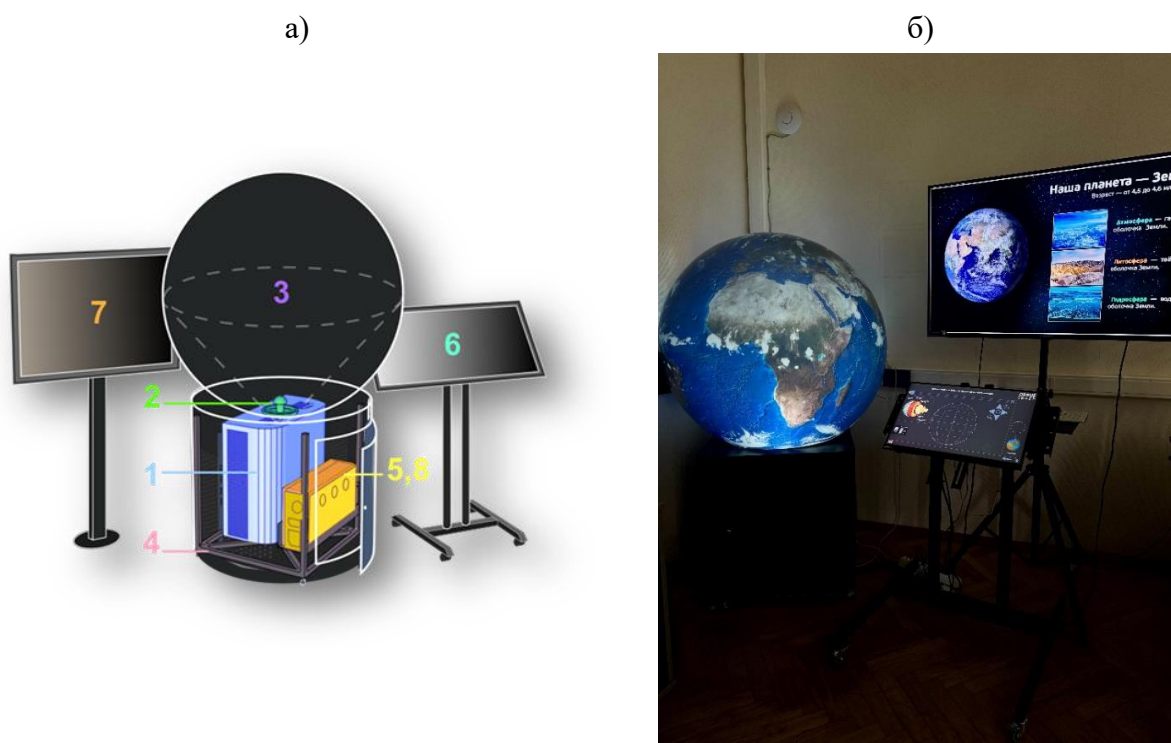


Рисунок 7 – Устройство цифровой демонстрационной системы со сферическим проекционным экраном ORBUS: а) 1 – проектор, 2 – линза, 3 – сферический экран, 4 – постамент, 5 – ПК, 6 – пользовательская touch-панель, 7 – информационный экран, 8 – установленное ПО; б) – внешний вид

В научных исследованиях ГЦ РАН система визуализации ORBUS на основе коллекции данных крупнейших месторождений нефти позволяет систематизировать и анализировать информацию о геологических условиях, характеристиках залежей, технологических параметрах и их ресурсных запасах (Рисунок 8).

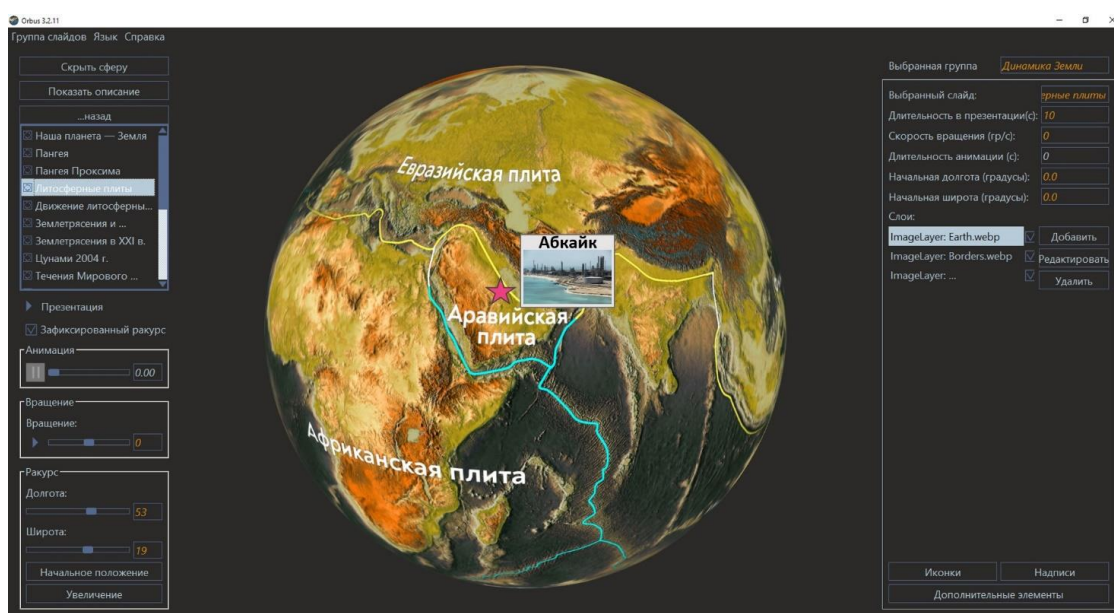


Рисунок 8 – Пример работы ПО ORBUS: визуализация месторождения Абкайк разработанной БД на сферическом проекционном экране

Разработанный аппаратно-программный комплекс, объединяющий в себе систему визуализации со сферическим проекционным экраном и геоинформационное обеспечение (базу данных и ГИС-проект), позволяет анализировать процессы формирования и развития нефтяных месторождений, прогнозировать их потенциал и оценивать перспективы освоения новых участков. Комплексность оснащения геоинформационного обеспечения инструментами визуализации способствует развитию методов геолого-геофизического анализа и обеспечивает высокую скорость и эффективность работы с геопространственными данными.

Интеграция геологических, геофизических, технологических, экономических и экологических данных позволяет формировать системное представление о развитии нефтегазовых объектов и использовать его для стратегического планирования и управления рисками. Открытая архитектура системы способствует внедрению современных аналитических решений и развитию международного обмена данными ввиду открытого доступа к информации посредством специализированного веб-сервиса, оснащенного соответствующим функционалом.

Аппаратно-программные комплексы на базе цифровой системы визуализации со сферическим проекционным экраном апробированы в научных, образовательных и выставочных проектах: они используются в университетах, научных центрах и музеях (Рисунок 9), а также демонстрируются на международных конференциях и отраслевых

выставках, что подтверждает их эффективность как инструмента визуализации научных данных.



Рисунок 9 – Цифровая система визуализации со сферическим проекционным экраном ORBUS на выставке «РОССИЯ-2024»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научная задача разработки и апробации современного геоинформационного обеспечения для пространственного анализа условий локализации и оценки стратегических направлений развития крупнейших нефтяных месторождений в пределах основных нефтегазоносных провинций, что имеет важное народнохозяйственное значение и вносит значительный вклад в развитие методологических основ геоинформатики. Проведённые исследования позволили сформировать единую методологию работы с пространственными данными по нефтяной тематике, включающую систематизацию разрозненной информации, её интеграцию, аналитическую обработку, геоинформационную интерпретацию и визуализацию в интерактивной цифровой среде.

Основные научные и практические результаты работы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ существующего базового научно-методического и программно-аналитического обеспечения геоинформационных технологий и опыта их применения при решении задач поиска и разведки нефтяных месторождений, что позволило выявить основные методические ограничения существующих геоинформационных решений и обосновать необходимость их дальнейшего развития.

2. Исследованы геопространственные закономерности локализации крупнейших нефтегазоносных провинций на основе комплексного анализа геолого-геофизических данных, что послужило основой для формирования систематизации и классификации локализаций крупнейших скоплений углеводородов.

3. Собраны, классифицированы и интегрированы разноформатные и разновременные данные по нефтяным месторождениям крупнейших нефтегазоносных провинций в единую унифицированную ГИС-среду на базе платформы NextGIS QGIS.

4. Произведена рейтинговая оценка перспективности крупнейших нефтяных месторождений на основе показателей технологичности освоения и индекса относительной капиталоемкости (*CAPEXrel*) разработанного методологического подхода для обоснования перспектив их освоения и эксплуатации.

5. Разработан и реализован геоинформационный веб-сервис, обеспечивающий интерактивный доступ к данным, их централизованное хранение, визуализацию, фильтрацию, проведение пространственно-временных исследований и аналитическую обработку без необходимости установки специализированного ПО.

6. Разработаны специализированные программные решения и адаптированы новые данные для цифровой демонстрационной системы ORBUS со сферическим проекционным экраном, обеспечивающей наглядную, интуитивно-понятную и высокоэффективную форму представления информации о крупнейших нефтяных месторождениях и закономерностях их глобального пространственного распределения.

7. Проведена процедура валидации и верификации разработанного геоинформационного обеспечения, предназначенного для выявления базовых закономерностей локализации крупнейших месторождений нефти в пределах нефтегазоносных провинций и повышения эффективности геолого-аналитических исследований для обоснования перспективности и стратегий их освоения и эксплуатации.

8. Полученные результаты позволили создать и внедрить многокомпонентный геоинформационный комплекс, включающий специализированную базу данных, ГИС-проект, веб-сервис и цифровую систему визуализации со сферическим проекционным экраном. Разработанный комплекс является современным инструментом для проведения фундаментальных и прикладных исследований, направленных на изучение крупнейших нефтяных месторождений России и мира, который может быть использован в научно-аналитической и образовательной целях.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и входящих в международную систему цитирования Web of Science/SCOPUS, а также получены свидетельства о государственной регистрации баз данных и программ для ЭВМ:

1. **Одинцова А. А.**, Гвишиани А. Д., Рыбкина А. И., Самохина О. О., Астапенкова

А. А., Фирсова Е. Ю. Динамика развития нефтегазовой отрасли в 20 веке на примере крупнейших месторождений мира: ГИС-проект и Веб-сервис (Часть I) // Геоинформатика. 2017. № 4. С. 2–6.

2. **Odintsova A.**, Gvishiani A., Nakicenovic N., Rybkina A., Busch S., Nikolova J. The world's largest oil and gas hydrocarbon deposits: ROSA database and GIS project development // Russian Journal of Earth Sciences. 2018. Vol. 18. № 3. P. 1–14.

3. **Одинцова А. А.**, Гвишиани А. Д., Рыбкина А. И., Самохина О. О., Астапенкова А. А., Фирсова Е. Ю. Динамика развития нефтегазовой отрасли в 20 веке на примере крупнейших месторождений мира: ГИС-проект и Веб-сервис (Часть II) // Геоинформатика. 2018. № 1. С. 3–10.

4. Boyarshinov G. S., Popov A. B., **Odintsova A. A.**, Gvozdik S. A., Rybkina A. I., Korolkova A.A. Application of geoportal's web-technologies in GIS, case study: interactive geology atlas // Russian Journal of Earth Sciences. 2022. Vol. 22. № 3. P. 1–9.

5. **Odintsova A.**, Rybkina A., Nikolova J., Korolkova A. GIS Project ROSA: FAIR Principles in the Petroleum Industry // Data Science Journal. 2020. Vol. 19. № 13. P. 1–7.

6. Камаев А. А., Маневич А. И., Татаринов В. Н., **Одинцова А. А.** Геологическое картографирование на основе текстурного анализа матриц совместных вероятностей спутниковых изображений // Геодезия и картография. 2025. № 12. С. 38–45.

7. **Odintsova A. A.**, Tatarinov V. N. An Integrated Approach to Ranking the Development Potential of Petroleum Provinces // Russian Journal of Earth Sciences. 2026. Vol. 26. P. 1–8. ES1009.

8. **Одинцова А. А.**, Рыбкина А. И., Самохина О. О., Астапенкова А. А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620942 «База данных по крупнейшим месторождениям углеводородов «ROSA (РОСА)». Заявитель и правообладатель ФГБУН ГЦ РАН. Дата гос. регистрации № 2017620942 в Реестре баз данных 18.08.2017. Заявка № 2017620394 от 02.05.2017.

9. **Одинцова А. А.**, Рыбкина А. И. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018620639 «База данных по месторождениям углеводородов на территории РФ с запасами 100-1000 млн тонн «ROSA 2.0 (РОСА 2.0)». Заявитель и правообладатель ФГБУН ГЦ РАН. Дата гос. регистрации № 2018620639 в Реестре баз данных 27.04.2018. Заявка № 2018620293 от 12.03.2018.

10. **Одинцова А. А.**, Рыбкина А. И. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018620640 «База данных по месторождениям углеводородов на территории РФ с запасами менее 100 млн тонн «ROSA 3.0 (РОСА 3.0)». Заявитель и правообладатель ФГБУН ГЦ РАН. Дата гос. регистрации № 2018620640 в Реестре баз данных 27.04.2018. Заявка № 2018620294 от 12.03.2018.

11. **Одинцова А. А.**, Николова Ю. И. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621722 «База сферических визуализаций: ROSA 1.0».

Заявитель и правообладатель ФГБУН ГЦ РАН. Дата гос. регистрации № 2019621722 в Реестре баз данных 08.10.2019. Заявка № 2019621628 от 26.09.2019.

12. Пресняков С. В., Бояршинов Г. С., **Одинцова А. А.**, Боровская Т. Е., Дьяков В. В. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022683072 «ORBUS 3.0». Заявитель и правообладатель ФГБУН ГЦ РАН. Дата гос. регистрации № 2022683072 в Реестре 30.11.2022. Заявка № 2022682373 от 22.11.2022.

13. Пресняков С. В., Бояршинов Г. С., **Одинцова А. А.**, Боровская Т. Е., Дьяков В. В. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023669257 «ORBUS 3.1». Заявитель и правообладатель ФГБУН ГЦ РАН. Дата гос. регистрации № 2023669257 в Реестре 12.09.2023. Заявка № 2023667372 от 21.08.2023.