На правах рукописи

ПЛАТОВ БОРИС ВИКТОРОВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТОЛЩИНЫ МАЛОМОЩНЫХ ПЛАСТОВ ПО СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫМ ДАННЫМ (НА ПРИМЕРЕ ТУЛЬСКО-БОБРИКОВСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН)

Специальность 1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2026

Работа выполнена на кафедре геофизики и геоинформационных технологий Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

Научный руководитель:	**Нургалиев Данис Карлович,** доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор Института геологии и нефтегазовых технологий ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань
Официальные оппоненты:	**Приезжев Иван Иванович,** генеральный директор Общества с ограниченной ответственностью «Лаборатория Приезжева», доктор технических наук, г. Москва **Яскевич Сергей Владимирович,** Старший научный сотрудник Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, кандидат физико-математических наук, г. Новосибирск
Ведущая организация:	Общество с ограниченной ответственностью «ТНГ-Групп», г. Бугульма

Защита состоится 28 января 2027 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.358.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

С диссертацией можно ознакомиться в ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» и на сайте университета www.psu.ru.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью, в двух экземплярах направлять по адресу: 614068, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15, ПГНИУ, ученому секретарю диссертационного совета Огородовой Ирине Владимировне.

Email dissovet.geophys@psu.ru

Автореферат разослан «2» ……ноября.. 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.358.01
кандидат геолого-минералогических наук, доцент И.В. Огородова

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Добыча нефти и газа является одним из основных источников доходов федерального бюджета России в 2020-х годах. Однако поддержание текущего уровня добычи возможно только с применением современных технологий. В Республике Татарстан накоплен значительный опыт применения инновационных технологий поиска и добычи нефти, который позволил добыть свыше 3 млрд т нефти к 2014 году и стабилизировать добычу на этом уровне [Муслимов, 2014]. К основным источникам восполнения запасов можно отнести:

– повышение эффективности геологоразведочных работ на территории действующих нефтепромыслов в пределах лицензионных участков Республики Татарстан;

– повышение коэффициента нефтеизвлечения;

– вовлечение в освоение нижележащих горизонтов разрабатываемых месторождений;

– освоение ресурсов и запасов высоковязких тяжелых нефтей;

– геологическое изучение и оценку нетрадиционных коллекторов («доманикитов» и высоковязких нефтей (ВВН)) [Справка о состоянии и перспективах использования…, 2021].

Повышение эффективности геологоразведочных работ на территории действующих нефтепромыслов включает поиск пропущенных интервалов [Архипов и др., 2012] и уточнение запасов по данным сейсморазведки [Екименко, 2008]. Данные задачи требуют поиска новых подходов к уточнению строения нефтеносных пластов и более точного определения их толщины.

Проблема определения мощности продуктивных отложений имеет принципиальную важность при картопостроении. Точные значения мощностей необходимы для подсчета запасов нефтяных и газовых месторождений, определения параметров геологических объектов, проектирования положения бурящихся горизонтальных скважин, определения оптимальных параметров гидрогазрыва пласта (ГРП).

Для оценки толщины пластов в межскважинном пространстве применяют данные 3D сейсморазведки. Однако ввиду ограниченной вертикальной разрешающей способности сейсморазведочных данных оценка толщин маломощных отложений (менее четверти длины волны) является трудновыполнимой задачей [Widess, 1973].

Некорректное определение толщины маломощных пластов приводит к:

– неверному подсчету запасов (завышенному или заниженному);

– сложностям в планировании разработки месторождения;

– ошибкам при бурении горизонтальных скважин [Хисамов и др., 2018].

Точная информация о толщинах маломощных пластов необходима при планировании гидрогазрыва пластов. В случае проведения ГРП в пластах малой мощности существует риск возникновения трещин, пересекающих покрышку или касающихся водонефтяного контакта (ВНК). Такие ситуации могут привести к быстрому обводнению скважин [Малышев и др., 1997; Усачев, 1986; Имангалиева, 2007].

При проектировании геометрии горизонтальных скважин необходимо учитывать изменения толщин маломощных пластов. Чем меньше толщина пласта, тем выше риск выхода скважины из продуктивной части пласта в процессе бурения, что ухудшает ее эксплуатационные характеристики. При проведении скважины необходимо выбирать области с наибольшей толщиной продуктивных отложений [Иванова, Хисматуллин, Важенин, 2022; Горбань, Керусов, Шилкин, 2017; Хисамов и др., 2017].

Еще одной важной задачей является определение параметров маломощных геологических объектов с переменной толщиной. На территории Республики Татарстан примером таких объектов могут быть визейские палеоврезы. В данных геологических образованиях сосредоточены значительные запасы нефти; их выделение и определение свойств необходимы для оптимальной разработки месторождений [Валеева, Баранова, Успенский, 2014; Ларочкина и др., 2010]. Толщины данных объектов изменяются в широком диапазоне, часто на пределе вертикальной разрешающей способности сейсморазведочных данных.

Целью диссертационного исследования является разработка методики оценки толщины маломощных пластов по данным сейсморазведки, оценка точности и достоверности метода для конкретного геологического объекта (тульско-бобриковских отложений Республики Татарстан).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение обзора существующих методов оценки толщины маломощных пластов;
2. Выбор объекта исследования. Оценка параметров объекта по скважинным данным (мощность пласта, геофизические характеристики) и по данным 3D-сейсморазведки. Интерпретация геолого-геофизической информации. Подбор сейсмических атрибутов, наиболее пригодных для оценки толщины пласта на пределе разрешающей способности сейсморазведки;
3. Создание и апробация новой методики оценки толщины маломощных пластов (на пределе разрешающей способности сейсморазведки);
4. Оценка точности определения эффективных толщин маломощных пластов при помощи сейсмических атрибутов, классификации по форме сейсмотрасс и применения машинного обучения;
5. Оценка достоверности прогноза эффективных толщин.

Предмет исследования – определение толщины маломощных пластов (на пределе разрешающей способности сейсморазведки) по результатам интерпретации 3D сейсморазведочных данных и оценка достоверности прогноза.

Объект исследования – продуктивные отложения бобриковско-радаевского возраста двух месторождений Республики Татарстан, представленные терригенными породами (песчаниками и глинами). Исследуемые отложения осложнены визейскими палеоврезами, в которых наблюдается значительное увеличение как общей толщины интервала, так и эффективной толщины коллектора.

Согласно расчетам, в терригенных отложениях нижнего карбона содержится до 10% всех разведанных запасов Ромашкинского месторождения. Аналогичные оценки получены для других месторождений Юго-Востока Татарстана [Нефтегазоносность Республики Татарстан, 2007, т. 1]. На отложения бобриковско-радаевского возраста приходится порядка 15% всех месторождений Республики Татарстан [Хисамов и др., 2010].

По объектам исследований были подготовлены данные глубокого бурения, каротажные данные по всем доступным скважинам, данные 3D сейсморазведки.

Методы исследования

Для достижения цели диссертационного исследования и решения поставленных задач использовались следующие методы:

1. Интерпретация каротажных данных для выделения эффективных толщин продуктивных отложений;
2. Атрибутивный анализ сейсмического сигнала (расчет частотных сейсмических атрибутов);

3. Классификация сейсмического сигнала по форме сейсмотрасс для прогноза эффективных толщин;

4. Применение методов машинного обучения:

– линейная регрессия от частотных сейсмических атрибутов (моночастотная компонента 50 и 60 Гц);

– метод ближайшего соседа (на основе карт Кохонена);

– нейронная сеть с архитектурой многослойного персептрона (MLP);

– алгоритм «случайный лес» (Random Forest);

– модель Колмогорова для нейронных сетей;

5. Оценка достоверности прогноза эффективных толщин при помощи:

– анализа распределений эффективных толщин в скважинах и прогнозных картах;

– анализа среднеквадратичных отклонений реализаций прогнозных карт;

– параметра Simularity.

Научная новизна

Разработана новая методика расчета толщины маломощных пластов на пределе разрешающей способности сейсморазведки с применением алгоритмов машинного обучения. Методика заключается в применении седиментационных слайсов сейсмических атрибутов для обучения алгоритмов машинного обучения и прогноза эффективных толщин.

Установлено применение классификации по форме сейсмического сигнала для расчета эффективных толщин на пределе разрешающей способности и определены ее оптимальные параметры расчета.

Разработана методика оценки достоверности прогнозов эффективных толщин по анализу распределений эффективных толщин в скважинах и прогнозных картах, анализу среднеквадратичных отклонений реализаций прогнозных карт и параметру Simularity.

Практическая значимость работы

Применение методов машинного обучения для оценки эффективной толщины маломощных пластов позволяет снизить величину среднеквадратичной ошибки в 1,5 – 2 раза по сравнению с линейной регрессией от сейсмических атрибутов.

Методика оценки достоверности прогноза эффективных толщин по анализу распределений эффективных толщин в скважинах и прогнозных картах, анализу среднеквадратичных отклонений реализаций прогнозных карт и параметру Simularity позволяет уменьшить вероятность ложных прогнозов.

Показано, что подробные сведения об эффективной толщине необходимы для подсчета запасов, проектирования ГРП, бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика расчета карт эффективных толщин, основанная на применении седиментационных слайсов сейсмических атрибутов и обучении алгоритмов машинного обучения, позволяет определить эффективную толщину на пределе разрешающей способности сейсморазведки.

2. Методика расчета карт эффективных толщин, основанная на классификации по форме сейсмического сигнала, обладает большей среднеквадратичной ошибкой, чем методы, основанные на седиментационных слайсах и алгоритмах машинного обучения.

3. Методика оценки достоверности прогноза эффективных толщин на пределе разрешающей способности сейсморазведки, основанная на анализе распределений сейсмических

атрибутов, среднеквадратичных отклонений и параметра Simularity, позволяет повысить надежность прогноза и исключить ложные аномалии.

Личный вклад автора

Автор выполнил теоретические исследования ограничений разрешающей способности сейсморазведки. Разработал методику расчета карт эффективных толщин, основанную на применении седиментационных слайсов сейсмических атрибутов и обучении алгоритмов машинного обучения. Определил оптимальные параметры методики расчета карт эффективных толщин, основанные на классификации по форме сейсмического сигнала. Разработал методику оценки достоверности прогноза эффективных толщин на пределе разрешающей способности сейсморазведки на основе анализа распределений сейсмических атрибутов, среднеквадратичных отклонений и параметра Simularity. Выполнил комплексную интерпретация сейсморазведочных данных на двух площадях исследований и опробование разработанных методик.

Апробация работы и публикации. Диссертационное исследование рассмотрено, обсуждено и одобрено на заседании кафедры геофизики и геоинформационных технологий Института геологии и нефтегазовых технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Основные научные положения и практические результаты диссертации опубликованы в 8 научных работах, 3 из которых – в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ для защиты диссертаций, 5 – в журналах, индексирующихся в международной базе научного цитирования Scopus. При подготовке данной работы были проведены выступления на 5 конференциях с докладами: Научно-практическая конференция «Проблемы поиска и разведки нетрадиционных запасов из нетрадиционных коллекторов» (2017); Международная научная конференция SGEM (2018, 2019); Международная научно-практическая конференция «Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting» (2019); Научно-практическая конференция «Красноярск – 2024. Сейсморазведка в Сибири и за ее пределами» (2024), Международная конференция «First Artificial Intelligence & High-Performance Geophysics Workshop» (2026).

По теме диссертационной работы автором было прочитано 4 курса лекций студентам и аспирантам Китайского нефтяного университета (г. Циндао) 10 мая 2023 года, 1 июля 2024 года, 1 июля 2025 года, 8 января 2026 года. По теме диссертации проведен курс лекций для студентов и аспирантов университета Юникамп (Кампинас, Бразилия) 15 мая 2026 года.

Структура и объем диссертации обусловлены ее целью и задачами. Исследование состоит из введения, пяти глав и заключения. В работе содержится иллюстративный материал: 134 рисунка, 9 таблиц, список литературы, включающий 279 наименований.

Благодарности. Автор глубоко признателен научному руководителю, доктору геолого-минералогических наук, профессору Данису Карловичу Нургалиеву за помощь в постановке задач исследования и общее руководство работой, Выражает благодарность Айнуру Илгизаровичу Кадирову за ценные советы и постоянное внимание, Юлии Витальевне Багмановой, сотрудникам НОЦ ТРИЗ и кафедры геофизики и геоинформационных технологий за консультации и критические замечания при обсуждении результатов на всех этапах исследований, Ильдусу Адгамовичу Чукмарову за создание условий для написания данной работы, сотрудникам ООО «ТНГ-Групп» и лично Игорю Вадимовичу Устимову за ценные советы по выполнению работы.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Ограничение вертикальной разрешающей способности сейсморазведочных данных соответствует от 1/8 до 1/4 длины волны сейсмического сигнала [Widess, 1973].

Существует несколько подходов к обнаружению маломощных пластов и оценке их толщины при помощи сейсморазведочных данных. Основные из них связаны со следующими факторами:

1. Параметры регистрации сигналов [Mougenot, 2018; Hegna, Parkes, 2012; Synchronized multi-level source.., 2013; Soubaras, Dowle, 2010; Caporal, Blacquière, 2015; Yanchak, Monk, Versfelt, 2018; The influence of spatial.., 2010];

2. Алгоритмы и параметры обработки сейсмического сигнала [Птецов, 1989; Вилмаз, 1986; Unlocking the full potential.., 2015; Low-frequency sparse double-constrained.., 2019];

3. Методики интерпретации сейсморазведочных данных [Thin-bed reflectivity inversion.., 2007; Chopra, Castagna, Portniaguine, 2006; Using seismic attributes.., 2005; Evaluation of thickness estimation…, 2020; Thickness prediction.., 2020; Xu, Haq, 2022; Ольнева, Егоров, Орешкова, 2023; Архипов, 2023; Ольнева и др., 2024].

Все проанализированные подходы позволяют увеличить вертикальную разрешающую способность сейсморазведочных данных, однако требуют особых методов регистрации (широкополосные записи) и обработки сейсморазведочных данных.

Автором разработана методика, позволяющая прогнозировать эффективную толщину на пределе разрешающей способности сейсморазведки по стандартным (не широкополосным) данным.

Объектами исследования стали отложения тульско-бобриковского возраста на двух месторождениях Юго-Восточной части Республики Татарстан – нефтяном месторождении А и нефтяном месторождении Б (Рис.1).

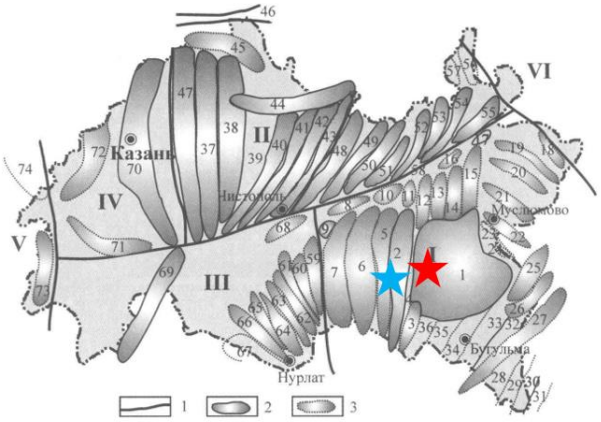

Рисунок 1 - Тектоническая схема строения осадочного чехла та территории Республики Татарстан. Звездами обозначено расположение площадей А (красный цвет) и Б (синий цвет).

1 – границы крупных тектонических структур первого порядка (I – ЮТС, II – СТС, III – Мелекесская впадина, IV – Казанско-Кировский прогиб, V – восточный склон Токмовского свода, VI – Бирская седловина);

2 – сквозные и наложенно-сквозные структуры;

3 – наложенные и погребенно-наложенные структуры, по: [Геология Татарстана, 2003]

Кровля тульских отложений по данным ГИС выделяется по реперу «Тульский известняк» [Хисамов, Давлетшин, Минебаев, 2011], который характеризуется низкими значениями

естественной радиоактивности и высокими показаниями нейтронного каротажа. Породы тульско-бобриковского возраста с размывом залегают на кизеловских отложениях турнейского яруса. Переход от терригенных тульско-бобриковских отложений к карбонатным породам кизеловского возраста отмечается резким снижением показаний естественной радиоактивности (ГК) и возрастанием показаний нейтронного каротажа (НГК) и сопротивления. Схема корреляции скважин по месторождению А (Рис.2).

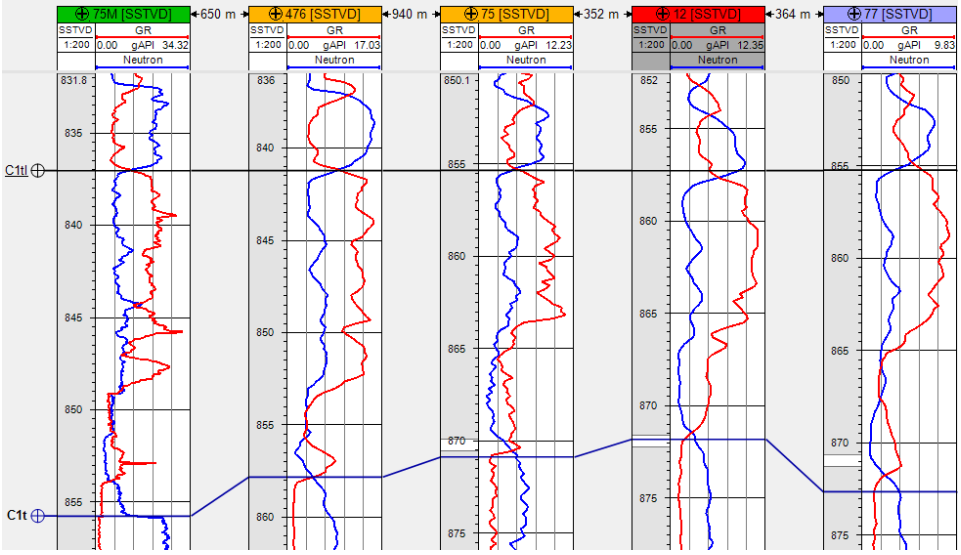

Рисунок 2 - Каротажные данные по линии скважин на месторождении А (скважины 75М-476-75-12-77). Проведено выравнивание по кровле тульского горизонта

На месторождении Б выделяется врез терригенных отложений визейского возраста. Наиболее контрастное отображение врeза получено на седиментационном слайсе на 12 мс ниже отражения Y на сейсмическом атрибуте «моночастотная компонента» на частоте 50 Гц (рисунок 3). На рисунках 86-88 приведены сейсмические разрезу с указанием положения врeза.

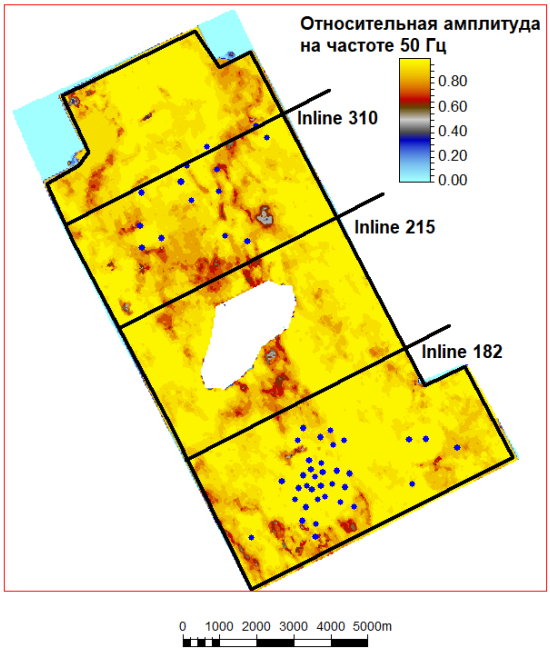

Рисунок 3 - Седиментационный слайс на 12 мс ниже отражения Y на сейсмическом атрибуте «моночастотная компонента» на частоте 50 Гц для месторождения Б. Белым цветом выделена область отсутствия сейсморазведочных данных из-за населенного пункта

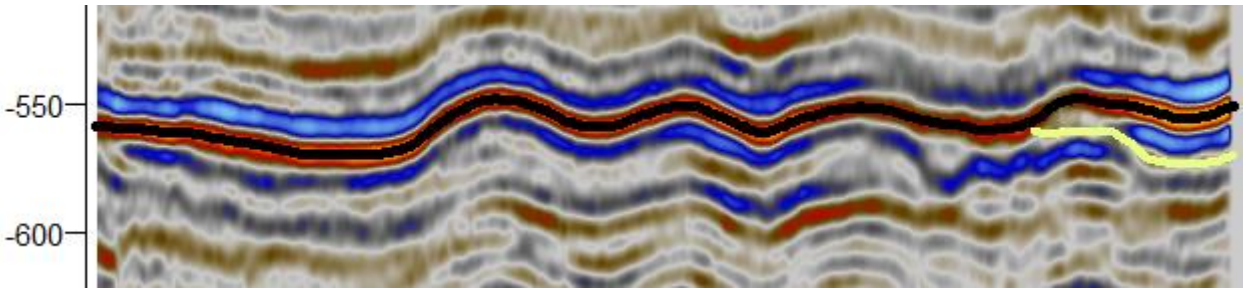

Рисунок 4 - Инлайн 310 на месторождении Б. Желтым выделено положение вреза

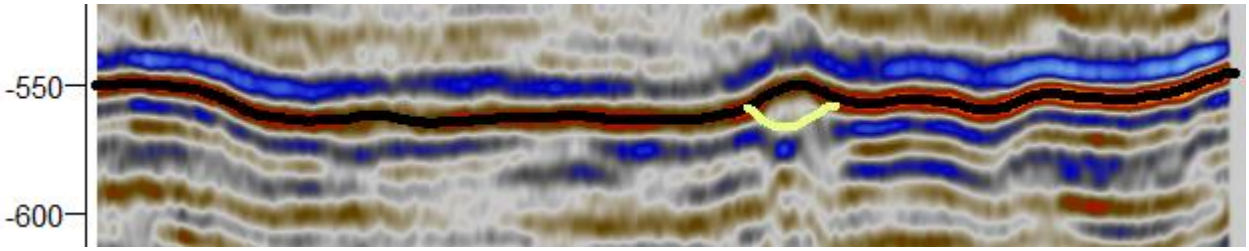

Рисунок 5 - Инлайн 215 на месторождении Б. Желтым выделено положение вреза

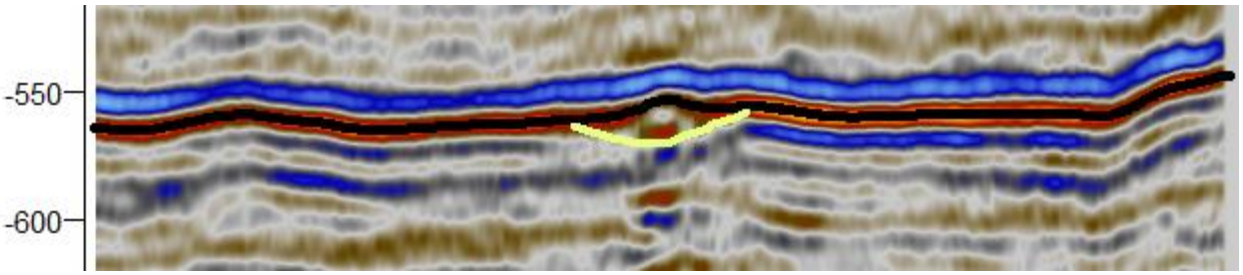

Рисунок 6 - Инлайн 182 на месторождении Б. Желтым выделено положение вреза

В работе оценивалась эффективная толщина пласта - суммарная толщина коллектора в исследуемом интервале. Коллектор по скважинным данным выделялся по пониженным значениям естественной радиоактивности по данным ГК в интервале тульско-бобриковских отложений.

Маломощным пластом в работе считается пласт, толщина которого меньше или равна четверти длины волны.

В исследовании автором опробовано 6 способов расчета эффективных толщин:

1. Расчет толщины пласта через моделирование изменения формы сейсмического сигнала;

Набор методов машинного обучения:

2. Линейная регрессия по частотным сейсмическим атрибутам;
3. Случайный лес (Random Forest);
4. Многослойный персептрон (MLP);
5. Метод ближайшего соседа (на основе сетей Кохонена);
6. Нейронные сети на основе модели Колмогорова.

Первое защищаемое положение. *Методика расчета карт эффективных толщин, основанная на применении седиментационных слайсов сейсмических атрибутов и обучении алгоритмов машинного обучения, позволяет определить эффективную толщину на пределе разрешающей способности сейсморазведки.*

Автором проведен анализ зависимости сейсмических атрибутов (доминирующая частота; спектральная декомпозиция на моночастотные компоненты: 40, 45, 50, 55 и 60 Гц; RMS-амплитуда; относительный акустический импеданс) и эффективных толщин по скважинам. Была найдена зависимость эффективной толщины от сейсмических атрибутов амплитуда сигнала на моночастотной компоненте на частоте 50 и 60 Гц для обоих месторождений. Коэффициент корреляции составил от -0.63 до -0.77, кросс-плоты показаны на рисунках 7 и 8.

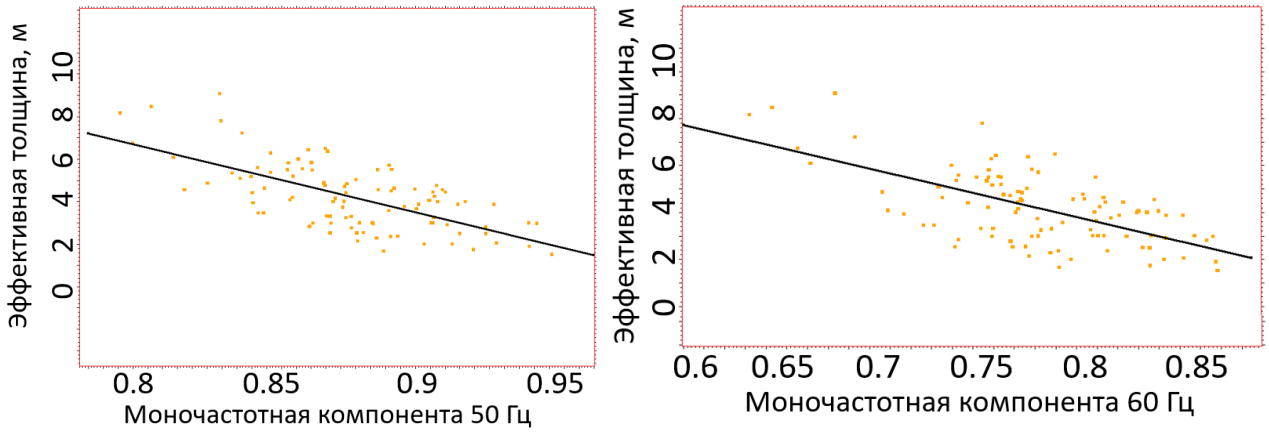

Рисунок 7 - Кросс-плот зависимости «эффективная толщина пласта/сейсмический атрибут» «моночастотная компонента» на частоте 50 Гц (слева, коэффициент корреляции 0.65) и на частоте 60 Гц (справа, коэффициент корреляции 0.63) для месторождения А

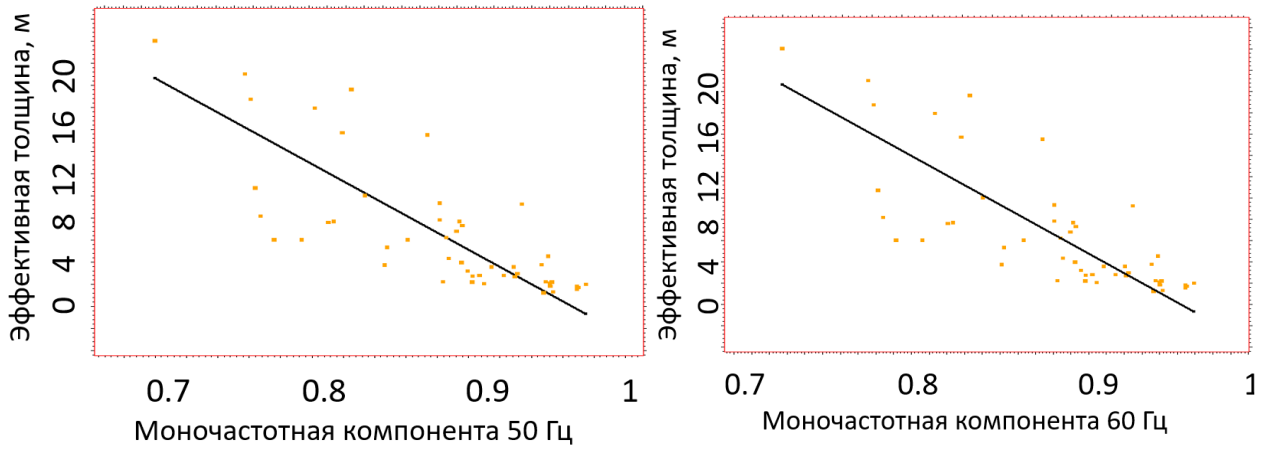

Рисунок 8 - Кросс-плот зависимости «эффективная толщина пласта/сейсмический атрибут» «моночастотная компонента» на частоте 50 Гц (слева, коэффициент корреляции 0.77) и на частоте 60 Гц (справа, коэффициент корреляции 0.77) для месторождения Б

Линейная регрессия — используемая в статистике регрессионная модель зависимости одной (объясняемой, зависимой) переменной Y от другой или нескольких других переменных (факторов, регрессоров, независимых переменных) X с линейной функцией зависимости.

Модель многослойного перцептрона (Multilayer Perceptron, MLP) - классическая архитектура нейросети, состоящая из нескольких слоев нейронов, соединенных полносвязными связями. MLP подходит для моделирования нелинейных зависимостей между входными

признаками (например, сейсмические атрибуты) и выходными значениями (например, эффективная мощность). В работе применялись параметры: количество скрытых слоев: 1, количество нейронов в скрытом слое: 5, количество итераций для обучения: 500, алгоритм обучения: генетический, размер популяции: 10, размер выборки: 5, функция активации: сигмоида. График обучения нейронной сети MLP показан на рисунке 9.

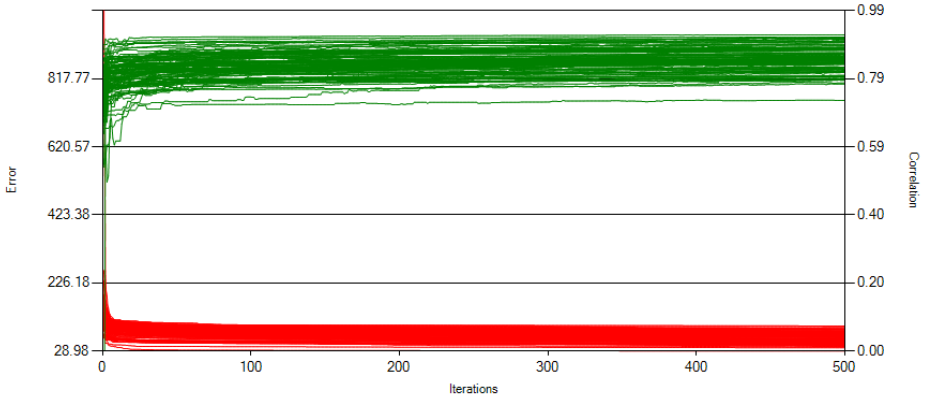

Рисунок 9 - График обучения нейронной сети MLP. Красным показана ошибка, зеленым – корреляция. По оси X – номер итерации

Случайный лес (Random Forest) — это ансамблевый алгоритм машинного обучения, который объединяет множество деревьев решений для повышения точности и устойчивости модели. В работе применялись параметры: максимальная вероятность определения 0.95, максимальная глубина леса 500.

Самоорганизующиеся карты Кохонена (Self-Organizing Maps, SOM), известные как сети Кохонена, обычно не используются для задач регрессии в их классической форме. SOM – это алгоритм неконтролируемого обучения, который предназначен для кластеризации, снижения размерности и визуализации данных, а не для предсказания непрерывных числовых значений (что является задачей регрессии). В IP_Seismic нейронные сети Кохонена реализованы в виде метода ближайшего соседа, где нейроны – это точки пластопересечения с известными значениями эффективной толщины по скважинам и значениями сейсмических атрибутов. В процессе прогноза находится несколько ближайших соседей (нейронов) и усреднение значения прогноза с весами по похожести с точками пластопересечения [Приезжев и др., 2025]. В работе применялись параметры: количество соседей = 3, метрика расстояния – похожесть между точками.

Модель Колмогорова для нейронных сетей основана на теореме Колмогорова о суперпозиции. Теорема утверждает, что любую непрерывную функцию от n переменных можно представить в виде композиции непрерывных функций от одной переменной и операции сложения. В более формальном виде, для любой непрерывной функции f(x1,…, xn) от n переменных, существуют функции от одной переменной $g_i(y)$ и константы $\lambda_i n$.

Эта теорема показывает, что в принципе любую функцию можно аппроксимировать с помощью композиции функций от одной переменной. Если представить, что g_i - это функции активации нейронов, а $\lambda_i n$ - это веса связей между нейронами, то теорема подразумевает, что, в теории, даже достаточно простые нейронные сети могут приблизить любую непрерывную функцию [Колмогоров, 1957].

Классическая нейронная сеть использует нейроны, которые являются взвешенной суммой входного вектора, с последующим использованием активационной функции сигмоидного вида.

В модели Колмогорова применяются полнофункциональные активационные функции на основе теоремы Колмогорова [Priezzhev, 2020]. В работе применялись параметры: количество скрытых слоев: 1, количество нейронов в скрытом слое: 3, количество итераций для обучения: 500, алгоритм обучения: генетический, размер популяции: 10, размер выборки: 5, функция активации: сигмоида. График обучения нейронной сети MLP показан на рисунке 10.

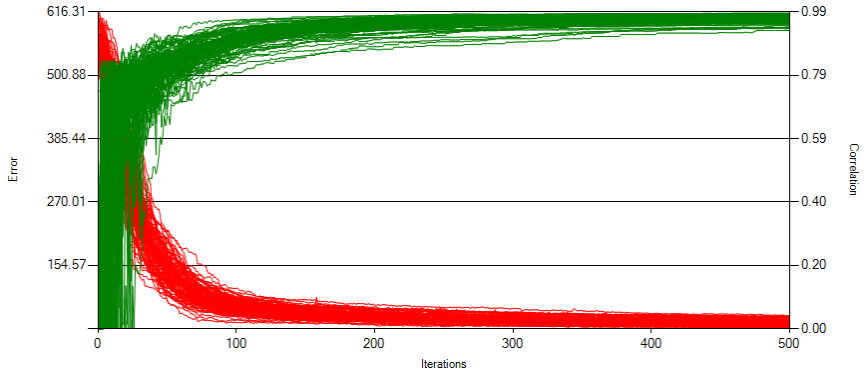

Рисунок 10 - График обучения модели Колмогорова. Красным показана ошибка, зеленым – корреляция. По оси X – номер итерации

Автором предлагается методика расчета эффективных толщин:

1. Трассировка целевого отражающего горизонта (кровли интервала, для которого проводится расчет толщин);
2. Расчет частотных сейсмических атрибутов и нахождение корреляционных зависимостей «эффективная толщина пласта – сейсмический атрибут»;
3. Нарезка кубов сейсмических атрибутов на седиментационные слайсы параллельно кровле интервала. Снятие значений сейсмических атрибутов вдоль седиментационных слайсов. Выбор слайсов атрибутов со значением линейной корреляции более 0.75. Данная величина корреляции выбрана, поскольку является сильной по шкале Чеддока;
4. Использование выбранных слайсов для алгоритмов машинного обучения. Расчет 100 реализаций с исключением 30% исходных данных;
5. Выбор алгоритма с наименьшей среднеквадратической ошибкой.

Для применения алгоритмов машинного обучения рассчитаны седиментационные слайсы параллельно кровле интервала анализа (10 слайсов с шагом 2 мс) и коэффициенты корреляции между сейсмическими атрибутами и эффективной толщиной по обучающей выборке скважин. Шаг слайсов выбран равным шагу квантования сейсморазведочных данных. Нарезка седиментационных слайсов параллельно кровле выбрана исходя из геологических условий – нижележащее отражение (кровля турнейского яруса) соответствует границе несогласия.

Валидация результатов:

- Для каждого алгоритма выполнено 100 реализаций;
- В каждой итерации 70% скважин случайно отбирались для обучения, 30% — для валидации;
- Результаты: вероятностные карты эффективных толщин (P10, P50, P90) и карта стандартного отклонения.

В главе показаны итоговые карты эффективных толщин, рассчитанные 6 способами, и проведена оценка достоверности полученных результатов.

Результирующие вероятностные карты P10, P50, P90 для примененных алгоритмов приведены на рисунках 11-15. На рисунке 16 показана карта, построенная при помощи классификации по форме сейсмического сигнала.

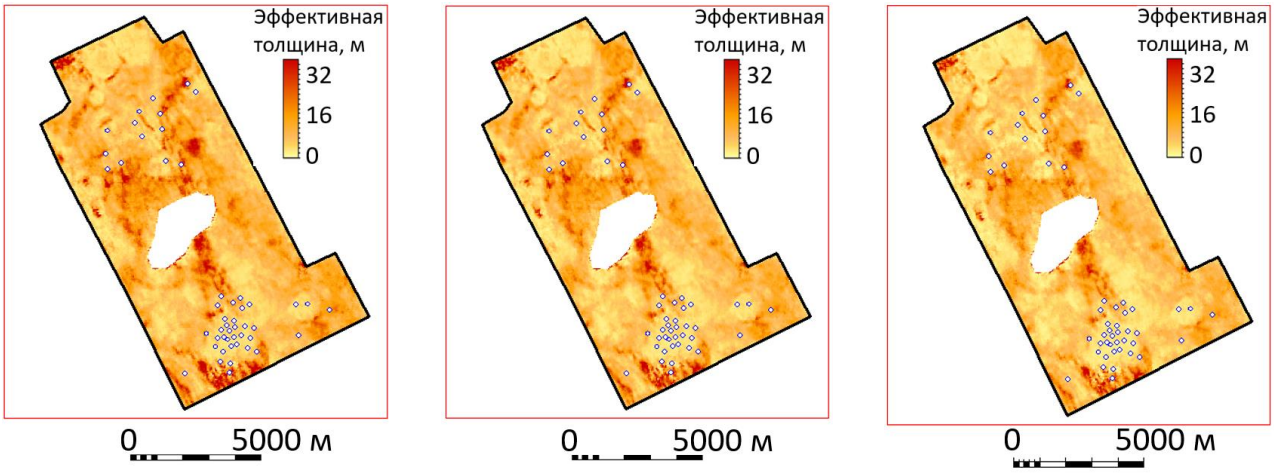

Рисунок 11 - Вероятностные карты эффективных толщин P10, P50, P90, рассчитанные при помощи линейной регрессии. Белым цветом выделена область отсутствия сейсморазведочных данных из-за населенного пункта

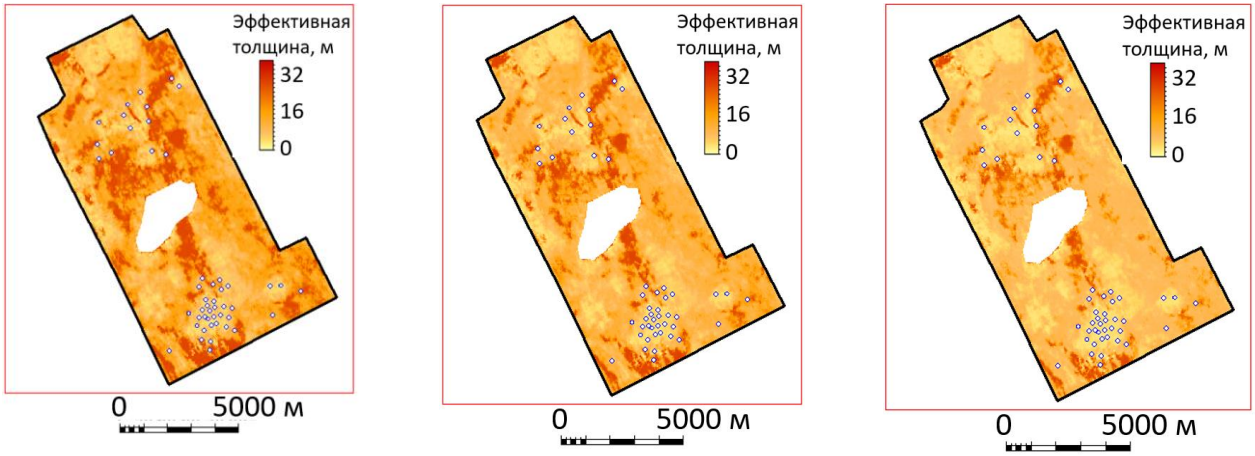

Рисунок 12 - Вероятностные карты эффективных толщин P10, P50, P90, рассчитанные при помощи нейронной сети с архитектурой многослойный персептрон. Белым цветом выделена область отсутствия сейсморазведочных данных из-за населенного пункта

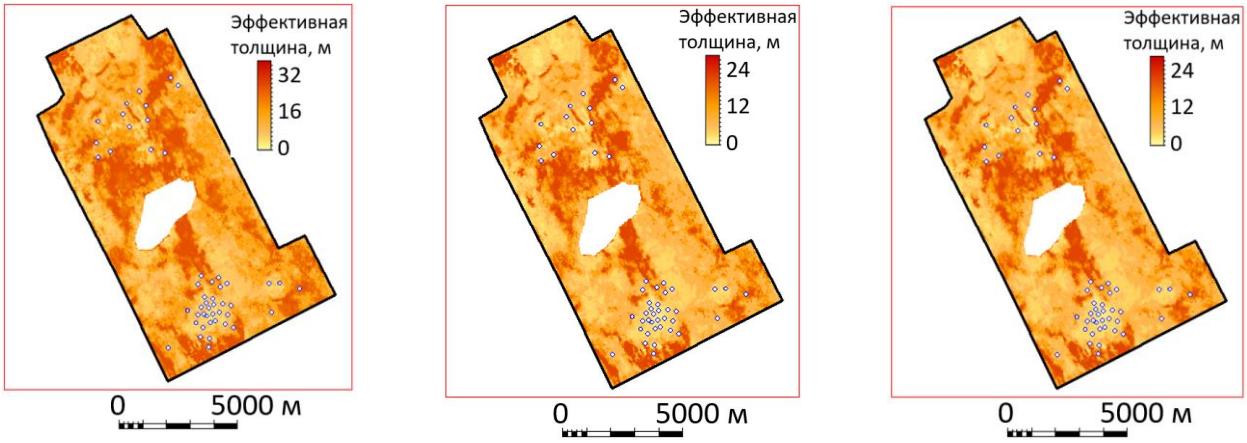

Рисунок 13 - Вероятностные карты эффективных толщин P10, P50, P90, рассчитанные при помощи алгоритма случайный лес (Random Forest). Белым цветом выделена область отсутствия сейсморазведочных данных из-за населенного пункта

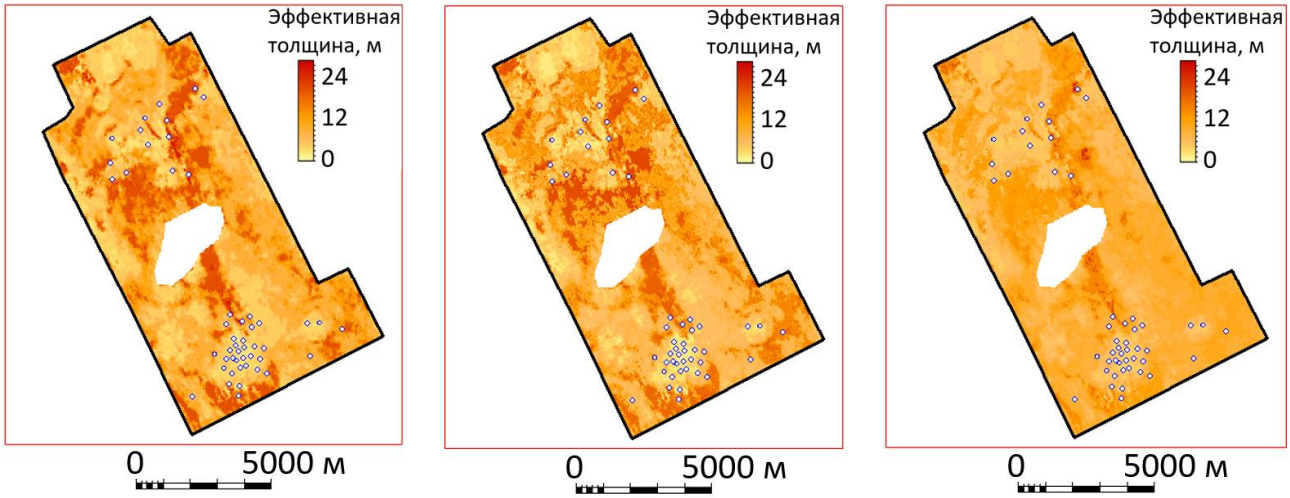

Рисунок 14 - Вероятностные карты эффективных толщин P10, P50, P90, рассчитанные при помощи метода ближайшего соседа. Белым цветом выделена область отсутствия сейсморазведочных данных из-за населенного пункта

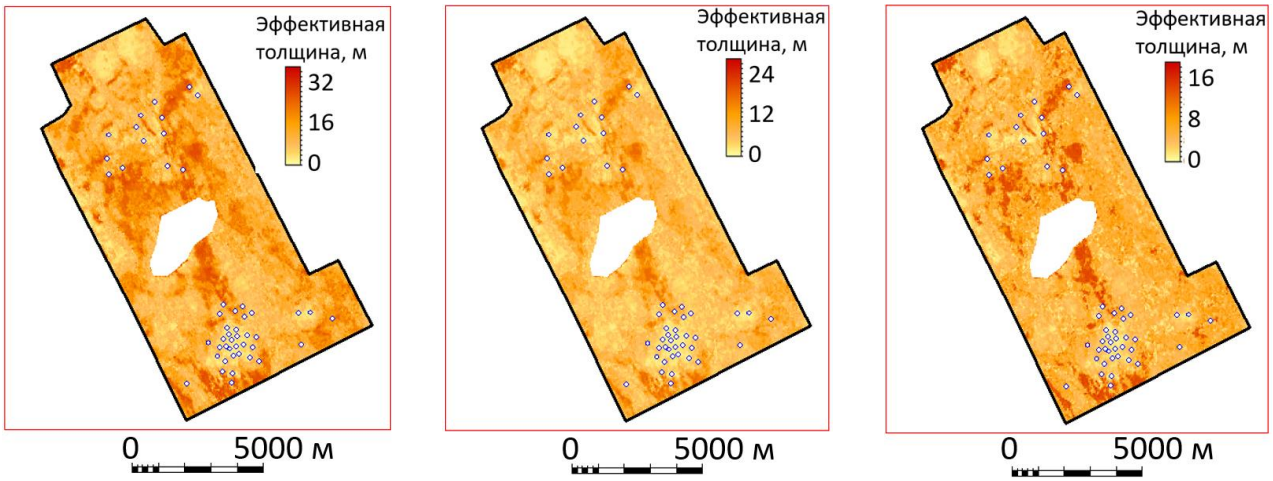

Рисунок 15 - Вероятностные карты эффективных толщин P10, P50, P90, рассчитанные при помощи модели Колмогорова для нейронных сетей. Белым цветом выделена область отсутствия сейсморазведочных данных из-за населенного пункта

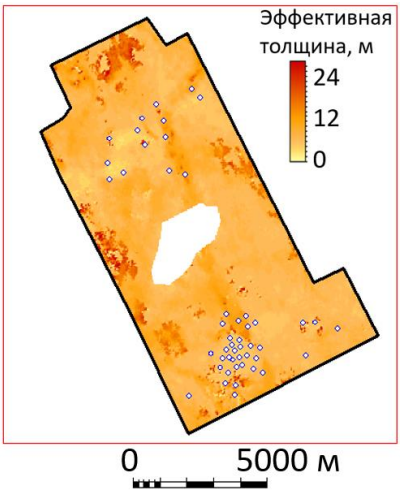

Рисунок 16 - Карта эффективных толщин, построенная методом применения классификации по форме сейсмического сигнала. Белым цветом выделена область отсутствия сейсморазведочных данных из-за населенного пункта

Результаты расчетов показаны в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчетов среднеквадратичной ошибки по месторождениям А и Б

Название метода	Месторождение А Среднеквадратичная ошибка, м	Месторождение Б Среднеквадратичная ошибка, м
Линейная регрессия от частотных сейсмических атрибутов (моночастотная компонента 50 и 60 Гц)	1.7	3.1
Метод ближайшего соседа	0.7	2.1
Нейронная сеть с архитектурой многослойный персептрон (MLP)	2.2	2.6
Алгоритм случайный лес (Random Forest).	1.2	2.7
Модель Колмогорова для нейронных сетей	1.4	2.9
Классификация по форме сейсмического сигнала	6	4.3

Наилучшие результаты достигнуты методом ближайшего соседа. Полученная среднеквадратичная ошибка наименьшая, среди всех расчетов. Наихудшие результаты получены в обоих случаях для классификации по форме сигнала.

На месторождении Б среднеквадратичная ошибка существенно выше, чем на месторождении А. Это может быть связано с большим разбросом значений эффективных толщин для данного месторождения, вызванного наличием визейского палеовреза.

Второе защищаемое положение. *Методика расчета карт эффективных толщин, основанная на классификации по форме сейсмического сигнала, обладает большей среднеквадратичной ошибкой, чем методы, основанные на седиментационных слайсах и алгоритмах машинного обучения.*

Построена модель зависимости эффективной толщины от формы сейсмического сигнала и подобраны наилучшие параметры этой модели (окно интервала анализа, размер шага анализа, положение окна анализа).

Для применения указанного метода создавалась модель акустических свойств разреза.

• сейсмостратиграфическая привязка скважины к данным сейсморазведки;

• расчет акустического импеданса по выбранной скважине, подбор импульса для свертки;

• расчет модельных форм сигнала в зависимости от изменения толщины исследуемого пласта. Подбор шага изменения толщины для расчетного импульса;

• трассировка исследуемого сейсмического горизонта; подбор параметров интервала исследования;

• построение карты классификации по форме сейсмического сигнала на основе выделенных модельных импульсов.

Таблица 2

Изменение среднеквадратичной ошибки в зависимости от интервала анализа

Окно анализа для исследования (относительно отражения от кровли интервала), мс	Длина интервала анализа, мс	Среднеквадратичная ошибка, м
+0-10	10	14
+2-10	12	11
+4-10	14	10
+6-10	16	9.8
+8-10	18	9.8
+10-10	20	4.3
+10-12	22	14
+10-14	24	18
+10-16	26	19
+10-18	28	18
+10-20	30	14
+10-30	40	15

Таблица 3

Изменение среднеквадратичной ошибки в зависимости изменения количества классов

Количество классов для окна +10-10 мс	Среднеквадратичная ошибка, м
10 (толщина класса 5 м)	18.4
25 (толщина класса 2 м)	4.3
50 (толщина класса 1 м)	11.2
100 (толщина класса 0.5 м)	12

Наилучшие параметры для расчета: длина интервала равна длине волны (20 мс), расположение интервала симметрично относительно отражения от кровли исследуемого интервала, шаг класса по глубине 2 м. Среднеквадратичная ошибка для данного метода выше, чем для методов машинного обучения.

Третье защищаемое положение. *Методика оценки достоверности прогноза эффективных толщин на пределе разрешающей способности сейсморазведки, основанная на анализе распределений сейсмических атрибутов, среднеквадратичных отклонений и параметра Simularity, позволяет повысить надежность прогноза и исключить ложные аномалии.*

Для анализа достоверности результатов предлагаются следующие виды проверки:

1. Сравнение распределения эффективных толщин по скважинам и по картам, полученным на основе сейсморазведочных данных.

Этот анализ показывает, насколько распределение и границы прогноза отличаются от фактических данных. Значения прогнозных эффективных толщин, которые отсутствуют или редко встречаются в скважинных данных, следует считать ненадежными.

2. Анализ карт среднеквадратичного отклонения (СКО) реализаций.

Данный параметр отражает степень различий между прогнозами при исключении 30% исходных данных. Чем выше значение СКО, тем выше неопределённость определения эффективной толщины.

Параметр применим только для карт, рассчитанных на основе множества реализаций. Для классификации по форме сейсмического сигнала карты СКО не рассчитывались.

3. Анализ параметра Simularity.

Параметр Simularity предложен И.И. Приезжевым для оценки достоверности геофизических аномалий. Методика его расчета включает следующие этапы:

- Значения сейсмических атрибутов извлекаются в точках расположения скважин (обучающая выборка);
- Из обучающей выборки выбираются две точки, максимально различающиеся по значениям сейсмических атрибутов. Их различию присваивается значение Simularity = 100%;
- Каждая точка на карте сравнивается со всеми точками обучающей выборки, определяется наиболее близкая скважина и рассчитывается мера сходства (Simularity);
- Строится карта Simularity, отражающая степень сходства каждой точки прогноза с ближайшей скважиной.

Интерпретация карты Simularity:

- Низкие значения Simularity (близкие к 0%) указывают на высокое сходство с обучающей выборкой, что указывает на достоверность прогноза;
- Высокие значения (близкие к 100% и более) свидетельствуют о слабом сходстве с имеющимися данными, снижая надежность прогноза.

Для повышения достоверности необходимо:

- расширить обучающую выборку (бурение новых скважин);
- сузить область прогноза;
- исключить из анализа зоны с Simularity > 100 %.

Анализ достоверности

1) Сравнение распределения эффективных толщин по скважинам и по картам, полученным по сейсморазведочным данным показаны на рисунке 17.

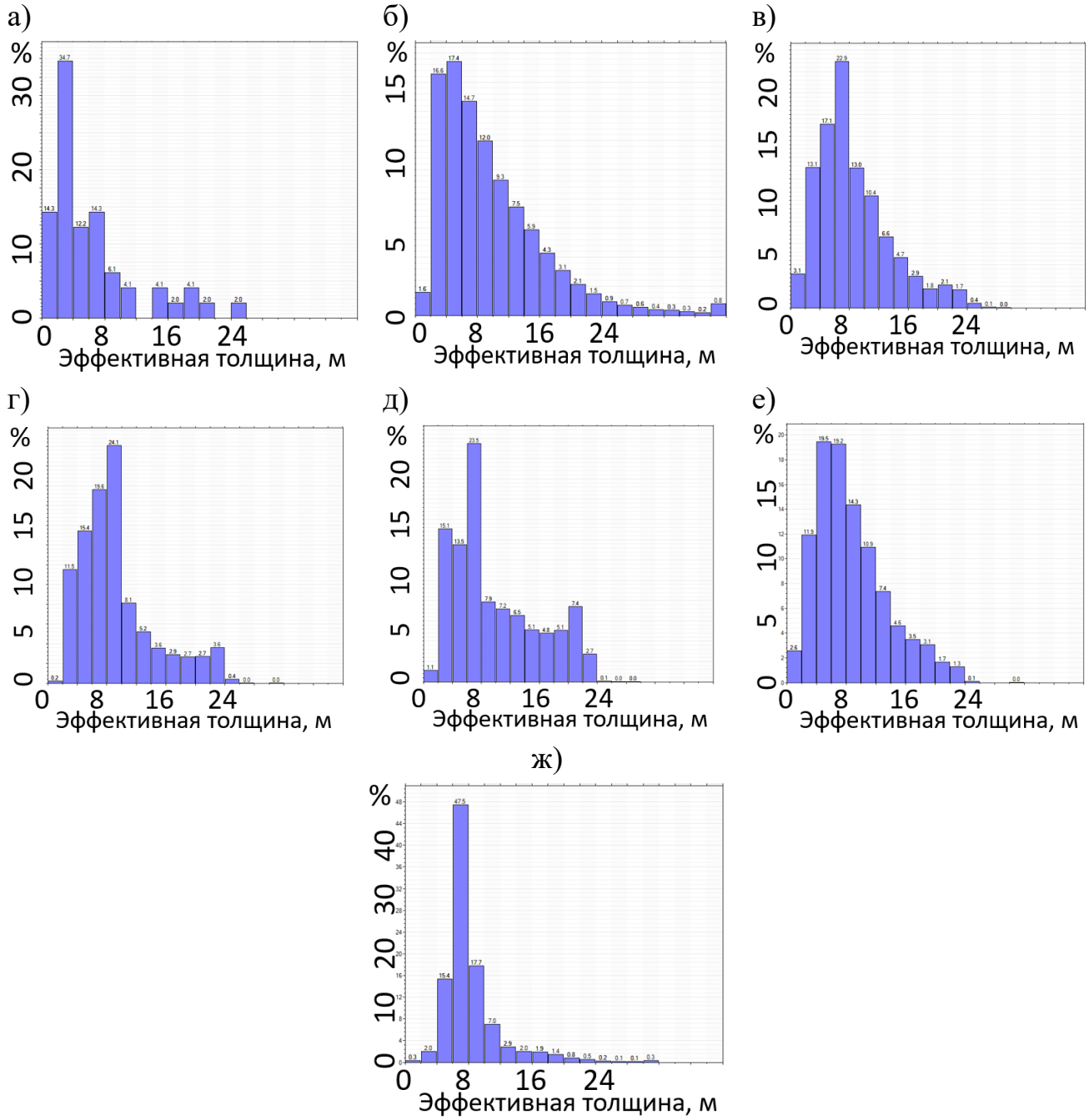

Рисунок 17 - Распределение эффективных толщин по месторождению Б по скважинам (а), а также распределения значений эффективных толщин, полученных по разным методам:
б) Линейная регрессия от сейсмических атрибутов (моночастотная компонента 50 и 60 Гц);
в) Метод ближайшего соседа;
г) Нейронная сеть с архитектурой многослойный персептрон (MLP);
д) Алгоритм случайный лес (Random Forest);
е) Модель Колмогорова для нейронных сетей;
ж) Классификация по форме сейсмического сигнала.

Как показано на рисунке 17, распределения эффективных толщин, полученные по скважинным и расчетным методам, существенно различаются. Это различие может быть обусловлено неравномерным расположением скважин на площади. Скважины не охватывают зоны с экстремальными значениями эффективных толщин.

Метод линейной регрессии прогнозирует более высокие значения эффективных толщин по сравнению с другими методами. Это объясняется особенностью алгоритма: линейная интерполяция в межскважинном пространстве экстраполирует данные, опираясь на линейные зависимости. Сравнение со скважинными данными выявило аномальные значения (более 24 м), отсутствующие в реальных измерениях. Такие прогнозы следует считать недостоверными.

Для значений эффективных толщин свыше 15 м распределения, полученные другими методами, отклоняются от скважинных данных. Скважины не охватывают все потенциальные зоны с высокими значениями. Вследствие этого прогноз в таких областях требует дополнительной проверки и не может быть признан полностью достоверным.

2) Анализ карт среднеквадратичного отклонения реализаций. Карты стандартных отклонений реализаций показаны на рисунке 18.

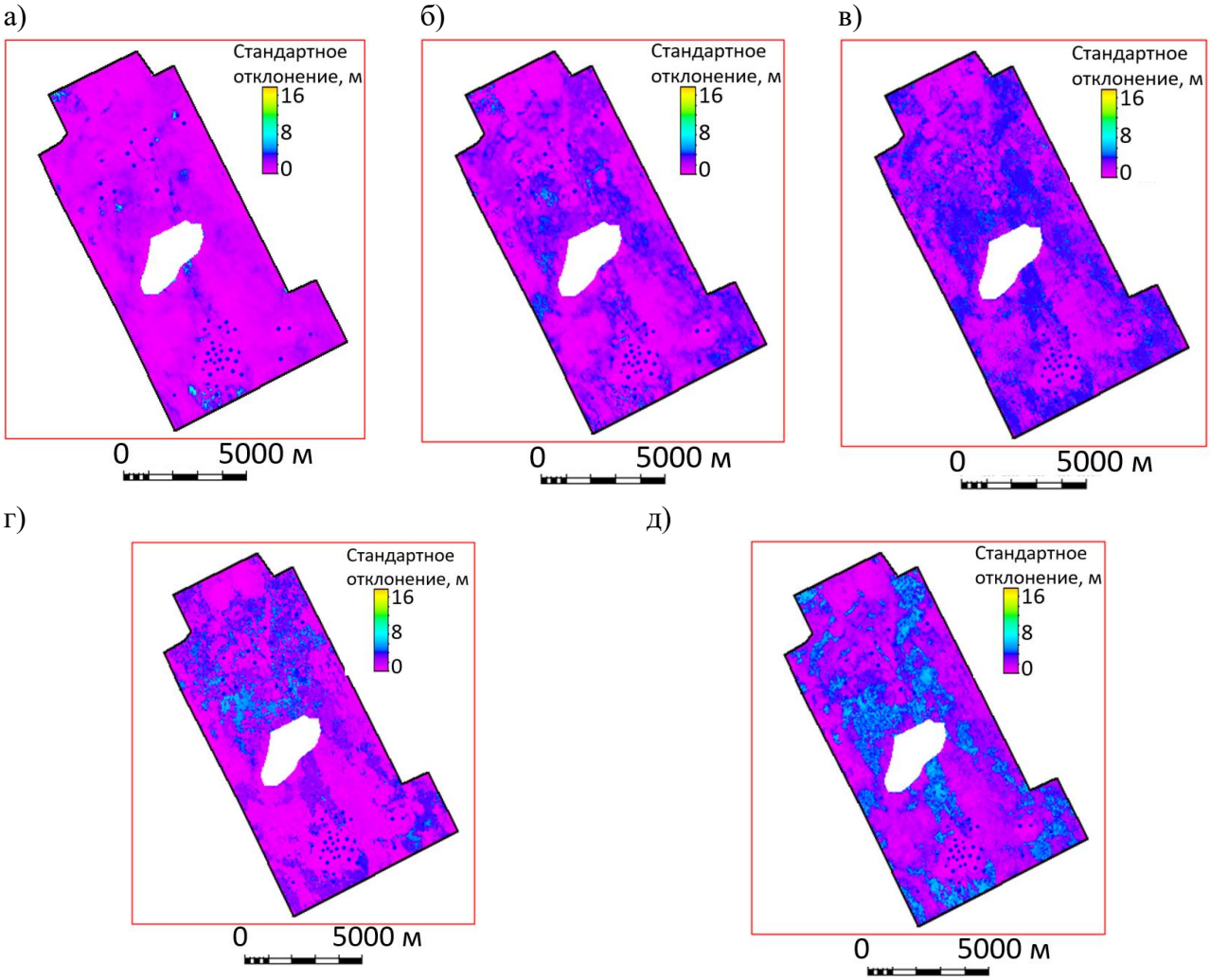

Рисунок 18 - Карты стандартного отклонения вариаций эффективной толщины для месторождения Б, рассчитанные по методам:

А) линейная регрессия от частотных сейсмических атрибутов (моночастотная компонента 50 и 60 Гц);

Б) метод ближайшего соседа;

В) нейронная сеть с архитектурой многослойный персептрон (MLP);

Г) алгоритм случайный лес (Random Forest);

Д) модель Колмогорова для нейронных сетей

Белым цветом выделена область отсутствия сейсморазведочных данных из-за населенного пункта.

Для метода линейной регрессии характерно однородное распределение отклонений, что указывает на схожие величины расхождений между всеми точками карты.

Для остальных методов наблюдаются значительные различия в распределении СКО. Максимальные отклонения фиксируются в зонах, удаленных от скважин, а также в областях с повышенными значениями эффективных толщин, таких как зона визейского палеовреза.

Зоны с максимальными значениями СКО следует рассматривать как наименее достоверные, поскольку прогнозные значения здесь значительно варьируются при изменении состава обучающей выборки.

3) Анализ параметра Simularity.

На рисунке 19 показаны карты эффективных толщин, построенные по методу ближайшего соседа с разными значениями параметра Simularity.

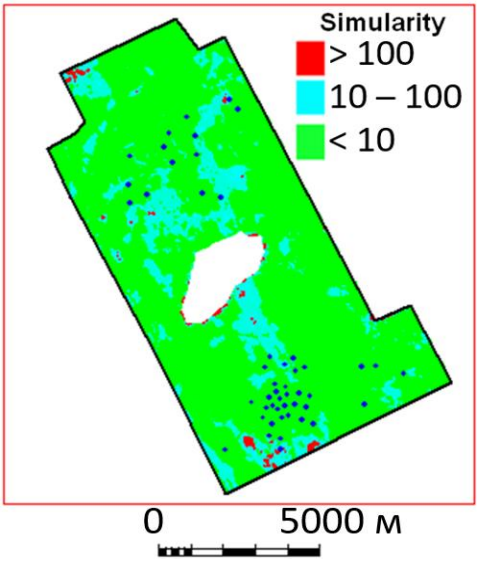

Рисунок 19 - Карта параметра Simularity для месторождения Б. Красным цветом отмечены области со значениями более 100 (области не достоверного прогноза)

Значения параметра Simularity <10% характерны для большей части карты. В этих зонах прогноз свойств является достоверным, так как в обучающей выборке присутствуют схожие значения сейсмических атрибутов.

Зоны с Simularity >100% (на рисунке выделены красным) занимают незначительную площадь. Прогноз здесь наименее надёжен, поскольку значения сейсмических атрибутов, соответствующие этим зонам, отсутствуют в обучающей выборке.

Наблюдается связь между зонами с Simularity >100% и высокими прогнозируемыми значениями эффективных толщин. Чётко выражена геометрия визейского палеовреза (на рисунке).

Интерпретация результатов:

- На большей части территории прогноз эффективных толщин достоверен;
- Локальные зоны с Simularity >100% характеризуются низкой надёжностью прогноза;
- Обучающая выборка отражает геологическое строение основной части площади.

На основании анализа трёх параметров (распределение, СКО реализаций, Simularity) прогноз эффективных толщин признаётся достоверным для большей части территории.

Прогноз в зоне визейского палеовреза требует дополнительного изучения, так как его достоверность снижена из-за ограниченности обучающих данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении диссертационного исследования автором выполнены следующие работы:

I. Проведен обзор существующих методов повышения разрешающей способности сейсморазведки. Теоретически вертикальная разрешающая способность сейсморазведочных данных составляет порядка 1/8 – 1/4 длины волны и зависит от частоты сигнала и пластовой скорости упругой волны. Для стандартных условий (центральная частота сейсмического сигнала 60 Гц, скорость порядка 3000 м/с) ограничение составляет около 12.5 м.

II. Автором проведен расчет эффективной толщины пласта при помощи подходов:

метод применения классификации сейсмического сигнала по форме и нахождение зависимости формы сигнала от толщины пласта;

линейная регрессия от частотных сейсмических атрибутов;

нейронная сеть с архитектурой «Многослойный персептрон» (MLP);

алгоритм «Случайный лес» (Random Forest);

метод ближайшего соседа;

модель Колмогорова для нейронных сетей.

III. Разработана новая методика расчета эффективных толщин на пределе разрешающей способности сейсморазведки:

1. Трассировка целевого отражающего горизонта (кровли интервала, для которого проводится расчет толщин);

2. Расчет частотных сейсмических атрибутов и нахождение корреляционных зависимостей «эффективная толщина пласта – сейсмический атрибут»;

3. Нарезка кубов сейсмических атрибутов на седиментационные слайсы параллельно кровле интервала. Снятие значений сейсмических атрибутов вдоль седиментационных слайсов. Выбор слайсов атрибутов со значением линейной корреляции более 0.75;

4. Использование выбранных слайсов для алгоритмов машинного обучения. Расчет 100 реализаций с исключением 30% исходных данных;

5. Выбор алгоритма с наименьшей среднеквадратической ошибкой.

Данная методика позволяет рассчитать эффективную толщину маломощных пластов на пределе разрешающей способности сейсморазведки и оценить достоверность прогноза.

IV. Установлено, что метод ближайшего соседа обеспечивает наименьшую погрешность расчета эффективных толщин на пределе разрешающей способности сейсморазведки среди проанализированных методов на примере тульско-бобриковских отложений Республики Татарстан.

V. Установлено, что метод, основанный на классификации по форме сейсмического сигнала, обладает большей среднеквадратичной ошибкой, чем методы, основанные на алгоритмах машинного обучения.

VI. Впервые предложенная методика оценки достоверности прогноза эффективных толщин на основе анализа трех параметров: сравнение распределения по скважинам и прогнозным картам, среднеквадратичное отклонение реализаций прогнозных карт, анализ параметра Simularity позволяет проверить надежность прогноза и отбраковать ложные аномалии.

Тема диссертационной работы соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., № 842 (с дополнениями и изменениями), и пунктам 14, 17, 18 паспорта специальности 1.6.9 «Геофизика»:

п.14. Математические и численные исследования в теории прямых и обратных задач геофизики (сейсмики, геоэлектрики, гравиметрии, магнитометрии, геотермики, ядерной геофизики, петрофизики, дистанционных зондирований Земли), включая геофизические методы разведки, скважинную и инженерную геофизику. Разработка алгоритмов решения прямых и обратных задач геофизики, методов аппроксимации геофизических полей, цифровой фильтрации, нейронных сетей и машинного обучения для повышения разрешающей способности методов и подавления помех, построения изображений. Создание соответствующих компьютерных технологий, в том числе для суперкомпьютеров и графических процессоров, и их применение в геолого-геофизической практике при достаточной математической новизне:

- Разработана новая методика расчета толщины маломощных пластов на пределе разрешающей способности сейсморазведки с применением алгоритмов машинного обучения. Методика заключается в применении седиментационных слайсов сейсмических атрибутов для обучения алгоритмов машинного обучения и прогноза эффективных толщин;

- Проанализирована возможность применения классификации по форме сейсмического сигнала для расчета эффективных толщин на пределе разрешающей способности и определены ее оптимальные параметры расчета;

- Разработана методика оценки достоверности прогнозов эффективных толщин по анализу распределений эффективных толщин в скважинах и прогнозных картах, анализу среднеквадратичных отклонений реализаций прогнозных карт и параметру Simularity.

п.17. Компьютерные системы обработки, численной инверсии и комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, включая ГИС-технологии:

- Показано, что метод, основанный на классификации по форме сейсмического сигнала, обладает большей среднеквадратичной ошибкой (в 2 и более раза), чем методы, основанные на алгоритмах машинного обучения.

п.18. Использование геолого-геофизических данных для построения цифровых геологических, гидродинамических, геодинамических и иных моделей геологической среды и месторождений:

- Построены прогнозные карты эффективных толщин для двух месторождений на территории Республики Татарстан;

- Построены карты Simularity и среднеквадратичных отклонений реализаций прогнозных карт для выбора наиболее перспективных мест заложения скважин.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

I. Публикации в научных журналах и изданиях Scopus/ Web of Science:

1. Platov B. Application of geophysical methods in the extrapolation of sedimentological data on unmastered areas of deposits (on the example of pennsylvanian carbonate reservoir, Akanskoye oilfield, east of Russian platform) / **B. V. Platov**, A. N. Kolchugin, E. A. Korolev [и др.] // SOCAR Proceedings. – 2021. – № SI2. – С. 128-134 (вклад автора 50 %).

2. Platov, B. The example of neural net algorithm applying for seismic facies analysis. Example from the Republic of Tatarstan / **B. Platov**, N. Kozhevnikova, M. Shipaeva // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2019. – Т. 19, № 1.1. – С. 593–600 (вклад автора 35 %).

3. Platov, B. The Use of Seismic Attributes to Identify Visean Erosion Paleo-Channels in the Territory of the Republic of Tatarstan / **B. Platov**, A. Stepanov // Advances in Devonian, Carboniferous and Permian Research: Stratigraphy, Environments, Climate and Resources: Golovkinsky Stratigraphic Meeting, Kazan, September 19-23, 2017. Proceedings. – Bologna : Filodiritto Publisher, 2018. – С. 417-423 (вклад автора 70 %).

4. Khamidullina G. S. Seismostratigraphic analysis of a carbonate section located in the territory of the South-Tatarian Arch / G. S. Khamidullina, **B. V. Platov**, A. Caramov [и др.] // Sedimentary Earth Systems: Stratigraphy, Geochronology, Petroleum Resources: Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting 2019, Kazan, September 24-28, 2019. Proceedings. – Bologna : Filodiritto Publisher, 2019. – С. 119–123 (вклад автора 35 %).

II. Публикации в научных журналах и изданиях ВАК

5. Платов Б.В. Новая методика расчета карт эффективных толщин с применением машинного обучения на пределе разрешающей способности сейсморазведки / **Платов Б.В.**, Храмкова Ю.О., Зинюков Р. А., Минекаева Д.Р.// Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2026. - №1. – с 107-116 (вклад автора 70 %).

6. Платов Б.В. Подбор оптимальных параметров расчета толщины маломощных пластов при помощи классификации по форме сейсмотрассы / **Платов Б.В.**, Кадиров А. И., Зинюков Р. А. [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2024. – № 3. – С. 114-120 (вклад автора 70 %).

7. Платов Б.В. Методические аспекты расчета толщины маломощных пластов по данным 3Д сейсморазведки / **Платов Б. В.**, Юсупов Р. Р., Михель А. А.// МОНИТОРИНГ. Наука и Технологии. – 2024. – № 1 (59). – С. 23-26 (вклад автора 75 %).

III. Свидетельства на программы для ЭВМ

Нургалиев Д.К., Судаков В.А., Аверьянов А.А., Багманова Ю.В., Делев А.Н., Муртазин Т.А., **Платов Б.В.**, Степанов А.И., Чукмаров И.А. / Программа симулятора для анализа геолого-промысловых данных и имитации планирования разработки нефтяного месторождения (вклад автора 20%) свидетельство на Программу для ЭВМ № 2023682211 от 23.10.2023.

Тираж 100 экз.