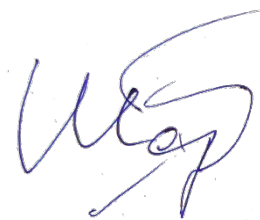


На правах рукописи



ШАРАФУТДИНОВ АЙДАР РАФИСОВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ ТЮМЕНСКОЙ
СВИТЫ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛИТОЛОГО-ФАЦИАЛЬНОГО
АНАЛИЗА И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Специальность 1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и
газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Уфа – 2026

Работа выполнена на кафедре «Геология и разведка нефтяных и газовых месторождений» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Султанов Шамиль Ханифович

Официальные оппоненты: Вахитова Гузель Ринатовна
доктор геолого-минералогических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» / Кафедра цифровых технологий в петрофизике, доцент

Осипов Александр Викторович
кандидат геолого-минералогических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» / Нефтегазовый факультет, декан

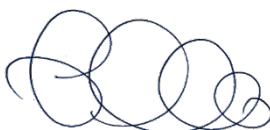
Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Югорский государственный университет» (г. Ханты-Мансийск)

Защита диссертации состоится «16» июня 2026 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.428.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте <http://www.rusoil.net>.

Автореферат диссертации разослан «__»_____2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Махмутов Алмаз Аксанович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Исследование причин формирования зон со слабой выработкой запасов нефти является актуальным вопросом для месторождений на завершающей стадии разработки. Освоение остаточных запасов нефти требует детального геологического обоснования применения различных подходов и методов, направленных на их извлечение. Ключевыми факторами, влияющими на выработку запасов нефти, являются области замещения коллектора непроницаемыми породами, неоднородное распределение и высокие показатели вариации коллекторских свойств отложений как по площади, так и по разрезу нефтегазовой залежи.

В условиях большого объема геолого-геофизических и геолого-промысловых данных и наращивания мощности вычислительной техники, более актуальной является детализация геолого-гидродинамических моделей продуктивных пластов, построение которых является трудоемкой задачей.

Наибольшее влияние на геологическое строение оказывает распределение коллекторских свойств пород, в основном формируемых литолого-фациальными условиями образования отложений и тектоническими особенностями развития исследуемого района.

Учет литолого-фациальных особенностей может значительно снизить риски неэффективной разработки. Комплексный подход к изучению литолого-фациальных характеристик, включающий интеграцию геологических, геофизических и промысловых данных, позволяет создать более достоверные модели нефтяных резервуаров и оптимизировать процессы их разработки.

В качестве объекта исследований выбран регион в западной части Западно-Сибирской нефтегазоносной мегапровинции, включающий 6 месторождений Приуральской нефтегазоносной области. Сложный генезис продуктивных пластов в разрезе обусловил формирование ловушек пластового и пластово-сводового типа с элементами литологического, стратиграфического и тектонического экранирования. Продуктивные юрско-нижнемеловые отложения имеют различный генезис и приурочены как к континентальным, так и к морским обстановкам осадконакопления. Высокая послойная и площадная неоднородность пропластков коллектора значительно осложняет выработку запасов нефти. Так как состав отложений контролируется особенностями условий осадконакопления, литолого-фациальный анализ продуктивных толщ месторождений дает возможность получить представление о причинах образования зон с остаточными запасами нефти.

Современные методы математического моделирования и геостатистического анализа становятся всё более актуальными для оценки литолого-фациальных характеристик. Эти

инструменты позволяют не только визуализировать сложные геологические структуры, но и прогнозировать поведение флюидов в резервуарах при различных геологических условиях.

Полученные литолого-фациальные особенности отложений оказывают влияние на выбор системы и технологий разработки месторождений углеводородов. Например, в случае выделения резервуаров с высокой послойной анизотропией свойств коллектора, где вариация коэффициента пористости и проницаемости быстро изменяется по площади и разрезу, применяется гидравлический разрыв пласта, потокоотклоняющие технологии и нестационарное заводнение. Геолого-технические мероприятия адаптируются с учетом особенностей литологического строения и фациальной структуры территории, что позволяет добиться вовлечения в разработку ранее не дренируемых запасов нефти.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Содержание диссертационной работы в области исследования соответствуют паспорту научной специальности ВАК 1.6.11. «Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», а именно: п.1. «Условия образования месторождений нефти и газа – геология нефтяных и газовых месторождений, типы месторождений, их классификация»; п.4. «Совершенствование методов геологического моделирования залежей и месторождений нефти и газа».

Степень разработанности темы. Большое внимание изучению особенностей геологического строения, корреляции отложений, а также проведению палеогеографических реконструкций восточной части Западной Сибири уделили такие ученые и производственники как: В.П. Алексеев, О.Э. Амон, В.С. Бочкарев, Ю.В. Брадучан, Е.А. Гайдебурова, Л.А. Глинских, В.П. Девятков, В.Г. Елисеев, О.В. Елишева, О.В. Золотова, В.И. Ильина, В.А. Казаненков, В.А. Конторович, Т.Г. Ксенева, Д.П. Куликов, М.А. Левчук, В.А. Маринов, А.Г. Мухер, Г.П. Мясникова, А.А. Нежданов, И.И. Нестеров, Е.А. Предтеченская, С.В. Рыжкова, З.Я. Сердюк, Л.В. Смирнов, А.Ф. Фрадкина, Г.Г. Шемин, А.В. Шпильман, Б.Н. Шурыгин, И.В. Князева и др. Изучением вопросов доизвлечения остаточной нефти на исследуемых месторождениях рассматривались и обсуждались в работах: Ф.Г. Гурари, В.Е. Андреева, Ю.А. Котенёва, О.А. Залевского, В.Л. Свечникова, Б.М. Орлинского, Г.Х. Файзуллина, С.Б. Шишлова, Ф.Р. Губаева, Р.Х. Гильмановой, А.В. Стенькина и др.

Целью диссертационной работы является обоснование выделения особенностей условий осадконакопления отложений терригенных пластов тюменской свиты на основе проведения комплексного литолого-фациального анализа с применением методов машинного обучения.

Задачи исследования:

1. Выполнить детальный анализ геологических особенностей отложений, в том числе региональных условий осадконакопления продуктивных толщ, определяющих сложное

геологическое строение и пространственное распределение остаточных запасов нефти залежей центральной части Приуральской нефтегазоносной области.

2. Формирование комплексной модели условий осадконакопления отложений тюменской свиты центральной части Приуральской нефтегазоносной области.

3. Обзор, обобщение и анализ применения методов машинного обучения для решения задач нефтегазовой геологии. Подбор эффективных моделей машинного обучения для оценки зон распространения литолого-фациальных неоднородностей продуктивных отложений.

4. Разработка алгоритма автоматизированного выделения литолого-фациальных тел в разрезе скважин на основе данных геофизических исследований.

5. Изучение влияния литолого-фациальных особенностей отложений тюменской свиты на распределение коллекторских свойств отложений и выработку запасов нефти.

Объект исследования

Объектом исследования являются терригенные отложения тюменской свиты центральной части Приуральской нефтегазоносной области.

Предмет исследования

Предметом исследования являются особенности условий осадконакопления продуктивных отложений, а также математические алгоритмы машинного обучения, направленные на решение задачи классификации разреза по литолого-фациальным зонам.

Научная новизна диссертации

1. Впервые создана детальная модель условий осадконакопления отложений тюменской свиты центральной части Приуральской нефтегазоносной области, основанная на результатах интерпретации описания кернового материала, данных сейсморазведочных работ и геофизических исследований скважин, а также учитывающая сложное распределение тел коллекторов и анизотропию фильтрационно-емкостных свойств.

2. Установлены закономерности распределения геолого-физических свойств нефтегазоносных толщ, а именно электрических и радиоактивных, определяющие модели машинного обучения с целью выделения фациальных особенностей отложений.

3. Обоснованы оптимальные параметры моделей машинного обучения, обеспечивающие достоверный результат классификации терригенных отложений тюменской свиты по данным геофизических исследований скважин.

Теоретическая значимость работы:

1. Обобщены исследования, посвященные влиянию особенностей осадконакопления на коллекторские характеристики залежей и их нефтегазоносность, а также представлены выводы, полученные при формировании концептуальной палеогеографической модели изучаемой территории.

2. Предложена методика выделения литолого-фациальных тел на основе анализа данных описания керна, геофизических исследований скважин и результатов интерпретации сейсморазведочных работ с применением методик машинного обучения.

Практическая значимость работы:

1. Созданы геолого-гидродинамические модели месторождений центральной части Приуральской нефтегазоносной области, учитывающие условия осадконакопления отложений.

2. Установлено, что распределение фациальных зон оказывает существенное влияние на выработку запасов нефти месторождений центральной части Приуральской нефтегазоносной области

3. Результаты выполненных исследований легли в основу рекомендаций по совершенствованию системы разработки и выработки запасов нефти шести месторождений: Новомостовского, Яхлинского, Потанай-Картопьянского, Лазаревского, Ловинского и Пайтыхского.

4. Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе при подготовке студентов ФГБОУ ВО «УГНТУ» специальностей: 21.05.02 – «Прикладная геология» специализация «Геология нефти и газа»; 05.03.01 – «Геология» специализация «Геология», «Нефтегазовая геология и геофизика»; 21.05.03 – «Технология геологической разведки» специализация «Геофизические методы исследования скважин».

Методология и методы научного исследования

Решение поставленных задач выполнено путем создания, систематизации и анализа базы данных геологической, геолого-геофизической и геолого-промысловой информации. Обработка массивов данных и их изучение выполнены методами математического моделирования и статистики. Формирование моделей машинного обучения и алгоритмов для работы с базами данных проводилось в программном комплексе для работы с языком программирования Python 3.12, построение геолого-гидродинамических и фациальных моделей выполнено в специализированных программных комплексах tNavigator, IRAP RMS. Формирование детальной литолого-фациальной модели проводилось на основе общепринятых методов фациального анализа, включающих изучение кернового материала, построение электрометрических моделей осадконакопления, а также интерпретацию данных сейсморазведочных работ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Особенности условий осадконакопления отложений тюменской свиты центральной части Приуральской нефтегазоносной области, выделенные на основе комплексного анализа данных описания кернового материала, геофизических исследований скважин, а также результатов интерпретации сейсморазведочных работ.

2. Алгоритмы машинного обучения, позволяющие выделить фациальные особенности отложений в разрезах скважин на основе комплексного применения данных проведенных в них геофизических исследований.

Степень достоверности и апробации результатов

Достоверность научных результатов диссертационной работы и рекомендаций обоснована применением актуальных, общепризнанных методов обработки первичных геологических и геолого-геофизических данных, а также статистического и математического анализа геолого-геофизических данных. В процессе исследования учтены результаты предыдущих научных исследований, выполненных другими специалистами в данной области, которые подтверждают выводы, полученные в ходе проведенных исследований. Достоверность полученных геологических моделей согласуется с общими представлениями о геологическом развитии исследуемой нефтегазоносной области и обосновывается сходимостью результатов интерпретации геолого-геофизических данных, полученных разными методами.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 73-й, 74-й, 75-й Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ, г. Уфа – 2022-2024 гг.; на Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, УГНТУ в г. Октябрьском, 2022 г.; на VI, VII Международной молодежной научной конференции г. Казань – 2022-2024 гг.; на XVI, XVII Международной научно-практической конференции молодых ученых Актуальные проблемы науки и техники, г.Уфа – 2023-2024 гг.; на Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию горно-нефтяного факультета УГНТУ и 100-летию ученого Спивака Александра Ивановича. УГНТУ, г. Уфа – 2023 г.; на 1 и 2 Международной научно-практической конференции «Освоение углеводородного потенциала – зелёные технологии», г. Уфа – 2024-2025 гг.; на Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых запасов тяжелых нефтей», г. Ухта – 2024 г., а также на научно-технических совещаниях в ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь» территориально-производственном предприятии «Урайнефтегаз».

Публикации по теме диссертации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 35 научных трудах, в том числе 3 – в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 2 публикации РИД – программы для ЭВМ, 3 публикации – в издании, входящем в международную реферативную базу Scopus.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников из 105 наименований. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков, 6 таблиц, 1 приложение.

Автор благодарит профессора Котенёва Юрия Алексеевича, а также геологическую службу территориально-производственного предприятия «Урайнефтегаз» ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь» за консультации, замечания и рекомендации по проводимым исследованиям, позволившие сформировать научную идею.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации программы развития НЦМУ по соглашению № 075-15-2022-297.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследований, определены цели, основные задачи и защищаемые положения диссертационной работы, сформулирована научная новизна и приведена практическая значимость полученных результатов работы.

В **первой главе** диссертации обобщены научные исследования, направленные на изучение геологического строения ряда месторождений, приуроченных к центральной части Приуральской нефтегазоносной области (НГО), литолого-фациальных особенностей тюменских отложений и их влияния на выработку запасов нефти, а также применения методов машинного обучения для решения задач нефтегазопромысловой геологии.

Изучаемая территория (Рисунок 1) характеризуется сложным геологическим строением. Залежи структурные с тектоническим и литологическим экранированием, нижняя часть разреза выклинивается о поверхность фундамента. Кроме того, пропластки коллекторов характеризуются высокой степенью анизотропии фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) по площади и разрезу.

Приуроченность территории в структурно-тектоническом плане к северной части Шаимского мегавала, Шеркалинской мегавпадине и Яхлинской мегаседловине обусловила формирование нескольких типов продуктивного юрско-нижнемелового разреза.

Палеогеографические обстановки осадконакопления формируют особенности литологического состава отложений. Исходя из литологических и структурно-текстурных особенностей, а также характера распространения по площади интервал тюменской свиты разделен на три подсвиты:

1. Нижняя подсвита (Вымский горизонт, пласты Ю₇₋₉) Осадконакопление характеризуется развитием континентальных обстановок в условиях аллювиальных аккумулятивных равнин.

2. Средняя подсвита (Леонтьевский горизонт, пласты Ю₅₋₆) имеет широкое распространение по площади. Условия формирования отложений также отнесены к континентальным.

Верхняя подсвита (Малышевский горизонт, пласты Ю₂₋₄) характеризуется сменой фациальных обстановок. За счет ингрессии бассейна, формируются переходные обстановки прибрежно-морской равнины, постепенно сменяющиеся на условия открытого бассейна. Территории, приуроченные к сводовой части Шаимского мегавала, характеризуются сохранением континентальных обстановок осадконакопления.

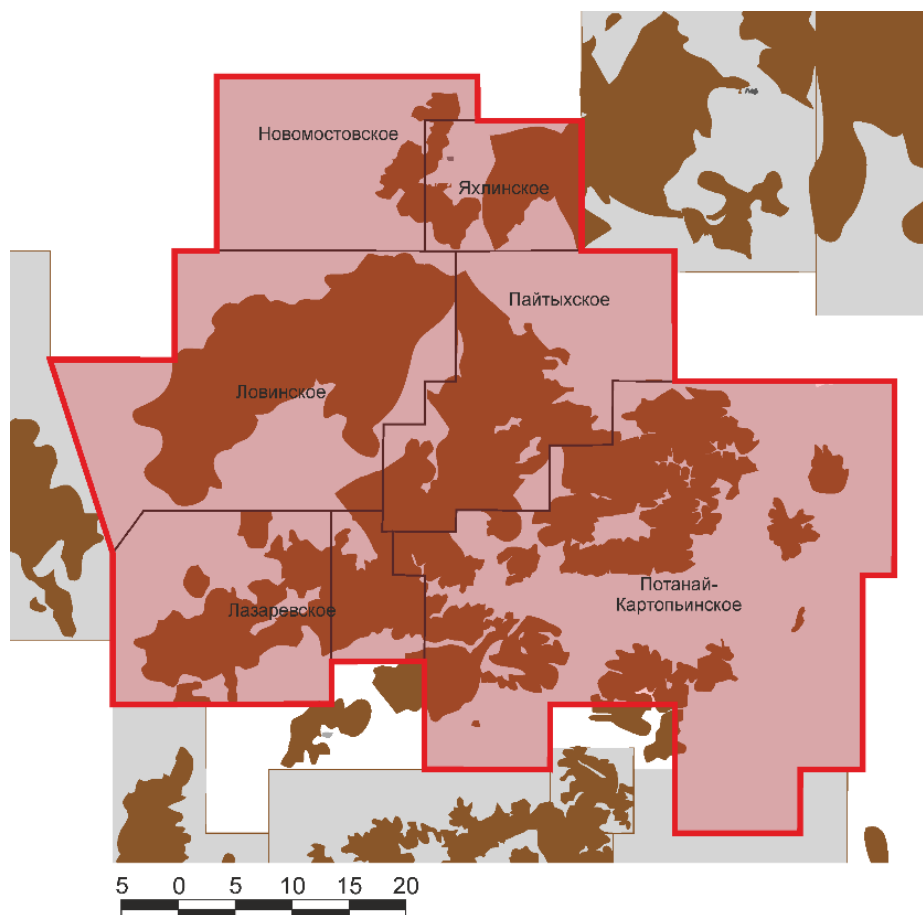


Рисунок 1 – Карта-схема исследуемого района

Современные исследования показывают, что учет литолого-фациальных особенностей может значительно снизить риски неэффективной разработки. Комплексный подход к изучению литолого-фациальных характеристик, включающий интеграцию геологических, геофизических и промысловых данных, позволяет создать более достоверные модели нефтяных резервуаров и оптимизировать процессы их разработки. Вклад в развитие вопроса внесли А.М. Казаков, Л.Б. Рухин, А. Э. Конторович, В. А. Конторович, В.С. Бочкарев, А.А. Бакиров, И.И. Нестеров, А.В. Шпильман, Ф. Шеппард, В. Эдельгардт, К. Эдельман, В.Крумбейн, Л. Слосс, П. Вейл, И.М. Губкин, В.Е. Хаин, Н.М. Страхов, Н.С. Шатский, В.В. Белоусов, Н.Б. Вассоевич,

Л.В. Пустовалов, А. Гребо, П. Дафф, А. Халлам, Х.Уолтон, Г. Миллер, М.С. Швецов, Д.В. Наливкин и др.

Параллельно с этим, инструменты машинного обучения находят применение в анализе больших объемов геологических данных. Эти методы способны выделить скрытые закономерности и предсказывать литолого-фациальные характеристики на основании имеющихся данных, что может существенно ускорить процесс геолого-разведочных работ и эксплуатации месторождений углеводородов. Многие авторы проводили внедрение методов автоматизации анализа сложных по структуре данных, интерпретации каротажных диаграмм, классификации пород, определения литологических и коллекторских свойств продуктивных отложений. Среди перечня работ можно отметить труды следующих авторов: Д.В. Костикова, В.А. Судакова, Р.И. Сафуанова, А.Н. Козлова, И.Р. Мавлялова, Л.Дж. Дрю, Дж.Х. Довентона, Л.У. Лейка, А.К. Джона, Л.Ф. Анифоуоса, Ф. Ли, Дж. Чена, Дж. Чана, Х. Ли, Б. Холла и др.

Нейросетевые модели активно применяются в интерпретации данных сейсморазведочных работ. Специализированные продукты геологического моделирования (Petrel, tNavigator) встроены модули, использующие алгоритмы машинного обучения для проведения инверсии кубов сейсморазведочных работ. Многие авторы – М. Карренбах, Р. Эзенрайтер, К. Рефанджол, И. Леннон, Ф. Аминзаде, К. Росс, А. Кэннинг и др., применяли алгоритмы машинного обучения в улучшении разрешения результатов сейсморазведочных работ, автоматическом выделении в разрезе стратиграфических поверхностей, разрывных нарушений, а также геометризации различных геологических тел и потенциальных нефтегазоносных областей в нетрадиционных коллекторах.

Во **второй главе** приведено методическое обоснование комплексного литолого-фациального анализа продуктивных отложений.

Основной задачей фациального анализа является восстановление физико-географических особенностей среды района исследования в течение определенного времени и установление изменения данных особенностей по площади.

С целью детализации представлений об особенностях условий осадконакопления исследуемой территории сформирована методика проведения комплексного литолого-фациального анализа тюменских отложений:

1. Формирование представлений об общей концепции развития исследуемой территории, путем выделения основных групп фациальных обстановок осадконакопления, основано на анализе результатов исследований кернового материала:

- представления о типе климата обстановок осадконакопления и длительности процесса выветривания пород доюрского фундамента установлены в ходе анализа вещественного состава обломочной части горных пород и минерального состава глинистого цемента.

С целью нахождения закономерностей в изменении вещественного состава пород, связанных с изменением палеогеографических особенностей условий осадконакопления, рассчитаны петрохимические модули, а также проведен анализ минерального состава глинистых отложений. Распределение минералов в глинистом цементе соответствует концепции общей трансгрессии бассейна. Для континентальных обстановок осадконакопления пластов Ю₅₋₆ характерно преобладание каолинита, сформированного при полном протекании процесса выветривания полевых шпатов в области денудации палеозойского фундамента. Возрастание гидрослюдистых минералов в составе цемента в отложениях пластов Ю₂₋₄ связано с поднятием уровня вод бассейна, и снижением периода выветривания полевых шпатов (Рисунок 2);

– на основе распределения фракционного состава отложений проведена оценка изменения гидродинамической активности среды осадконакопления.

Исходя из анализа гранулометрического состава отложений продуктивных пластов месторождений центральной части Приуральской НГО можно сделать следующие выводы о палеогеографических условиях формирования осадочного материала. Постепенное уменьшение доли грубозернистых отложений вверх по продуктивному разрезу отражает трансгрессию Западно-Сибирского бассейна и уменьшение энергии речных систем. Возрастание роли мелкозернистых отложений также характеризует уменьшение гидродинамической активности среды осадконакопления. Песчаные фракции пластов Ю₂₋₃ в большей степени приурочены к областям подвижного прибрежно-морского мелководья (Рисунок 2);

– текстурно-структурные особенности отложений, а также наличие различных включений отражает основные обстановки осадконакопления изучаемого разреза.

Характер слоистости отражает динамику среды переноса и накопления осадка. В застойных обстановках (отдаленные глубоководные области, изолированные заливы, озера) формируются горизонтально слоистые текстуры. В активных средах формируется важная для генетического анализа косая слоистость. Кроме слоистости отложений, высокое значение имеют и различные знаки на поверхности слоев. Исходя из среды и динамики осадконакопления выделяется большое количество текстур поверхности напластования. Для отложений морского генезиса характерны различные знаки водной волновой и ряби течения, следы биотурбации и т.д. Для континентальных отложений выделяются следы корневой системы растений, трещины усыхания, а также следы смятия и взмучивания характерные для заливаемых областей суши.

Анализ текстурных особенностей продуктивных отложений производился на основе данных описания кернового материала, а также по фотографиям керна отдельных скважин, предоставленных специалистами ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь». Большое внимание уделялось информации о наличии косой слоистости, следов взмучивания и перемятия, трещин внедрения и усыхания.

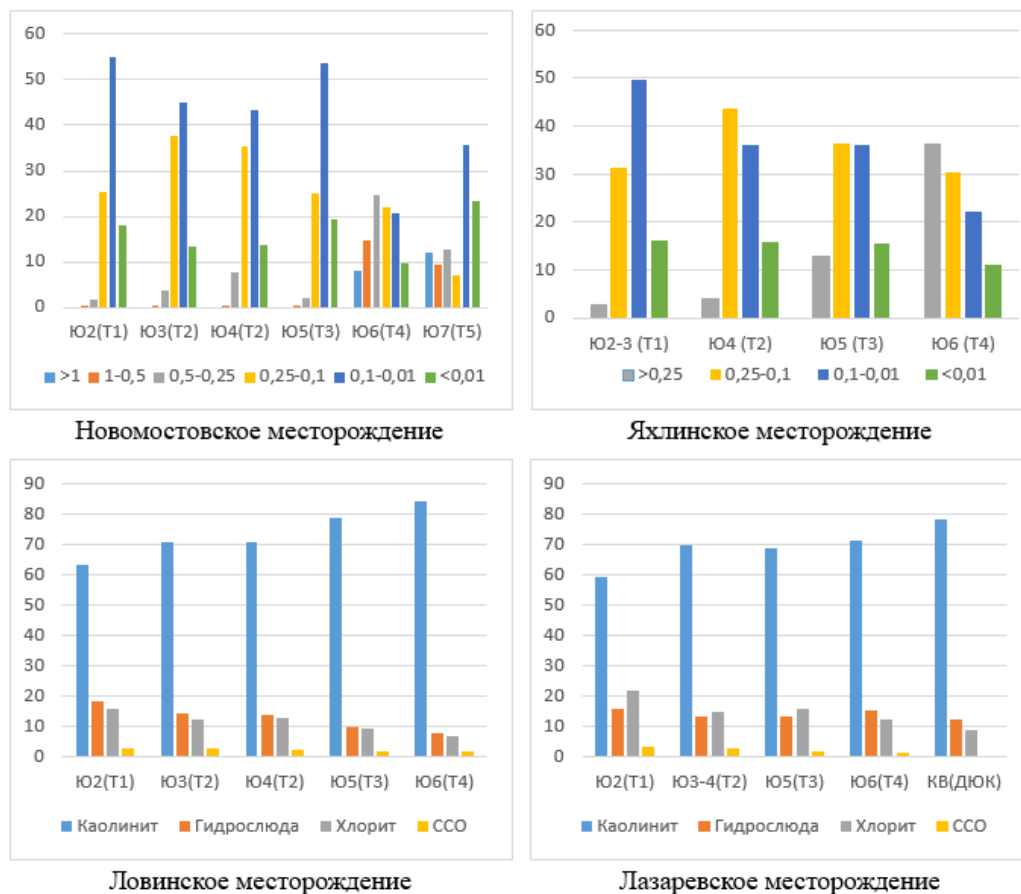


Рисунок 2 – Гистограммы распределения гранулометрического состава отложений (сверху) и минералов глинистого цемента отложений (снизу)

2. Определение физико-географических особенностей осадконакопления для фонда скважин, не охваченных отбором керна, проводилось на основе применения метода электрометрических моделей фаций В.С. Муромцева. Проанализированы данные геофизических исследований скважин (ГИС) по 2091 скважине. Выделенные по данным анализа керна разведочных скважин фациальные обстановки сопоставлены с кривыми каротажей.

По данным литолого-фациального анализа, а также характеристик форм кривых выделены основные группы фациальных обстановок, отвечающие общей концепции развития региона в тюменское время. Для каждой из фациальных групп сформированы эталонные кривые, позволившие провести расчленение разреза всего фонда скважин на интервалы формирования основных фациальных зон.

3. Контроль распределения границ фациальных тел в межскважинном пространстве осуществляется путем анализа карт эффективных толщин продуктивных пластов. На основе анализа распределения показателя, а также сопоставления с выявленными условиями осадконакопления по скважинным данным, сформированы концептуальные литолого-фациальные карты для каждого из продуктивных пластов.

4. Для уточнения распределения условий осадконакопления на границах лицензионных участков или неразбуренных частей месторождений применялся метод спектральной декомпозиции сигнала. Разложение исходного сейсмического куба на частотные компоненты позволяет сформировать представления о распределении различных по плотностным свойствам телам, приуроченным к различным фациальным обстановкам.

На основе анализа полученных атрибутивных кубов сейсморазведочных работ установлены преобладающие спектры сигнала для каждого из продуктивных пластов и детализированы границы выделяемых фациальных тел. Распределение спектров сигнала достоверно коррелируется с полученной ранее литолого-фациальной моделью исследуемой площади.

В **третьей главе** представлены результаты комплексного литолого-фациального анализа терригенных отложений тюменской свиты, на основе которых выявлены закономерности изменения условий осадконакопления исследуемой площади. Генетические особенности отложений, выделенные при анализе макроскопического описания и лабораторных исследований керна, характера кривых ГИС и результатов интерпретации данных сейсморазведочных работ позволили сформировать концептуальную фациальную модель исследуемого объекта.

Распределение фациальных обстановок осадконакопления продуктивных пластов соответствует общему развитию Западно-Сибирского бассейна в юрский период. По разрезу выделяется постепенная смена континентальных групп фаций на переходные и морские. Наступление бассейна на исследуемой территории происходило с северного, северо-западного направления, в сторону осевой части Шаимского мегавала.

Отложения пластов Ю₅₋₆ на рассматриваемых площадях представлены континентальными отложениями аллювиальных долин, основными продуктивными песчанистыми телами которых являются русловые каналы. При залегании аллювиальных тел на фундаменте, на разрезе заметны врезки палеорусел в комплекс доюрских отложений. На полученных кубах сложно выделить отдельные русловые тела, вся область представлена врезающимися друг в друга меандрирующими и сплетенными речными каналами. В интервале отложений пласта Ю₆ большая часть рассматриваемой области характеризуется преобладанием аллювиальных обстановок осадконакопления.

Общее погружение фундамента Западной Сибири и трансгрессия бассейна привели к изменению обстановок осадконакопления. Пласт Ю₅ на большей части территории характеризуется сохранением континентальных условий осадконакопления. Отмечается смена преимущественно континентальных условий на прибрежно-морские в северо-восточной части Яхлинского ЛУ. Кроме того, сокращается площадь распространения аллювиальных отложений и областей выклинивания коллектора, что приводит к выполаживанию рельефа, снижению энергетики русловых систем и общему возрастанию роли застойных обстановок как по площади, так и разрезу исследуемых объектов.

Осадконакопление пласта Ю₄ характеризуется стадией активизации ингрессии бассейна, что привело к смене условий осадконакопления в северо-западной части исследуемой территории. Отложения Новомостовской, Яхлинской, северной части Ловинской и Пайтыхской площадей характеризуются развитием обстановок мелководного бассейна. В центральной части исследуемой территории формируется группа фаций заливаемой прибрежной равнины.

Исходя из анализа кубов спектральной декомпозиции, отложения бассейна распределены относительно равномерно и принимают значения канала средних частот. Прибрежно-морские переходные обстановки приурочены к зонам преобладания высоких частот синего канала. При этом достаточно уверенно выделяется граница континентальных и морских условий осадконакопления.

Кроме того, за счет развития морских обстановок осадконакопления, характеризующихся относительно равномерным распределением алевритисто-глинистых пород (в отличие от изменчивого характера распределения тел аллювиальных отложений), на кубах спектральной декомпозиции верхнего интервала четко прослеживаются линеаменты разрывных нарушений.

Продолжение повышения уровня моря привело к общему уменьшению гидродинамической активности среды осадконакопления в интервалах пластов Ю₂₋₃. Накопление песчаных осадков в северной и центральной части территории сохранилось лишь в приподнятых участках рельефа, на которых сформировалась цепь барьерных островов и баров, протягивающаяся с юго-запада на северо-восток (Ловинская, Яхлинская, Новомостовская площади). В восточной и южной части выделяются дельтовые отложения – область разгрузки речных систем Пайтыхского, Лазаревского и Потанай-Картопынского месторождений, на которых сохранились континентальные условия осадконакопления.

Для пластов Ю₂₋₃ выделяется общая тенденция – морские и переходные отложения характеризуются преобладанием синего и зеленого канала в сигнале, континентальные – синего и красного. На картах и разрезах уверенно выделяется граница между континентальными и переходно-морскими обстановками (Рисунок 3).

Таким образом, в результате комплексного анализа литолого-фациальных обстановок на основе данных описания керна, геофизических исследований скважин и результатов интерпретации сейсморазведочных работ создана концептуальная региональная литолого-фациальная модель ряда месторождений центральной части Приуральской НГО. Установлены основные особенности осадконакопления для продуктивного интервала отложений тюменской свиты, имеющей сложное геологическое строение.

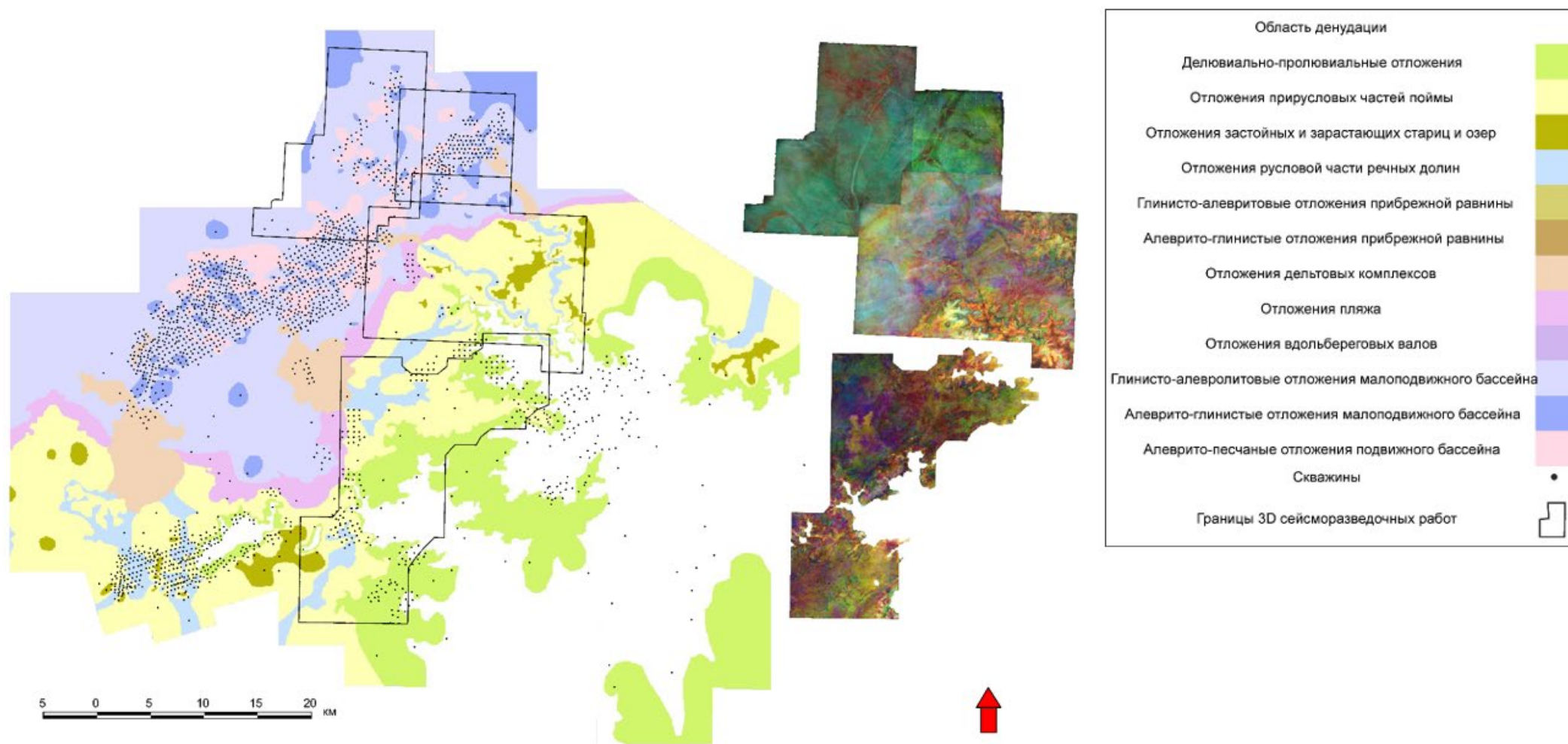


Рисунок 3 – Фациальная карта с срезами кубов спектральной декомпозиции в интервале пласта Ю₃

Кроме того, в ходе проведения анализа выявлено, что продуктивный интервал скважин исследуемой территории характеризуются двумя различными по особенностям условий осадконакопления типами разрезов:

- северо-западный «морской» – территория Ловинской, Яхлинской, Новомостовской и частично Пайтыхской площади. С точки зрения палеогеографии данный разрез представлял собой пониженную часть рельефа, который в ходе ингрессии аккумулятивного бассейна претерпел значительное затопление (преимущественно во время накопления пластов Ю₄₋₅). Для разреза характерна постепенная смена континентальной группы фациальных обстановок на переходную (периодически затопляемую прибрежную равнину) и открытый бассейн;

- юго-восточный «континентальный» – Лазаревская, Потанай-Картопьянская и южная часть Пайтыхской площади. Характеризуется сохранением континентальных обстановок осадконакопления практически во всем интервале тюменской свиты и широким развитием областей денудации отложений фундамента. Следы затопления территории и формирования переходных и морских групп фациальных обстановок наблюдаются в вышележащих отложениях абалакской (даниловской) свиты.

На основе полученных результатов сформирована база данных, которая легла в основу обучающей выборки для модели машинного обучения.

В **четвертой главе** приведены результаты разработки методики выделения фациальных тел в разрезе с использованием алгоритмов машинного обучения. С целью формирования общей базы данных ГИС для проведения классификации продуктивных интервалов, проведен анализ исходной скважинной информации. В качестве основных для формирования признаков пространства, выбирались методы ГИС, характеризующие различные физические свойства отложений. Так, в основу выборки скважин легли те методы, общий процент охвата которых превышал 90%.

Так как в качестве исходной информации использовались кривые ГИС, полученные разными методами (имеющими различную чувствительность к изменению характеристик разреза), проведена предварительная нормировка данных. Нормирование проводилось в пределах минимальных и максимальных значений кривых в исследуемом продуктивном интервале. Кроме того, для каждой из кривых проведена аппроксимация в скользящем окне, для приведения качества записи кривых под средние значения вертикального шага записи. Таким образом была подготовлена общая база данных для выделения в разрезах скважин литолого-фациальных тел. В качестве обучающей и тестовой выборки определены скважины, на которых проводился отбор кернa. Вследствие низкой доли скважин, охваченных отбором кернa (3% от общего фонда), обучающая и тестовая выборка являются недостаточно большими для соблюдения всех статистических рекомендаций. Однако, следует отметить, что выбранные скважины распределены

по площади изучаемого объекта равномерно, и в полной мере отражают особенности распространения и характер изменения условий осадконакопления.

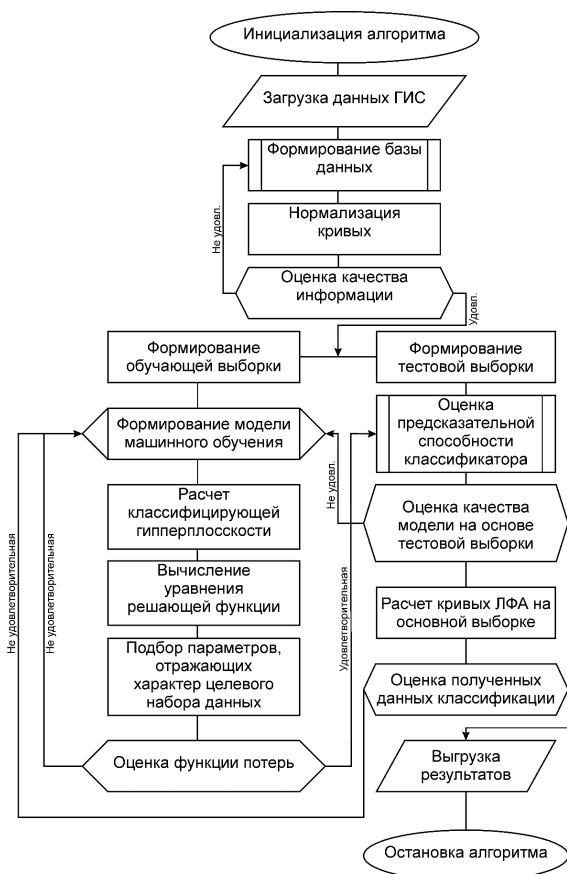
С целью подбора оптимального алгоритма классификации, проведен анализ точности предсказаний на основе нескольких моделей машинного обучения, основанных на разных подходах выделения классов объектов.

В качестве объектов анализа были выбраны следующие алгоритмы:

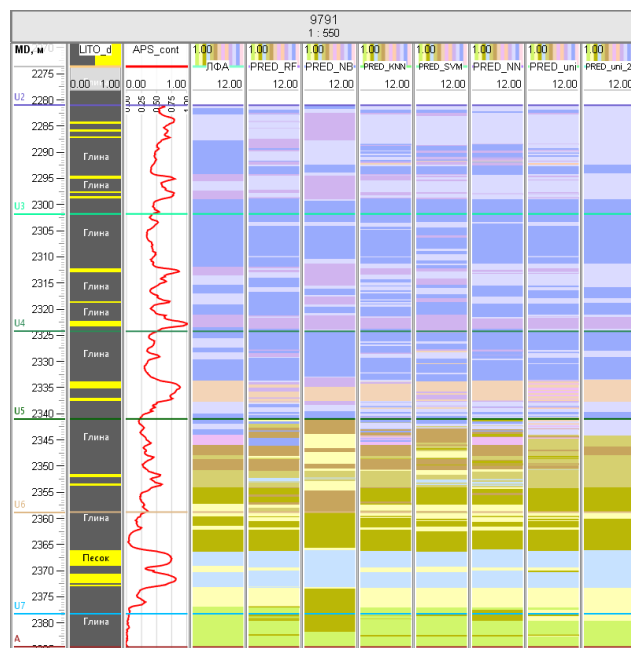
- метод опорных векторов (SVM). Данный тип классификаторов в качестве основной модели использует построение плоскостей в многомерном пространстве, разделяющих облака классов точек. Присуждение класса происходит на основе положения точек измерений относительно разделяющей плоскости;
- алгоритм ближайших k соседей (KNN), классифицирующий данные на основе метрик расстояний в признаковом пространстве. В основе метрических методов классификации лежит гипотеза компактности. Согласно этой гипотезе, координаты образов одного и того же класса имеют, как правило, большее сходство между собой, чем объекты разных классов.;
- наивный Байесовский классификатор – алгоритм, использующий оценку вероятности причисления измерения к определенному классу. В основе данного вида классификаторов лежит вероятностный подход распределения объектов по выделенным классам;
- метод Случайного леса. Данная группа методов классификации включает в себя алгоритмы, основанные на логических правилах. Каждый из классификаторов представляет собой ациклический граф, включающий связанные корень, внутренние вершины и листья (вершины без потомков). При этом каждая из вершин, на основе конъюнкций бинарных признаков делится на два ответвления;
- нейросетевая модель, представленная многослойным полносвязным перцептроном, формирующим предсказания на основе поиска скрытых корреляционных зависимостей между векторами параметров. Алгоритм самостоятельно устанавливает веса для каждого варианта данных, на основе которых проводится предсказание, при этом нет результирующей зависимости. Обучение проходит поэтапно, за каждую итерацию проводится оценка полученного предсказания и коррекция весовых коэффициентов, до полного соответствия результатов обучающей выборки.

При визуальном просмотре результатов классификации отложений в разрезе скважин большая часть алгоритмов показывает хорошее сходжение с исходными данными. Однако по всему разрезу выделяются единичные выбросы в виде отдельных, небольших по толщинам аномалий. Для удаления шума итоговые кривые фациальных зон были пересчитаны с помощью сглаживающего фильтра. Полученная итоговая кривая классификации имеет наибольшую сходимость с результатами комплексного литолого-фациального анализа отложений (Рисунок 4).

А



Б



А – Блок-схема предлагаемого алгоритма классификации,
Б – Диаграмма скважины 9791 с результатами классификации разными алгоритмами (Кривые PRED_X) и на основе комплексного литолого-фациального анализа (Кривая ЛФА)

Рисунок 4 – Блок-схема и результаты классификации предлагаемого алгоритма

С целью выявления и прогнозирования формирования зон остаточных запасов нефти проведена актуализация геолого-гидродинамических моделей на основе данных комплексного литолого-фациального анализа. Полученные результаты распределения особенностей условий осадконакопления отложений легли в основу трехмерных фациальных моделей месторождений исследуемой территории.

С целью выявления зон остаточных запасов, исходя из полученных результатов, проведен анализ распределения текущих подвижных запасов нефти месторождений. Высокая степень неравномерности выработки запасов нефти приурочена к границам областей застойных и активных условий осадконакопления. В качестве примера выявления зон остаточных запасов приведено Ловинское месторождение, характеризующееся наибольшим показателем отбора от начальных извлекаемых запасов – 76%.

Нижний интервал отложений тюменской свиты характеризуется развитием обстановок низменной аллювиальной долины. В данных условиях тела палеорусел, имеющие высокие значения эффективных толщин и коэффициентов пористости и проницаемости при низкой

расчлененности, замещаются на области развития пойменных и озерно-болотных обстановок осадконакопления. Обособленные пропластки коллектора пойменных отложений имеют значительно меньшие показатели ФЕС, что приводит к формированию слабодренируемых зон на границе тел палеорусел и пойменных отложений, в которых наблюдается увеличение анизотропии ФЕС и повышение расчлененности разреза.

Формирование областей остаточных слабодренируемых запасов в верхней части интервала также приурочено к границам фациальных тел. Обособленные тела активных обстановок замещаются на отложения малоподвижного открытого бассейна, продуктивные пропластки которых представлены маломощными прослоями алевролитов. Также можно выделить отдельные тела активных обстановок осадконакопления, не вовлеченные в выработку запасов нефти.

Таким образом, высокая степень выработки запасов нефти наблюдается для протяженных песчаных тел при условии наличия в них зон нагнетания. Также степень выработки запасов нефти для отложений морского генезиса более хорошая, так как тела коллекторов характеризуются большей выдержанностью свойств и имеют гидродинамическую связь друг с другом.

Равномерность выработки по площади у зон распространения русловых тел заметно хуже, так как нижний интервал отложений имеет сложный характер взаимоотношений тел коллекторов. В данных условиях пары нагнетательных и добывающих скважин могут вскрывать разные русловые тела, характеризующиеся отсутствием гидродинамической связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере ряда месторождений центральной части Приуральской нефтегазоносной области предложена методика детализации геолого-гидродинамических моделей изучаемых объектов с помощью применения алгоритмов машинного обучения.

1. Подтверждено, что рассматриваемые объекты характеризуются сложным геологическим строением продуктивного интервала тюменской свиты, обусловленной особенностями условий формирования коллекторов. Продуктивные залежи ассоциированы с ловушками пластового и пластово-сводового типов, осложнёнными литологическим замещением, областями выклинивания и тектоническим экранированием. Кроме того, наблюдается высокая степень анизотропии коллекторских свойств отложений, связанная с палеогеографическими особенностями седиментации в период трансгрессии Западно-Сибирского бассейна на расчленённый рельеф фундамента исследуемой территории.

На основе обобщения и анализа данных о геологическом строении, в том числе из литературных источников, а также геологической, геофизической и промысловой информации по месторождениям района исследования установлено, что эволюция седиментационного бассейна в тюменское время отражена в особенностях строения отложений рассматриваемого интервала.

Исходя из литологических и структурно-текстурных особенностей, а также характера распространения отложений по площади в составе тюменской свиты выделяется три интервала:

- нижняя подсвита (Вымский горизонт, пласты Ю₇₋₉), приуроченная к областям развития условий континентальных аллювиальных равнин, сильно ограниченных на исследуемой площади;
- средняя подсвита (Леонтьевский горизонт, пласты Ю₅₋₆) представленная широко распространенными континентальными отложениями;
- верхняя подсвита (Малышевский горизонт, пласты Ю₂₋₄) характеризующаяся сменой фациальных обстановок — от морских (на северо-востоке исследуемой территории) до континентальных (сводовая часть мегавала).

2. С целью выделения литолого-фациальных особенностей тюменских отложений предложена комплексная методика, включающая:

- изучение кернового материала с целью определения климатических условий и длительности выветривания фундамента по вещественному составу обломочных пород и глинистого цемента; оценки гидродинамической активности на основе распределения гранулометрического состава; идентификация фаций по текстурно-структурным признакам;
- выделение электрометрических моделей осадконакопления по методике В.С. Муромцева, направленных на реконструкцию физико-географических условий для скважин без кернового опробования;
- применение данных интерпретации сейсморазведочных работ, направленных на контроль корреляции фациальных тел в межскважинном пространстве и выявление неструктурных ловушек на границах лицензионных участков.

Детальный комплексный анализ терригенных отложений тюменской свиты позволил установить пространственно-временные закономерности седиментационных процессов. Интеграция макроскопического описания керна, лабораторных исследований, интерпретации данных ГИС и сейсморазведочных работ обеспечила формирование концептуальной фациальной модели объекта.

Выявленная динамика фациальных обстановок отражает общую эволюцию Западно-Сибирского бассейна в юрский период, демонстрируя постепенную смену континентальных условий осадконакопления на прибрежно-морские, с прогрессирующим затоплением в сторону осевой зоны Шаимского мегавала.

На основе результатов комплексного литолого-фациального анализа построены детальные геолого-гидродинамические модели месторождений, позволившие минимизировать неопределенности геологического строения коллекторов, уточнить основные направления фильтрационных потоков, а также выявить недренируемые зоны залежей.

3. Систематизация научных данных позволила формализовать принципы работы алгоритмов машинного обучения для задач выявления литолого-фациальных особенностей отложений. В работе адаптированы следующие модели искусственного интеллекта:

- классификаторы на основе разделяющих гиперплоскостей – анализ многомерного признакового пространства;
- метрические алгоритмы – классификация по метрикам близости наблюдений в признаковом пространстве;
- вероятностные методы – байесовские классификаторы, учитывающие вероятность распределения объектов по классам;
- логистические алгоритмы – построение решающих ациклических графов с бинарными узлами ветвления.

4. Подобрана оптимальная методика классификации отложений по разрезу скважин на основе алгоритмов машинного обучения:

- восстановление кривой ГГК-п на основе регрессионного алгоритма Случайного леса;
- нормирование выборки кривых ГИС, включающей методы ПС, ГК, НК, ГГК-п;
- нормирование и сглаживание кривых исходной выборки с целью уменьшения влияния случайных выбросов данных;
- классификация комплексом алгоритмов машинного обучения;
- определение средневзвешенного общего значения, в качестве весовых коэффициентов – параметр ассигасу каждой модели;
- сглаживание результирующей кривой классификации.

Полученная модель машинного обучения для классификации разрезов скважин на основе данных ГИС показывает высокую степень согласованности с данными комплексного литолого-фациального анализа.

5. На основе выявленных закономерностей пространственной изменчивости условий осадконакопления построены трехмерные фациальные модели месторождений, позволившие идентифицировать ключевые факторы, контролирующие распределение остаточной нефтенасыщенности.

Литологическая неоднородность коллекторов, отраженная в сложном характере границ фациальных тел и их взаимоотношений, формирующих фильтрационные барьеры в отдельных прослоях, определяет преимущественные направления фильтрации флюида.

Высокая степень выработки запасов нефти приурочена к областям развития крупных песчаных тел активных обстановок, имеющих низкую изменчивость коллекторских свойств и высокий охват заводнением. Наличие пар нагнетательных и добывающих скважин, вскрывающих и действующих на одно песчаное тело приводит к равномерному вытеснению нефти.

При этом, наблюдается низкая степень выработки подвижных запасов нефти в условиях близкого расположения нагнетательных скважин к добывающим, но вскрывающим различные по условиям осадконакопления тела. Таким образом, неравномерное вытеснение запасов нефти приурочено к границам областей застойных и активных условий осадконакопления, в которых наблюдается увеличение анизотропии ФЕС и повышение расчлененности разреза.

Установленная взаимосвязь между динамикой выработки запасов нефти и распределением фаций позволяет:

- оптимизировать систему разработки месторождений и локализовать участки с недренируемыми запасами на основе фациально-обусловленной анизотропии коллекторов;
- разрабатывать и рекомендовать геолого-технические мероприятия для интенсификации добычи нефти и увеличения нефтеотдачи продуктивных пластов, отличающихся различными литолого-фациальными обстановками их формирования, в том числе с учетом ранее успешно примененных методов и технологий.

Полученные результаты формируют методологическую основу для повышения коэффициента извлечения нефти за счет перехода от традиционных гидродинамических подходов к фациально-адаптированным технологиям управления разработкой. Интеграция машинного обучения в интерпретацию фациальных моделей создаёт предиктивную аналитическую платформу для минимизации геологических рисков и рациональной эксплуатации ресурсной базы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертационной работы опубликовано 31 научных трудов, в том числе:

в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Шарафутдинов, А.Р. Особенности выработки запасов нефти юрско-нижнемеловых отложений на основании уточнения литолого-фациального строения месторождения / С.В. Арефьев, В.В. Никифоров, Ю.А. Котенев, Н.В. Шабрин, А.Р. Шарафутдинов // Нефть. Газ. Новации. – 2022. – № 3(256). – С. 26-31. – EDN ULZUHW.
2. Шарафутдинов, А.Р. Уточнение литолого-фациального строения юрско-нижнемеловых отложений на основе спектральной декомпозиции / В. В. Никифоров, А.Р. Шарафутдинов, Н. В. Шабрин, А. В. Чибисов // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2024. – Т. 52, № 3(115). – С. 52-62. – DOI 10.24412/1728-5283-2024-3-52-62. – EDN DWLOYG.
3. Шарафутдинов, А.Р. Условия и причины образования зон остаточных запасов нефти в неоднородных юрских коллекторах Шаимского нефтегазового района / О.А. Залевский, Ю.А. Котенев, Н.В. Шабрин, В.В. Никифоров, А.Р. Шарафутдинов // Вестник Академии наук

Республики Башкортостан. – 2025. – Т. 54, № 1(117). – С. 16-24. – DOI 10.24412/1728-5283-2025-1-16-24. – EDN UHVCII

в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и систем цитирования Scopus:

4. Sharafutdinov, A. R. Influence of facies and tectonic structure on the reservoir properties distribution / V. V. Nikiforov, Sh. H. Sultanov, Yu. A. Kotenev, N. V. Shabrin, A. R. Sharafutdinov // SOCAR Proceedings. – 2023. – No. 2. – P. 7-13. DOI 10.5510/OGP20230200840. – EDN PMFURI.

5. Sharafutdinov, A. R. Refinement of the Geological and Hydrodynamic Model of Productive Deposits Based on the Interpretation of Seismic Survey Data / Sh. Kh. Sultanov, A.R. Sharafutdinov, V. V. Nikiforov, N. V. Shabrin, // Technological Horizons of Decarbonization Based on Environmental Innovations. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. 2025. pp 65-68 https://doi.org/10.1007/978-3-031-82210-0_11

6. Sharafutdinov, A. R. Geological and Technological Factors of Premature Well Watering During the Initial Stages of Field Development / Yu. A. Kotenev, V. V. Nikiforov, N. V. Shabrin, A.R. Sharafutdinov, A.V. Chibisov // Technological Horizons of Decarbonization Based on Environmental Innovations. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. 2025. pp 277-280 https://doi.org/10.1007/978-3-031-82210-0_46

в других изданиях и материалах различных конференций и семинаров:

7. Шарафутдинов, А.Р. Выделение литолого-фациальных особенностей отложений на основе методов машинного обучения / О.А. Залевский, Ю.А. Котенев, Ш.Х. Султанов, А.Р. Шарафутдинов // Нефтегазовое дело. – 2024. – Т. 22, № 6. – С. 16-25. – DOI 10.17122/ngdelo-2024-6-16-25. – EDN FBOKTG.

8. Шарафутдинов, А.Р. Детализация представлений о геологическом строении терригенных отложений на основе результатов комплексного литолого-фациального анализа / А.Р. Шарафутдинов, Ш.Х. Султанов, Р.У. Рабаев, А.М. Маляренко, Ж.Т. Кенжегалиева // Нефтегазовое дело. – 2025. – Т. 23, № 2. – С. 15-26. – DOI 10.17122/ngdelo-2025-2-15-26

9. Шарафутдинов, А.Р. Применение алгоритмов машинного обучения в целях детализации геологического строения продуктивных отложений / А.Р. Шарафутдинов, Ш.Х. Султанов, В.М. Чиликин // Инженер-нефтяник. – 2025. – № 1. – С. 86-89. – EDN MCRDVS.

10. Шарафутдинов, А.Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667218 Российская Федерация. Оптимизация работы с базами данных геофизических исследований скважин : № 2024664928 : заявл. 28.06.2024 : опубл. 22.07.2024 / Ш.Х. Султанов, А.Р. Шарафутдинов, В.М. Чиликин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – EDN MTQYMM.

11. Шарафутдинов, А.Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024680759 Российская Федерация. Модуль оценки гидродинамической связи скважин по промысловым данным : № 2024669362 : заявл. 19.08.2024 : опубл. 03.09.2024 / Ш.Х. Султанов, Н.В. Шабрин, А.Р. Шарафутдинов, В.М. Чиликин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – EDN XIOYEV.

12. Шарафутдинов, А.Р. Уточнение литолого-фациального строения юрско-нижнемеловых отложений на основе спектральной декомпозиции / В. В. Никифоров, А.Р. Шарафутдинов, Н.В. Шабрин, А.В. Чибисов // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов. – 2024. – № 2(35). – С. 49-65. – DOI 10.24412/2949-4052-2024-2-49-65. – EDN AGAJRZ.

13. Шарафутдинов, А.Р. Критерии поиска новых залежей нефти в коре выветривания доюрского фундамента Шаимского НГР / Н.В. Шабрин, А.Р. Шарафутдинов, В.В. Никифоров, М.Ю. Котенев, Р.В. Климин // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов. – 2023. – № 32. – С. 52-67. – DOI 10.24412/2949-4052-2023-3-52-67. – EDN RTWOBF.