

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Грибанов Данила Александрович



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ АЧИМОВСКОЙ ТОЛЩИ
СЕВЕРА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ НА
ОСНОВЕ СЕДИМЕНТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
кандидат геолого-минералогических наук, доцент
Нефедов Ю.В.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФОРМИРОВАНИИ АЧИМОВСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ И ПОДХОДЫ К ИХ ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ.....	11
1.1 Геологическое строение и закономерности формирования ачимовской толщи Западной Сибири.....	11
1.2 Генетические механизмы формирования и переработки ачимовских песчано-алевритовых тел.....	17
1.3 Современные подходы к геологическому моделированию глубоководных резервуаров	22
1.4 Выводы по главе 1	33
ГЛАВА 2 ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АЧИМОВСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ	36
2.1 Геологическое строение и тектоническое положение района исследования....	36
2.2 Фактический материал.....	40
2.3 Признаки и сравнительная интерпретация интрабассейновых и экстрабассейновых турбидитовых потоков	42
2.4 Признаки и сравнительная интерпретация придонных течений.....	49
2.5 Выводы по главе 2	62
ГЛАВА 3 МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ СЕДИМЕНТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЧИМОВСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ.....	64
3.1 Постановка задачи и концепция алгоритма седиментационного моделирования.....	64
3.2 Математическая основа разработанного алгоритма	66
3.3 Исходные данные и геологическая параметризация модели.....	82
3.4 Выводы по главе 3	91

ГЛАВА 4 ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА СЕДИМЕНТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ АЧИМОВСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ	92
4.1 Пример моделирования единичного конусы выноса.....	92
4.2 Пример моделирования гряды конусов выноса	101
4.3 Выводы по главе 4	107
ГЛАВА 5 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗОН РАЗВИТИЯ КОЛЛЕКТОРОВ АЧИМОВСКОЙ ТОЛЩИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СЕДИМЕНТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	108
5.1 Результаты построения фациальных схем	108
5.2 Перспективы применения седиментационного моделирования при изучении ачимовских отложений	112
5.3 Выводы по главе 5	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	118
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в производство	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Ачимовские отложения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (НГП) являются одним из ключевых объектов восполнения ресурсной базы углеводородов [30]. Перспективы их освоения связаны преимущественно с литологически ограниченными ловушками, приуроченными к глубоководным конусам выноса, формирование которых контролировалось турбидитовыми потоками, палеорельефом, гранулометрическим составом и гидродинамическими условиями переноса осадочного материала.

Сложное внутреннее строение песчаных тел, высокая неопределенность их пространственного распространения, латеральная изменчивость коллекторских свойств и недостаточная изученность отдельных участков обуславливают необходимость глубокой проработки концептуальной геологической модели ачимовских отложений. Традиционные методы геологического моделирования, основанные преимущественно на геостатистических алгоритмах, не в полной мере учитывают генетические механизмы формирования глубоководных конусов выноса, что снижает достоверность прогноза и ограничивает их применение в условиях дефицита геолого-геофизической информации.

Седиментационное моделирование выступает инструментом перехода от статистического описания распределения свойств к процессно-ориентированному прогнозу внутреннего строения. Методика позволяет воспроизводить процессы формирования терригенных отложений с учетом различных геологических сценариев, что позволяет геометризовать литологические ловушки, в которых могли накапливаться углеводороды.

Диссертационное исследование направлено на прогнозирование внутреннего строения ачимовских отложений на основе алгоритма седиментационного моделирования. Работа вносит вклад в совершенствование подходов к построению геологических моделей сложнопостроенных резервуаров углеводородов и повышение обоснованности выделения перспективных зон развития коллекторов в литологических ловушках нефти и газа.

Степень разработанности темы исследования

Проблеме геологического строения, условий формирования и нефтегазоносности ачимовской толщи посвящены работы А.Л. Наумова, А.А. Нежданова, Ф.Г. Гурари, А. В. Храмцовой, А.Э. Конторовича, А.В. Ершова и других. Большинство исследователей принимается клиноформенная модель строения неомских отложений, согласно которой ачимовские песчано-алевритовые тела формировались в глубоководной части бассейна за счет действия гравитационных турбидитовых потоков. Вместе с тем современные исследования показывают, что существенную роль могли играть и гиперпикнальные потоки [44], связанные с прямой разгрузкой паводковых речных вод в морской бассейн. Кроме того, значительное влияние на архитектуру песчаных тел оказывали придонные течения, перерабатывавшие отлагающийся осадочный материал [134].

Методические основы седиментационного моделирования развивались в работах Т.В. Ольневой, А.В. Кулагина, D. Tetzlaff, D. Granjeon, J. Harbaugh, R. Groenenberg и других. В указанных исследованиях обоснованы подходы к численному воспроизведению процессов переноса, отложения, сортировки и аккумуляции осадочного материала. Однако существующие алгоритмические решения не в полной мере адаптированы к условиям формирования ачимовских отложений, поскольку часто ориентированы на воспроизведение обобщенной геометрии осадочных тел и недостаточно учитывают влияние различных высокоплотностных потоков, а также придонных течений.

Объектом исследования являются ачимовские отложения севера Западно-Сибирской НГП, представленные глубоководными песчано-алевритовыми телами неомского клиноформенного комплекса.

Предмет исследования – закономерности формирования и пространственного распределения ачимовских отложений севера Западно-Сибирской НГП.

Цель работы – прогнозирование особенностей внутреннего строения и пространственного распространения коллекторов ачимовской толщи, связанных с

глубоководными конусами выноса и приуроченных к литологически ограниченным ловушкам углеводородов севера Западно-Сибирской НГП.

Идея работы заключается в том, что повышение достоверности прогноза пространственного распространения коллекторов и геометрии литологических ловушек нефти и газа может быть достигнуто за счет разработанного математического алгоритма седиментационного моделирования, воспроизводящего последовательность формирования ачимовских отложений.

Задачи исследования

1. Обобщить современные представления о закономерностях формирования ачимовских отложений, проанализировать существующие подходы к седиментационному моделированию условий формирования коллекторов, приуроченных к литологическим ловушкам, и систематизировать исходную геолого-геофизическую информацию по объекту исследования;

2. Сформировать концептуальную геологическую модель неоконских клиноформенных отложений с учетом всей имеющейся геолого-геофизической информации и проработки истории геологического развития территории;

3. Разработать математический алгоритм седиментационного моделирования, позволяющий воспроизводить процессы переноса, аккумуляции, размыва и переотложения осадочного материала в глубоководной части севера Западно-Сибирского бассейна, к которой приурочены литологические ловушки углеводородов;

4. Выполнить апробацию разработанного алгоритма на основе построенной концептуальной модели севера Западно-Сибирского бассейна с использованием скважинных, керновых, сейсмических и литолого-фациальных данных;

5. Сформировать прогнозные схемы перспективных зон развития коллекторов ачимовской толщи на основе результатов седиментационного моделирования и комплексной геолого-геофизической интерпретации.

Научная новизна

1. Разработан математический алгоритм седиментационного моделирования ачимовских отложений севера Западно-Сибирской НГП, позволяющий воспроизводить последовательность переноса, сортировки, аккумуляции, размыва и переотложения осадочного материала и использовать результаты моделирования для геометризации литологических ловушек углеводородов.

2. Установлены закономерности заполнения локальных неоднородностей восстановленного палеорельефа при моделировании серии турбидитовых потоков, каждое событие имеет свою траекторию переноса осадочного материала, это приводит к образованию дополнительных депоцентров и наложению лопастей конусов выноса;

3. Обосновано использование разработанного математического алгоритма для построения геологически допустимых сценариев формирования ачимовских отложений, которые различаются характером и продолжительностью переноса осадочного материала, а также степенью влияния последующего действия придонных течений;

4. Обоснован подход к комплексированию результатов седиментационного моделирования со скважинными, керновыми и сейсмическими данными для геометризации литологических ловушек и прогноза распространения коллектора.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.6.11. «Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» по пунктам 1, 2 и 4.

Теоретическая и практическая значимость работы

Состоит в уточнении представлений о механизмах формирования глубоководных конусов выноса ачимовских отложений севера Западно-Сибирской НГП как основы прогноза литологических ловушек углеводородов. Подтверждено влияние палеорельефа, расположения источников сноса терригенного материала,

гидродинамических характеристик турбидитовых потоков на внутреннее строение ачимовских резервуаров.

Разработанный численный алгоритм седиментационного моделирования воспроизводит процессы формирования глубоководных конусов выноса. Практическая значимость предлагаемого подхода состоит в использовании результатов при уточнении концептуальной геологической модели ачимовских отложений, построении трехмерных геологических моделей и использовании при вариативной оценке ресурсной базы, что ведет к более обоснованной программе геологоразведочных работ на углеводородное сырье. Результаты диссертационной работы приняты к использованию и внедрены в деятельность ООО «Газпромнефть Научно-Технический Центр» (акт внедрения от 08.06.2026 г.) при выполнении работ по геологическому обоснованию перспектив нефтегазоносности и уточнению строения ачимовских резервуаров проекта «Южный Ямал», что подтверждено соответствующим актом внедрения (Приложение А).

Методология и методы исследований

Фактическим материалом для проведения исследования являлись геолого-геофизические данные по ачимовским отложениям севера Западно-Сибирской НГП. В основу работы положены материалы изучения керна и его фотодокументации, данные геофизических исследований скважин, результаты скважинной корреляции, а также материалы сейсморазведки 2D и 3D.

Методологической основой исследования является комплексный подход, направленный на восстановление условий формирования и прогноз пространственной архитектуры ачимовских песчано-алевритовых тел. Работа выполнена с использованием методов литолого-фациального и седиментологического анализа, скважинной корреляции, интерпретации данных ГИС, сейсмофациального и сейсмогеологического анализа. Для воспроизведения процессов формирования ачимовских резервуаров применялся метод седиментационного моделирования, основанный на эмпирических уравнениях течения жидкости и количественном учете глубины палеобассейна, расхода водно-осадочной смеси, состава осадка, скоростей транспортировки и осаждения.

Достоверность полученных результатов подтверждалась путем сопоставления модельных распределений мощности и песчанистости со скважинными и сейсмическими данными.

Положения, выносимые на защиту

1. Специфика формирования ачимовских резервуаров связана с поступлением терригенного материала в глубоководную часть бассейна, где различия в характере и продолжительности высокоплотностных потоков определяют внутреннее строение песчано-алевритовых тел;

2. Существенным фактором, определяющим пространственное распределение ачимовских отложений, является восстановленная палеоповерхность, последовательное заполнение ее локальных неоднородностей влияет на дальнейшую траекторию переноса осадочного материала, вызывая образование дополнительных депоцентров и наложение отдельных лопастей. Дополнительное действие вдольсклоновых придонных течений усиливает латеральное смещение и асимметрию глубоководных конусов выноса;

3. Применение разработанного математического алгоритма седиментационного моделирования позволяет уточнить геометрию литологических ловушек и выделить перспективные зоны развития коллекторов ачимовской толщи.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием комплекса фактических геолого-геофизических материалов, включающих данные керна, ГИС и сейсморазведки 2D и 3D, а также сопоставлением результатов седиментационного моделирования со скважинными, керновыми и сейсмическими данными.

Апробация результатов диссертации Основные положения и результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и семинарах, в том числе: XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, май 2023); VIII Балтийская научно-практическая конференция «Петрофизическое

моделирование осадочных пород» (г. Санкт-Петербург, август 2024); Всероссийская междисциплинарная научная конференция с международным участием «Азимут ГЕОнаук-2025» (г. Томск, декабрь 2025); VII Международная конференция молодых ученых и специалистов памяти А. П. Карпинского (г. Санкт-Петербург, март 2026); IX Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия-2026. Геологоразведочные технологии - наука и бизнес» (г. Москва, апрель 2026); 12-я международная геолого-геофизическая конференция «Санкт-Петербург 2026, Геонауки: от современных вызовов до решений, открывающих будущее» (г. Санкт-Петербург, апрель 2026).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, анализе отечественной и зарубежной литературы, обобщении и интерпретации геолого-геофизических материалов по ачимовским отложениям, разработке алгоритма седиментационного моделирования, построении и апробации моделей формирования ачимовских резервуаров, а также формулировании прогнозных критериев выделения перспективных зон развития коллекторов.

Публикации

Результаты диссертационного исследования освещены автором в 8 печатных работах (пункты списка литературы №13, 14, 15, 16, 68, 69, 98, 99), в том числе в 1 статье – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (далее – перечень ВАК). В 4 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 135 наименований, списка иллюстративного материала. Диссертация изложена на 139 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 4 таблицы.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФОРМИРОВАНИИ АЧИМОВСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ И ПОДХОДЫ К ИХ ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

1.1 Геологическое строение и закономерности формирования ачимовской толщи Западной Сибири

В Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции одними из наиболее перспективных объектов ТРИЗ для поиска в них залежей УВ являются ачимовские песчано-алевритовые пласты, залегающие в основании неокомских клиноформ и имеющие широкое распространение по всему бассейну [6, 9, 30]. Вместе с тем высокая изменчивость внутреннего строения ачимовских резервуаров существенно ограничивает эффективность традиционных подходов к их прогнозированию [10, 23]. Значительная вертикальная и латеральная неоднородность ФЕС, низкая проницаемость, малая связность песчаных тел по площади и разрезу и высокая неопределенность по пространственному распространению коллекторов обуславливают необходимость детального изучения закономерностей формирования и архитектуры данных отложений [5, 9, 43]. В связи с этим разработка подходов, позволяющих учитывать генетические особенности формирования ачимовских резервуаров и повышать достоверность прогноза их внутреннего строения, является одной из ключевых задач при проведении геологоразведочных работ [34, 37, 46].

Ачимовские отложения впервые были выделены Ф.Г. Гурами в 1959 г. при изучении нижнемеловых разрезов Обь-Иртышского междуречья [17]. Первоначально они рассматривались в ранге пачки, а в 1964 г. И.И. Нестеровым, Ю.В. Брадучаном и другими исследователями были переведены в ранг толщи [8]. На ранних этапах изучения представления о строении неокомских отложений основывались преимущественно на данных бурения и корреляции разрезов скважин. Это обусловило распространение плоскопараллельных стратиграфических схем, в рамках которых песчаные пласты сопоставлялись на

значительных расстояниях как относительно выдержанные субгоризонтальные тела [7, 18] (Рисунок 1.1).

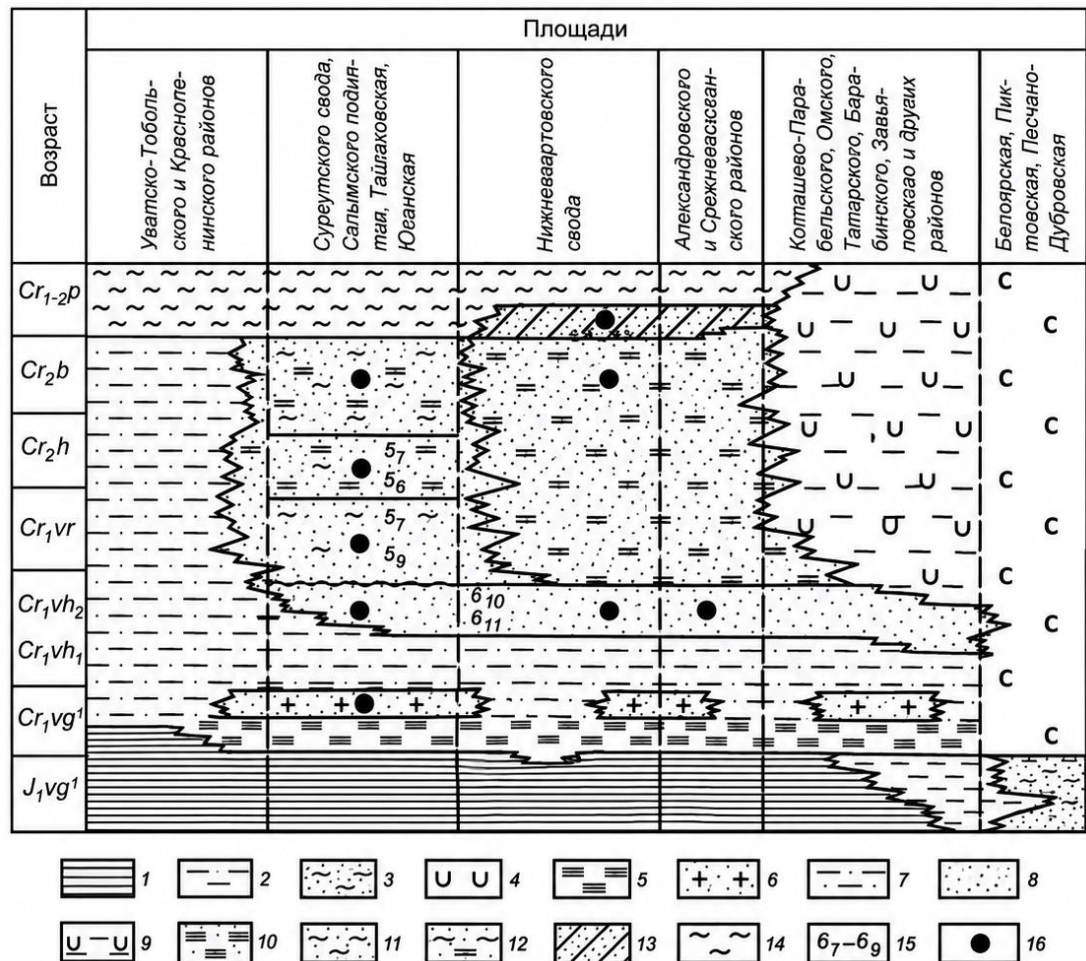


Рисунок 1.1 – Схема взаимоотношения типов фаций в отложениях неокома [18]

На рисунке 1.1: 1 - морские битуминозные отложения (баженовская свита); 2 - морские аргиллиты (марьяновская свита); 3 - песчаники с прослоями аргиллитов (прибрежно-морские аналоги баженовской свиты); 4 - лагунно-реликтовые постройки, преимущественно листоватые отложения (ильясовская свита); 5 - морские, преимущественно битуминозные отложения (нижняя подсвита куломзинской свиты); 6 - мелководно-морские отложения, преимущественно песчаники (ачимовская пачка); 7 - морские, преимущественно глинистые отложения (верхняя часть верхнекуломзинской подсвиты, аская и яловская свиты); 8 - морские песчаники (тарская свита); 9 - переходные прибрежно-морские отложения (киянская свита); 10 - прибрежно-морские зеленоватые и сероцветные песчано-глинистые отложения (вартовская свита); 11 - морские, преимущественно

сероцветные песчано-глинистые отложения (нижняя подсвита сургутской свиты); 12 - прибрежно-морские или лагунные зеленоватые глинисто-песчаные отложения (верхняя подсвита сургутской свиты); 13 - мелководно-морские или лагунные песчано-алевролитовые отложения (нижняя пачка кошайской свиты); 14 - мелководно-морские или лагунные темно-серые и черные глины (кошайская свита и ее верхняя пачка); 15 - номера продуктивных пластов (верхнего и нижнего), выделенных в свите или пачке; 16 - нефтяные месторождения

Существенное изменение представлений о строении неокома произошло по мере накопления материалов сейсморазведки методом отраженных волн и общей глубинной точки [12, 25]. На региональных сейсмических профилях была установлена сложная косослоистая конфигурация отражающих горизонтов, свидетельствующая о последовательной проградации осадочных комплексов в сторону глубоководной части бассейна [3, 12, 34]. Это изменило подход к корреляции. Использование сейсмических материалов позволило проследить, что прошлая модель сопоставления ачимовских отложений некорректна, так как пласты могут соответствовать различным по возрасту геологическим телам, а их положение в разрезе должно в первую очередь определяться положением внутри клиноформы [2, 34].

Первая клиноформенная модель строения неокомских отложений Западно-Сибирской НГП была предложена А.Л. Наумовым в 1970–1980-е годы [32, 33]. Автором выделялся крупный единый комплекс, который можно разделить на три составные части: мелководную ундаформную, склоновую ортоформную и глубоководную фондоформную. Подчеркивается связь глубоководных отложений с шельфовой областью питания [18, 33], формирование ачимовских отложений связывается с транспортировкой осадочного материала питающими каналами через шельф в фондоформенную часть бассейна [6, 18, 34] (Рисунок 1.2).

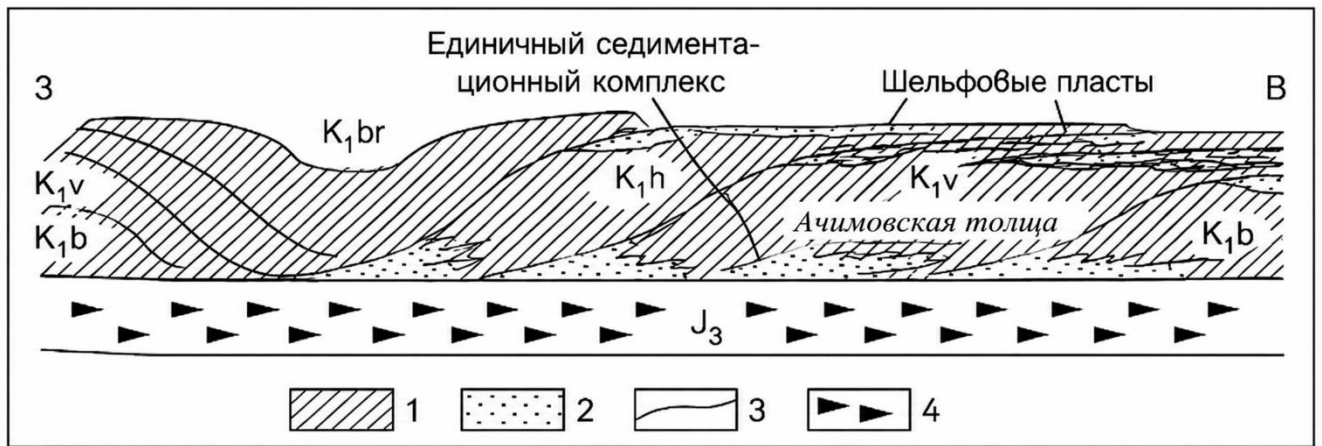


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема строения неокомских отложений Западной Сибири (1 – отложения склона, 2 – отложения фондоформенной части, 3 – границы циклитов, 4 – баженовская свита) [18]

В последующие годы клиноформенная модель имеет дальнейшее развитие в работах А.А. Нежданова [34], В.Н. Бородкина и А.Р. Курчикова [6, 29], С.В. Ершова [20, 22], А.Э. Конторовича [26], К.В. Зверева [24, 21] и других исследователей. В рамках этих представлений положение ачимовских резервуаров в составе клиноформы определяется особенностями стратиграфического строения, палеобатиметрии и морфологии бассейна [19, 27, 34]. Наиболее значительные скопления песчано-алевритового материала приурочены к депоцентрам, которые связаны с крупными аллювиально-дельтовыми источниками питания шельфовой зоны [19, 46]. Формирование ачимовских отложений связывается с развитием крупных проградационных систем. Материал поступал с прилегающей суши. И первоначально накапливался в аллювиально-дельтовых и мелководно-морских обстановках [5, 26, 61]. Однако не весь материал оставался на шельфе. Основная аккумуляция перенесённого материала происходила у подножия склона и на прилегающих участках глубоководной зоны [6, 34, 104]. Транспортировку песчано-алевритового материала обеспечивали турбидитовые потоки, которые различались по плотности и продолжительности действия [44, 50, 89, 94]. Направление их движения зависело от морфологии палеорельефа, расположения склоновых ложбин и каналов, величины уклона, объёма поступившего осадка и его гранулометрического состава [34, 55, 91]. При выходе из канала на относительно

выровненную поверхность скорость потока уменьшалась. Так происходило осаждение осадков. В результате формировались конусы выноса [97, 100, 128] (Рисунок 1.3).

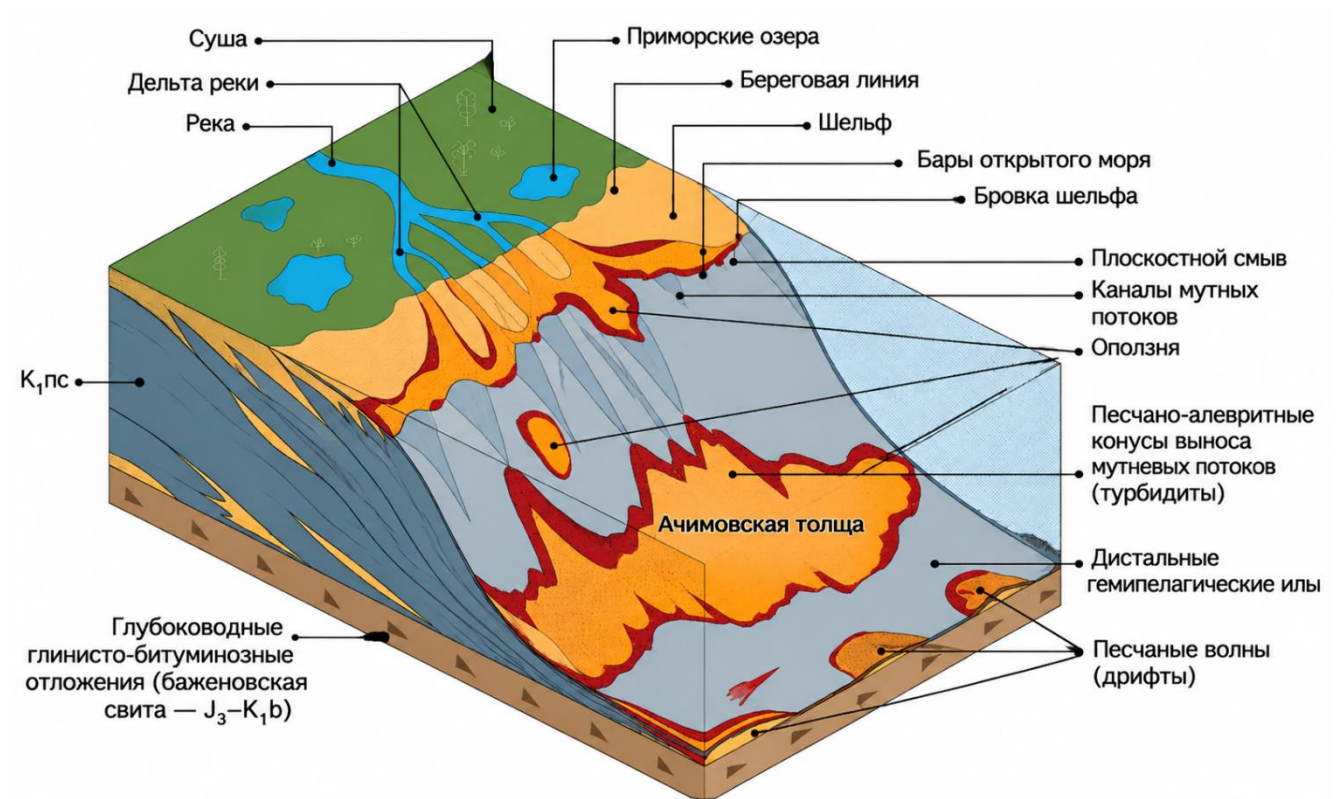


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема формирования ачимовских отложений Западной Сибири [34]

Внутреннее строение ачимовских резервуаров формировалось в ходе последовательных событий поступления и перераспределения осадочного материала [6, 12]. Каждое последующее событие могло изменять положение формирующихся песчаных тел, одни тела частично перекрывали ранее накопленные отложения, другие заполняли понижения палеорельефа либо смещались относительно предшествующих аккумулятивных элементов. Геометрия тел при этом усложнялась [15, 40, 63, 100]. Ачимовские резервуары характеризуются литологической ограниченностью песчано-алевритовых тел [25, 33, 41], в отличие от классических структурных ловушек, где положение объектов контролируется гипсометрией кровли пласта. Важной особенностью геометризации литологических ловушек является их расчленённость и положение

в разрезе [6, 34], поэтому при оценке перспектив нефтегазоносности необходимо устанавливать границы локальных зон коллекторов, которые приурочены к каналам, лопастям и конусам выноса [38, 46, 105, 131] (Рисунок 1.4).

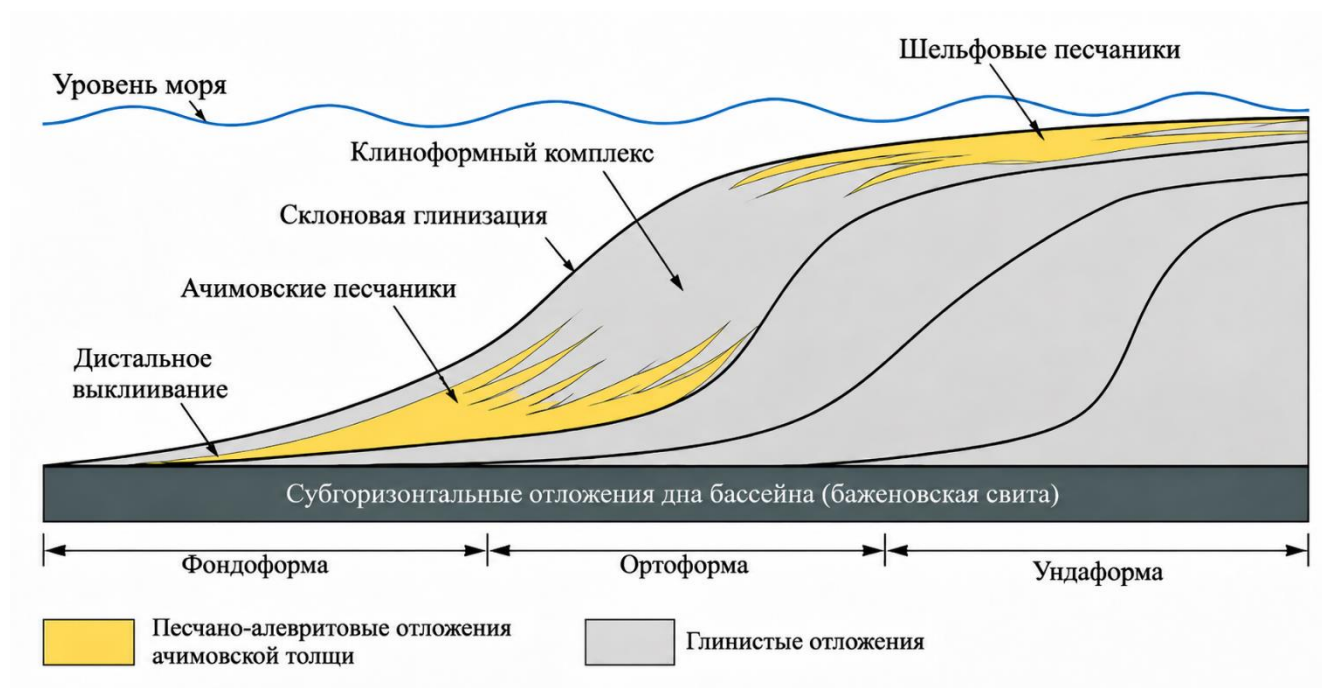


Рисунок 1.4 – Клинформное строение ачимовской толщи (составлено автором)

Ввиду сложного геологического строения геометрия песчаных линз ачимовских отложений способна существенно изменяться в пределах небольших расстояний [9, 23]. Данная особенность осложняет выполнение межскважинной корреляции, особенно для участков, характеризующихся низкой изученностью [10, 43]. Развитие методов сейсморазведки дало возможность с большей точностью оконтуривать границы распространения глубоководных конусов выноса, однако прогноз коллектора по ней не всегда возможно воспроизвести достоверно, для понимания внутреннего строения и генетической природы ее образования необходимо применение дополнительных совершенно иных подходов к геологическому моделированию [12, 15, 25, 34, 69].

1.2 Генетические механизмы формирования и переработки ачимовских песчано-алевритовых тел

Ачимовские отложения, приуроченные к основанию неокомского клиноформенного комплекса Западной Сибири, представлены песчано-алевритовыми телами глубоководного генезиса [6, 18, 34]. Геологическое строение определялось в зависимости от условий поступления терригенного материала и особенностей движения водно-осадочной смеси, во время формирования осадков частицы осаждались, сортировались и подвергались вторичной обработке [44, 121, 124], от сочетания действия этих процессов зависели итоговая геометрия геологических тел и неоднородность их строения. Основным агентом поступления осадочного материала являлись гравитационные турбидитовые потоки, которые формировались при большей плотности водно-осадочной смеси относительно принимающей морской воды, перемещение происходило под действием силы тяжести [34, 42, 84, 92]. Сортировка осадочного материала происходила по мере протекания потоков, в присклоновой части накапливался крупнозернистый материал, ввиду его быстрой потери энергии, а пелитовая составляющая перемещалась на удаленные участки системы, это предопределило зональность глубоководных конусов выноса [100, 104, 128] (Рисунок 1.5).

Классическая модель формирования ачимовской толщи подразумевает действие интрабассейновых потоков, которые возникают при нарушении устойчивости осадочных отложений, расположенных на шельфе, подводном склоне или отдельных его выступах [50, 97, 134]. Причины начала движения осадков связывают с землетрясениями, высокой нагрузкой пород на склон, превышением углов устойчивости склоновой части или развитием оползневых процессов [49, 53]. Приводящийся в движение осадок переносится в глубоководную часть бассейна, где происходит его аккумуляция, такие потоки имеют кратковременный характер, их действие занимает несколько часов, иногда сутки и каждое такое событие имеет свой характер [84, 89, 94, 118]. Во время движения по склону поток способен размывать подстилающие отложения. За счёт этого объём переносимой смеси увеличивается. При выходе на более пологие

участки фондоформенной части скорость движения уменьшается. Поток постепенно теряет способность удерживать осадочный материал во взвешенном состоянии [71, 92]. В пределах склоновой зоны формируются каналы. Они служат основными путями транспортировки песчаного материала от бровки шельфа к подножию склона [55, 91], далее каналы могут переходить в распределительные элементы, которые связаны с аккумулятивными лопастями и глубоководными конусами выноса [100, 104, 128].

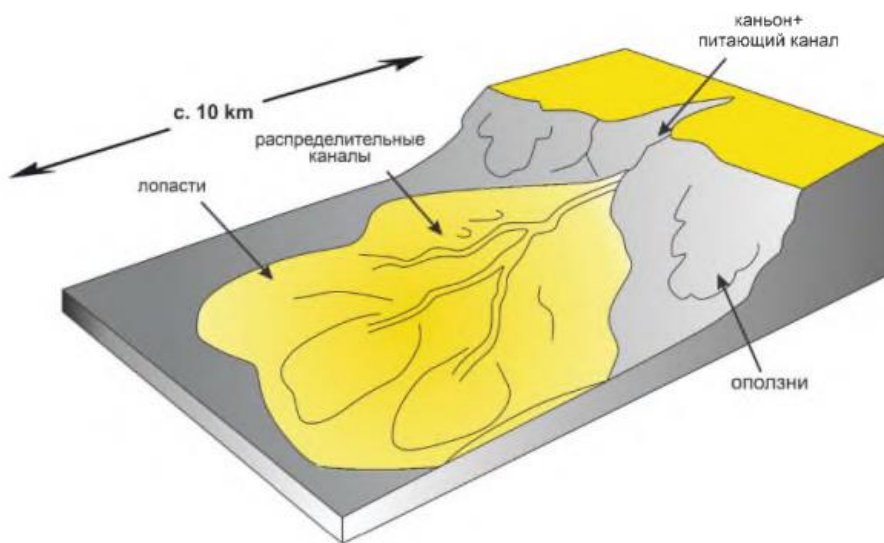


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема формирования интрабассейновых турбидитовых потоков [37]

В составе турбидитовой седиментационной системы основной интерес для поиска нефти и газа представляют следующие морфологические элементы [97, 131]. Лопasti соответствуют областям разгрузки потока, где накапливается значительная часть переносимых песчаных фракций [55, 70, 91, 105]. Они, каналы и дистальные шлейфы образуют более крупную морфологическую единицу - глубоководный конус выноса [100, 128]. Его размеры и пространственная конфигурация определяются условиями движения водно-осадочной смеси. На их формирование влияют уклон подводного склона, морфология палеорельефа, объём вовлечённого материала, начальная концентрация осадка и его гранулометрический состав [84, 94, 124]. Отдельное значение имеет способность потока размывать подстилающие отложения и сохранять транспортную

способность при движении к подножию склона, при поступлении значительного объёма материала в условиях выраженного уклона могут развиваться лопастные тела, имеющие широкое площадное распространение [70]. Иная картина наблюдается при небольшом объёме осадка или быстром уменьшении скорости потока. В таких условиях аккумуляция концентрируется на ограниченной площади, а формирующиеся песчаные тела имеют меньшую протяжённость и могут быть пространственно разобщены [105, 131].

Однако не все особенности итоговой геометрии ачимовских песчано-алевритовых тел можно объяснить исключительно действием интрабассейновых турбидитовых потоков [11, 44]. В отдельных глубоководных системах отмечаются протяжённые песчаные тела, склоновые каналы, связанные с шельфовыми и русловыми системами, а также признаки поступления обломочного материала непосредственно из континентальных источников [96, 133]. Это говорит о гиперпикнальном механизме потоков [44, 96, 134]. Они возникают при разгрузке речных паводковых вод в морской бассейн. Необходимым условием является превышение плотности поступающей водно-осадочной смеси над плотностью воды принимающего бассейна [96, 102]. При выполнении этого условия речной поток погружается и продолжает движение вдоль дна под действием силы тяжести [87], далее речной материал может транспортироваться в глубоководную область в пределах единой седиментационной системы [44, 103, 134]. Различается и продолжительность действия потоков. Экстрабассейновые в отличие от интрабассейновых действуют продолжительное время [96, 133]. Оно достигает нескольких дней, а иногда и недель [87, 103]. На протяжении этого времени характеристики потока не остаются постоянными, изменяются расход воды, концентрация взвешенного материала, скорость движения и все это отражается на последовательности осаждения гранулометрических фракций и внутреннем строении формирующихся тел (Рисунок 1.6). В разрезе фиксируются сложная внутренняя слоистость, неоднократные изменения гранулометрического состава и признаки последовательного усиления и ослабления течения [44, 133, 134],

поэтому зачастую разрез не соответствует идеализированной последовательности цикла Боума, характерной для классических турбидитов [50, 118].

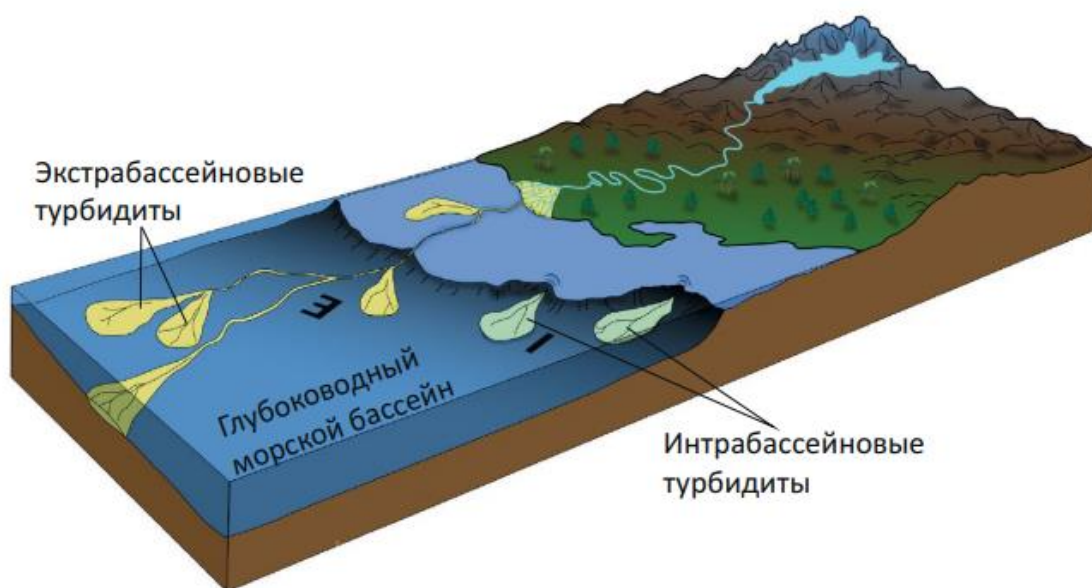


Рисунок 1.6 – Блок-диаграмма формирования классических (интрабассейновых) и гиперпикнальных (экстрабассейновых) турбидитов [134]

При изучении ачимовской толщи гиперпикнальный механизм представляет интерес прежде всего с точки зрения происхождения песчаного материала и его поступления в глубоководную часть бассейна. Здесь существует связь речных источников питания и глубоководных тел [6, 15, 41]. При продолжительной разгрузке водно-осадочной смеси песчаные и алевритовые фракции могут переноситься на значительные расстояния от бровки шельфа [69, 98], подобные условия способствуют развитию протяжённых песчаных тел. Геометрия таких систем зависит от сочетания факторов. Помимо морфологии подводного склона, существенное значение имеют продолжительность паводкового события, расход поступающей воды, осадочная нагрузка реки и гранулометрический состав материала [80], изменение этих характеристик влияет на условия переноса и распределения осадка в пределах глубоководной области [41, 126, 128] (Рисунок 1.7).

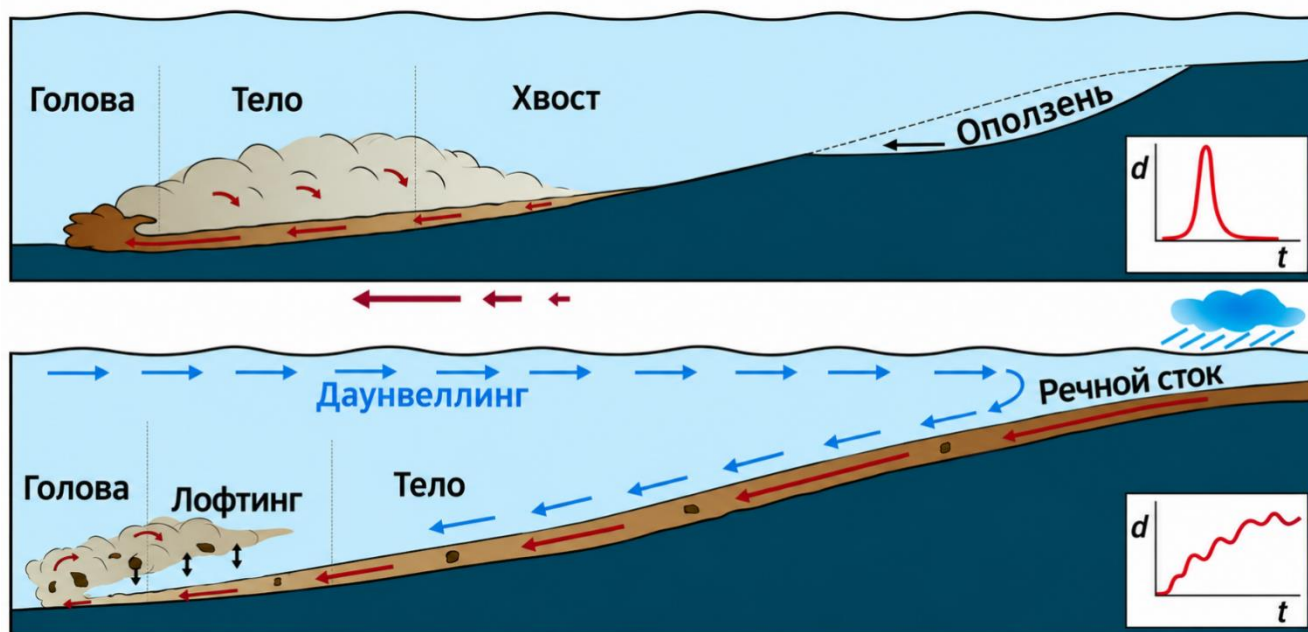


Рисунок 1.7 – Профили движения для интрабассейновых и экстрабассейновых турбидитовых потоков [44, 134]

После первичной аккумуляции терригенного материала его пространственное распределение могло изменяться под воздействием придонной циркуляции. Одним из рассматриваемых механизмов такой переработки являются контурные течения [59, 109, 120]. Для Западно-Сибирского бассейна раннемелового времени развитие придонных течений связывается, в частности, с возможным поступлением холодных вод арктического происхождения через северные проливы, повышенная плотность этих водных масс могла способствовать их погружению в глубоководную часть бассейна [45]. Дальнейшее движение зависело от сил Кориолиса. В Северном полушарии такое воздействие вызывает отклонение движущихся вод и при определённых условиях способствует возникновению вдольсклоновой циркуляции. Развитие контурных течений рассматривается в связи с термогалинными и геострофическими процессами. При этом гидродинамический режим придонной области может испытывать влияние ветровых воздействий, внутренних волн и глубинных приливов [54, 76, 77, 108, 116, 127].

Придонные течения воздействуют на отложения, которые уже поступили в область аккумуляции [53, 116]. В зависимости от гидродинамических условий они

могут размывать верхнюю часть осадочной толщи, сортировать песчаные и алевритовые фракции и перемещать их вдоль подводного склона, повторная аккумуляция происходит на флангах седиментационных тел либо в локальных понижениях палеорельефа, при этом изменяется первоначальное распределение материала, сформированное гравитационными потоками [57, 107]. Зоны повышенной песчанистости в таких условиях могут возникать в латеральных частях глубоководных конусов выноса [53, 94, 104].

Формирование ачимовских песчано-алевритовых тел связано с несколькими процессами осадконакопления. Они могли действовать последовательно или одновременно. Сначала обломочный материал поступал в глубоководную часть бассейна [4, 6, 33]. Пути его переноса различались. В одних случаях осадок перемещали кратковременные интрабассейновые гравитационные потоки [84]. В других материал поступал при более продолжительной гиперпикнальной разгрузке речных систем [41, 127], каждый из этих механизмов имел свои особенности. Различались условия мобилизации материала и характер его поступления в бассейн. Далее водно-осадочная смесь двигалась по подводному склону. Поток размывал подстилающие отложения. Одновременно частицы сортировались по крупности, а часть переносимого материала осаждалась [79, 89]. Первичное осаждение не всегда завершало перераспределение материала. Придонные течения могли вновь вовлекать ранее накопленный осадок в движение и переносить отдельные фракции вдоль склона. Зоны аккумуляции при этом смещались. Такая переработка происходила после завершения отдельного седиментационного события либо одновременно с продолжающимся поступлением осадка. В результате могли формироваться асимметричные конусы выноса, а песчаные тела - смещаться в латеральном направлении [15, 53, 104, 107].

1.3 Современные подходы к геологическому моделированию глубоководных резервуаров

Одной из сложных задач при геологическом моделировании ачимовских резервуаров остаётся прогноз архитектуры глубоководных конусов выноса.

Песчано-алевритовые тела неоднородны по своему строению. Их распространение по площади и разрезу во многих случаях удаётся определить лишь с высокой степенью неопределённости [23, 52]. Одной интерполяции скважинных данных недостаточно. Требуется также разобраться в геологических процессах, которые определяли условия формирования резервуара. Сначала разрабатывают концептуальную модель объекта. Это основа дальнейших построений. На её основе затем прогнозируют распределение свойств в межскважинном пространстве [23, 36, 37]. Геологическое моделирование позволяет уточнить представления о строении ачимовских отложений и оценить, как изменяются свойства пород в объёме пласта. Полученные результаты используют при поисках и разведке месторождений нефти и газа [23, 35]. При этом основная задача заключается не только в распределении коллекторских свойств, но прежде всего в воспроизведении генетически обусловленной архитектуры песчаных тел [55, 91, 131].

Построение геологической модели начинается с создания концептуальной основы моделирования [1]. Ее формирование происходит путем комплексирования керна, данных ГИС, результатов сейсмической интерпретации, региональных геологических представлений и сведений о современных или древних аналогах [6, 10]. Для ачимовских тел в такой модели принципиально важны положение источников сноса, конфигурация палеорельефа, направление транспортировки осадочного материала, положение подводных каналов, зон разгрузки потока, лопастей [34, 104, 105]. Концептуальная модель задает геологические правила, в рамках которых в дальнейшем выполняется распределение фаций, песчанистости, пористости и проницаемости [36, 40].

Особую роль в построении концептуальной модели играет сейсмофациальный анализ [12, 37, 46]. Сейсмические данные позволяют выделять амплитудные аномалии, линейно вытянутые тела, вероятные области развития песчано-алевритовых отложений [25, 104]. По результатам анализа сейсмических атрибутов удастся выделять возможные пути транспортировки осадочного материала, а также производить оконтуривание перспективных объектов [3, 38].

Однако низкая вертикальная разрешенность не позволяет выделять сложную многоуровневую систему конусов выноса. В условиях низкой изученности не представляется возможным по сейсмическим данным определить литологический состав. Поэтому сейсмогеологическая модель является необходимой, но недостаточной основой для количественного прогноза внутреннего строения резервуара [23, 46] (Рисунок 1.8).

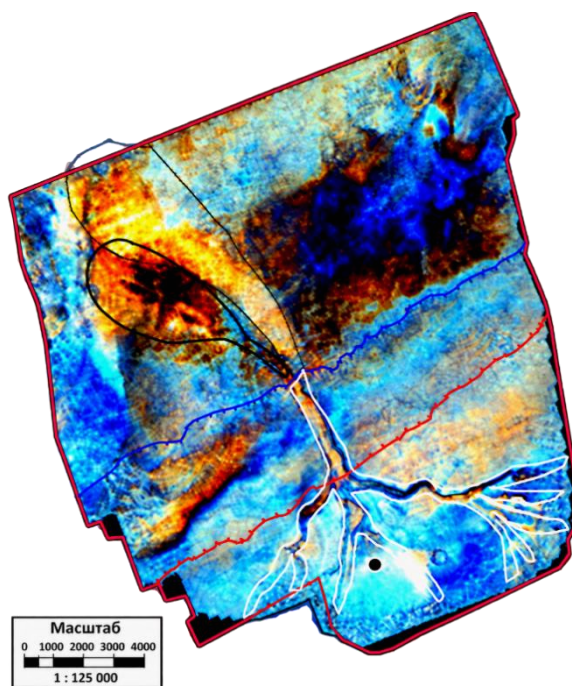


Рисунок 1.8 – Сейсмофациальный анализ по результатам анализа сейсмических атрибутов (составлено автором)

После создания концептуальной геологической модели идет этап построения статической геологической модели. Сначала выбираются целевые интервалы для моделирования, создается структурный каркас модели, строится фациальная и литологическая модель и затем уже происходит ее насыщение петрофизическими свойствами [23, 106]. В мировой и отечественной практике широкое распространение имеют геостатистические методы, включающие последовательное индикаторное моделирование, последовательное гауссово моделирование и различные их модификации [56, 82, 90]. В основе данных подходов лежит строгое согласование построенной модели с имеющимися скважинными данными и заданными геологическими трендами. В условиях достаточной изученности данные методы позволяют надёжно воспроизводить

моделируемые свойства. Однако на начальных этапах ГРП их использование не всегда способно решить задачу и воспроизвести требуемое концептуальное строение объекта [52, 106].

Недостатки геостатистических методов заключаются в отсутствии возможности воссоздать природу изучаемого объекта. Данные модели в первую очередь описывают пространственную изменчивость свойств [9, 23, 106, 122]. Проблема данных методик в том, что полученная модель будет соответствовать фактическим данным в точках скважин, но при этом не отражать корректную морфологию глубоководных конусов выноса [48, 56, 106]. Поэтому результат геостатистических подходов напрямую зависит от количества и качества исходной геолого-геофизической информации и грамотно построенной концептуальной геологической модели.

Для более реалистичного воспроизведения геометрии осадочных тел применяются объектно-ориентированные методы моделирования [56, 106]. В этом подходе геологические тела задаются как объекты определенной формы, размера и ориентации: каналы, лопасти, линзы, баровые тела, дельтовые протоки или другие элементы седиментационной системы [55, 91]. Особенность моделирования глубоководных резервуаров состоит в том, что их архитектурные элементы имеют иерархическое строение, могут быть охарактеризованы геометрически и поддаются параметризации по размерам и форме [100, 128, 131]. Однако встает вопрос о корректном подборе аналогов и учете всех неопределенностей. Объектный подход воспроизводит конечную геометрию осадочных тел, но не описывает физику их формирования. Также ограничение метода состоит в сложности одновременного воспроизведения большого количества скважинных данных и заданных параметров объектов [51, 57] (Рисунок 1.9).

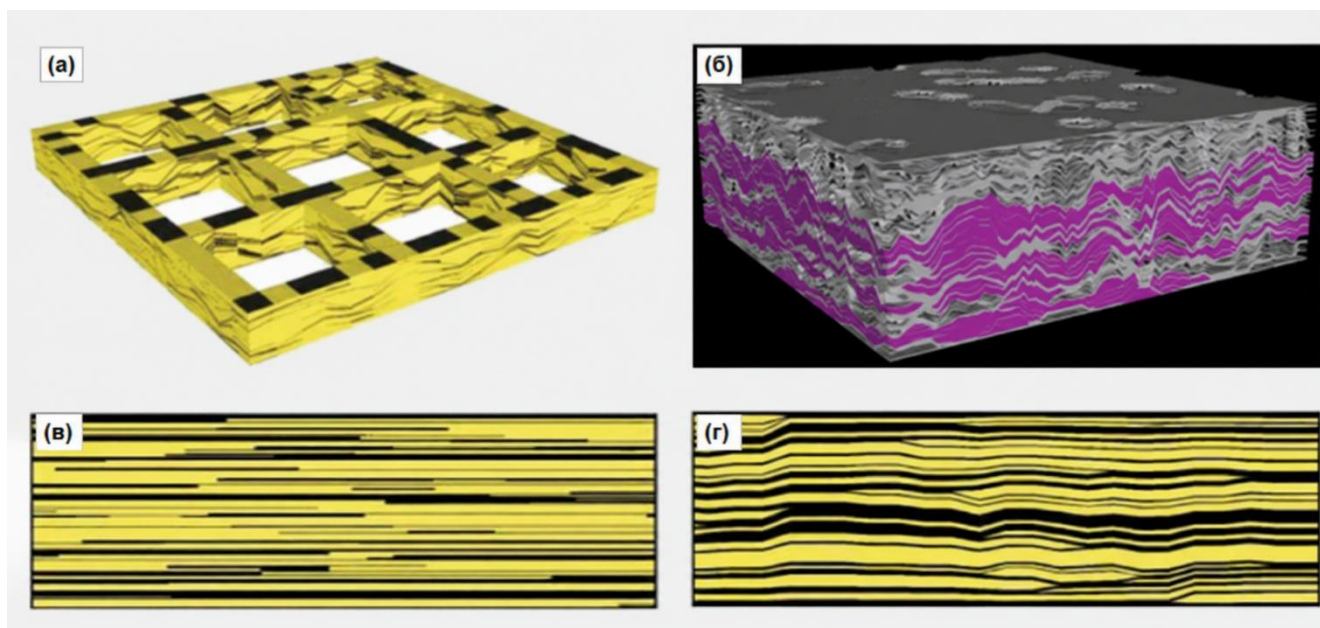


Рисунок 1.9 – а) Схематический пример геологической модели, коллектор обозначен желтым цветом, неколлектор обозначен черным цветом, б) Геологическая модель, фиолетовым цветом показаны связанные прослои песчаника; в) Традиционные объектно-ориентированные модели, г) Геологическая модель, построенная классическими геостатистическими методами [106]

Другим направлением развития пиксельных подходов является многоточечная геостатистика [48, 122]. Данная технология использует в основе обучающее изображение, которое должно воссоздать ожидаемую геометрию конусов выноса и расположение литофаций в периметре объекта [122]. Преимуществом данного подхода является возможность воспроизводить более сложную структуру геологических тел [56, 65,]. Данная методика в полной мере завязана на качестве обучающего изображения [82, 90, 135]. Оно должно корректно отражать седиментационную систему и воспроизводить ключевые фациальные паттерны. В условиях Западно-Сибирского бассейна, где формирование ачимовских отложений связано с различными типами плотностных потоков и влиянием контурных течений, хорошо обоснованная концептуальная модель выступает в роли ключевого звена построения достоверной модели [62, 67, 93, 94, 107, 128] (Рисунок 1.10).

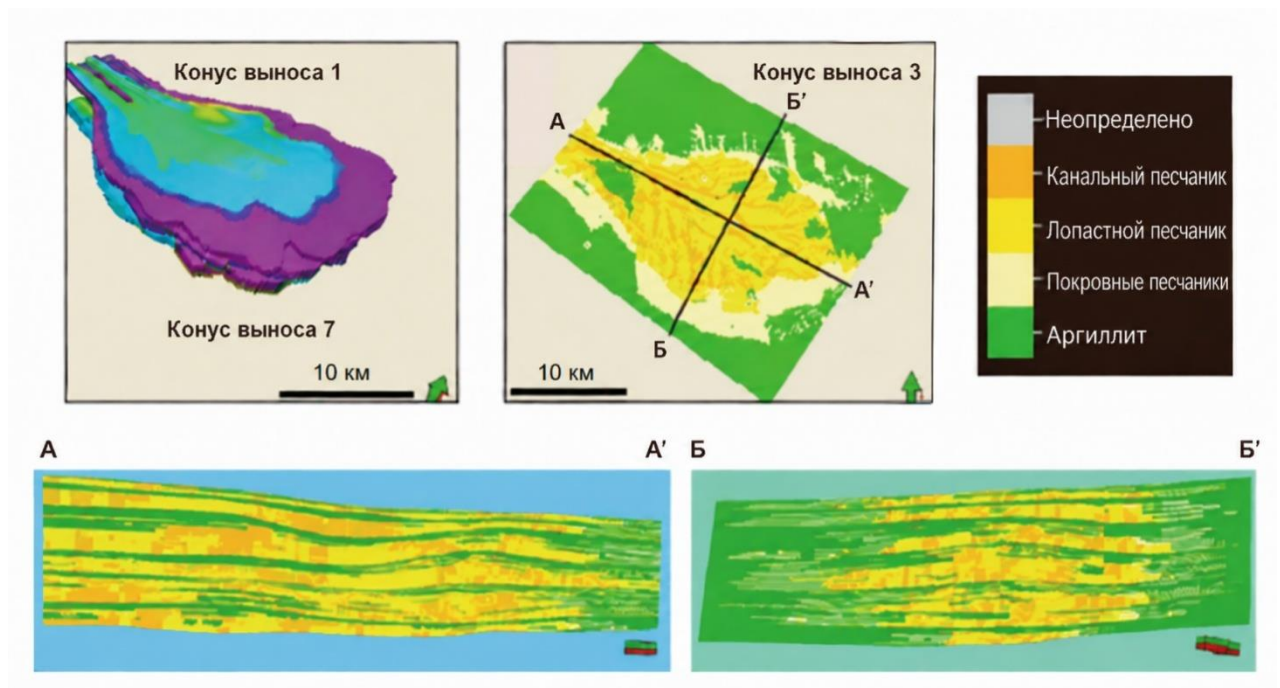


Рисунок 1.10 – Модель литологии, построенная с использованием методов многоточечной геостатистики [135]

К отдельному типу моделей можно отнести седиментационное моделирование [51, 66, 80, 125]. Главное отличие данного класса моделей состоит в том, что они последовательно воспроизводят процессы формирования геологических тел в течение геологического времени [57, 64]. Седиментационное моделирование основано на численной реконструкции осадочных процессов, следовательно, в основе моделей лежит глубокое изучение территории исследования и параметров седиментационной системы. Данный инструмент позволяет учитывать геологическую информацию, которая отражает этапы формирования моделируемых отложений [37, 116, 117]. И на выходе расчетные модели дают возможность получить фациальные тренды, карты мощностей и песчанистости. Тем самым технология позволяет уточнить и обосновать прогноз коллектора по площади [36, 40, 85, 86] (Рисунок 1.11).

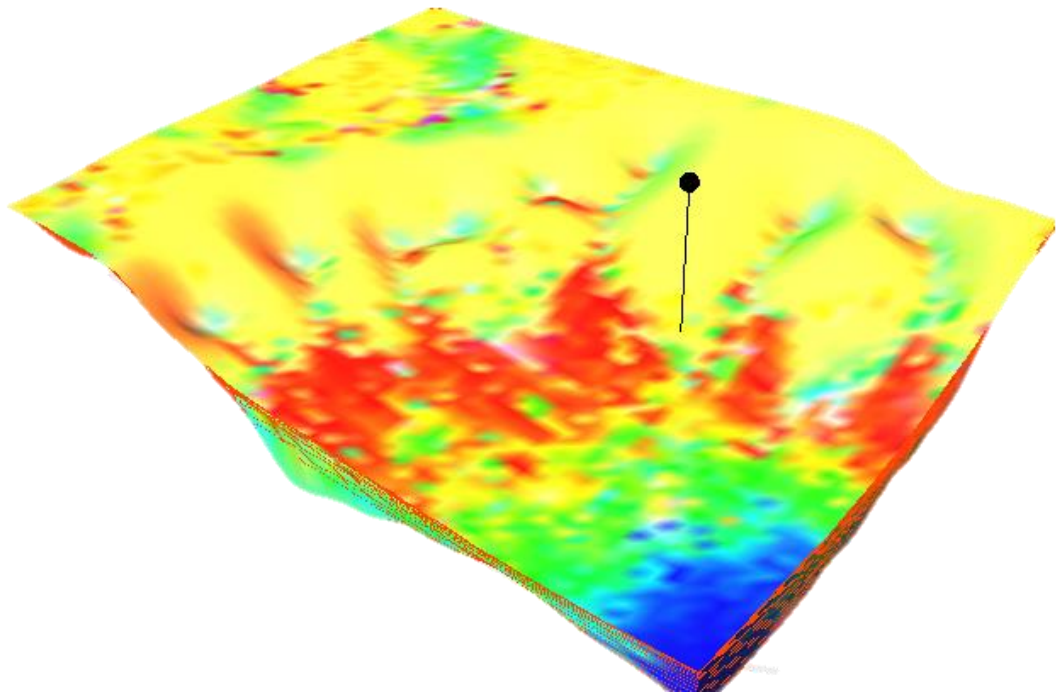


Рисунок 1.11 – Результаты седиментационного моделирования глубоководных конусов выноса (составлено автором)

Важным применением седиментационного моделирования является реконструкция глубоководных резервуаров [64, 112, 120], к которым относится ачимовская толща. Моделируемая турбидитовая система характеризуется сложным многостадийным процессом. Каждое седиментационное событие имеет собственные характеристики. Могут отличаться длительность поступления терригенного материала, его объем, скорости, концентрации и т.д. [87, 89, 119]. Все это обуславливает сложное внутреннее строение конусов выноса [50, 86, 97]. Седиментационное моделирование позволяет проверить геологические концепции и оценить вероятность существования сценария формирования перспективного объекта [15, 16, 60, 83, 93].

Однако моделирование турбидитовых систем все так же остается сложной задачей, так как на строение элементов седиментационной системы влияет множество факторов, которые формируют внутреннюю архитектуру резервуара [66, 71, 117]. Дополнительным ограничением является недостаточное количество существующих современных турбидитовых потоков и их измерение затруднено быстрым разрушительным характером и краткосрочностью действия [84, 92, 124].

Поэтому в таких условиях численное седиментационное моделирование выступает в роли ключевого инструмента воссоздания строения турбидитовых отложений [101, 107, 129].

Существует несколько основных классов моделей седиментационного моделирования. К ним относятся геометрические, диффузионные и гидравлические [57, 66, 80, 125]. Первые инструменты седиментационного моделирования появились в конце 80-х годов прошлого века. Это были простейшие двумерные описательные модели. По мере развития вычислительных мощностей случился переход к трехмерным моделям. Он был связан с необходимостью учитывать процессы переноса, осаждения и эрозии осадочного материала [112, 114, 117, 123, 130].

Кратко рассмотрим основные типы существующих седиментационных моделей:

- Геометрические модели являются первым разработанным классом моделей. Они обладают высокой вычислительной эффективностью, так как воспроизводят процессы упрощенно в 2D формате и в основном используются для реконструкции регионального заполнения бассейна [114, 123]. Для моделирования локальных объектов данный тип не применим, поскольку описывает распределение осадков без учета гидродинамических параметров потока и генетических механизмов их формирования [71, 72]. Данный тип слабо чувствителен к воспроизведению сложной архитектуры глубоководных конусов выноса [55, 81, 91, 131];

- Диффузионные модели представляют следующий уровень развития седиментационного моделирования [66, 107]. Они способны моделировать заполнение региональных бассейнов в течение длительного промежутка геологического времени [66, 67]. Движение потока в таких моделях упрощено, оно зависит от уклона поверхности, объема водно-осадочной смеси и коэффициента диффузии [74, 112]. Данные схемы широко применимы и эффективны для задач регионального масштаба [28, 64, 123], однако для локальных объектов их применение ограничено [79, 80], так как полученные модели характеризуются

серьезным усреднением параметров течения и не способны воспроизводить динамику турбидитовых потоков [71, 130];

- Следующим классом являются гидравлические модели. К одному из подвидов относятся клеточные автоматы. Здесь седиментационная система представляется как последовательность геологических эпизодов [51, 79, 80, 125]. Процессы формирования происходят на уровне локального взаимодействия ячеек, что позволяет получать трехмерную архитектуру резервуара при меньших вычислительных затратах. В качестве второго подвида гидравлических моделей используются решения, в основе которых лежат гидродинамические уравнения Навье-Стокса [49, 53, 73]. С точки зрения воспроизведения процессов формирования турбидитовых отложений данный тип моделей характеризуется наиболее достоверным воспроизведением элементов глубоководных конусов выноса. Однако важным ограничением модели служит высокая вычислительная емкость [62, 63, 71, 117] (Рисунок 1.12).

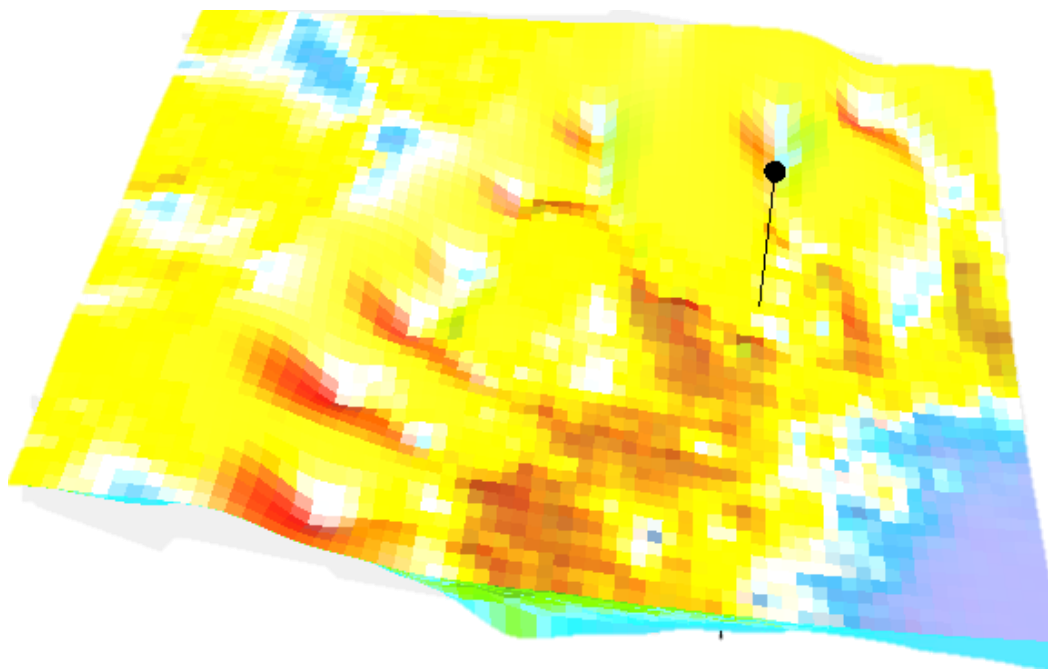


Рисунок 1.12 – Интеграция результатов моделирования в геологическую модель
(составлено автором)

Инструмент седиментационного моделирования не является заменой остальных методов моделирования, напротив его стоит использовать в комплексе со стандартными методиками [34, 37, 60]. Построенная концептуальная модель

формирует геологическое представление об объекте [1], сейсмофациальный анализ позволяет выделить крупные седиментационные элементы и закартировать объекты по площади [43], геостатистические методы позволяют распространить свойства в объеме моделируемого пространства [51, 106], а седиментационное моделирование дает возможность проверить генетические сценарии формирования геологических тел и получить надежные тренды для построения модели [52, 69]. Следовательно, седиментационное моделирование должно выступать связующим звеном между геолого-геофизической интерпретацией и статическим геологическим моделированием [15, 35] (Рисунок 1.13).

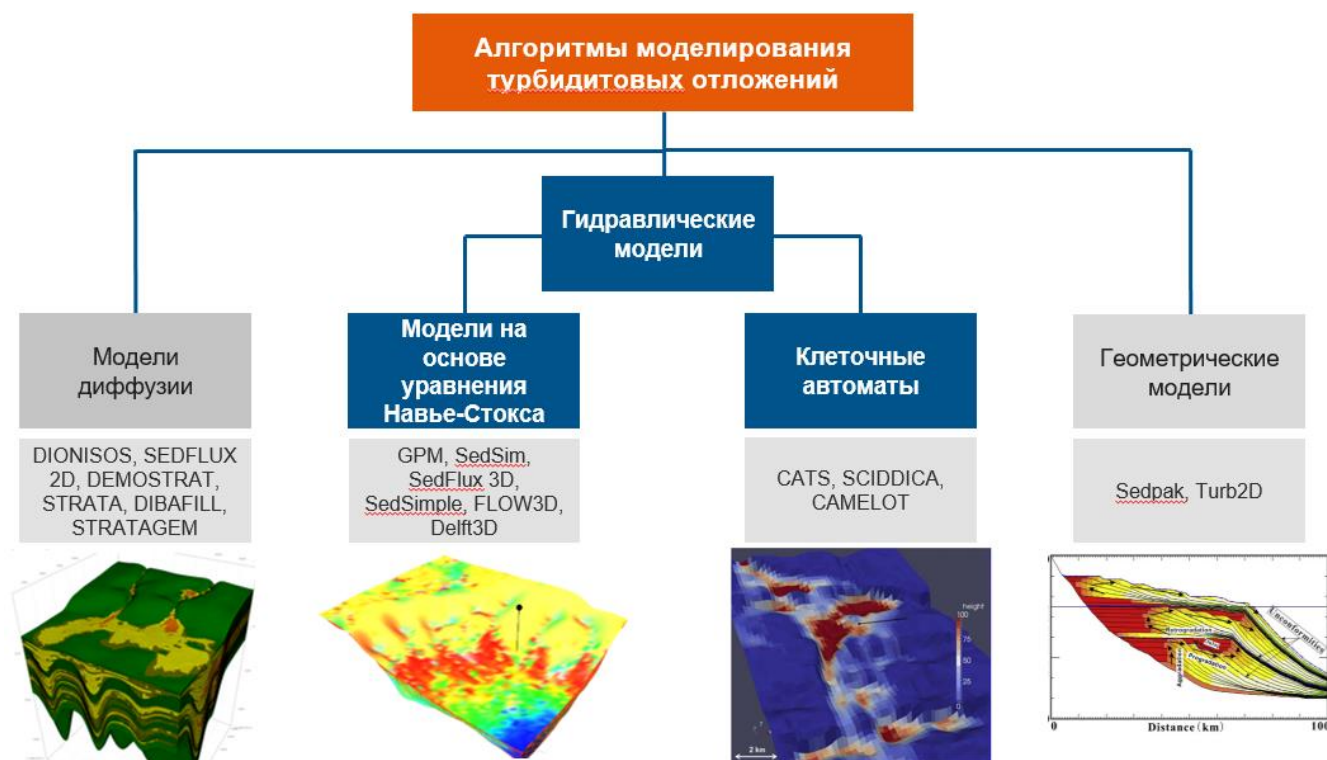


Рисунок 1.13 – Классификация методов седиментационного моделирования
(составлено автором)

Сравнительная характеристика основных классов моделей седиментационного моделирования приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика подходов к седиментационному моделированию глубоководных систем (составлено автором)

Класс моделей	Принцип моделирования	Воспроизводимые геологические элементы	Основные входные параметры	Преимущества подхода	Ограничения для ачимовских резервуаров
Геометрические / эвристические	Заполнение пространства по эвристическим правилам	Общая геометрия осадочного чехла и клиноформ	Палеорельеф, объем аккумуляции, геометрические углы	Высокая скорость счета, минимум параметров	Не воспроизводят гидродинамику и фракционную сортировку
Диффузионные	Перенос осадка как функция диффузии и регионального уклона	Региональное распределение мощностей песчано-глинистых толщ	Батиметрия, региональный уклон, коэффициент диффузии	Эффективны на региональных этапах	Сглаживание локальных тел, потеря дискретности турбидитов
Клеточные автоматы	Последовательность локальных седиментационных событий	Каналы, распределительные лопасти, эрозия и осаждение	Палеорельеф, параметры события, правила перехода	Высокая скорость, воспроизведение многособытийности	Упрощенная гидродинамика без уравнений механики сплошных сред
Гидравлические	Полные уравнения гидродинамики (Навье–Стокса, Рейнольдса)	Детальная динамика плотного потока	Поле начальных скоростей, турбулентность, градиенты плотности	Максимальная физическая строгость процесса	Крайне высокая вычислительная ресурсоемкость для серии событий

Вместе с тем процессные модели имеют собственные ограничения. Их результат зависит от исходных и граничных условий: реконструкции палеорельефа, положения источников сноса, длительности событий, расхода водно-осадочной смеси, концентрации, фракционного состава, параметров эрозии, осаждения и перераспределения материала [61, 112, 120]. Многие из этих параметров не могут быть измерены напрямую для древних осадочных систем и задаются по аналогам, экспертным оценкам или в результате серии сценарных расчетов [125]. Поэтому процессное моделирование обычно связано с итерационным подбором параметров и сравнением полученных реализаций с наблюдаемыми геолого-геофизическими данными [60, 93, 94, 68].

Таким образом, необходимость применения седиментационного моделирования для прогноза распространения коллектора ачимовской толщи определяется сложным внутренним строением изучаемого объекта [6, 33]. Так как на итоговую геометрию влияло значительное количество факторов. Восстановить эти процессы способна методика седиментационного моделирования. Данный подход должен применяться как самостоятельный этап в общем цикле геологического моделирования. Расчетное воспроизведение процессов формирования резервуара обеспечивает более надежный уровень геологической модели и поднимает степень обоснованности принимаемых решений при поиске нефти и газа.

1.4 Выводы по главе 1

По итогам выполненного анализа показано, что ачимовская толща является объектом со сложным геологическим строением [18, 34]. Пространственное распространение коллекторов контролировалось различными седиментационными факторами [6, 33]. В результате действия этих факторов сформировались литологически ограниченные ловушки углеводородов со сложной геометрией, резкой изменчивостью литологического строения [9, 23].

Формирование ачимовских резервуаров было связано с неоднократным поступлением осадочного материала в глубоководную часть бассейна. Наряду с кратковременными интрабассейновыми турбидитовыми потоками существенную роль могли играть длительные гиперпикнальные потоки, обусловленные прямой разгрузкой паводковых речных вод [41, 127]. Различия в продолжительности событий, расходе водно-осадочной смеси, концентрации и гранулометрическом составе материала определяли дальность переноса, геометрию каналов и лопастей, положение зон аккумуляции коллекторов, способных вмещать УВ [94, 98].

Дополнительное влияние на архитектуру ачимовских тел оказывали вдольсклоновые придонные течения. Контурная переработка могла приводить к размыву, сортировке, латеральному переносу и повторному отложению ранее накопленного турбидитового материала [53, 104, 115]. С этим процессом могут

быть связаны асимметрия глубоководных конусов выноса, смещение зон повышенной песчаности относительно осей питающих каналов и формирование коллекторов на флангах первоначальных зон аккумуляции [4, 107]. Учитывать такие процессы особенно важно при поиске неструктурных залежей, поскольку перспективные песчаные тела могут располагаться за пределами традиционно прогнозируемых осевых частей турбидитовых систем [94].

С позиций поисков и разведки нефти и газа основная сложность изучения ачимовской толщи заключается в том, что положение залежей определяется преимущественно не структурным, а литологическим фактором [32, 38]. Нефтегазоносность таких объектов зависит от морфологии песчано-алевритового тела, его мощности, связности, расчленённости [25, 43], поэтому прогноз перспективных участков должен быть направлен не только на выявление локальных структурных поднятий, но прежде всего на геометризацию литологических ловушек [36, 92].

Существующие методики геологического моделирования позволяют решать разные задачи. Геостатистические методы распределяют свойства в объеме моделируемого объекта на основе заданной статистической информации [56, 106, 122], однако при низкой степени изученности бурением результат не всегда отражает геологическую концепцию формирования отложений [1, 23]. Формальное соответствие модели скважинным данным не всегда обеспечивает корректное воспроизведение реальной формы и связности глубоководных песчаных тел, что может приводить к высоким рискам при размещении поисковых и разведочных скважин [9, 48]. В связи с этим наиболее перспективным является включение в стандартный цикл интерпретации седиментационного моделирования. Данный подход позволяет оценивать возможные сценарии формирования ачимовских перспективных объектов [35, 61, 120] и использовать полученные результаты для более достоверного построения геологической модели и дальнейшего формирования программы ГРП [15, 37].

Таким образом, повышение эффективности поисков нефти и газа в ачимовской толще связано с применением седиментационного моделирования на

начальных этапах работ для формирования надежной основы прогноза геометрии и строения литологических ловушек и снижения геологических рисков [15, 16, 92, 94].

ГЛАВА 2 ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АЧИМОВСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Геологическое строение и тектоническое положение района исследования

В физико-географическом отношении район исследования расположен в юго-восточной части полуострова Ямал между побережьем Обской губы и системой озер Яррото. С точки зрения нефтегазогеологического районирования относится к Ямальской нефтегазоносной области Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции [39].

В геологическом строении территории выделяются два основных структурно-формационных комплекса: доюрские породы складчатого фундамента и перекрывающие его мезозойско-кайнозойские осадочные отложения платформенного чехла [39].

Доюрские образования в пределах юго-восточной части полуострова Ямал относятся к Новопортовскому структурно-фациальному району. Возраст образований изменяется от докембрия до карбона. Породы ордовика представлены глинистыми известняками и известковистыми аргиллитами. Нижняя часть толщи силурийской системы представлена доломитами и доломитизированными, брекчированными известняками светло-серого цвета. Верхняя часть комплекса представлена доломитами и известняками с конодонтами. Нижний девон представлен калькаренитами, аргиллитами и известняками. Средний девон сложен песчаниками, известняками, доломитами и базальтами с криноидеями. Верхний отдел - калькаренитами, аргиллитами и водорослевыми известняками. Карбоновая система представлена аргиллитами с песчано-галечным материалом и сланцами с углистоглинистым и растительным детритом. Пермская система представлена нерасчлененными образованиями: углистыми аргиллитами, алевролитами, песчаниками, известняками и базальтами [39].

Пермо-триасовые накопления в районе представлены сменяющимися морскими, паралическими, континентальными угленосными отложениями.

Осадочный чехол сложен терригенными породами юрского, мелового, палеогенового и четвертичного возраста. Триасовые образования в разрезах скважин района работ не зафиксированы [39].

На породах доюрского основания с гравелитами серыми, опесчаненными с угловым стратиграфическим несогласием залегают отложения мезозойско-кайнозойского осадочного чехла. В разрезе верхнего стратиграфического этажа в полном объеме выделяются отложения юрской, меловой, палеогеновой и четвертичной систем. В составе мезозойской группы рассматриваются отложения юрской и меловой систем [39].

Юрский комплекс представлен преимущественно чередованием песчаников, алевролитов и аргиллитов морского, прибрежно-морского и континентального генезиса. Верхнеюрские отложения представлены преимущественно глинистыми породами абалакской и баженовской свит. При этом баженовская свита на части территории существенно размыта. Её сохранившиеся фрагменты приурочены главным образом к склоновым и погружённым участкам [39].

Меловой комплекс составляет значительную часть осадочного чехла. Состав комплекса неоднороден. В его разрезе представлены морские, прибрежно-морские и континентальные отложения. Главным объектом настоящего исследования являются нижнемеловые неокомские образования. Они формировались в относительно глубоководном эпиконтинентальном морском бассейне. Осадконакопление оставалось некомпенсированным. Одновременно происходило боковое заполнение бассейна осадками. Строение этих отложений определяется системой последовательно проградирующих клиноформ [34] (Рисунок 2.1).

Стратиграфическая шкала					Толщина, м	Абс.отм., м	Литологическая колонка	Пласты ОГ	Краткая литологическая характеристика пород
Группа	Система	Отдел	Ярус	Свита					
Q					0-10 до 150				Глины, суглинки, пески и алевролиты
KZ	P	P ₁		Тибейсалинская	100				Глины опоки, диатомитами с прослоями песчаных пород
			K ₂ ob ₃	Ганькинская	80-100				Алевритистые глины известковые, с прослоями глинистых мергелей
Мезозойская - MZ	Меловая - K	Верхний - K ₂	Верхоязская	Верхняя подсв.	230-250				Глины, опоковые в подошве. В глинах прослои алевролитов и мелкозернистого песчаного материала
				Нижняя подсв.	50			С	Опоки, глины, алевролиты, песчаники
				Кузнецовская	50			Г	Глины
			K ₂ k - K ₂ km						
			K ₂ c	Марресалинская	450-500			ПК ₁₀	Неоднородное чередованием и переслаиванием алевролитов, песков и песчаников с линзовидными прослоями и невыдержанными пластами алевритистых глин
			K ₂ st			-1000			
				Яронгская	120-160			ХМ ₁₃	Глины слабобитуминозные с пластами песчаников и алевролитов
								М ₁	
			Томльинская					ТП ₀₊₂	Переслаивание песчаников, алевролитов и глин
				Икижинская	600 20-40			ТП ₀₊₃ М	Глины с пластами песчаников
								ТП ₀₋₁	Неравномерное чередованием глин, песчаников и алевролитов
				Дютлин. п.	20			Арс	Глины
			Авская	Спахич. п.	60-90	-2000		БЯ ₃₊₄	Чередование песчано-алевритовых слоев с пластами глин
								С ₁₀₋₂	Глины
				Новопорт. т.	650			НП ₁₀₋₂	
								НП ₉	
								НП ₇	Песчаники и алевролиты с прослоями глин
								НП ₄₊₅₊₆	
				Лимская т.				НП ₁₋₃	Глины, битумин. аргиллиты

Рисунок 2.1 – Сводная литолого-стратиграфическая колонка [39]

Согласно схеме тектонического районирования мезозойско-кайнозойского осадочного чехла Западно-Сибирской плиты, рассматриваемая территория входит в состав Ямало-Тазовской мегасинеклизы. Она расположена в переходной зоне между Надым-Тазовской синеклизой и Южно-Ямальской моноклиной [7]. Наибольший интерес в пределах района работ представляет Новопортовский вал [39, 47] (Рисунок 2.2).

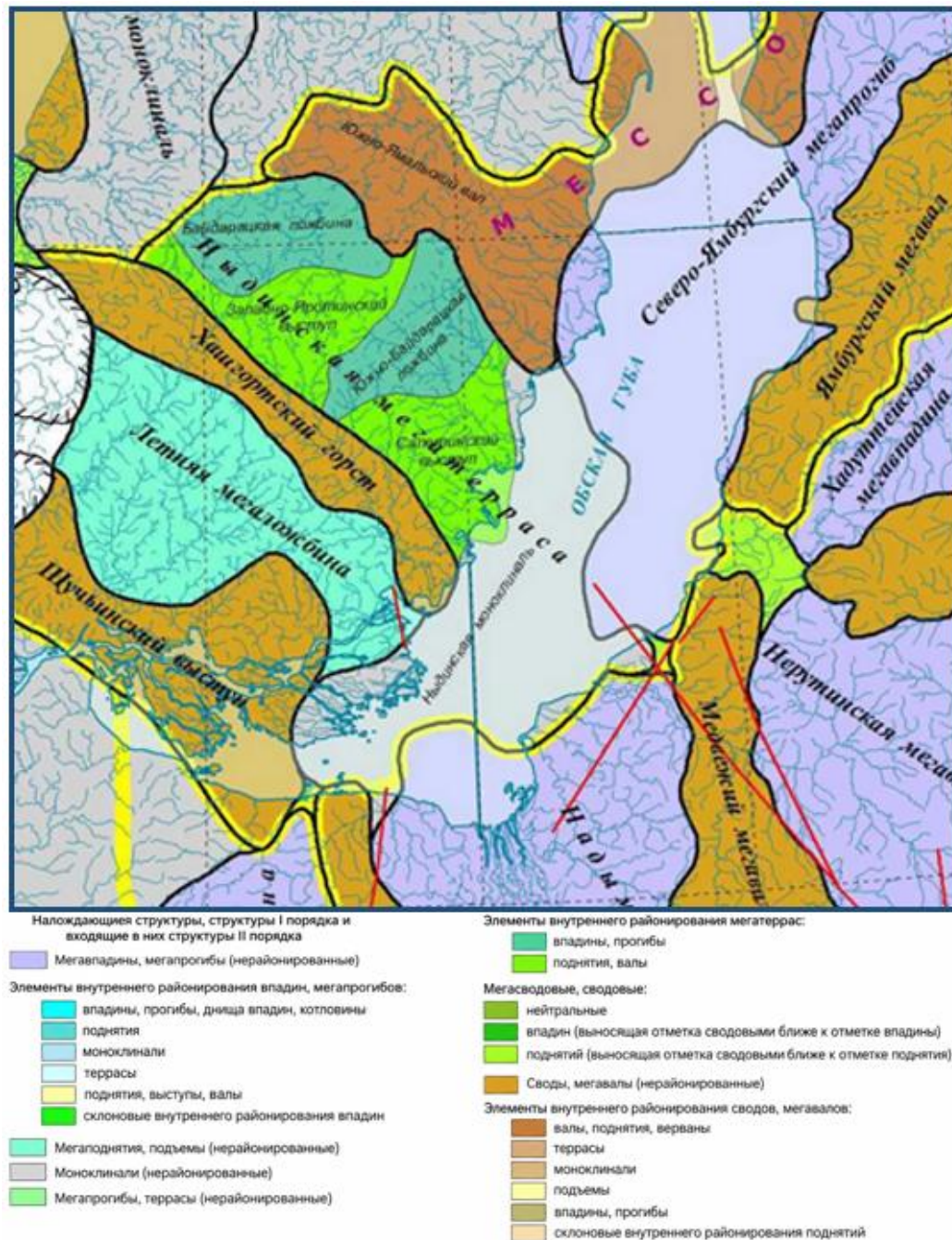


Рисунок 2.2 – Фрагмент тектонической карты [47]

Современный тектонический облик северной части Западно-Сибирской плиты складывался на протяжении длительной геодинамической эволюции. Район расположен в области сочленения двух палеозойских складчатых поясов - Урало-Монгольского и Арктического. В позднепермско-раннетриасовое время завершались основные этапы герцинской складчатости. Этот период сопровождался тектонической перестройкой и развитием рифтогенеза. Строение фундамента стало неоднородным. В результате сформировался структурный

каркас территории, который в дальнейшем контролировал погружение бассейна и накопление мезозойских отложений [27, 39, 47].

В юрско-меловое время структурный план территории неоднократно менялся. Палеотектонический анализ показывает, что на разных этапах изменялись положение локальных поднятий, направления регионального погружения и конфигурация депрессионных зон. Погружение происходило неравномерно. Западная и юго-западная части района неоднократно занимали относительно повышенное положение. Восточные участки, напротив, погружались интенсивнее. Здесь увеличивалось аккомодационное пространство. Такие различия влияли на направления переноса обломочного материала и распределение депоцентров осадконакопления [39]. Для неокомского этапа особенно важна связь тектонического строения с развитием клиноформных систем. Положение бровки палеошельфа, уклон поверхности и локальные положительные и отрицательные формы рельефа определяли пути перемещения осадочного материала. От них зависело и размещение глубоководных аккумулятивных тел. В пределах исследуемой территории неокомские отложения имеют выраженное клиноформное строение. Поэтому для их надёжной корреляции требуется совместно анализировать данные ГИС и сейсморазведки.

2.2 Фактический материал

Рассматриваемая территория отличается неравномерной геолого-геофизической изученностью. В её пределах открыто несколько крупных месторождений, нефтегазоносность которых связана с ачимовским комплексом. Эти участки достаточно подробно изучены бурением и геофизическими методами. Однако картина неоднородна. На большей части исследуемой площади объём фактических данных остаётся ограниченным.

Основу исследования составили материалы сейсморазведки, которые получены в разные годы. Они различаются качеством исходных данных и параметрами обработки (Рисунок 2.3).

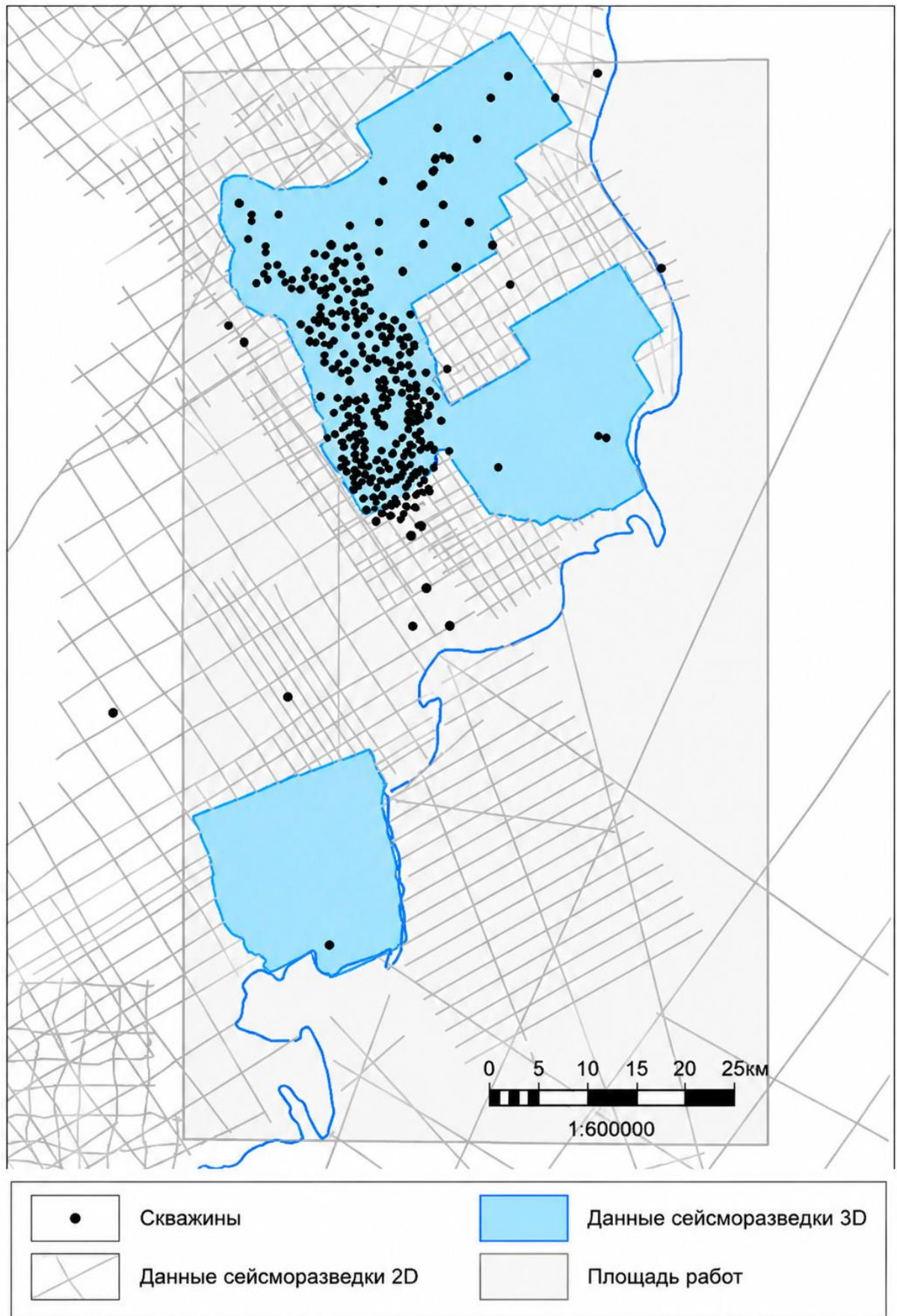


Рисунок 2.3 – Схема изученности территории работ (составлено автором)

Площадь покрытия сейсморазведкой 3D составляет 1 566 км². Дополнительно привлечены профили 2D общей протяжённостью 4 497 пог. км. Скважины распределены неравномерно. Всего в пределах района исследования пробурено 127 поисково-разведочных скважин. Для геологической интерпретации также использованы результаты ГИС и стратиграфической корреляции. При разработке седиментологической концепции изучены материалы фотодокументации керна общей протяжённостью 350 м. Материалы дополняют друг друга. Их совместный анализ позволил уточнить представления о строении ачимовских отложений и обосновать исходные параметры седиментационного моделирования.

2.3 Признаки и сравнительная интерпретация интрабассейновых и экстрабассейновых турбидитовых потоков

Представления о механизмах формирования глубоководных конусов выноса, рассмотренные в первой главе, служат теоретической основой для интерпретации геолого-геофизических материалов по району исследования. В данном разделе рассматриваются диагностические признаки различных типов турбидитовых потоков. Особенности их действия влияли на внутреннее строение изучаемых осадочных тел.

Турбидитовые отложения, сформированные мутьевыми потоками, изначально связывали с гравитационной неустойчивостью склоновой части или бровки шельфа и осаждением терригенного материала в глубоководных зонах. В зарубежной литературе они именуются интрабассейновыми [134]. В последнее время появляется все больше доказательств того, что мутьевые потоки берут свое начало в континентальной области и формируются в результате прямого переноса водно-осадочных смесей речными паводками. Связанные с такими процессами отложения называются экстрабассейновыми [134]. Отложения различных типов потоков имеют характерные особенности, по которым существует возможность их надежно разделить. Интрабассейновые потоки связаны с импульсным неустойчивым течением, зарождающимся в виде селевых, дебрисных потоков,

которые приобретают ускорение по мере движения по склону и переходят далее в турбулентные потоки [132]. В результате действия таких потоков по керновому материалу можно отследить характерные слоистые текстуры. Экстрабассейновые же потоки связаны полностью турбидитовыми потоками, которые поддерживаются во взвешенном состоянии плотным речным стоком. Выделяются как глинистые, так и песчаные гиперпикнальные потоки. Последние характеризуются длительным переносом материала, высокой интенсивностью течений с обилием растительных остатков [88, 89].

Определение генетических механизмов образования ачимовских отложений в пределах изучаемой площади выполнялось по имеющимся керновым и сейсмическим данным, затем выдвинутые гипотезы тестировались алгоритмом седиментационного моделирования. Диагностика керна выполнялась по совокупности различных признаков: структурно-текстурных особенностей пород, литологического состава, включений органических остатков. По сейсмическим данным определялись возможная морфология конусов выноса, пути направления транспортировки осадочного материала, форма и наличие питающих и распределительных каналов.

По результатам изучения кернового материала автором в составе группы исследователей для рассматриваемой территории удалось определить основные характеристики ачимовских отложений. Горные породы преимущественно представлены средне-мелкозернистыми песчаниками, алевролитами и в меньшей степени глинистыми породами. Для рассматриваемых отложений характерно сочетание массивных, горизонтально-слоистых, градационных текстур, присутствует мелкокосая слоистость ряби течений, выделяются многочисленные сдвоенные глинистые слойки. Набор таких текстурных особенностей указывает на высокую динамичность среды осадконакопления и на периодическое изменение скоростей транспортировки осадочного материала. Также отличительной особенностью изучаемых отложений является отсутствие классической последовательности цикла Боума [6, 30, 44] (Рисунок 2.4).

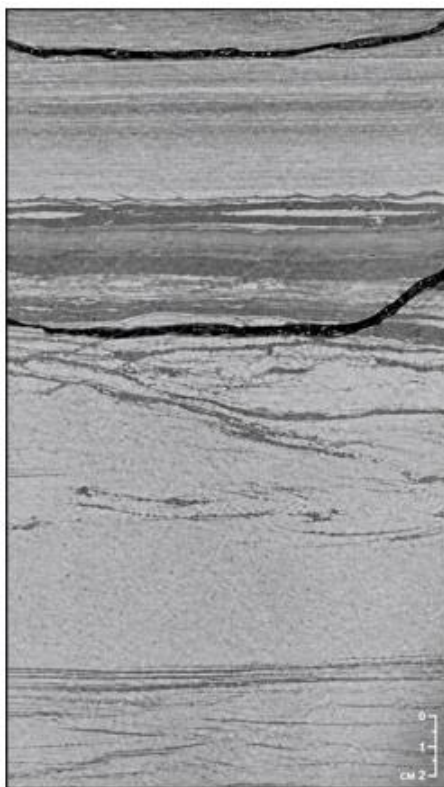


Рисунок 2.4 – Тонко-мелкозернистые массивные песчаники с прослоями заглинизированных песчаников и песчаных алевролитов, тонкие прослои горизонтальнослоистых и линзовиднослоистых глинистых алевролитов и аргиллитов (составлено автором)

Описанные характеристики кернового материала соответствуют гиперпикнальному поступлению материала. В данном случае мутьевые потоки движутся с низким уровнем вовлечения окружающей воды, что позволяет переносить осадки на большие расстояния. Так как транспортировка водно-осадочной смеси происходит с континентальной части, для гиперпикнальных потоков характерно присутствие древесного угля, обломков древесины, растений. По результатам анализа кернового материала в нем удалось установить присутствие углефицированного растительного детрита, включений угля. В условиях действия интрабассейновых турбидитовых потоков перенос растительного материала маловероятен [44, 133] (Рисунок 2.5), (Рисунок 2.6).



Рисунок 2.5 – Песчаник мелкозернистый светло-серый, с мелкослойчатой рябью течений с многочисленными сдвоенными глинистыми слойками, встречаются мелкие обломки углефицированной древесины (составлено автором)

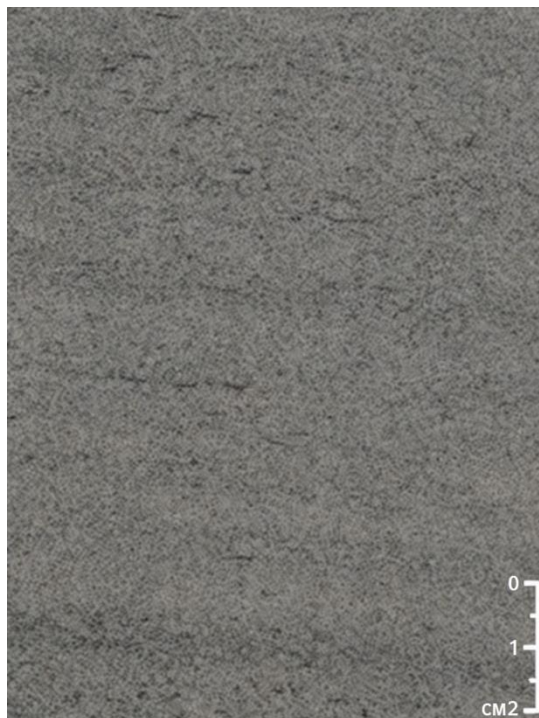


Рисунок 2.6 – Массивный мелкозернистый песчаник с слабо выраженным полосчатым строением и обогащенный рассеянным углефицированным растительным детритом (составлено автором)

Дополнительными признаками гиперпикнального поступления терригенного материала являются характерная текстурная неоднородность, наличие резких эрозионных подошв, отсутствие устойчивой идеализированной последовательности, характерной для постепенно затухающего турбидитового потока. Разрез глубоководных конусов выноса, сформированных под действием экстрабассейновых турбидитовых потоков, отражает длительный перенос осадков с изменяющейся интенсивностью среды. В условиях гиперпикнальных течений скорости, концентрация и фракционный состав водно-осадочной смеси могли изменяться в течение одного седиментационного события, это объясняет высокую неоднородность внутреннего строения ачимовской толщи [44, 78, 134].

Для воспроизведения генетических механизмов формирования глубоководных конусов выноса важную роль играет продолжительность переноса осадочного материала. В работах Т. Mulder и J. Syvitski экстрабассейновые течения рассматриваются как речные мутьевые потоки, которые способны погружаться в морской бассейн при превышении плотности речной водно-осадочной смеси над окружающими водами морского бассейна, их особенность состоит в способности поддерживать движение в течение всего паводкового события, то есть в достаточно продолжительный период времени. Такой механизм важен для воспроизведения процессов образования ачимовских отложений, так как действие данных потоков влияет на морфологию объектов, формирование протяженных конусов выноса [96]. Однако диагностика признаков экстрабассейновых потоков не говорит о возможном действии классических гравитационных течений. В пределах рассматриваемой территории преобладает влияние гиперпикнального поступления осадочного материала. Интрабассейновые потоки действовали в меньшем ограниченном масштабе. Однако также оказывали влияние на формирование ачимовских песчано-алевролитовых тел.

По материалам сейсмических данных также существует возможность разграничить механизмы формирования ачимовских отложений. На рассматриваемом участке исследования отчетливо выделяются амплитудные аномалии, выраженные в виде линейно вытянутых форм, которые ассоциируются

с питающими и распределительными каналами, обнаружение площадных аномалий может соответствовать конусам выноса. На отдельных выбранных сейсмических атрибутах отчетливо выделяется преобладание системы – переход от русловых систем через шельфовые питающие каналы и склоновую область, а затем и в глубоководную часть. Такое расположение элементов седиментационной системы указывает на возможную связь речной системы с морским бассейном. Это позволяет предполагать гиперпикнальный перенос осадочного материала. Сходные представления встречаются в исследованиях дельтовых систем, развитие которых связано с паводковыми событиями. В таких условиях материал может поступать из речной системы непосредственно на шельф и далее в глубоководные участки бассейна [44, 53] (Рисунок 2.7).

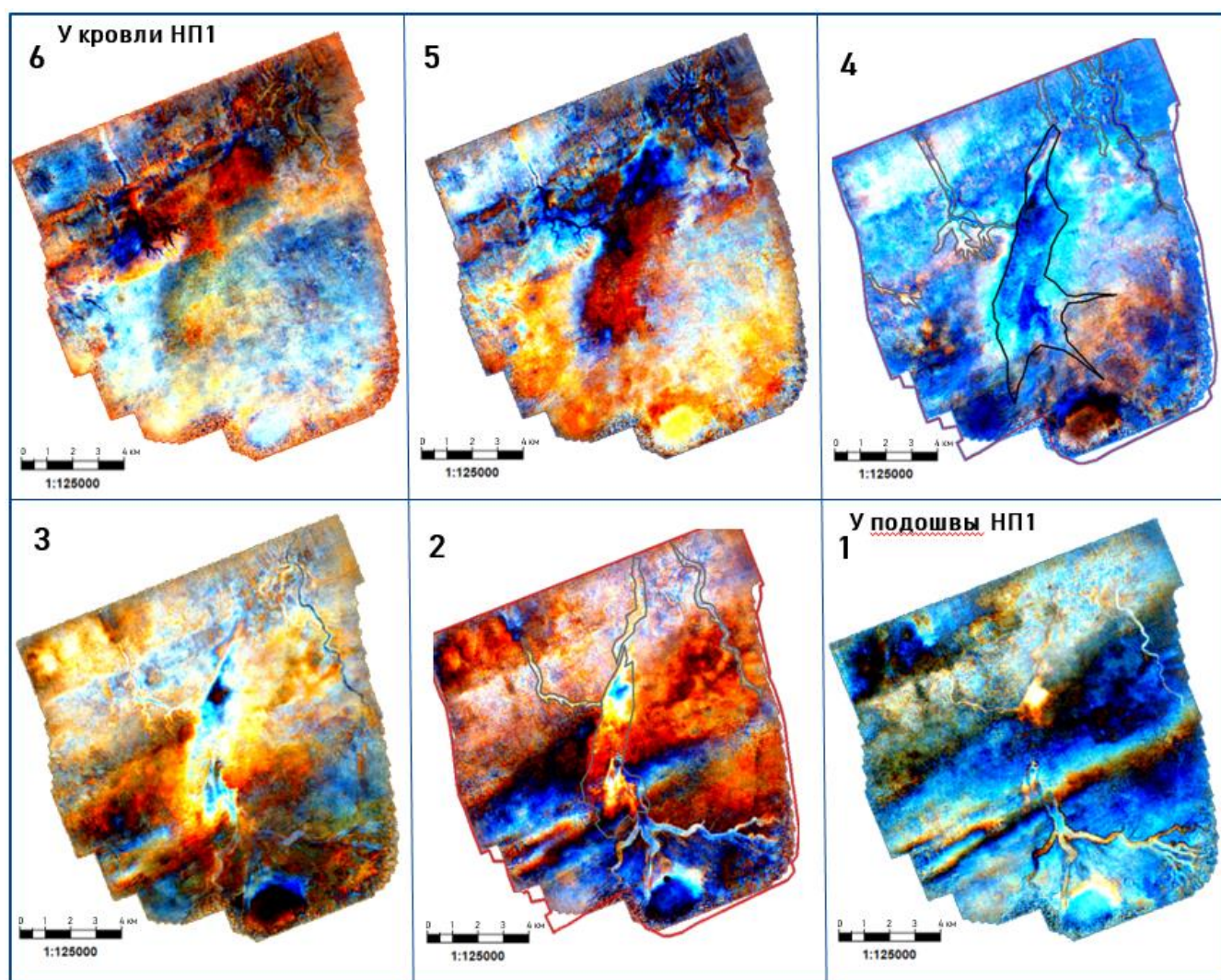


Рисунок 2.7 – Признаки гиперпикнального потока по результатам спектральной декомпозиции (составлено автором)

При анализе данных сейсморазведки 3D установлена вытянутая форма конусов выноса. Это ещё один признак. Подобная морфология согласуется с предполагаемым гиперпикнальным поступлением терригенного материала. Такие потоки могут действовать относительно долго и сохранять способность переносить осадок во взвешенном состоянии. Материал перемещается дальше. При последующем осаждении возникают протяжённые аккумулятивные тела. Наблюдение за существующими современными системами турбидитовых потоков показывает, что наличие связи речных отложений с глубоководными позволяет транспортировать осадочные разности на более удаленные участки от склоновой области. В качестве примера можно рассмотреть реку Конго, где выполнены численные замеры продолжительности, интенсивности, характеристик потока. По результатам этих экспериментов фиксируется дальний перенос осадков потоками. Для древних систем, к которым относится ачимовская толща, данный пример подтверждает принципиальную возможность длительного и направленного переноса транспортного материала от области речного питания к фондоформенной части [44, 121] (Рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Признаки гиперпикнальных турбидитов по результатам анализа сейсмических атрибутов (составлено автором)

Комплексирование исходных геолого-геофизических данных показывает, что на исследуемой территории действовали различные типы плотностных потоков. Интрабассейновые потоки обеспечивали импульсное перемещение осадочного материала и его осаждение вблизи склоновой части, гиперпикнальные течения обеспечивают более продолжительное поступление осадков и формирование протяженных вытянутых конусов выноса. Переменное влияние этих турбидитовых потоков определяет архитектуру резервуара, распределение коллектора в объеме геологического тела. Выявление данных механизмов имеет существенное значение для построения концептуальной геологической модели и дальнейшего выполнения седиментационного моделирования, которое способно воспроизводить различные сценарии формирования потенциально перспективных объектов.

2.4 Признаки и сравнительная интерпретация придонных течений

При интерпретации ачимовских отложений рассматриваемой территории были выявлены особенности строения, которые затруднительно объяснить только действием гравитационных потоков. Наряду с каналами и лопастями, ориентированными преимущественно в направлении падения палеосклона, на сейсмических материалах прослеживаются вытянутые вдольсклоновые формы. На отдельных участках установлены осадочные волны, асимметричные аккумулятивные тела и смещение песчаных зон относительно предполагаемого направления основного переноса материала. Подобное сочетание признаков допускает участие придонных течений в формировании окончательной архитектуры резервуаров [45, 109, 113]. Придонная циркуляция может обеспечивать перемещение осадков латерально. При этом характер взаимодействия течения с донными отложениями определяется гидродинамическими условиями, осадок способен подвергаться размыву, повторной сортировке или аккумуляции за пределами зоны его первоначального накопления. Отложения, которые сформировались либо были существенно переработаны под действием придонных течений, относят к контуристам [109, 121].

Для них характерна преимущественно вдольсклоновая направленность движения, хотя и локальная морфология дна способна изменять траекторию течения.

Воздействие придонных вод на осадок неодинаково при различных скоростях течения. В условиях относительно слабой циркуляции может происходить перенос тонкозернистого материала с образованием преимущественно алевритоглинистых аккумуляций, усиление течения, напротив, сопровождается увеличением его способности перемещать более крупные частицы. При этом тонкие фракции могут удаляться из ранее накопленного осадка, а песчаный материал - подвергаться повторной сортировке и переотложению. Дальнейшее увеличение интенсивности движения воды создаёт условия для эрозии. На поверхности дна формируются борозды, промоины, отдельные каналы и другие отрицательные формы рельефа, также размыв может затрагивать ранее сформированные элементы турбидитовых систем [45, 58, 109].

Возможность существования придонных течений в нижнемеловом Западно-Сибирском бассейне рассматривается с учётом его палеогеографического положения. В валанжин-готеривское время бассейн имел относительно глубоководный полузамкнутый характер и сообщался с арктической акваторией через северные проливы, поступление более холодных и плотных вод могло сопровождаться их погружением и последующим распространением вдоль подводного склона, также на направление движения водных масс влияли конфигурация бассейна, рельеф дна и сила Кориолиса [45]. Одним из возможных результатов подобной циркуляции являлось формирование вдольсклоновых течений. Их интенсивность изменяется во времени. Дополнительное воздействие на придонную гидродинамику оказывали внутренние волны и глубинные приливы, которые при определённых условиях способны усиливать движение воды вблизи морского дна [45, 109] (Рисунок 2.9).

Для изучения возможных механизмов формирования контуритов полезно обратиться к современным полузамкнутым морским бассейнам и крупным озёрам. Важно понимать природу формирования объектов, которую можно восстановить по современным аналогичным системам, в качестве таких можно рассмотреть

Черное, Каспийское и Средиземное моря и озеро Байкал, в которых также описаны осадочные отложения, подверженные действию придонных течений. Однако необходимо осторожно подходить к такому сравнению ввиду различных характеристик бассейнов, по имеющейся информации по данным внутреннего Западно-Сибирского раннемелового моря, в бассейнах отличаются глубины и соленость морской воды, различны топография дна и характеристики и условия водообмена, но с некоторыми допущениями можно сравнивать природу действия придонных течений, которые могут перераспределять осадочный материал бассейна и изменять и создавать дополнительные аккумулятивные формы и эрозионные врезы [45].

Осадочные образования, связанные с придонной циркуляцией, известны в Чёрном, Каспийском и Средиземном морях, а также в озере Байкал. Но сходство здесь ограничено. Эти бассейны можно рассматривать лишь как морфодинамические аналоги. Переносить их современный гидрологический режим на раннемеловую Западную Сибирь нельзя. Различаются глубины и солёность. Не совпадают также условия водообмена и конфигурация дна. Общее связано с придонными течениями. Они способны перераспределять осадочный материал, в результате чего возникают аккумулятивные и эрозионные формы.

Определить следы действия контурных процессов получается не всегда однозначно, различные текстурно-структурные особенности горных пород могут возникать при различных условиях осадконакопления, необходимо анализировать весь комплекс характеристик для достоверной интерпретации процессов седиментации. Важно оценивать не только структуру и текстуру турбидитовых отложений, строение и последовательность слоев, степень их биотурбации, также анализ необходимо подкреплять положением рассматриваемого объекта в пределах седиментационной системы, региональными предпосылками [109, 121].



Рисунок 2.9 – Основные течения, циркулирующие в нижнемеловом Западно-Сибирском морском бассейне [45]

По результатам анализа кернового материала в составе группы авторов можно выделить текстурные особенности, которые указывают на смену первичной транспортировки и аккумуляции осадка. В мелкозернистых песчаниках и алевролитах отмечены разнонаправленная, косая и горизонтальная слоистость с рябью течения, линзовидные и флазерные текстуры, установленные по керну многих скважин. Одним из основных диагностических признаков песчаных и глинистых контуритов являются биотурбационные текстуры. Для контуритов характерны биотурбационные текстуры, так как донные течения могут поставлять дополнительную порцию кислорода и питательных веществ (Рисунок 2.10), (Рисунок 2.11).



Рисунок 2.10 – Мелкозернистые песчаники с интенсивной биотурбацией, с мелкой косой разнонаправленной слоистостью, присутствует рябь течения, обратная градационная текстура (составлено автором)

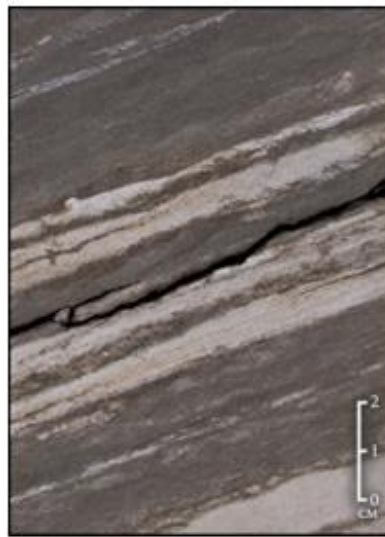


Рисунок 2.11 – Межфэновые (дна бассейна) ритмичнослоистые глинистые алевролиты с линзами тонкими слойками тонко-мелкозернистого песчаника с рябью течения и резкой кровлей (составлено автором)

Сочетание различных типов слоистости в пределах одного рассматриваемого материала, как правило, указывает на смену гидродинамического режима бассейна. Течения, возникающие в раннемеловом Западно-Сибирском бассейне, могли усиливаться, что приводило к перераспределению частиц и возникновению

тягового переноса, при котором движение крупнозернистых частиц происходит не во взвешенном состоянии, а путем волочения и скольжения по дну под воздействием сил течения, при ослаблении движения водных масс накапливался более тонкозернистый материал, и в результате повторения таких эпизодов седиментации в разрезе можно наблюдать прослойки, характеризующиеся разным гранулометрическим составом. Для таких текстурных особенностей характерна совершенная окатанность, так как из-за постоянного трения и соударения частиц о дно бассейна обломки углов осадочных разностей быстрее истираются. О возможном действии придонных течений также могут говорить сдвоенные глинистые слойки и поверхности повторного размыва, в отдельных интервалах они могут встречаться над или под массивными песчаниками, такое строение может объясняться несколькими процессами, осаждение материала из плотностного потока происходило с быстрой потерей энергии, и верхняя часть сформированного слоя могла повторно вовлекаться в движение и подвергаться обработке и дополнительной сортировке, и поэтому в керновом материале можно наблюдать совместно с первоначальными текстурами, характерными для турбидитов, признаки тягового переноса [45, 113, 120] (Рисунок 2.12).

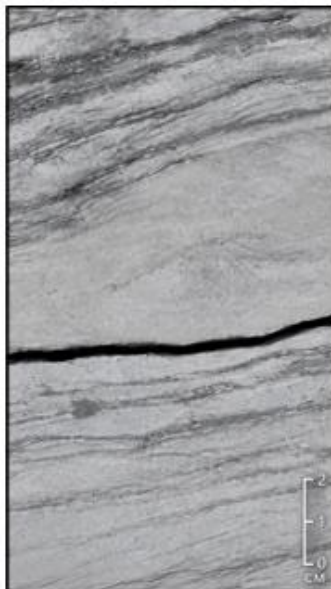


Рисунок 2.12 – Многочисленные сдвоенные глинистые слойки в кровле прослая массивного турбидитового песчаника и под ним указывают на переработку приливами турбидитовых осадков (составлено автором)

При описании кернового материала массивные и градационно-слоистые песчаники могут соответствовать этапу преимущественного гравитационного осаждения. Наличие в верхней части разреза волнистой, косой или линзовидной слоистости, допускает смену механизма седиментации, которая может свидетельствовать о его переносе и обработке после первоначальной аккумуляции осадка. Для более надежного обоснования необходимо сопоставить текущую интерпретацию с последовательностями соседних интервалов, информацией о геологическом строении изучаемой площади и региональными предпосылками бассейна седиментации, прослеженная пространственная связь выявленных текстур с выделенными морфологическими формами, которые закартированы по результатам сейсмофациального анализа, повышает обоснованность выдвинутой гипотезы [45, 109].

Оценка степени биотурбации позволяет оценить возможное влияние придонных течений на особенности строения осадочных отложений. Анализ выявленных следов жизнедеятельности донных организмов выполняется по некоторым характеристикам седиментации, таким как скорости накопления осадков, продолжительность перерывов между последовательными седиментационными событиями, свойства кислородного режима, топографии дна бассейна, если за короткий промежуток времени поступал значительный объем осадочного материала, условия для биотурбации могли не выполняться, и она становилась ограниченной, напротив при более медленном накоплении осадка биогенные текстуры могли сохраняться. На придонную переработку могла указывать повышенная степень биотурбации, однако интерпретация не всегда может быть однозначной, поэтому анализ необходимо проводить по группе факторов [109, 121].

По материалам сейсморазведки 3D можно судить о возможном воздействии придонных течений, на сейсмических атрибутах могут прослеживаться характерные морфологические элементы. Выделенные линейные формы могут соответствовать осадочным волнам, грядам, бороздам и контуритовым дрифтам,

конфигурация которых отличается от типичного конуса выноса, образованного классическим путем при гравитационном переносе осадков [45, 59, 110].

Дополнительный вторичный агент, влияющий на итоговую морфологию глубоководных конусов выноса, может быть определен по ориентации осадочных тел, расположение которых вдоль палеосклона по направлению, отличному от первоначального движения турбидитовых потоков, свидетельствует о смене движения переноса (Рисунок 2.13). Геометрия проявления таких осадочных волн может изменяться в зависимости от гидродинамических условий бассейна седиментации и особенности топографии рельефа дна бассейна, выделяются относительно прямолинейные гребни, извилистые формы и элементы с бифуркацией. Изменчивость амплитуд отражения, волнообразная форма записи на временных сейсмических разрезах может говорить о проявлении контурных процессов. В некоторых случаях прослеживаются последовательности отражений, соответствующие миграции осадочных форм [45, 59]. Интерпретация подобных аномалий требует осторожности. Положительная амплитудная аномалия может согласовываться с повышенным содержанием песчаного материала, однако амплитуда отражения зависит и от других характеристик геологической среды. По одной сейсмической карте установить литологический состав невозможно. Для проверки предположения необходимо привлекать данные ГИС, керн и результаты корреляции скважинных разрезов.

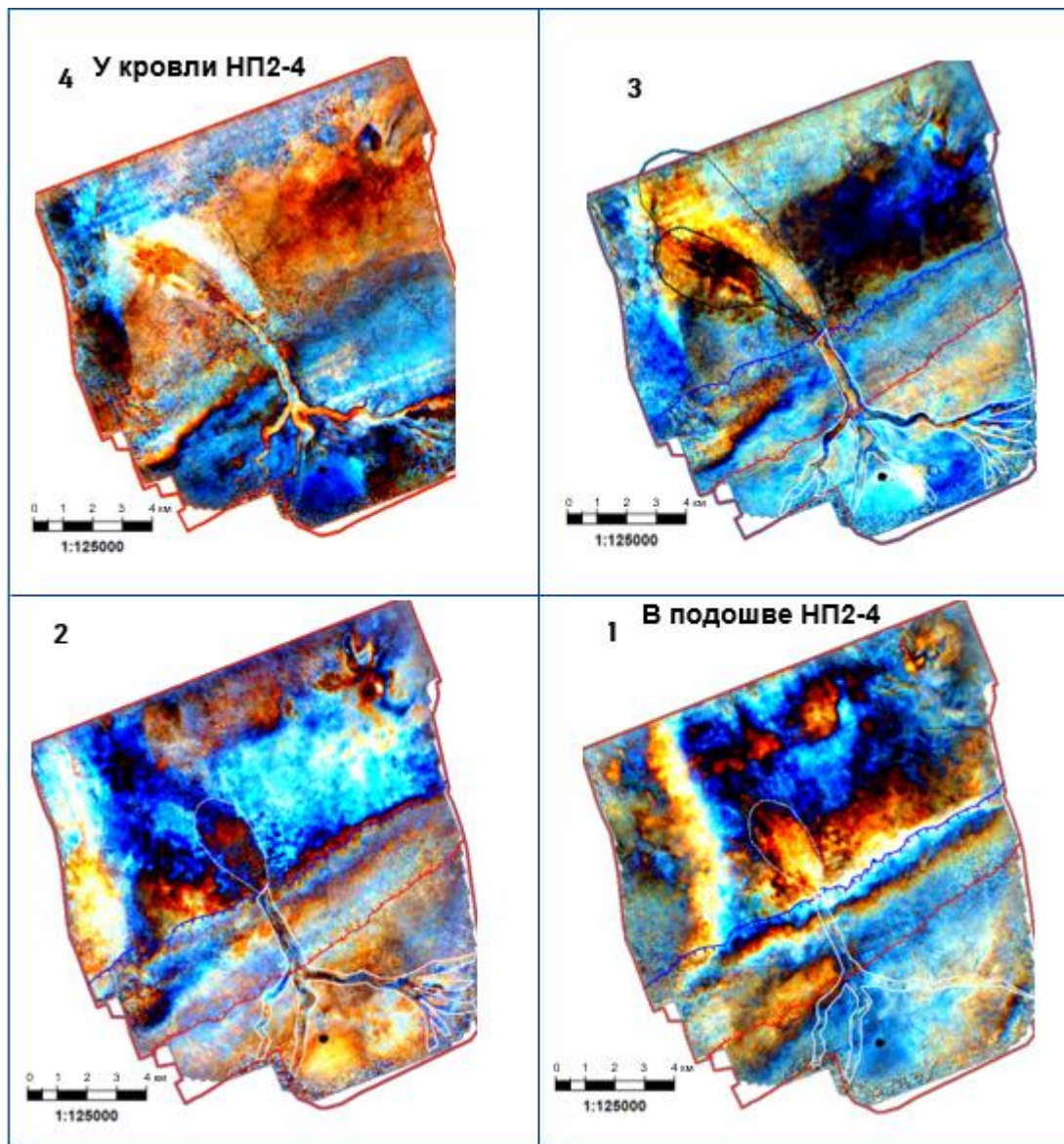


Рисунок 2.13 – Признаки контурных течений по результатам спектральной декомпозиции (составлено автором)

В нижнемеловом клиноформенном комплексе Западной Сибири описаны донные формы, которые ориентированы вдоль подводного склона и пересекают направления турбидитовых каналов и лопастей [45]. Подобная геометрия рассматривается как один из аргументов в пользу участия вдольсклоновой циркуляции. При этом выраженность осадочных форм различается. На одних участках выделяются относительно небольшие линейные элементы, на других - крупные осадочные волны и протяжённые аккумулятивные тела. Различия в морфологии могут отражать неодинаковую интенсивность придонной циркуляции. Их особенность поступления осадка. Поэтому отсутствие крупных дрифтов на

определённом стратиграфическом уровне не следует автоматически интерпретировать как полное отсутствие придонных течений. Возможно, условия не обеспечивали накопления достаточного объёма материала либо сформированные тела впоследствии подверглись размыву. Пример осадочных волн в сейсмическом поле представлен на рисунке 2.14.

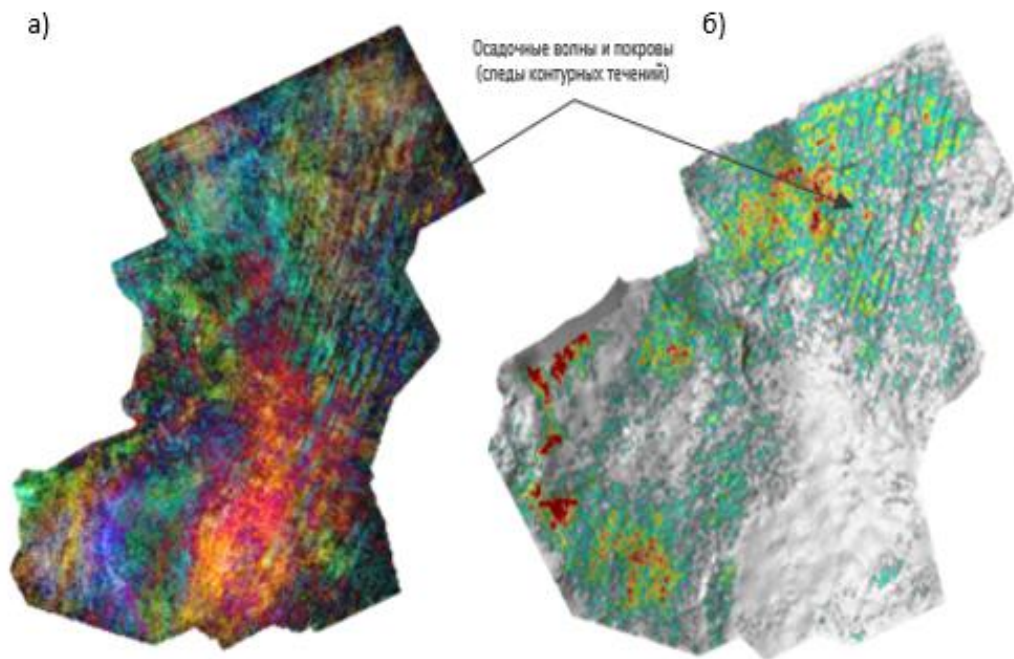


Рисунок 2.14 – Сейсмические разрезы для пласта с признаками контурных процессов (а – Спектральная декомпозиция, б – Сумма положительных амплитуд)
(составлено автором)

Совместное действие гравитационных и придонных потоков могло приводить к различным вариантам формирования осадочных тел. Один из них связан с существованием контуритового дрефта до поступления очередного турбидитового потока. В этом случае дрефт выступал в качестве положительной формы палеорельефа. При приближении гравитационного потока к такому препятствию его траектория могла изменяться. В зависимости от особенностей палеорельефа канал мог отклоняться, а поток - огибать возвышенные участки. Часть материала при этом перераспределялась между соседними направлениями переноса [45, 111, 113] (Рисунок 2.15). Другой вариант связан с одновременным

действием двух направлений переноса. Основная масса терригенного материала перемещалась вниз по склону в составе турбидитового потока. Придонные течения могли смещать часть осадка в латеральном направлении. Материал распределялся неравномерно. На противоположных флангах седиментационной системы накапливалось разное количество осадка. При определённых условиях прирусловые валы развивались асимметрично, ось лопасти смещалась, а общая конфигурация конусы выноса менялась [45, 113, 116].

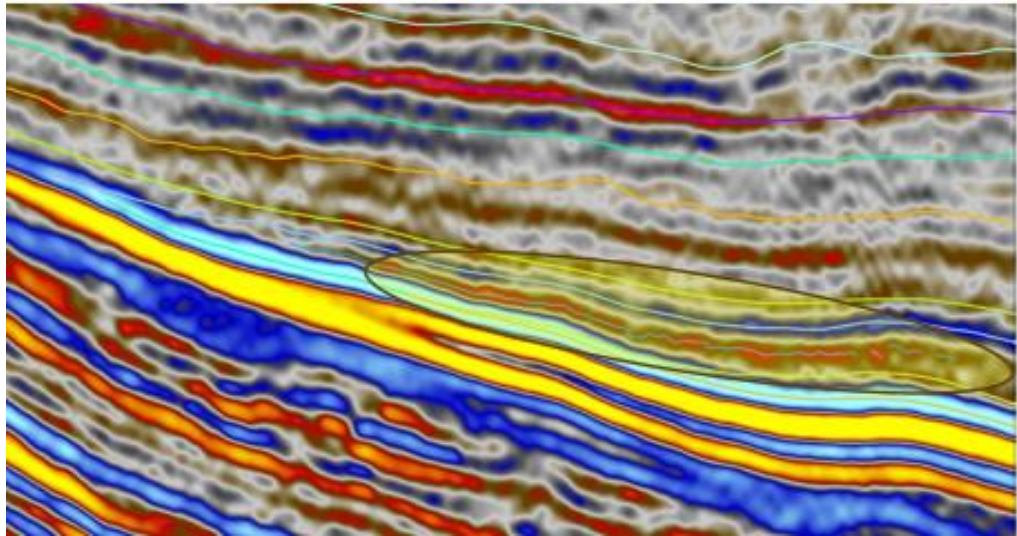


Рисунок 2.15 – Проявление в сейсмическом поле осадочных волн (составлено автором)

Придонные течения могли перерабатывать отложения и после завершения основного турбидитового события. В таком случае течение воздействовало на верхний слой уже накопленного осадка. Часть материала вновь взмучивалась. Тонкозернистые частицы переходили во взвешенное состояние и переносились за пределы первоначальной зоны аккумуляции. Песчаные и алевритовые фракции при этом могли сортироваться и повторно осаждаться вдоль склона. Первичная форма лопасти при этом сохранялась полностью либо частично, но распределение песчаности и положение её границ изменялись [109, 113]. Наиболее интенсивное воздействие придонной циркуляции сопровождалось существенным преобразованием ранее сформированных осадочных тел, размыв мог затрагивать каналы, прирусловые валы и отдельные части лопастей, первоначально связные песчаные тела могли разделяться на несколько фрагментов, а перенесённый

материал накапливался на других участках, в том числе вдоль простираения склона [45, 109, 113].

Существует асимметрия глубоководных конусов выноса. При интерпретации такой геометрии необходимо разграничивать влияние палеорельефа и возможное воздействие придонных течений, латеральное смещение оси конусы может происходить вследствие заполнения локальных понижений и изменения траектории последующих турбидитовых потоков, в то же время устойчивый вдольсклоновый перенос способен дополнительно перераспределять материал между флангами системы [45, 113]. Механизмы следует проверять совместно. Для этого необходимо сопоставлять положение питающих каналов с морфологией палеоповерхности, сейсмическими атрибутами и литологическими характеристиками разреза, в случае если наблюдаемая геометрия может быть объяснена несколькими процессами, каждый из предполагаемых вариантов требует самостоятельной оценки, это необходимо для последующего седиментационного моделирования.

Возможность взаимодействия придонных и гравитационных потоков подтверждается исследованиями современных глубоководных систем. В частности, есть пример Мозамбикского пролива. Там описаны сложные соотношения контуритовых и турбидитовых отложений. Сопоставление геометрии осадочных тел, их состава и характеристик придонной циркуляции показывает, что вдольсклоновые течения могут изменять пространственное положение и сохранность элементов гравитационных систем [95], различные типы смешанных турбидито-контуритовых комплексов рассматриваются также в работах, посвящённых их классификации и диагностическим признакам [113]. Эти примеры помогают восстановить возможные процессы осадконакопления.

Придонные течения оказывают неоднозначное влияние на коллекторские свойства горных пород, с одной стороны, контурная обработка могла улучшать сортировку и окатанность песчаного материала и уносить глинистый материал на более удаленные участки, с другой стороны интенсивный размыв вполне мог и нарушать первичную пространственную связность песчаных линз. Перемещение

материала вдоль склона могло приводить к образованию дополнительных зон накопления терригенного материала, в иных областях относительно осевых зон конусов выноса, при благоприятном исходе такие образовавшиеся объекты можно рассматривать в качестве потенциальных литологических ловушек [45, 109, 127]. При построении прогнозных схем важно рассматривать не только первоначальную архитектуру, но и ее изменения под действием придонных течений. Проверить возможные сценарии действия различных процессов помогает инструмент седиментационного моделирования. В разработанном алгоритме важно учитывать взаимодействие первичного гравитационного и вторичного придонного течения. Необходимо учитывать некоторые параметры седиментации. К ним относятся направление и интенсивность фонового течения, продолжительность его действия, характеристики эрозии и различия в подвижности гранулометрических фракций. Полученные результаты затем сопоставляют с фактическими геолого-геофизическими данными. Однозначного решения может не быть. Одна и та же морфология осадочного тела может возникать при разных сочетаниях исходных условий.

Таблица 2.1 – Сравнительная характеристика основных типов седиментационных потоков, участвующих в формировании ачимовских песчано-алевритовых тел (составлено автором)

Критерий сравнения	Интрабассейновый турбидитовый поток	Гиперпикнальный поток	Придонное (контурное) течение
Генезис	Гравитационный срыв и оползание нестабильных масс осадка на бровке палеошельфа и верхней части склона	Катастрофические паводки речных систем с выносом высокоплотной водно-осадочной суспензии непосредственно в глубоководный бассейн	Непрерывная циркуляция водных масс бассейна под действием различных процессов
Гидродинамический режим и длительность	Кратковременный (часы – первые сутки), резко нестационарный, затухающий импульсный поток	Продолжительный (дни – недели), стационарный поток с пульсациями расхода во времени	Непрерывный или сезонно активизирующийся (месяцы – годы), низко- и среднескоростной режим

Продолжение таблицы 2.1

Критерий сравнения	Интрабассейновый турбидитовый поток	Гиперпикнальный поток	Придонное (контурное) течение
Механизм транспорта осадочного материала	Поддерживающийся гравитационный плотностной поток; взвесь удерживается турбулентностью	Постоянный напорный придонный сток; суспензионный перенос в сочетании с активной донной нагрузкой	Тяговое волочение по дну, сальтация, взмучивание и вынос тонких алевро-глинистых частиц из верхнего осадочного слоя
Фракционная дифференциация	Быстрая продольная дифференциация: разгрузка песков в проксимальной/медальной зоне, вынос ила в дистальную	Продольно-растянутая дифференциация с образованием протяженных песчаных шнурковых русел	Избирательная эрозия пелитовой взвеси, остаточная концентрация хорошо отсортированного алевро-песчаного материала
Характерные осадочные текстуры в керне	Классическая градационная слоистость (циклы Боума), резкие эрозионные подошвы с интракластами	Инверсионная и составная градационная слоистость, многочисленные сдвоенные слойки, обилие углефицированного растительного детрита	Волнистая слоистость, слойки ряби течения с противоположным падением, линзовидно-слоистые текстуры, интенсивная биотурбация
Морфология тел по сейсмическим данным	Веерообразные лопасти, компенсационно перекрывающие друг друга; локальные эрозионные врезы	Протяженные прямолинейные или слаборасчлененные каналы большой длины	Асимметричные осадочные волны, контуритовые дрифты
Влияние на ФЕС и структуру коллектора	Формирование зонально-связных резервуаров с высоким NTG в осевых частях конусов; глинизация периферии	Однородные выдержанные канальные песчаники с хорошей связностью вдоль простираания палеопотока	Улучшение сортировки песчаников и повышение фильтрационных свойств, либо локальный размыв и утонение лопастей

2.5 Выводы по главе 2

По итогам рассмотренных материалов можно сделать вывод, что формирование ачимовской толщи происходило в условиях взаимодействия различных механизмов действия турбидитовых потоков и контурных течений.

Выявлены различные типы плотностных течений, которые могли влиять на итоговую морфологию глубоководных конусов выноса. Дополнительное серьезное влияние оказывали вдольсклоновые придонные течения, которые изменяли начальную геометрию лопастей. В результате этого ачимовская толща имеет высокую изменчивость, неопределённость по латеральному и вертикальному распространению коллекторов и линзовидное строение песчаных тел.

При планировании программы ГРП для поиска и разведки месторождений нефти и газа необходимо учитывать установленные закономерности, так как они оказывают влияние на площадное распространение потенциально перспективных объектов. Важно построить концептуальную геологическую модель, которая отражает генетические принципы формирования ачимовских отложений и является геологической основой проведения седиментационного моделирования, и позволяет перейти к прогнозу зон развития коллекторов, в которых могли аккумулироваться углеводороды.

ГЛАВА 3 МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ СЕДИМЕНТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЧИМОВСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ

3.1 Постановка задачи и концепция алгоритма седиментационного моделирования

Для воспроизведения внутреннего строения ачимовской толщи разработан математический алгоритм седиментационного моделирования. В нем формирование геологического тела рассматривается как последовательность действия отдельных седиментационных событий. Каждое единичное событие соответствует одному турбидитовому событию. В рамках него происходит поступление водно-осадочной смеси из шельфовой зоны в глубоководную часть бассейна. Здесь происходит задание исходных осадочных разностей, их транспортировка по подготовленному палеорельефу, осаждение материала, эрозия поверхности, повторное вовлечение осадков и возможная обработка придонными течениями.

В разработанном алгоритме под элементарным седиментационным событием понимается ограниченный по времени эпизод поступления и транспортировки терригенного материала. Для него задается собственный набор параметров. К исходным данным относятся начальное положение источника сноса, объем водно-осадочной смеси, концентрация осадка, длительность события, фракционный состав материала, гидродинамические условия переноса. Такое событие может иметь различный характер: отдельный турбидитовый поток, гиперпикнальный поток, комбинированный процесс. Помимо этого, гравитационный перенос осложняется вдольсклоновыми придонными течениями.

Данный подход широко применим для глубоководных конусов выноса, поскольку итоговая архитектура резервуара формируется за счет множества отдельных событий [75, 131]. Это подтверждается современными наблюдениями, а также физическим моделированием подобных систем [51]. Серия таких событий формирует глубоководный конус выноса. Отдельные лопасти в данной системе могут перекрываться, смещаться относительно друг друга в зависимости от

начальной топографии палеорельефа. Также на итоговую геометрию влияют эрозионные процессы. После каждого отдельного события происходит изменение поверхности дна модели, и последующие потоки протекают уже на обновленном рельефе. Это позволяет восстановить генетические процессы формирования ачимовских отложений и с большей достоверностью воспроизвести их внутреннее строение.

Разработанный математический алгоритм седиментационного моделирования имеет принципиальное отличие от стандартных геостатистических методик геологического моделирования. Статическая модель не способна объяснить природу формирования объекта. Она заточена на воспроизведение свойств в трехмерном пространстве по имеющимся скважинным данным, геологическим трендам и статистическим параметрам. Седиментационное моделирование, напротив, направлено на восстановление процессов, приводящих к формированию геологических объектов. То есть в данном случае решается обратная задача, по результатам моделирования полученные модельные данные сопоставляются с априорной геолого-геофизической информацией для полного соответствия. Это объясняет множество возможных решений и сценарность получаемого результата. Следовательно, модель не просто интерполирует свойства, а проверяет, могли ли заданные исходные параметры геологической среды привести к требуемому строению резервуара [15, 35].

Поэтому перед разработкой алгоритма к нему предъявляется ряд требований. Ключевое условие работы инструмента – учет реконструированного палеорельефа. Это главный параметр моделирования, влияющий на итоговую геометрию резервуара. Морфология дна определяет пути движения терригенного материала и места первичной аккумуляции моделируемого осадка. Помимо этого в работе алгоритма необходимо сохранить возможность задания различного характера поступления осадочных разностей и разной длительности действия турбидитового потока. Так как он имеет нестационарный характер и отличается по исходным гидродинамическим параметрам. Кроме того, важным аспектом алгоритма является учет фракционного состава осадочного материала, поскольку различные

гранулометрические разности имеют отличающуюся скорость переноса, подвижность, характер осаждения.

Также важным моментом в формировании ачимовской толщи, которые был рассмотрен в предыдущей главе является возможность воспроизведения различных типов высокоплотностных потоков. Необходимо предусмотреть вариант моделирования как классических гравитационных потоков, так и более длительных течений, действующих за счет речных паводков. Кроме того, важно учесть влияние контурных процессов, так как они способны перерабатывать отложившийся материал. Тем самым они могут изменять внутреннее строение резервуара и площадное распространение коллектора по площади.

Разработанный алгоритм по итогам моделирования должен обеспечивать получение в виде карт, геологических трендов, четырехмерной модели, которая последовательно в течение геологического времени отражает процессы формирования моделируемого объекта. Набор таких данных дает возможность осуществлять прогноз распространения коллектора, использовать результаты для вариативной оценки ресурсной базы углеводородов для обеспечения более надежного принятия решений по программе геологоразведочных работ.

Таким образом, постановка задачи в разработке алгоритма состоит в создании расчетной схемы. Она должна воспроизводить процессы формирования ачимовских отложений. Такая схема призвана обеспечить согласование заданных исходных данных с итоговой архитектурой резервуара.

3.2 Математическая основа разработанного алгоритма

Разработанный алгоритм представляет собой численную реализацию, в основе которой лежит гибридный подход – сочетание эйлера и лагранжева представления моделирования терригенного материала. В основе структурного каркаса находится восстановленный палеорельеф территории, а моделируемые лагранжевы частицы отвечают за перенос осадочных разностей в глубоководную часть бассейна. Данный подход позволяет контролировать массовый баланс

осадков, учитывать изменение топографии после каждого моделируемого события (Рисунок 3.1).

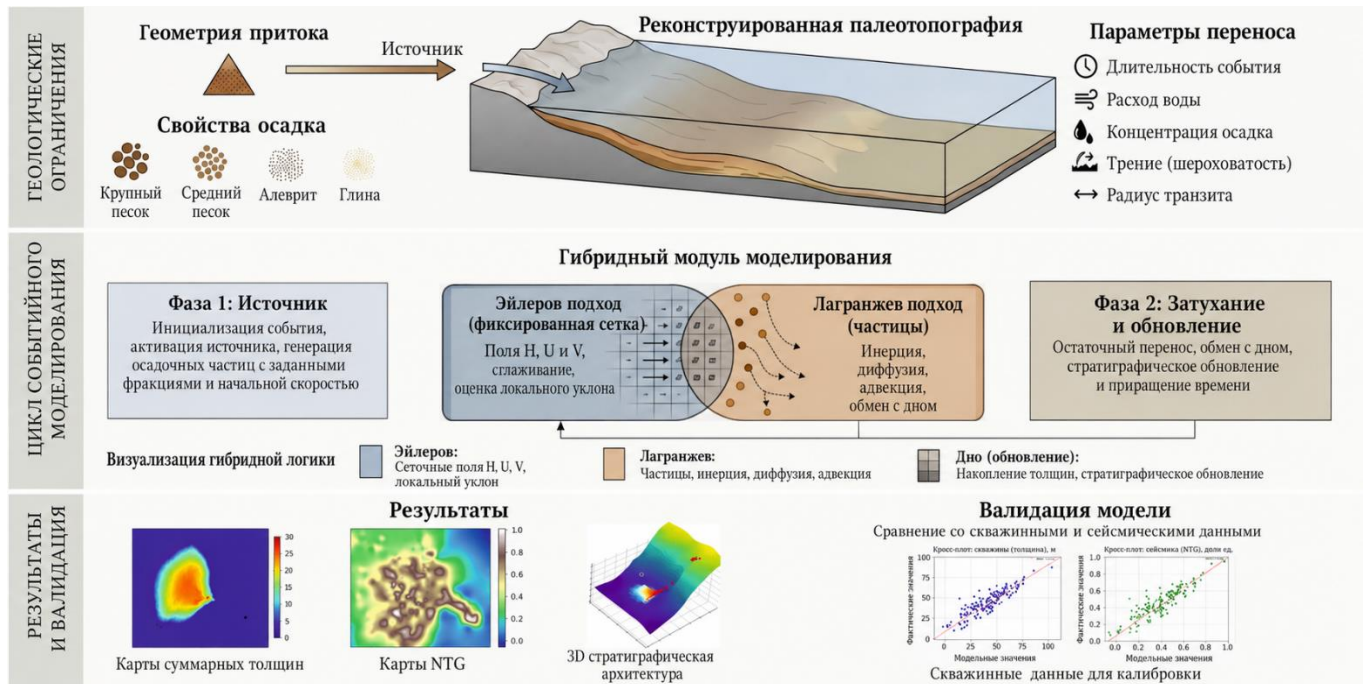


Рисунок 3.1 – Рабочая схема разработанного алгоритма седиментационного моделирования ачимовских отложений (составлено автором)

Расчетная область задается в качестве правильной геометрической формы в прямоугольной системе координат. В качестве основы задается поверхность регулярной сетки с постоянным шагом. Координаты углов сетки задаются в следующем виде (3.1), (3.2):

$$x_j = x_{min} + j\Delta x \quad (3.1)$$

$$y_i = y_{min} + i\Delta y, \quad (3.2)$$

где x_j и y_i - координаты ячейки расчетной сетки;

x_{min} и y_{min} - координаты начала расчетной области;

Δx и Δy - шаг сетки по соответствующим направлениям;

i и j - индексы строки и столбца.

Данная форма записи моделируемых объектов необходима для определения положения каждой ячейки в пространстве. Это позволяет использовать полученную регулярную сетку как основу для хранения начального палеорельефа,

его изменений при последующих итерациях моделирования потока, итоговой накопленной мощности и площадных распределений по отдельным фракциям.

Далее в каждой заданной ячейке задается исходная отметка топографии, которая соответствует палеорельефу на начало моделирования. Ее можно обозначить как (3.3):

$$Z_0(i, j), \quad (3.3)$$

где Z_0 - отметка базовой палеоповерхности в ячейке (i, j) .

Затем по мере моделирования последовательных отдельных событий происходит изменение расчетной области за счет накопления терригенного материала. Такая поверхность моделирования задается как (3.4):

$$Z_t(i, j), \quad (3.4)$$

где индекс t определяет состояние модели в определенный момент геологического времени.

В наиболее общем виде связь между базовой (начальной) поверхностью и поверхностью на текущий момент времени может быть представлена следующим образом (3.5):

$$Z_t(i, j) = Z_0(i, j) + H_{dep}(i, j) - H_{er}(i, j), \quad (3.5)$$

где $H_{dep}(i, j)$ - суммарная мощность накопленного осадка;

$H_{er}(i, j)$ - мощность осадков, подверженных эрозии в определенной ячейке.

Данный принцип показывает ключевую суть седиментационного моделирования, где модель изменяется в течение геологического времени и преобразуется вследствие действия процессов седиментации. Следовательно, каждый последующий поток взаимодействует с обновленной поверхностью.

Постоянное изменение поверхности несет в себе важную роль. При формировании глубоководных конусов выноса при начальных итерациях действия потока заполняются впадины палеорельефа. При последующих событиях они становятся уже положительными формами. Следовательно, будущие потоки отклоняют траекторию своего движения и формируют дополнительные депоцентры. В результате чего формируются компенсационное наложение лопастей и миграция зон аккумуляции песчаного материала. Так, если бы

поверхность была статична и не обновлялась, модель воспроизводила бы только повторное отложение осадков в одних и тех же депоцентрах. Такой подход не позволял бы корректно воспроизводить процессы формирования ачимовских отложений. Поэтому данная методика является одной из основных особенностей седиментационного моделирования и позволяет учитывать эволюцию седиментационной системы [68, 69].

Для корректного восстановления литотипов ачимовских отложений в модели задается несколько гранулометрических фракций. Они подразделяются по размеру зерна. В качестве основных осадочных разностей принимаются: крупнозернистый песок, среднезернистый песок, алевроит, глина. Также допускается задавать и большее количество осадков, если того требуют задачи моделирования. В каждой ячейке расчетной сетки модели хранятся не только общая мощность всех моделируемых осадков, но и отдельное соотношение каждой фракции.

Общая мощность каждой ячейки может быть записана в следующем виде (3.6):

$$H(i, j) = \sum_{k=1}^4 H_k(i, j), \quad (3.6)$$

где $H_k(i, j)$ - мощность k -й фракции, накопленной в ячейке (i, j) .

При этом $k = 1$ соответствует крупнозернистому песку, $k = 2$ - среднезернистый песок, $k = 3$ - алевроит, $k = 4$ - глина.

Это позволяет сохранить структуру каждой ячейки и на выходе получать карты распространения осадков по каждой фракции.

На основе полученных распределений можно с некоторой долей условности рассчитать коэффициент песчанистости. В рамках рассматриваемой территории к песчаным компонентам были отнесены крупнозернистый и среднезернистый песчаник. Поэтому значение коэффициента песчанистости задается как (3.7):

$$NTG(i, j) = \frac{H_{coarsesand}(i, j) + H_{mediumsand}(i, j)}{H_{total}(i, j)}, \quad (3.7)$$

где $H_{coarse sand}$ и $H_{medium sand}$ - мощности крупно- и среднезернистой песчаных фракций;

H_{total} - суммарная мощность всех фракций в ячейке.

Данный показатель имеет важное значение для осуществления прогноза коллектора по площади.

Для описания процессов транспортировки осадочных разностей в модели используется лагранжев подход. Данный подход позволяет отслеживать формирование отдельных расчетных элементов, которые перемещаются в пространстве. В разработанном алгоритме они представляют собой частицы в виде порций водно-осадочной смеси. Соответственно каждая такая частица характеризуется собственными координатами, скоростями, литологическим составом и объемом осадков. В общем виде состояние частицы в общем виде можно представить как (3.8):

$$P_n = (x_n, y_n, u_n, v_n, V_{1,n}, V_{2,n}, V_{3,n}, V_{4,n}), \quad (3.8)$$

где P_n - состояние n-й частицы, x_n и y_n - ее координаты;

u_n и v_n - компоненты скорости;

$V_{1,n} - V_{4,n}$ - объемы осадочного материала соответствующих фракций, связанных с данной частицей.

Данная форма записи частиц позволяет учитывать фракционную составляющую и отслеживать перераспределение материала в течение геологического времени.

Лагранжев подход применим для моделирования турбидитовых потоков, поскольку позволяет описывать движение отдельных частиц по восстановленному палеорельефу. В зависимости от условий среды порции терригенного материала могут менять направление, скорость, объем осадков. При этом движение потока не задается по заранее определенному сценарию, а изменяется по результатам обновления топографии.

Сочетание с эйлеровым подходом позволяет фиксировать основные результаты моделирования в узлах и ячейках регулярной сетки. Так, текущая поверхность рельефа записывается в виде $Z_t(i, j)$, общая мощность как $H(i, j)$, мощности отдельных фракций - $H_k(i, j)$, поля скоростей $U(i, j)$ и $V(i, j)$.

Такой гибридный подход дает возможность отслеживать динамику переноса транспортируемого материала от источника к конечным зонам разгрузки осадков и

фиксировать изменения объемов осадка в каждой ячейке, а также обновление палеорельефа после каждого события.

При осаждении часть материала, переносимого лагранжевой частицей, переходит в расчётную сетку. Объём осевшей фракции пересчитывается в прирост её мощности с учётом площади ячейки. В простейшем виде это можно представить следующим образом (3.9):

$$H_k^{t+\Delta t}(i, j) = H_k^t(i, j) + \frac{\Delta V_{dep, k}}{A_{cell}}, \quad (3.9)$$

где $\Delta V_{dep, k}$ - объём осажженного материала k -й фракции;

$A_{cell} = \Delta x \Delta y$ - площадь ячейки;

H_k^t и $H_k^{t+\Delta t}$ - мощность фракции до и после расчетного шага.

Положение частицы не обязательно совпадает с центром ячейки. Поэтому в алгоритме предусмотрено распределение осаждаемого объёма между четырьмя соседними ячейками. Доли материала определяются весовыми коэффициентами, которые зависят от локальных координат ξ и η . Обе координаты изменяются в пределах от 0 до 1. Расчёт весов выполняется по выражению (3.10):

$$w_{00} = (1 - \xi)(1 - \eta), w_{01} = \xi(1 - \eta), w_{10} = (1 - \xi)\eta, w_{11} = \xi\eta, \quad (3.10)$$

Здесь w_{00} , w_{01} , w_{10} , w_{11} - веса распределения осажженного объёма между четырьмя ближайшими ячейками.

При переносе осадка на расчётную сетку алгоритм учитывает положение частицы. Весь осевший объём не сосредоточивается в одной ячейке. Материал распределяется между четырьмя соседними ячейками. Долю осадка для каждой из них задают весовые коэффициенты, которые зависят от координат частицы.

Важна и стратиграфическая память. Модель сохраняет не только итоговую мощность отложений, но и последовательность отдельных седиментационных событий. Историю накопления можно проследить. Для каждого этапа расчёта становится возможным оценить, как менялось пространственное распределение осадочного материала. На выходе формируется 4D-модель, которая отражает развитие седиментационной системы в пределах заданного геологического времени. Для этого реализован отдельный набор слоев, в которых фиксируется

положение на каждом временном шаге. В общем виде это можно представить следующим образом (3.11):

$$L_m(i, j, k), \quad (3.11)$$

где L_m - слой, сформированный m -м событием;

i, j - индексы ячейки;

k - номер фракции.

Индекс m отражает последовательность накопления осадков, что позволяет анализировать историю формирования осадочного тела.

Реализация такой функции принципиально важна для седиментационного моделирования. Это позволяет отслеживать вклад каждого турбидитового потока в итоговую архитектуру резервуара. Также появляется возможность анализировать неоднородность геологического тела и степень гидродинамической связности литологических объектов. Помимо этого, стратиграфическая запись необходима для воспроизведения процессов эрозии, поскольку поток может осуществлять взаимодействие и с прошлым слоем ранее накопленных отложений.

В результате выполнения моделирования удастся на выходе получить следующие данные:

- карты общих мощностей, показывающие суммарный объем накопившихся осадков в пределах расчетной области;
- карты толщин каждой отдельно заданной фракции;
- карты песчанистости и глинистости;
- 4D модель, отражающая временную историю формирования объекта.

Таким образом, можно сказать, что разработанный алгоритм объединяет три системы. Первая – эйлеров подход, задающий каркас модели, второй – лагранжев, описывающий движение частиц, третий – стратиграфический, фиксирующий в памяти формирование каждого моделируемого события.

Разработанный алгоритм позволяет использовать единую математическую основу для воспроизведения различных типов плотностных потоков, которые

влияли на формирование ачимовских отложений. Различие между моделируемыми режимами определяется временным промежутком поступления материала, длительностью действия турбидитового потока, характером взаимодействия потока с окружающей водной массой.

В алгоритме реализована возможность моделирования интрабассейновых и экстрабассейновых потоков, действия контурных течений. Выбор базового режима не влияет на структуру расчетной модели, но определяет управляющие исходные параметры модели.

Основной расчетной единицей разработанного алгоритма является отдельное седиментационное событие, которое представляет собой ограниченное во времени турбидитовый поток. Происходят процессы поступления, переноса, аккумуляции и эрозии терригенного материала. В каждом отдельном событии заложен набор исходных параметров (3.12):

$$\Theta_m = \{Q_m, C_{s,m}, T_{e,m}, \alpha_m, x_{s,m}, y_{s,m}, W_{s,m}, f_{m,k}, \vec{V}_{bg,m}, \vec{V}_{cont,m}\}, \quad (3.12)$$

где m - номер события;

Q_m - расход водно-осадочной смеси;

$C_{s,m}$ - объемная концентрация осадка;

$T_{e,m}$ - продолжительность события;

α_m - направление входа потока;

$x_{s,m}, y_{s,m}$ - координаты источника;

$W_{s,m}$ - ширина зоны поступления;

$f_{m,k}$ - доля k -й фракции;

$\vec{V}_{bg,m}$ - фоновое течение;

$\vec{V}_{cont,m}$ - направленное придонное течение.

В рамках разработанного алгоритма была реализована возможность задания одного или нескольких источников сноса терригенного материала. При наличии множества областей старта переноса терригенного материала, каждому источнику задаются свои координаты, время действия, относительный вес среди всей общей системы. Сумма весов активных источников задается следующим образом (3.13):

$$\sum_{r=1}^{N_s} w_r = 1, \quad (3.13)$$

где N_s - число источников;

w_r - доля общего поступления материала через r -й источник.

Такой подход позволяет воспроизводить последовательную или одновременную активность нескольких источников. Также можно задавать время действия каждого источника и объем переносимого материала для каждой зоны.

В пределах действия одного турбидитового потока можно выделить фазу активного поступления терригенного материала, фазу затухания движения потока, и при необходимости - дополнительную фазу придонной переработки осадков. Для формального описания в расчетную схему вводится нормированное время (3.14):

$$\tau = \frac{t}{T_e}, 0 \leq \tau \leq 1, \quad (3.14)$$

где t - время от начала события.

Активное поступление осадочного материала осуществляется при условии (3.15):

$$0 \leq \tau \leq \varphi_s, \quad (3.15)$$

где φ_s - доля продолжительности события, в течение которой источник генерирует новые порции терригенного материала.

На последующие события транспортировки и осаждения осадков отводится следующее время (3.16):

$$\varphi_s < \tau \leq 1 \quad (3.16)$$

В этом случае генерация новых частиц останавливается и ранее сгенерированный осадочный материал продолжает транспортировку, сортировку и осаждение в периметре расчетной сетки. Далее уже происходит завершение и затухание потока.

После завершения конечной стадии идет проверка на наличие остаточного материала. Для завершения массового баланса и предотвращения сохранения в системе неактивных порций происходит конечное осаждение материала.

Классический гравитационный турбидитовый поток применяется для воспроизведения кратковременного импульсного потока, который вызван

обрушением осадков. Для данного режима используется меньшая продолжительность активной фазы поступления осадков, повышается роль начального импульса и быстрее происходит снижение интенсивности потока.

Поступление осадочного материала для интрабассейновых турбидитов представлено как (3.17):

$$\dot{V}_s(t) = \begin{cases} QC_s, & 0 \leq t \leq \varphi_s T_e, \\ 0, & \varphi_s T_e < t \leq T_e, \end{cases} \quad (3.17)$$

где $\dot{V}_s$ - объемный расход твердой фазы.

При постоянных Q и C_s общий объем введенного материала определяется выражением (3.18):

$$V_{s,total} = QC_s \varphi_s T_e \quad (3.18)$$

Поток начинается формироваться с источника сноса, частицы генерируются, получают начальную скорость и начинают движение. После окончания генерации движение осадочных разностей определяется силами гравитации, уклоном поверхности и параметрами окружающей среды.

В базовом варианте для данного режима контурная составляющая отключается, либо задается на уровне слабого фонового течения, не определяющего общую траекторию потока. Основными управляющими параметрами являются расход, концентрация, длительность активной фазы, начальная скорость, направление поступления, фракционный состав и способность потока к эрозии. Однако в случае необходимости задания действий придонных течений существует возможность включить данный процесс.

Итоговое распределение материала в большей степени зависит от начальной топографии палеорельефа, объемов и параметров водно-осадочной смеси и последовательности действия турбидитовых событий. И на выходе появляется возможность оценить внутреннее строение смоделируемого объекта (Рисунок 3.2).

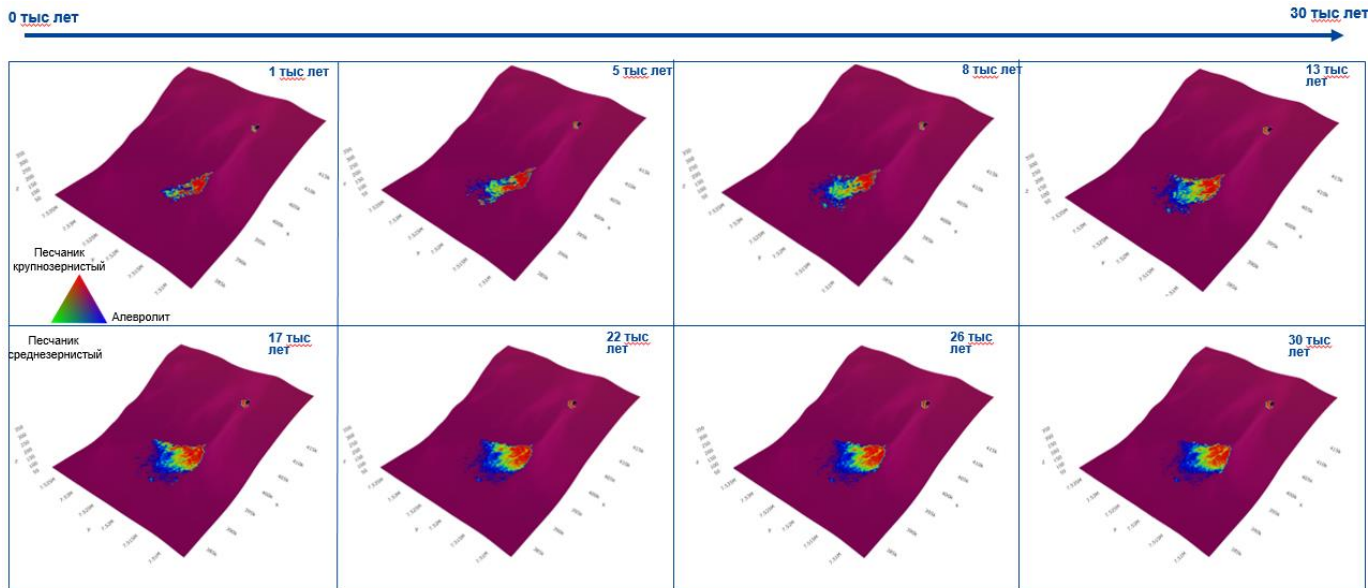


Рисунок 3.2 – Последовательные слайсы седиментационной модели гравитационного потока (составлено автором)

В разработанном алгоритме также реализован и гиперпикнальный режим поступления осадочного материала. Он предназначен для воспроизведения более длительного поступления осадочного материала, вызванного речными паводками. Также для данного типа плотностного потока изменяется интенсивность питания в течение времени. Расход водной смеси может последовательно нарастать, достигать пика, снижаться, отражая прямое развитие паводковой системы.

Изменение расхода водной смеси задается выражением (3.19):

$$Q(t) = Q_0 F_h(\tau), \quad (3.19)$$

где Q_0 - базовый расход;

$F_h(\tau)$ - функция развития речной паводковой системы.

В обобщенном виде она представляется как (3.20):

$$F_h(\tau) = \begin{cases} 1 + (K_p - 1) \frac{\tau}{\tau_r}, & 0 \leq \tau < \tau_r, \\ K_p, & \tau_r \leq \tau \leq 1 - \tau_f, \\ 1 + (K_p - 1) \frac{1-\tau}{\tau_f}, & 1 - \tau_f < \tau \leq 1, \end{cases} \quad (3.20)$$

где τ_r - доля продолжительности, соответствующая нарастанию расхода потока;

τ_f - доля стадии снижения интенсивности потока;

K_p - коэффициент максимального увеличения расхода.

Объемный расход твердой фазы определяется как (3.21):

$$\dot{V}_s(t) = Q(t)C_s(t) \quad (3.21)$$

Также для данного режима вводятся дополнительные параметры моделирования: плотность принимающей морской воды, доля пресноводной составляющей, интенсивность смешения с окружающей водой и коэффициент вовлечения окружающей водной массы.

Плотность поступающей смеси должна обеспечивать возможность ее погружения и продолжения движения вдоль дна. По мере разбавления окружающей водой избыточная плотность потока снижается, что может приводить к ослаблению придонного движения и частичной разгрузке тонких фракций.

Особенностью действия гиперпикнального потока является сохранение транспортной способности на большие дистанции и более длительный промежуток времени переноса терригенного материала. Поэтому здесь также дополнительно предусмотрены параметры направленного импульса от источника, удержания транспортного направления в пределах сформированной траектории потока. Данные параметры не имеют сильного влияния на итоговую геометрию моделируемого объекта, но регулируют способность потока сохранять четкое направление при взаимодействии с топографией рельефа.

Следовательно, можно сделать вывод, что гиперпикнальный режим отличается от классического гравитационного переноса большей продолжительностью активной фазы переноса терригенного материала, учетом влияния параметров пресной и морской воды и другой интенсивностью потока. Все эти факторы влияют на итоговую геометрию отложений и внутреннее строение объекта (Рисунок 3.3).

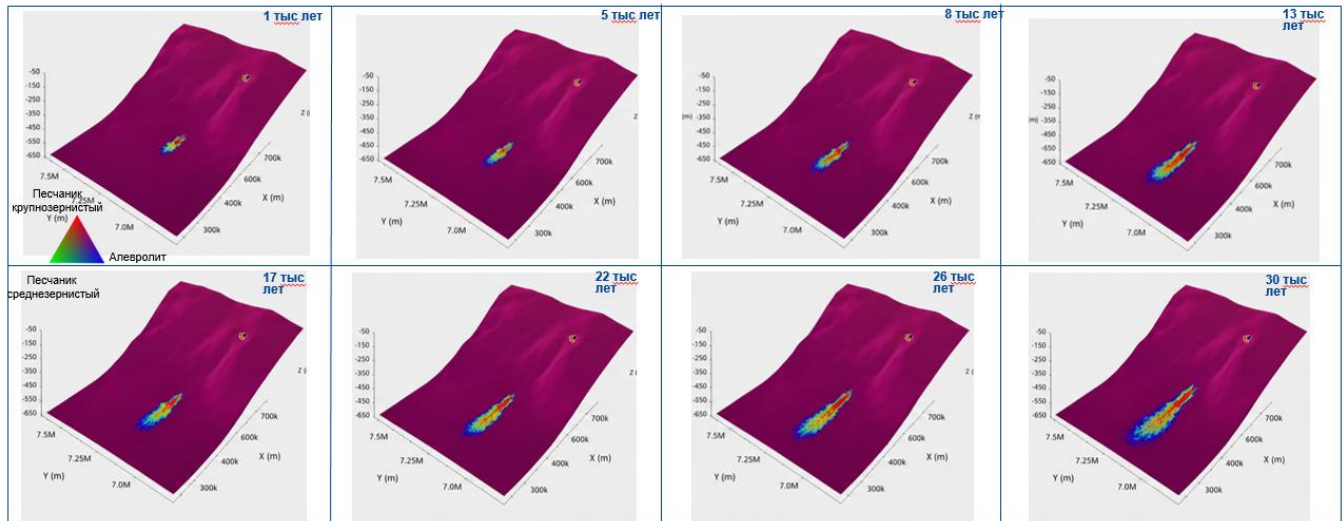


Рисунок 3.3 – Последовательные слайсы седиментационной модели гиперпикнального потока (составлено автором)

Также в разработанном алгоритме предусмотрен смешанный режим моделирования турбидитовых потоков. Для данного случая возможен выбор либо гравитационных турбидитовых потоков, либо гиперпикнального поступления терригенного материала. Траектория переноса контролируется не только направленным вниз по склону течением, но и дополнительной приконтурной переработкой. То есть реализованы два сценария. В первом варианте сначала моделируется турбидитовый поток и затем после осаждения осадков происходит их перераспределение придонными течениями. Во втором варианте действие присклоновых процессов начинается уже в активной фазе поступления терригенного материала. Это позволяет проверить различные гипотезы формирования объекта и оценить варианты его внутреннего строения.

Скорость движения каждой фракции представляется следующим образом (3.22):

$$\vec{V}_k = \vec{V}_{grav,k} + \vec{V}_{bg} + \beta_k \vec{V}_{cont} \quad (3.22)$$

где $\vec{V}_{grav,k}$ - скорость, определяемая гравитационным потоком;

$\vec{V}_{bg}$ - региональный фон;

$\vec{V}_{cont}$ - скорости вдольсклоновых придонных течений;

β_k - коэффициент связи отдельной фракции с контурными процессами.

Значение параметра принимается для каждой фракции отдельно, для пелитовой составляющей, которая легче вовлекается в перенос придонными течениями и может перемещаться на большие расстояния, и отдельно для более крупнозернистых частиц, которые сложнее поддаются переносу и требуют более высокой энергии потока.

Для данного режима дополнительно предусмотрен параметр латерального отклонения, который отвечает за степень смещения материала относительно основной оси траектории переноса, при большом значении данного параметра итоговая геометрия имеет более асимметричную форму, однако здесь главной составляющей, которая определяет пути переноса терригенного материала, является топография палеоповерхности, ее конфигурация остается основным параметром, определяющим условия движения потока. Итоговая геометрия конусы выноса главным образом зависит от сочетания этих факторов.

Интенсивность и направление действия придонных течений в разработанном алгоритме изменяются в заданных диапазонах, что дает возможность рассчитывать различные сценарии. Помимо воздействия придонных течений во время движения основного турбидитового потока, существует вариант их вторичного действия после первоначального накопления осадка, так придонное течение воздействует на верхний слой системы, вследствие этого часть материала вовлекается в движение и распределяется в периметре расчетной области (Рисунок 3.4).

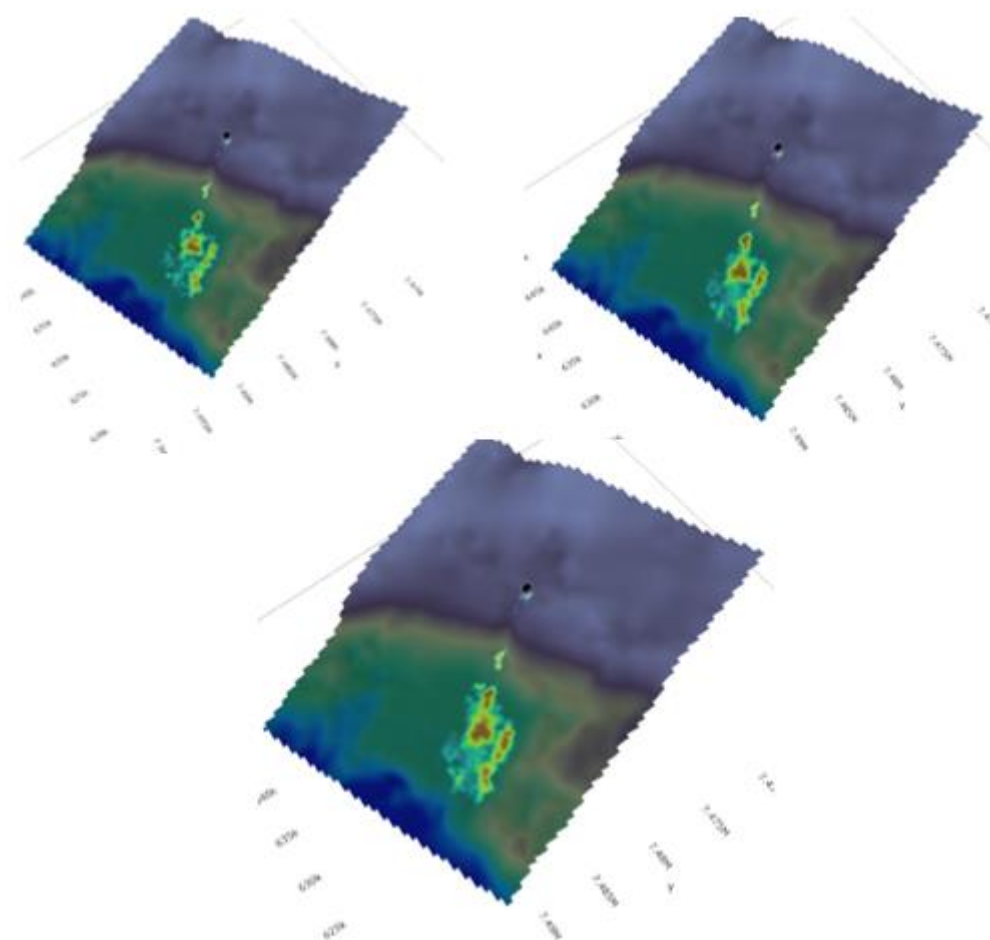


Рисунок 3.4 – Последовательные слайсы седиментационной модели с действием придонных течений (составлено автором)

В режиме придонной переработки задаётся мощность верхнего активного слоя (3.23):

$$H_{act} \quad (3.23)$$

Ограничение с вовлечением материала связано с использованием материала только из моделируемого интервала, также объем перерабатываемых осадков не должен превышать ее содержание в активном слое, это условие задаётся выражением (3.24). При расчёте учитываются площадь ячейки и доля соответствующей фракции в поверхностных отложениях.

$$\Delta V_{rw,k} \leq H_{act} A_{cell} f_{k,surface} \quad (3.24)$$

Движение частиц происходит только в случае преодоления критического касательного напряжения, которое задано отдельно для каждой фракции (3.25):

$$\tau_{cont} > \tau_{cr,k}, \quad (3.25)$$

где τ_{cont} - касательное напряжение, создаваемое придонным течением;
 $\tau_{cr,k}$ - критическое напряжение для отдельной фракции.

После завершения переработки алгоритм обновляет мощность и фракционный состав осадка. Полученные изменения сохраняются в стратиграфической записи текущего расчётного слоя (3.26):

$$\Delta V_{rw,k} = E_{rw,k} \left(\frac{\tau_{cont}}{\tau_{cr,k}} - 1 \right) A_{cell} \Delta t, \tau_{cont} > \tau_{cr,k}, \quad (3.26)$$

где $E_{rw,k}$ - коэффициент интенсивности переработки.

Продолжительность воздействия придонного течения задаётся независимо от основного турбидитового события (3.27):

$$0 \leq t_{rw} \leq T_{rw}, \quad (3.27)$$

где T_{rw} - продолжительность действия придонных течений после завершения турбидитового потока.

После завершения переработки изменения мощностей и фракционного состава включаются в стратиграфическую запись текущего расчётного слоя.

Формирование осадочных тел в алгоритме воспроизводится последовательностью отдельных седиментационных событий (3.28):

$$S = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}, \quad (3.28)$$

где каждое событие E_m характеризуется собственным вектором параметров Θ_m .

В модели у каждого события свои параметры. От одного события к другому могут меняться количество и положение источников сноса, направление поступления материала, расход и концентрация водно-осадочной смеси. Продолжительность действия потока и условия придонной переработки также могут различаться. После завершения очередного события рассчитанные мощности отдельных фракций добавляются к ранее накопленным значениям (3.29):

$$H_{\Sigma,k}^{(m)}(i,j) = H_{\Sigma,k}^{(m-1)}(i,j) + H_{m,k}(i,j) \quad (3.29)$$

Одновременно обновляется поверхность расчётной области. Полученная топография используется как исходная для следующего события (3.30):

$$Z_{input}^{(m+1)} = Z_{result}^{(m)} \quad (3.30)$$

Отдельные расчётные события связаны между собой через изменение рельефа дна. Осадок постепенно заполняет первоначальные депоцентры и влияет на дальнейшее перемещение осадков, образуя новые пути переноса моделируемого материала, тем самым происходит смещение питающих каналов и перераспределение депоцентров. Многократное повторение турбидитовых событий приводит к образованию сложной многоуровневой системы. Сочетание различных типов плотностных потоков также реализовано в разработанном алгоритме, к ним может добавляться дополнительная придонная обработка. Все режимы имеют общую расчётную основу, однако различаются условиями поступления и транспортировки осадочного материала. У каждого своя специфика. Интрабассейновый режим воспроизводит кратковременный импульсный перенос. При гиперпикнальном режиме поступление материала продолжается дольше, а расход водно-осадочной смеси может изменяться в течение события. Смешанный режим учитывает совместное воздействие гравитационного и вдольсклонового переноса. Отдельно рассчитывается придонная переработка. В этом случае течение воздействует на уже сформированные осадочные тела.

Последовательность таких процессов можно менять. Это позволяет рассматривать разные сценарии формирования ачимовских резервуаров. Полученные результаты сопоставляют с геолого-геофизическими данными, чтобы оценить возможное строение песчаных тел и неопределённость геологического прогноза.

3.3 Исходные данные и геологическая параметризация модели

Седиментационное моделирование является численным воспроизведением процессов формирования осадочной системы, следовательно, в основе модели лежат не только геолого-геофизические данные, но и глубокая история формирования рассматриваемых отложений. Исходные данные являются ключевым фактором грамотно построенной седиментационной модели, так как они обладают некоторыми неопределённостями необходим правильный подбор их

сочетания, так как они задают исходную геометрию расчетной области, положение областей питания, гидродинамические характеристики водно-осадочной смеси, важным моментом при выборе параметров является согласование их с особенностями строения рассматриваемой территории и фактически имеющимися данными [15, 37, 69]. Исходные данные, необходимые для седиментационного моделирования, можно разделить на следующие группы:

- Геолого-геофизические материалы, используемые для построения концептуальной геологической модели;
- Пространственные данные, определяющие расчетную область модели;
- Характеристика источников поступления осадка;
- Гидродинамические параметры транспортировки, осаждения и эрозии.

Каркасом модели служит восстановленная палеоповерхность, гипсометрия которой отвечает предполагаемому времени начала формирования моделируемого объекта, в ее периметр должны попадать области старта переноса терригенного материала и полное пространство, в пределах которого происходит аккумуляция терригенного материала. Первоначальная топография является ключевым элементом всего седиментационного моделирования, от ее морфологии зависят пути переноса терригенного материала и геометрия конусов выноса. Для реконструкции палеоповерхности в настоящей работе применен методический подход, изложенный Т.В. Ольневой и Е.А. Жуковской, который авторы именуют как «условным палеорельефом» [37]. Данная поверхность отражает относительный рельеф дна бассейна, ее построение осуществляется с рядом допущений, авторы также обращают внимание на необходимость рассмотрения альтернативных вариантов ее строения, ввиду сложного прогноза топографии бассейна на момент его формирования, поэтому стоит рассмотреть построение различных вариативных вариантов для оценки всех возможных геологических сценариев образования рассматриваемых геологических тел. Для построения условной палеоповерхности используются результаты сейсмической интерпретации и структурные карты, анализируются мощности осадочного комплекса относительно вышележащего опорного изохронного горизонта. Выбор реперного горизонта имеет

принципиальное значение. Он должен быть стратиграфически обоснован, иметь региональное распространение и характеризоваться выдержанным литологическим составом. Использование же плохо прослеживаемой поверхности может привести к неудовлетворительным результатам седиментационного моделирования [37].

Реконструкция палеоповерхности по общим мощностям может сопровождаться различными неопределенностями. Мощность осадочного комплекса способна изменяться в зависимости от удаления от источника сноса терригенного материала. Это влияет на пути транспортировки и скорости аккумуляции. Латеральное замещение песчаных и глинистых фракций приводит различной степени уплотнения реперных горизонтов. Помимо этого, современная наблюдаемая геометрия морского дна могла быть изменена под действием тектонических процессов, погружений бассейна и постседиментационных преобразований. Поэтому при построении палеоповерхности особое значение имеет учет региональных представлений о формировании бассейна, палеогеографических реконструкций и возможных вторичных процессов седиментации [16, 69, 71, 79].

Однако, несмотря на имеющиеся допущения, данный прием может быть эффективным инструментом восстановления топографии рельефа, особенно в случае наличия качественных данных сейсморазведочных работ. При проведении седиментационного моделирования данная поверхность необходима для воспроизведения устойчивых морфологических элементов, локальных депрессий, положения склоновых ложбин и направления регионального сноса терригенного материала. В то же время не стоит рассматривать мелкомасштабные изменения поверхности как достоверные элементы древнего рельефа. При построении вариативной седиментационной модели данные участки могут изменяться с учетом добавления стохастического шума. Это позволит оценить различные варианты формирования системы.

Далее полученная поверхность должна быть преобразована в расчетную сетку правильной геометрической формы. Размер ячейки должен соответствовать

степени изученности рассматриваемого объекта, площади моделируемого пространства и задач построения седиментационной модели. Чрезмерное уменьшение размера ячейки создает ложную детальность и значительно увеличивает вычислительные затраты, тогда как чрезмерное укрупнение сетки сглаживает элементы моделируемой седиментационной системы. Поэтому шаг расчетной сетки подбирается таким образом, что происходит сохранение основных морфологических объектов и не теряется производительность системы [13, 36, 68].

Следующим шагом после подготовки и расчета палеоповерхности следует определение источников сноса. В рамках седиментационного моделирования под ними понимаются области старта переноса моделируемого вещества. Его положение может быть установлено на основе имеющейся региональной информации о строении бассейна, результатов выполненного сейсмофациального анализа, а также изучения палеоповерхности и выделенной на ней бровки шельфа на наличие удлинённых отрицательных форм рельефа, по которым могла осуществляться транспортировка осадочного материала [15, 35].

Затем для выбранного источника сноса в случае многоточечной системы существует возможность задавать период его активности. В зависимости от принятого сценария моделирования источник может быть представлен как единичным каналом транспортировки, так и несколькими областями переноса осадочных разностей. В сложной многособытийной модели допускается варьирование числа и положения активных источников сноса между последовательными событиями. Это позволяет проверять различные сценарии формирования объектов, а также учитывать миграцию путей переноса осадочного материала и перераспределение питающей системы.

Литологическая и гранулометрическая характеристика поступающего материала задавалась на основе кернового материала и данных ГИС. В базовом сценарии моделирования осадочные разности представлены четырьмя фракциями: крупнозернистым песком, среднезернистым песком, алевроитом и глиной.

Для каждой фракции задавались гранулометрический размер частиц и плотность твердой фазы. На их основе определялись расчетные параметры

осаждения и вовлечения материала в поток. Доля каждой фракции в турбидитовом потоке устанавливается по результатам анализа кернового материала. В условиях низкой изученности допускается привлечение скважин с площадей, характеризующихся аналогичным геологическим строением. При построении вариативной модели необходимо задавать диапазоны изменения данного параметра, так как точный гранулометрический состав древних потоков восстановить невозможно и современное содержание различных фракций не отражает начального соотношения осадных разностей.

Также для каждого события необходимо задать продолжительность поступления терригенного материала, расход водно-осадочной смеси, концентрацию осадков в системе, общий объем осадочных разностей. Данные параметры контролируют энергетический потенциал потока, дальность переноса моделируемого вещества, итоговую мощность геологического тела. Также задаются гидродинамические параметры потока. Они используются по современным наблюдениям за турбидитовыми течениями, из результатов построенных физических моделей и проведенных лабораторных экспериментов [38, 42, 71, 92, 117].

Таблица 3.1 – Входные данные для седиментационного моделирования (составлено автором)

Категория входных данных	Источник фактического материала	Извлекаемые параметры и свойства	Назначение в расчетном алгоритме
Структурно-батиметрическая основа	Сейсморазведка 3D/2D, структурные карты по региональным реперам	Гипсометрия палеоповерхности, реконструированная методом «репер сверху», палеоуклоны дна	Задание граничной геометрии дна ($Z_{initial}$), регулярной расчетной сетки (dx , dy), путей гравитационного стока
Источники поступления осадка	Сейсмофациальный анализ, палеогеоморфологический анализ бровки шельфа	Координаты (X_{src} , Y_{src}), азимуты входа потока, пространственная конфигурация источника	Определение точек генерации лагранжевых расчетных частиц водно-осадочной смеси

Продолжение таблицы 3.1

Категория входных данных	Источник фактического материала	Извлекаемые параметры и свойства	Назначение в расчетном алгоритме
Литолого-гранулометрический состав	Анализ керна, петрофизическая интерпретация ГИС опорных скважин	Соотношение 4 фракций (крупный песок, средний песок, алевроит, глина), плотности частиц (ρ_{s_s})	Задание компонентного состава осадка (sed_ratios), диаметров зерен (d_k), расчет гидравлической крупности (w_s)
Скважинные данные	Данные ГИС, стратиграфическая разбивка, каротаж ПС, ГК	Общая мощность песчано-алевритового пласта (H_{real}), коэффициент песчанистости (NTG_{real})	Опорные точки калибровки модели, вычисление функционала невязки (J) оптимизатором Optuna
Сейсмические данные	Атрибуты, спектральная декомпозиция (RGB-срезы), результаты инверсии	Плановые контуры лопастей, положение распределительных каналов, зоны асимметрии аккумуляций	Верификация плановой морфологии модельных тел, контроль направления придонных течений
Бассейновые гидродинамические ограничения	Фациальный анализ керна, региональные палеогеографические схемы	Ориентация и порядок скоростей придонных контурных течений в бассейне	Задание компонент фонового поля скоростей бассейна (u_{bg} , v_{bg})

Входные данные модели различаются по степени геологической обоснованности. Их можно разделить на три группы.

К первой группе относятся наиболее определенные данные, которые получают по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов. К ним относятся восстановленная палеоповерхность, которая является структурной основой моделирования, фактические скважинные данные, такие как значения толщин различных литотипов и коэффициенты песчанистости и глинистости, по которым осуществляется калибровка результирующей модели.

Ко второй группе параметров можно отнести информацию, которую получают по литературным и справочным данным, определенным по результатам экспериментальных расчетов, физического моделирования, лабораторных исследований и измерений на современных аналогах. Это характеристики

осаждения, скорости транспортировки и переноса терригенного материала, условия вовлечения осадочных разностей в действие потока, свойства водно-осадочной смеси [125].

К третьей группе относятся параметры, определение которых не является однозначным, поэтому при выполнении седиментационного моделирования они подвергаются вариации в пределах определённых диапазонов до достижения сопоставления с имеющимися фактическими данными, в расчетах тестируются различные сочетания продолжительности действия турбидитовых потоков, объема водно-осадочной смеси, концентрации осадка и т.д. [66, 114].

Таблица 3.2 – Исходные параметры разработанного алгоритма седиментационного моделирования (составлено автором)

Группа параметров	Параметр и обозначение	Ед. изм.	Физический и геологический смысл	Базовое значение / Диапазон	Способ задания в модели
1. Геологические и ограниченные	Шаг расчетной сетки dx, dy	м	Пространственное разрешение цифровой модели	100–200	Фиксируется по сетке палеорельефа
	Координаты источника X_{src}, Y_{src}	м	Положение источников сноса	Координаты бровки шельфа	По палеоповерхности
	Плотность зерен осадка ρ_s	кг/м ³	Средняя минералогическая плотность песчано-глинистого материала	2650	Фиксированная физическая константа
	Плотность воды ρ_f , вязкость μ	кг/м ³ , м ² /с	Плотность и кинематическая вязкость водной среды	$\rho_f = 1025$; $\mu = 1,0 \cdot 10^{-6}$	Физические константы водной среды

Продолжение таблицы 3.2

Группа параметров	Параметр и обозначение	Ед. изм.	Физический и геологический смысл	Базовое значение / Диапазон	Способ задания в модели
2. Расчетные параметры	Гидравлическая крупность $w_{s,k}$	м/с	Скорость гравитационного осаждения частиц фракций по Стоксу	Расчет по формуле Стокса для 4 фракций	Автоматический расчет на каждом шаге
	Коэффициент эрозии/подхвата E_s	б/р	Критерий вовлечения донного осадка по Гарсия–Паркеру	Расчет через параметры Zu и R_p	Автоматический расчет по сдвиговой скорости
	Параметр взвешивания $Pa_{уза} P$	б/р	Критерий стабильности переноса тонкой взвеси (wash-load)	$P = w_s / (\kappa \cdot u_*)$	Автоматический расчет для алевролита и глины
3. Сценарные параметры	Расход жидкой фазы Q_{water}	м³/с	Объемный расход водно-осадочной смеси	10 000 – 25 000 (база: 15 000)	Сценарное варьирование
	Концентрация осадка C_{sed}	доли	Объемная концентрация твердой фазы во входящей суспензии	0,05 – 0,12 (база: 0,07)	Сценарное варьирование
	Длительность события t_{event}	ч	Продолжительность фазы активного притока водно-осадочной смеси	2,0 – 7,0 (база: 5,0)	Сценарное варьирование / оптимизация
	Скорость фонового течения u_{bg}, v_{bg}	м/с	Вектор скорости придонного контурного течения в бассейне	0,0 – 0,25	Сценарное задание по палеосхемам

Продолжение таблицы 3.2

Группа параметров	Параметр и обозначение	Ед. изм.	Физический и геологический смысл	Базовое значение / Диапазон	Способ задания в модели
4. Калибруемые параметры	Базовая скорость струи v_base	м/с	Начальная кинематическая скорость водно-осадочной смеси	1,0 – 8,0 (оптимум: 6,55)	Стохастическая оптимизация
	Коэффициент трения о дно f_fric	б/р	Коэффициент гидравлического сопротивления и диссипации	0,1 – 4,0 (оптимум: 2,51)	Стохастическая оптимизация
	Множитель эрозии K_entr	б/р	Интенсивность взмучивания и подхвата подстилающего дна	1,0 – 2,5 (оптимум: 2,25)	Стохастическая оптимизация
	Коэффициент инерции K_inert	б/р	Фактор сохранения вектора количества движения потока	0,950 – 0,999 (оптимум: 0,958)	Стохастическая оптимизация
	Масштаб аккумуляции S_scale	б/р	Коэффициент стратиграфического масштабирования осаднения	10,0 – 35,0 (оптимум: 10,04)	Стохастическая оптимизация
	Доли фракций (песок кр./ср./алевр./глина)	дол и	Гранулометрический состав	0,15–0,20 / 0,25–0,35 / 0,45–0,55 / 0,08–0,15	Оптимизация состава
	Радиус байпаса тонких фракций R_bypass	м	Расстояние устойчивого транзита алеврито-глинистой взвеси	1000 – 4000 (оптимум: 1600)	Оптимизация переноса

Важным аспектом проведения седиментационного моделирования является калибровка полученных результатов на фактическую геолого-геофизическую информацию. Сопоставление модельных данных позволяет оценить, насколько выбранная комбинация параметров воспроизводит моделируемую турбидитовую систему. Геометрию смоделированных осадочных тел дополнительно сопоставляют с результатами сейсмофациального анализа. Особенностью моделирования древних осадочных систем является невозможность точного

воспроизведения процессов, действовавших при их образовании, поэтому моделирование носит множественный характер, невозможно получить одну единственную верную реализацию, которая покажет достоверно процессы, действовавшие много миллионов лет назад. Оцифровка возможных геологически допустимых вариантов строения системы сужает этот диапазон неопределенностей, а фактическая калибровка на скважинные данные оставляет только реалистичные сценарии [14].

3.4 Выводы по главе 3

В рассмотренной главе представлена расчетная схема разработанного алгоритма седиментационного моделирования, которая позволяет воспроизвести процессы переноса, осаждения, размыва и повторного перераспределения осадочного материала. Реализован многособытийный процесс, который учитывает каждое последующее событие, что позволяет определить пространственное положение рассматриваемых геологических тел. Результаты расчета калибруются по фактическим данными до достижения приемлемого соответствия. Разработанный алгоритм может применяться для прогноза площадного распространения коллектора, геометризации литологических ловушек и более обоснованного формирования программы ГРП.

ГЛАВА 4 ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА СЕДИМЕНТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ АЧИМОВСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

В настоящей главе осуществлена апробация разработанного математического алгоритма седиментационного моделирования. Рассмотрены объекты, различающиеся степенью изученности и масштабом действия турбидитовых потоков. Первым примером является пласт НП5 южной части рассматриваемой территории. В пределах площади выполнена сейсморазведка 3D и пробурена поисковая скважина, вскрывшая глубоководные отложения. Вторым примером является пласт НП8 северной зоны площади исследования. Большой периметр работ покрыт сейсморазведкой 3D, также на площади пробурено несколько разведочных скважин. Данная территория характеризуется более масштабным формированием глубоководных конусов выноса с многоточечными источниками сноса.

Задачей проведения моделирования является проверка возможностей алгоритма воспроизводить различные типы турбидитовых отложений, которые отличаются по степени изученности и генетическим механизмам формирования. Для южной зоны необходимо восстановить процессы формирования многоуровневой системы конусов выноса. Это позволит оценить существующие неопределённости и более надёжно геометризовать объект по площади. Для северной части задача построения модели осложняется множеством источников сноса терригенного материала из шельфовой зоны, которые проявляются на сейсмических атрибутах в виде обширной зоны питающих каналов. Помимо этого, на площади широко развиты контурные процессы, которые также осложняют внутреннее строение ачимовской толщи.

4.1 Пример моделирования единичного конусы выноса

Далее рассмотрим выполнение седиментационного моделирования для пласта НП5 южной части периметра работ, расположенного в прибрежной части Обской губы.

Циклит НП5 имеет ограниченное распространение в пределах полуострова Ямал и прослеживается только в юго-восточной части территории (Рисунок 4.1). Он перекрывает нижележащий комплекс НП7 в западном направлении и выклинивается на отложения клиноформ восточного падения. На рассматриваемой площади представлены фондоформенные отложения пласта, ундаформа располагается за пределами периметра работ в восточной части. По результатам анализа сейсмических атрибутов выделяются амплитудные аномалии, приуроченные к глубоководным конусам выноса (Рисунок 4.2).

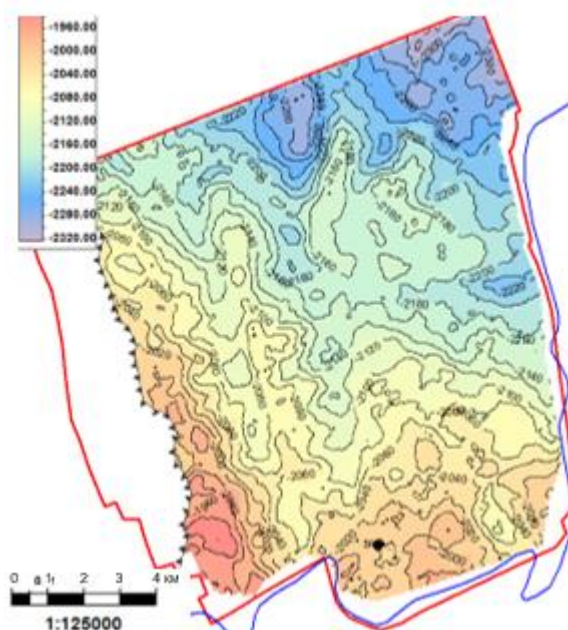


Рисунок 4.1 – Структурная карта пласта НП5 (составлено автором)

По результатам анализа региональной информации и геолого-геофизических материалов территории работ предполагается поступление терригенного материала из северо-восточной области из мелководно-морской зоны. В шельфовой области формировались дельты приливо-отливного типа, представленные боковыми и срединными барами, которые сложены песчано-алевролитовым материалом. Эти отложения являлись питающими объектами для дальнейшего образования глубоководных конусов выноса. В пределах куба 3D прослеживаются только лопасти конусов выноса с многочисленными распределительными каналами (Рисунок 4.2).

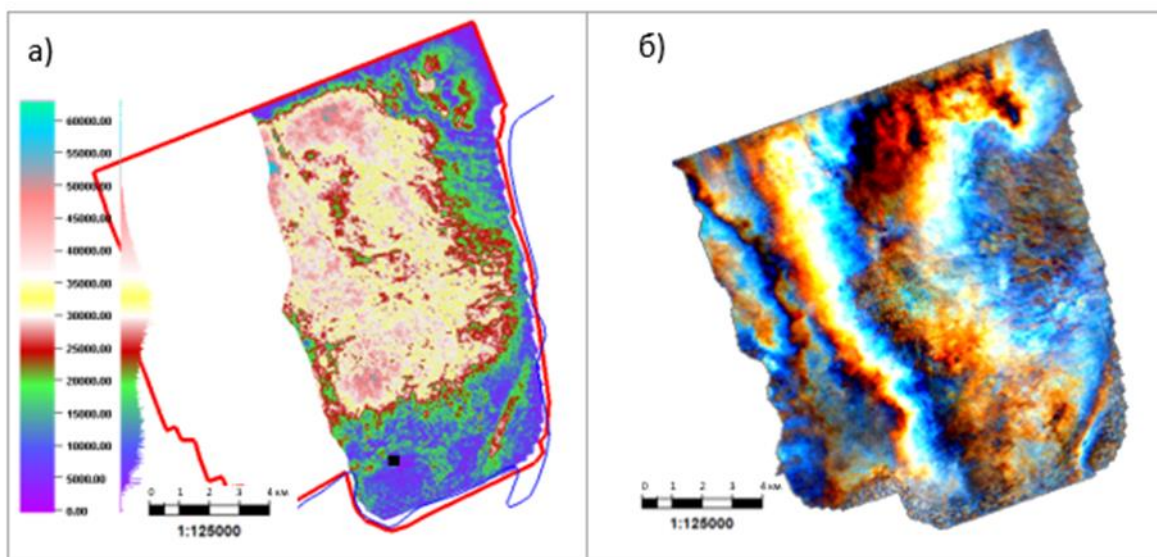


Рисунок 4.2 – Сейсмофациальный комплекс пласта НП5 в волновом поле
(составлено автором)

Выполненный последовательный анализ сейсмических материалов, пропорциональных срезов, сейсмических атрибутов позволил определить многоуровневое строение рассматриваемых отложений (Рисунок 4.3). В пределах периметра работ ачимовская толща обладает сложной внутренней архитектурой резервуара. Отчетливо выделяется несколько лопастей. Это говорит о многократном сносе терригенного материала турбидитовыми потоками и обуславливает высокие неопределенности по распространению коллектора, так как сейсмические данные не позволяют определить вещественный состав отложений и определить гидродинамическую связность резервуара между отдельными лопастями (Рисунок 4.4).

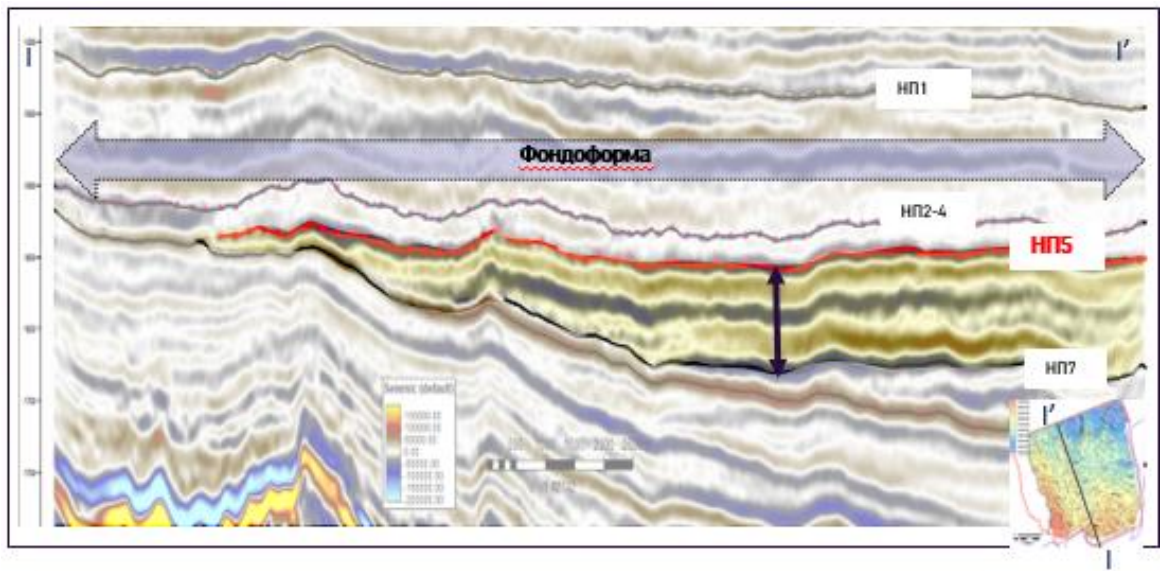


Рисунок 4.3 – Сейсмический разрез пласта НП5 (составлено автором)

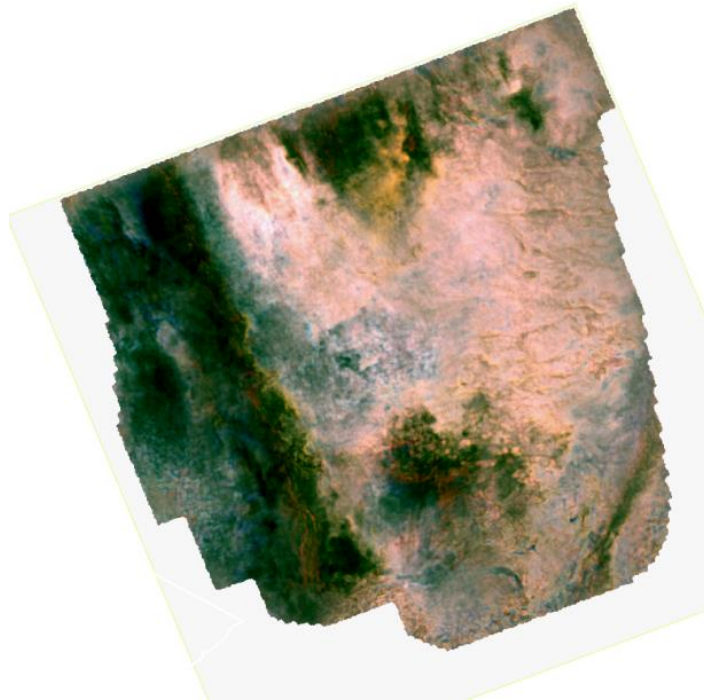


Рисунок 4.4 – Седиментационный срез пласта НП5 (составлено автором)

Поисковая скважина, пробуренная на территории исследования, вскрывает полный разрез пласта НП5. По петрофизической интерпретации эффективная толщина пласта оценивается в 45 метров. Из скважины отобрано 36 метров кернового материала. По результатам анализа фотодокументации керна можно сделать вывод, что пласт представлен фациями глубоководных конусов выноса и глубоководных донных течений. Отложения представлены в основном

песчаниками светло-серыми тонко/мелкозернистыми с многослойчатостью ряби течений, с флазерной местами волнистой слоистостью, с многочисленными сдвоенными глинистыми слойками, также встречаются обломки углефицированной древесины и углистого детрита (Рисунок 4.5). Это может свидетельствовать о действии различных турбидитовых потоков, а также влиянии придонных течений на формирование осадков. Неопределенность по механизмам формирования глубоководных конусов выноса влияет на архитектуру резервуара и пространственное распространение коллектора. Поэтому выполнение вариантного седиментационного моделирования позволит количественно оценить возможные сценарии формирования отложений.

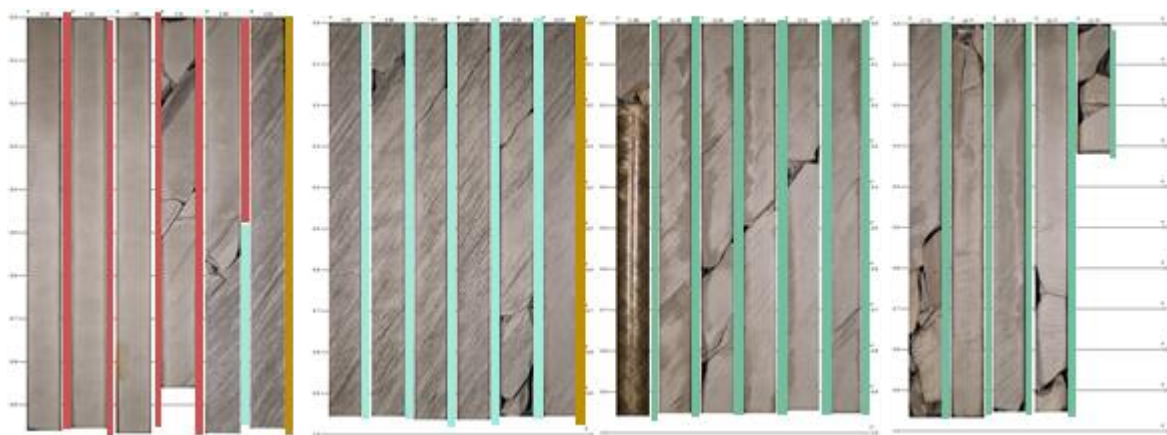


Рисунок 4.5 – Фотодокументация керна пласта НП5 (составлено автором)

Первым шагом на пути построения седиментационной модели является восстановление палеоповерхности. Она является каркасом модели и отражает топографию рельефа на момент формирования осадков. Расчет палеоповерхности осуществлялся по структурным поверхностям, полученным при интерпретации сейсмических данных. Использовался рассмотренный ранее принцип восстановления топографии относительно вышележащего реперного горизонта, приуроченного к алымской свите. Данный подход широко применяется при анализе региональной модели и для подготовки входных данных седиментационного моделирования [37]. Так как при построении полученной поверхности принят ряд допущений, и она не является единственной верной моделью, в ходе выполнения вариативной оценки строились дополнительные

близкие варианты палеорельефа. Они получались путем сглаживания локальных неровностей или добавления стохастического шума в глубоководной зоне (Рисунок 4.6).

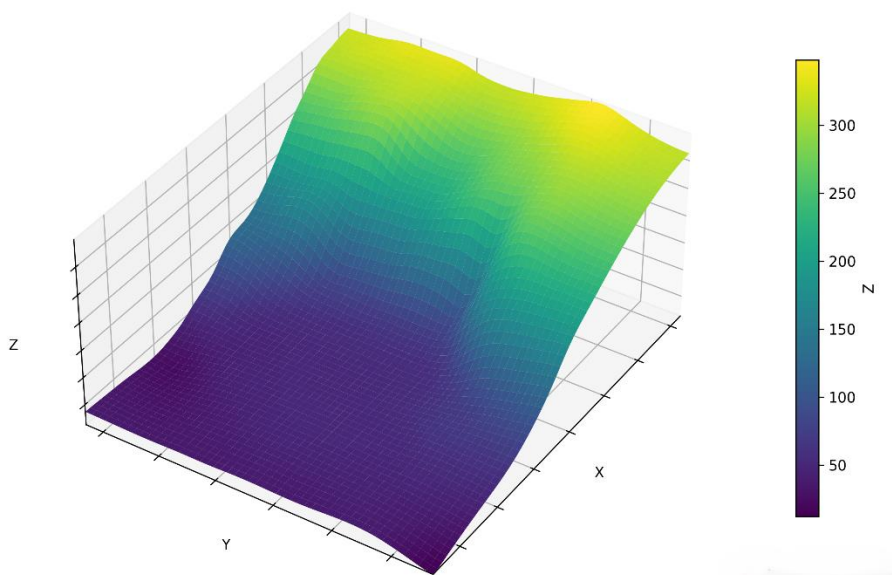


Рисунок 4.6 – Рассчитанная палеоповерхность пласта НП5 (составлено автором)

Следующим шагом необходимо задать область старта переноса терригенного материала. Для этого подготовленная палеоповерхность была проанализирована на наличие удлиненных отрицательных форм рельефа. Кроме того, изучены сейсмические атрибуты на наличие сопоставимых аномалий вдоль бровки шельфа. Область источника сноса определялась в восточной части площади. Также по керновому материалу поисковой скважины, а также анализу региональной информации заданы различные осадочные разности. Всего в модели представлены четыре фракции: крупнозернистым песком, среднезернистым песком, алевроитом и глинистым материалом.

В условиях низкой изученности и сложного геологического строения рассматриваемой территории необходимо выполнение сценарного моделирования. Его цель состоит в оценке допустимых геологических сценариев формирования ачимовских отложений, что позволит оценить имеющиеся неопределенности и снизить риски поискового этапа ГРП.

Для выполнения моделирования рассмотрены различные сценарии поступления терригенного материала. Кратковременный гравитационный поток связан с обрушением осадков со склона и быстрой транспортировкой осадочного материала, и гиперпикнальный перенос осадочных разностей, поддерживаемый более длительное время во взвешенном состоянии. Данные процессы тестировались, как и по отдельности, так и при совместном влиянии различных типов плотностных потоков. Помимо этого, дополнительно оценивалось действие контурных течений на морфологию лопастей. Также изменялось и тестировалось различное положение источников сноса. Это влияло на траекторию движения потока и дальнейшее положение зон разгрузки. Помимо этого, варьировались гидродинамические параметры турбидитового потока, скорости транспортировки и осаждения, соотношения литотипов и объем осадочного материала.

В ходе моделирования удалось установить, что строение пласта не воспроизводится как результат действия одного события. Формирование происходило в условиях многостадийного процесса с множеством событий. Выявлено, что на первых итерациях отлагаемый материал концентрируется в отрицательных формах рельефа. Там формируются начальные пути транспортировки и первичные зоны аккумуляции терригенного материала. По мере действия плотностных потоков происходит заполнение депрессий и последующие течения отклоняются в соседние участки. Так происходит формирование компенсационного наложения, где отдельные лопасти смещаются относительно ранее сформированных и образуют сложную многоуровневую архитектуру резервуара (Рисунок 4.7).

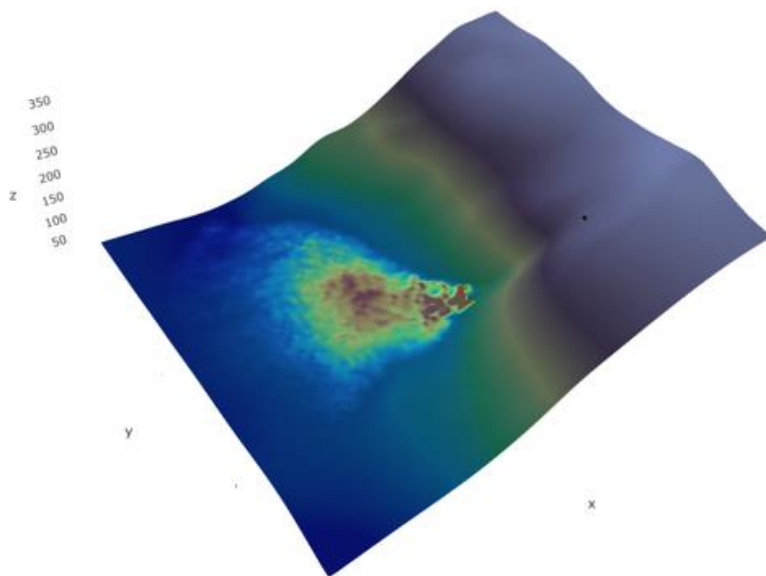


Рисунок 4.7 – Трехмерная реализация седиментационной модели (составлено автором)

При повторном поступлении материала на одну зону отдельные аккумуляции могли перекрываться. Зона развития песчаных отложений формировала более протяженные тела и занимала более значительные площади распространения. Однако при анализе некоторых реализаций направление перемещения осадков изменялось, это влияло на расчленённость резервуара, возрастала изменчивость латерального и вертикального распространения коллектора и происходило формирование отдельных песчаных линз, которые могли быть приурочены к литологическим ловушкам углеводородов. Использование сценарного подхода к седиментационному моделированию дает возможность проследить порядок накопления отдельных лопастей в объеме модели, их взаимное перекрытие и наличие прослоев неколектора, и тем самым определить наиболее вероятное положение песчаных тел в разрезе. Некоторые сценарии показывают сходное внутреннее строение рассматриваемых отложений, при различных настройках входных параметров. Такая закономерность объясняется влиянием гипсометрии палеоповерхности, которая имеет наибольшее влияние на итоговый результат. Анализ временного формирования конусов выноса показывает, что более короткие временные промежутки приводят к более плавному перемещению распределительных каналов, вероятность смещения депоцентров снижается и

уменьшается масштаб неоднородностей в сравнении с более длительным промежутком формирования одного события. За короткий временной шаг накапливается меньше осадочного материала и далее при моделировании последующих событий происходит меньшее перераспределение осадков, так как крупнозернистые депоцентры менее подвержены перемещению в пределах моделируемой области. При задании более длительного шага моделирования наблюдается обратная ситуация и формируются отложения большей мощности и появляется более значительная вариация положения депоцентров в периметре модели (Рисунок 4.8).

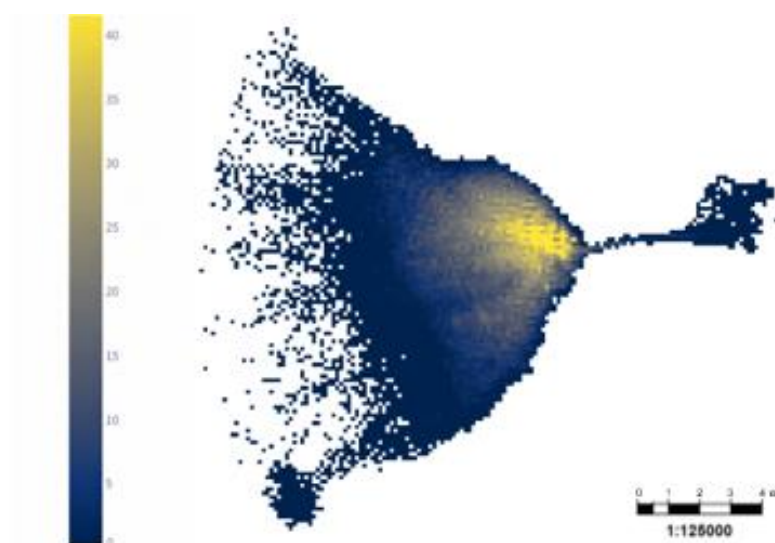


Рисунок 4.8 – Базовая карта эффективных толщин по седиментационной модели
(составлено автором)

Расчетные сценарии с различными входными настройками параметров моделирования показывают в большинстве случаев характерную пространственную зональность турбидитовых отложений. По мере того как поток утрачивает способность удерживать осадочный материал во взвешенном состоянии, частицы начинают терять энергию и выпадать из него. Более крупные разности осаждаются в первую очередь, а затем, поочередно, все более мелкие. Мощность отдельного слоя, формирующаяся в течение одного события, достигает от нескольких до десятков сантиметров, однако многократное прохождение отдельных мутьевых потоков на протяжении заданного времени моделирования приводит к формированию конусов выноса мощностью десятков метров, поэтому

в разработанном алгоритме реализован многособытийный процесс образования песчаных тел. Однако при сценариях, в которых включается действие придонных течений, классическая зональность турбидитовых отложений не всегда выполняется. В данных вариантах происходит перераспределение осадочного материала и нарушается идеализированная картина строения конусов выноса, рассмотрение таких сценариев позволяет учесть возможные варианты и использовать их для выполнения вариативной оценки ресурсной базы углеводородов (Рисунок 4.9).

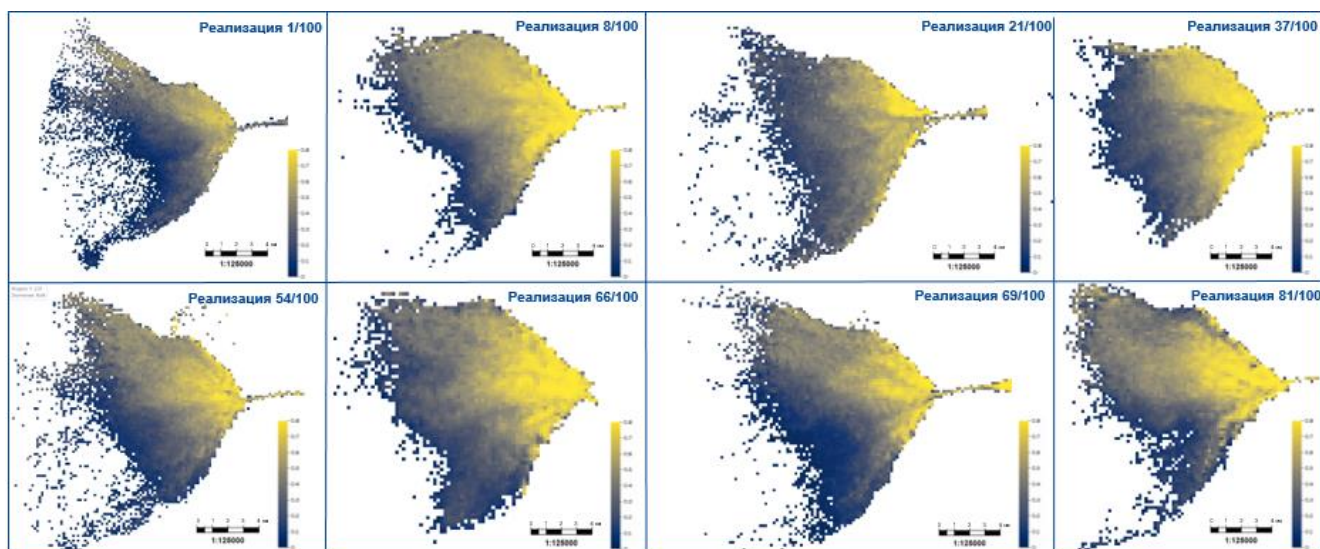


Рисунок 4.9 – Распределение песчанистости по площади для различных сценариев
(составлено автором)

4.2 Пример моделирования гряды конусов выноса

Для рассмотрения более сложной системы, где формируется не единичный объект, а группа конусов выноса, выбран пласт НП8 в северной части исследуемой площади, в котором по результатам построения полномасштабной концептуальной модели можно выделить такую систему. Инструмент седиментационного моделирования должен помочь решить задачу выявления потенциально перспективных песчаных тел для расчета ресурсной базы углеводородов и оценки промышленного потенциала периметра работ.

Концептуальная модель пласта НП8 сформирована с учетом всей имеющейся геолого-геофизической информации (Рисунок 4.10). Охарактеризованность керном объекта неравномерна. Ограниченные интервалы пласта изучены в трех скважинах.

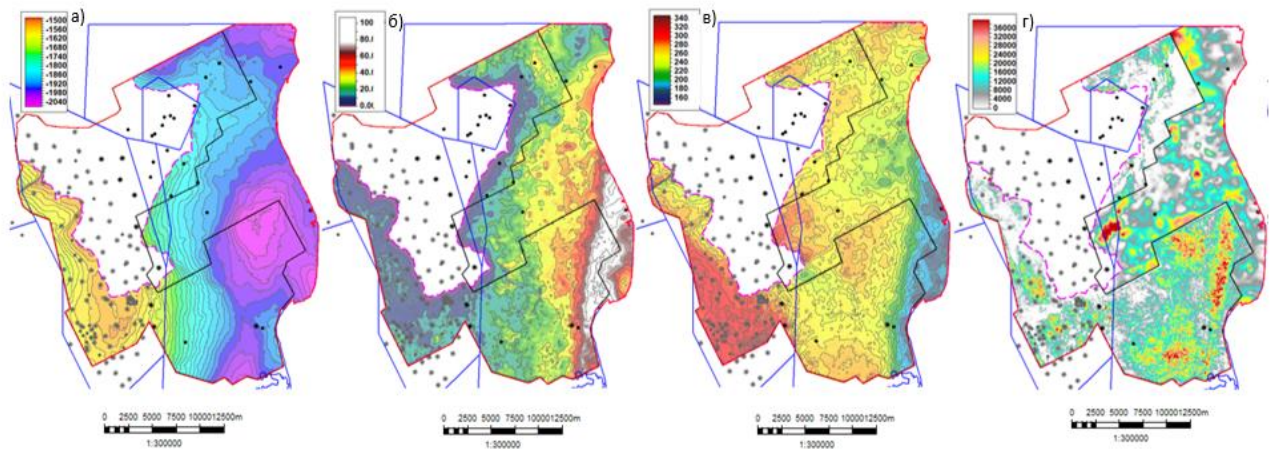


Рисунок 4.10 – Используемые материалы для построения КГМ пласта НП8 (а – Изохроны пласта НП8, б – Мощности пласта НП8, в – мощность между НП8 и арктической пачкой, г – сейсмический атрибут “Сумма положительных амплитуд”) (составлено автором)

Фондоформенная часть пласта представлена отложениями гиперпикнальных лопастей и распределительных каналов, на которые серьёзное воздействие оказывали придонные течения. Ундаформенная область представлена дельтой приливо-отливного типа и отложениями приливо-отливного побережья. На данные объекты также существенное влияние оказывали контурные процессы. Они изменяли привычную морфологию объектов и формировали вытянутые вдоль бровки переотложенные бары или контуритовые валы, пререзанные множеством распределительных каналов (Рисунок 4.11).

По данным региональных исследований и по результатам описания кернового материала удалось установить, что осадконакопление происходило в условиях достаточно обильного поступления терригенного материала. Это влияло на быструю проградацию.

Выполнение седиментационного моделирования осуществлялось на основе построенной концептуальной модели (Рисунок 4.12). Палеорельеф расчётной области восстанавливался на основе структурных построений, полученных по результатам интерпретации сейсмических данных с подправкой на региональные палеогеографические представления. Положение точек старта переноса терригенного материала обосновывалось по результатам анализа сейсмических

атрибутов. Источники сноса задавались как элементы единой питающей системы. Она связывала отложения питающей системы – ундаформы с глубоководными конусами выноса.

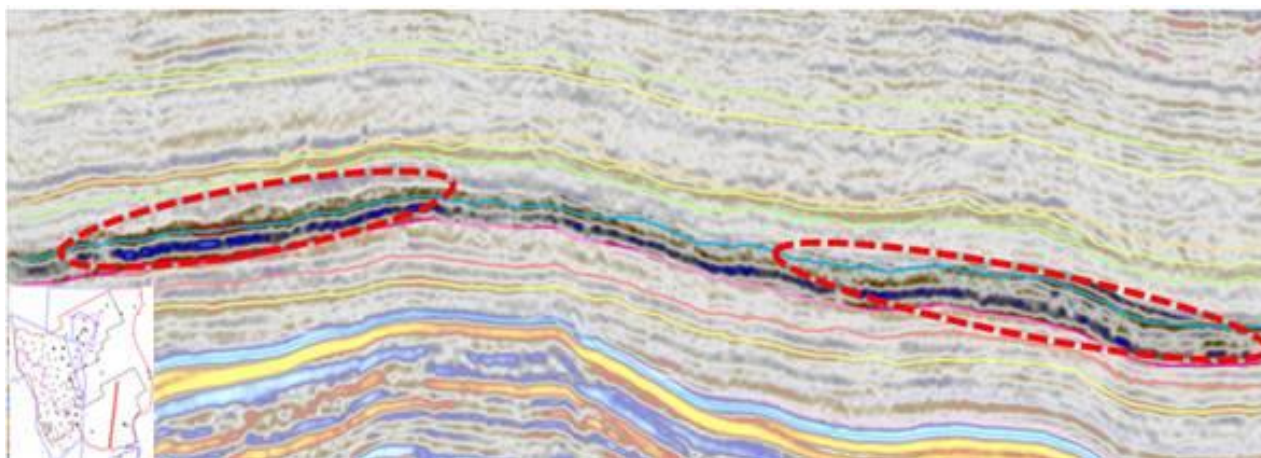


Рисунок 4.11 – Сейсмический разрез пласта НП8 (составлено автором)

Седиментационное моделирование выполнялось в сценарном формате. Для расчетных вариантов варьировалось положение активных источников сноса, продолжительность и характер действия плотностных потоков, объем водно-осадочной смеси, соотношение литотипов, скорости транспортировки. Также рассматривались сценарии влияния придонной переработки осадков. Это позволяло оценить возможные варианты формирования архитектуры резервуара.

Необходимость построения сценарных моделей объясняется неопределенностью исходных условий седиментации. Сходная геометрия рассматриваемых отложений могла формироваться взаимодействием различных факторов. Поэтому результаты моделирования необходимо рассматривать в качестве проверки возможных геологических сценариев формирования осадков.

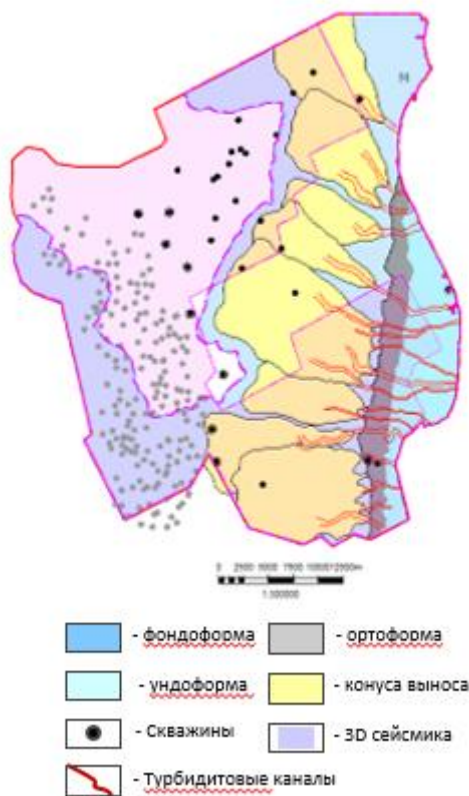


Рисунок 4.12 – Фациальная схема пласта НП8 (составлено автором)

По результатам расчетов можно сделать вывод, что пространственное распределение осадков контролируется в первую очередь морфологией палеорельефа, кроме того влияние оказывает положение источников сноса, объем осадочных разностей и гидродинамические параметры турбидитового потока. Перенос материала осуществлялся по транспортным каналам, при снижении энергии потока происходило осаждение терригенного материала и формирование лопастей конусов выноса (Рисунок 4.13). Распределение литотипов в большинстве случаев подчиняется зональности первоначального осаждения. Наиболее крупные фракции концентрировались в каналах, в присклоновой части, а пелитовая составляющая уносилась на самые удаленные участки (Рисунок 4.14).

Многособытийный процесс поступления терригенного материала приводил на каждой итерации к изменению топографии палеоповерхности. Первоначальное осаждение осадочных разностей в локальных понижениях палеорельефа приводило к отклонению последующих потоков в соседние депрессионные зоны. Результаты построения также подтверждаются физическим моделированием и

численными экспериментами процессов формирования турбидитовых отложений [63, 84, 89].

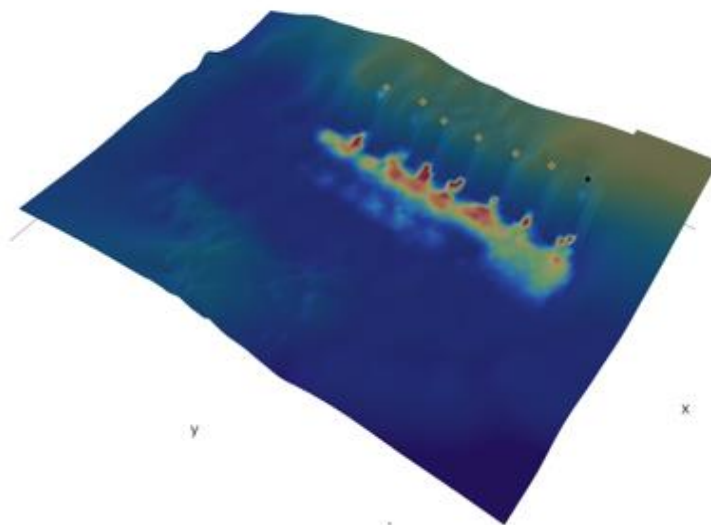


Рисунок 4.13 – Трехмерная реализация седиментационной модели (составлено автором)

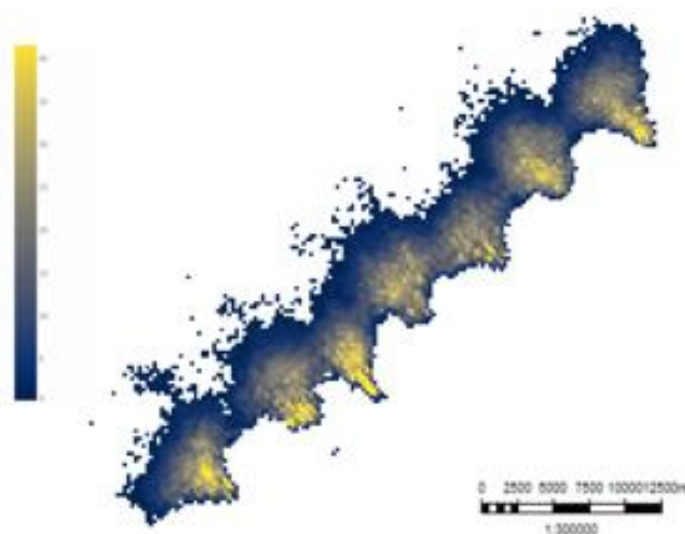


Рисунок 4.14 – Базовая карта эффективных толщин по седиментационной модели (составлено автором)

Включение придонной переработки оказало влияние на первичное распределение осадков. Действие контурных процессов происходило в верхнем активном слое, что смещало области аккумуляции различных литотипов, это формировало дополнительные зоны распространения песчаного материала.

Осадочные разности, переработанные контурными процессами, характеризуются повышенными коллекторскими свойствами, материал имеет лучшую сортировку и окатанность зерен в сравнении с первоначальными турбидитовыми потоками [109].

Для согласования результатов моделирования с фактическими данными выполнялся ряд калибровочных расчетов, в ходе которых изменялись начальные положения источников сноса, параметры потока, степень эрозии. Сценарии, которые удовлетворяли исходным данным, шли в дальнейшую работу и анализ. Сопоставление результатов моделирования с фактическими скважинными данными показало, что для выбранных расчётных реализаций среднее абсолютное относительное отклонение мощностей составляет порядка 7-8 %, а аналогичное отклонение коэффициента песчанистости не превышает 10 %. Основой для согласования площадного распространения выступали результаты сейсмофациального анализа, по ним определялись варианты, соответствующие направлению переноса терригенного материала и областям его разгрузки, которые оконтуривались по сейсмическим аномалиям. Учитывались и скважинные данные. В частности, сопоставлялось рассчитанное распределение осадка с фактическими мощностями и коэффициентами песчанистости пласта НП8. Различия между расчетными сценариями связаны прежде всего с выбором областей старта переноса терригенного материала, особенностями палеорельефа, объемом и параметрами водно-осадочной смеси, действием придонных течений. Вариация этих условий позволяла оценить различные варианты положения депоцентров осадков и морфологии лопастей. Иногда даже при сходной геометрии конусов выноса отличалось их внутреннее строение, латеральная и вертикальная связность коллектора, его распространение в объеме пласта. Полученные по результатам оценки карты и геологические тренды станут основой для дальнейшего геологического моделирования и подсчета запасов (Рисунок 4.15).

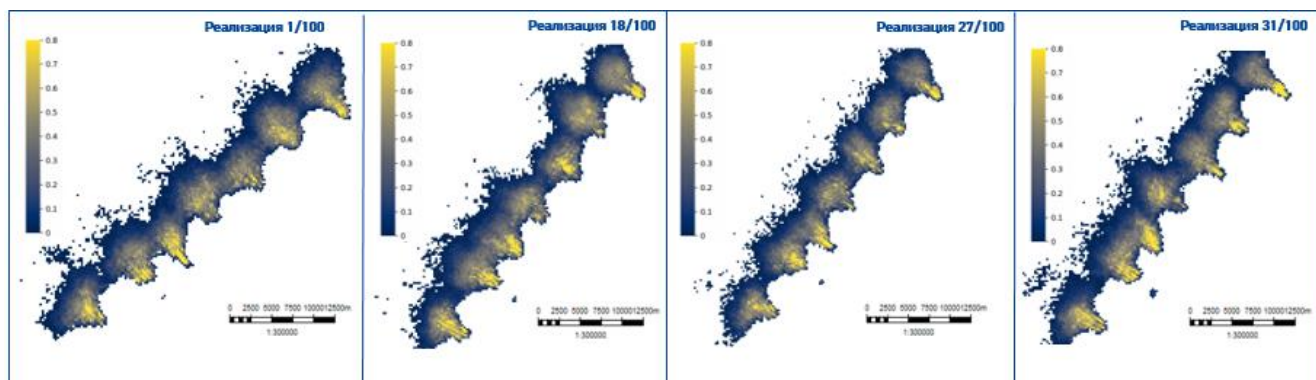


Рисунок 4.15 – Распределение песчанистости по площади для различных сценариев (составлено автором)

4.3 Выводы по главе 4

В главе рассмотрены результаты применения разработанного алгоритма седиментационного моделирования к двум объектам ачимовской толщи - пластам НП5 и НП8. В рамках построенной концептуальной модели удалось по сейсмическим атрибутам закартировать конусы выноса, что позволило оценить крупномасштабную геометрию объектов, однако важным вопросом остается их внутреннее строение, латеральная и вертикальная расчлененность коллектора, это оказывает прямое влияние на гидродинамическую связность резервуаров и на характер добычи углеводородов. Проведенные расчеты позволили определить основные сценарии формирования объектов и учесть возможные варианты строения объектов. Для рассмотренных примеров можно выделить следующие схожие выводы. На начальных этапах осадочный материал преимущественно заполняет понижения палеорельефа, каждое последующее событие топография дна обновляется и последующие потоки отклоняются от первоначальных направлений, это формирует сложную внутреннюю структуру резервуаров. Придонная переработка влияет на первоначальную зональность турбидитовых отложений, изменяет морфологию конусов выноса и образует дополнительные зоны распространения коллекторов. Выполненные сценарные расчеты, в ходе которых изменялись исходные параметры моделирования, позволяют учесть существующие неопределенности по пространственному положению коллектора и оценить их при расчете ресурсной базы нефти и газа.

ГЛАВА 5 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗОН РАЗВИТИЯ КОЛЛЕКТОРОВ АЧИМОВСКОЙ ТОЛЩИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СЕДИМЕНТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

5.1 Результаты построения фациальных схем

Разработанный алгоритм позволяет выполнять моделирование процессов седиментации ачимовских отложений и является важным звеном комплексного изучения геологического строения нефтегазоносных бассейнов. Выявленные по результатам расчетов связи и закономерности ложатся в основу построения фациальных схем и дают возможность количественно оценить толщины и долю в них песчаной составляющей. Построенные реализации седиментационной модели в комплексе с имеющейся фактической геолого-геофизической информацией являются основой составления прогнозных карт. Расчётные сценарии содержат информацию о распределении общих мощностей, песчанистости и отдельных гранулометрических фракций. При интерпретации этих данных рассматривалось положение питающих каналов, участков преимущественной разгрузки потоков и аккумулятивных лопастей. Отдельное внимание уделялось изменениям рельефа, которые возникали после последовательных событий осадконакопления. Рассмотренные ранее примеры показывают методологическую основу выполнения моделирования, с помощью такой методики смоделированы остальные объекты, сформированные на изучаемой территории.

Зоны, в которых прогнозируются наиболее благоприятные условия для формирования коллекторов, относятся к проксимальной и медиальной областям конусов выноса. В пределах данных зон происходит устойчивое формирование песчаной фракции. Дистальные части характеризуются меньшим интересом, однако также могут представлять области, пригодные для формирования коллекторов в случае активной придонной переработки осадочного материала. Поэтому такие сценарии также легли в основу вариативной оценки ресурсной базы.

Важным условием построения седиментационных моделей является согласование полученных результатов с независимыми геолого-геофизическими

данными. Оценивалось совпадение площадного распространения глубоководных конусов выноса, полученных по результатам интерпретации сейсмических атрибутов. Выполнялась калибровка модельных данных на скважинные. Сопоставлялись значения общих мощностей и коэффициента песчанистости. При несоответствии результатов седиментационного моделирования происходила оценка входных данных для анализа расхождений. При последующих итерациях изменялись исходные параметры для сопоставления с априорной геолого-геофизической информацией.

По результатам комплексной интерпретации для рассматриваемой территории сформированы результирующие фациальные схемы. Они отражают пространственное положение потенциально перспективных объектов – глубоководных конусов выноса.

В южной части рассматриваемой территории основной интерес представляют пласты новопортковской толщи, сформированные в меловой период и приуроченные к фондоформенной части клиноформенного комплекса. Данный участок характеризуется низкой изученностью, седиментационное моделирование в таких условиях позволяет проверить реалистичность выдвинутых гипотез о процессах формирования ачимовских отложений. Седиментационное моделирование выполнено для пластов НП1, НП2-4, НП5. В пределах северной части периметра работ подтверждена промышленная нефтегазоносность ачимовской толщи и данные участки активно разрабатываются. Для поддержания добычи необходимо выполнение ГРП на соседних площадях, которые характеризуются сложным геологическим строением.

Результаты седиментационного моделирования можно свести к общим выводам, которые характерны для всех рассматриваемых объектов. Процесс формирования потоков чувствителен к изменению рельефа дна бассейна, что порождает интересные закономерности образования рассматриваемых объектов. Отложения, сформированные предыдущими потоками, влияют на характер накопления осадков последующими течениями, происходит процесс перенаправления потоков и формирования новых отдельных лопастей. Происходит

характерная организация песчаных линз в различные отдельные литологические ловушки, в которых можно проследить закономерности изменения мощностей, так как они возникают вследствие быстро повторяющихся событий. Такой процесс подтверждается формированием конусов выноса у современных аналогов [51]. Процесс накопления отдельных лопастей повторяется в ходе моделирования регулярно, так образуются неоднородные резервуары со сложным многостадийным геологическим строением (Рисунок 5.1).

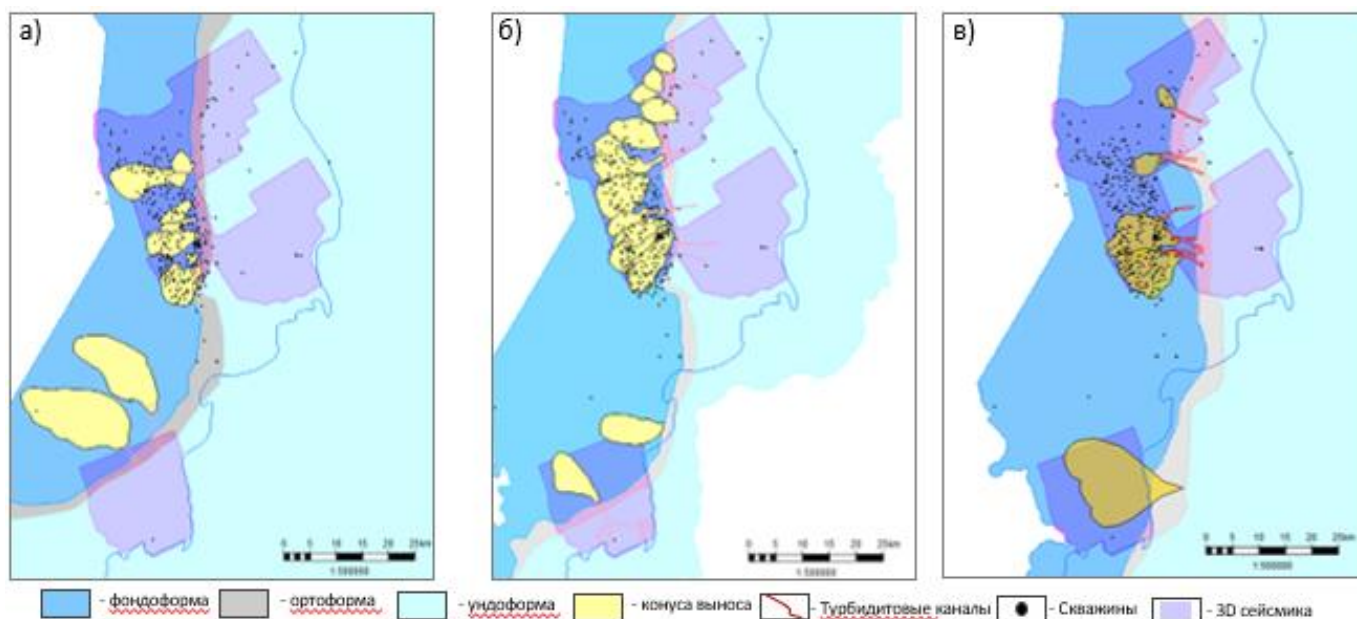


Рисунок 5.1 – Фациальные схемы новопортовской толщи (а – пласт НП1, б – пласт НП2-4, в – пласт НП5) (составлено автором)

Далее рассмотрим процессы формирования нижележащих пластов новопортовской толщи, на территории уже есть ряд открытых залежей нефти и газа для данных интервалов, они все концентрируются в западной части площади. Восточная часть территории хоть и вскрыта отдельными скважинами, но не имеет подтвержденной нефтегазоносности ввиду отсутствия испытаний с рассматриваемых пластов. На данных участках формирование конусов выноса шло с обильным количеством осадочного материала, это предопределило широкое распространение элементов седиментационной системы по всей площади. Основной особенностью образования конусов выноса данной территории служит их преимущественно гиперпикнальный генезис, осложненный действием

придонных течений. Это подтверждается анализом кернового материала и сейсмических атрибутов. В шельфовой области широкое распространение имеют приливно-отливные дельты, питающие каналы которых активно поддерживались речным стоком, что послужило основным материалом, который сформировал основные объекты интереса – глубоководные конусы выноса. На ундаформенной части выделяется многоточечная система источников питания, положение которых варьировалось в ходе выполнения седиментационного моделирования до достижения сопоставления с априорными данными. Сочетание действия гиперпикнальных потоков и контурных течений обусловило итоговую геометрию глубоководных конусов выноса (Рисунок 5.2).

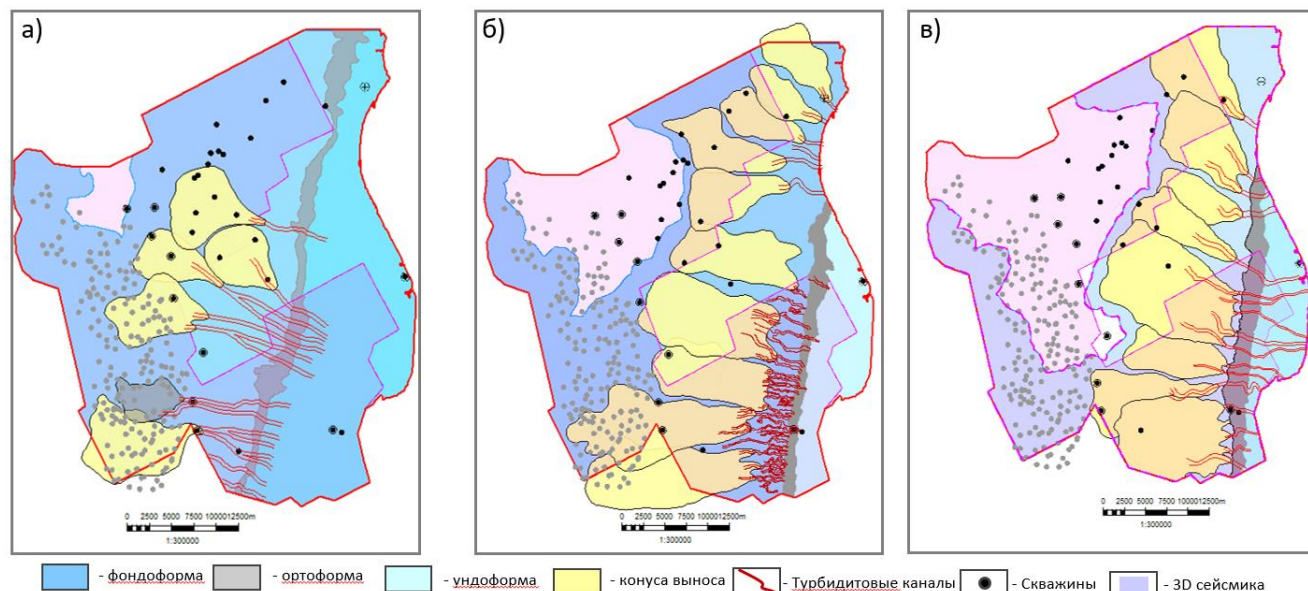


Рисунок 5.2 – Формирование глубоководных конусов выноса на изучаемой территории (а – пласт НП6, б – пласт НП7, в – пласт НП8) (составлено автором)

Результирующие фациальные схемы представляют собой согласованный результат фактических данных и реализаций седиментационных моделей. В условиях низкой изученности на начальных этапах ГРП использование разработанного алгоритма дает возможность получения новой информации, которая повышает степень комплексирования данных и дает более обоснованный прогноз.

5.2 Перспективы применения седиментационного моделирования при изучении ачимовских отложений

Седиментационное моделирование - актуальная и полезная методика для понимания того, как могут формироваться ачимовские отложения с учётом различных существующих гипотез об этих процессах. Понимание внутреннего строения ачимовских резервуаров позволяет выполнять прогнозирование архитектуры геологических тел с большей достоверностью [99]. Это особенно актуально в условиях сложного строения рассматриваемых отложений, их значительной пространственной изменчивости по латерали и вертикали, а также низкой изученности и ограниченного набора фактических данных. Моделирование различного характера транспортировки осадочного материала и продолжительности его действия позволяет рассматривать различные варианты образования песчаных тел, в которых могли аккумулироваться углеводороды. Разработанный алгоритм седиментационного моделирования позволяет получить представление об эволюции глубоководных конусов выноса, оценить вероятное распределение коллектора в объеме пласта, всегда удаётся прогнозировать стандартными методами.

Наибольшим преимуществом разработанного алгоритма является возможность запуска различных сценариев формирования объекта, данная функция также реализована в рамках автоматического режима, где можно задать диапазоны вариации исходных параметров и на выходе получить не одну единственную модель, а набор реализаций с различными входными настройками. Такой функционал дает возможность оценить, как начальные данные влияют на пути транспортировки осадочного материала, развитие депоцентров песчаного материала, наложение отдельных лопастей и их границ. Реализация автоматической калибровки на контуры конусов выноса, закартированных по результатам сейсмофациального анализа, а также сверка моделей с фактическими скважинными данными, отбрасывают реализации, не соответствующие априорной информации. Согласованные результаты идут в дальнейшую работу и

используются при дальнейшем уточнении сейсмогеологической интерпретации и построении полномасштабных геологических моделей.

Применение разработанного подхода на поисковом этапе может решить дополнительные задачи. Он обеспечивает проверку построенной концептуальной геологической модели на соответствие существующим гипотезам осадконакопления. Также удастся уточнить границы фациальных зон и геометрию литологических ловушек. Не менее важным результатом является получение пространственных геологических трендов, которые могут стать основой построения геологических моделей. Помимо этого, результаты различных сценариев дают возможность ранжировать перспективные объекты и с большей надежностью планировать дальнейшие мероприятия ГРП.

Важным преимуществом разработанного математического алгоритма является возможность обновления модели при поступлении новой геолого-геофизической информации. Результаты бурения поисковых скважин, полученные данные ГИС, керновые материалы, сейсмические данные могут корректировать исходную информацию для проведения седиментационного моделирования. Следовательно, по мере получения новой информации происходит уточнение возможных геологических сценариев и сокращается имеющая неопределённость, что позволяет транслировать результаты седиментационного моделирования на соседние участки, характеризующиеся более низкой степенью изученности.

Однако разработанный математический алгоритм должен использоваться в составе комплексного подхода. Результаты моделирования полностью зависят от исходных условий и не являются однозначными. Методика должна использоваться только в случае сопоставления с имеющимися геолого-геофизическими данными. Сверка результатов с сейсмофациальным анализом, по данным которого в ходе ранее проведенных были закартированы глубоководные конусы выноса, является обязательной. Необходимо соотнесение параметров, описывающих процесс седиментации и подобранных в процессе моделирования, с данными по современным турбидитовым системам, литературными данными по физическому и экспериментальному моделированию [37]. Только при сопоставлении с

имеющимися данными возможно использование результатов седиментационного моделирования.

Разработанный алгоритм стоит рассматривать как обязательный элемент камеральных работ при проведении геологоразведочных работ на ачимовские отложения. Его применение особенно актуально на начальных этапах и должно быть включено в стандартный цикл интерпретации. Это позволит повысить обоснованность выделения перспективных объектов на нефть и газ и сфокусировать геологоразведочные работы.

5.3 Выводы по главе 5

Для выполнения прогнозирования распространения коллектора по площади необходимо глубокое понимание эволюции седиментационных объектов, она определяет геометрию осадочных толщ и изменчивость распределения коллектора по латерали и вертикали. Восстановление достоверных свойств песчаных тел при геологическом моделировании - ключ к эффективной программе ГРП и успешному планированию добычи нефти и газа. Существующие подходы и инструменты не всегда способны решить данную задачу. Разработанный алгоритм седиментационного моделирования применим для воспроизведения ключевых элементов осадконакопления ачимовских отложений. Существующие неопределённости и ограничения входных параметров обуславливают существование множества решений данной проблемы, поэтому результаты должны четко соответствовать имеющимся материалам о региональном строении резервуаров и фактическим геолого-геофизическим данным. Рассмотренные примеры построения фациальных схем позволили с учетом седиментационного моделирования получить дополнительное обоснование выделения ключевых элементов моделируемой системы. Тестирование различных типов мутьевых потоков позволило сформировать набор сценариев, которые отвечают возможным вариантам строения объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе отражено практическое решение актуальной задачи нефтяной геологии - повышения достоверности прогноза внутреннего строения ачимовской толщи на основе седиментационного моделирования. Выполненное исследование позволило разработать алгоритм, который способен воспроизводить процессы формирования глубоководных конусов выноса, результаты позволяют уточнить концептуальную модель формирования ачимовских отложений и выполнить прогнозирование распространения коллектора.

В результате проведенного исследования получены следующие основные выводы:

1. Установлено, что формирование ачимовских песчано-алевритовых тел изучаемой территории связано с поступлением терригенного материала в глубоководную часть неомского бассейна, где совместно с классическими гравитационными турбидитовыми потоками в формировании клиноформ на севере Западно-Сибирской НГП существенную роль могли играть длительные гиперпикнальные потоки, контролируемые паводковым речным питанием, что определяло морфологию образовавшихся конусов выноса;

2. Обосновано, что на внутреннее строение ачимовских резервуаров оказывала влияние придонная переработка осадков контурными течениями, которые способствовали смещению зон аккумуляции осадочных разностей, формированию асимметричного строения глубоководных конусов выноса;

3. Разработан математический алгоритм седиментационного моделирования, который позволяет воссоздать эволюцию ачимовских отложений, в нем реализована возможность моделирования различных типов мутьевых потоков, отличающихся характером и продолжительностью действия, и последующей переработки придонными течениями. Алгоритм реализован в виде последовательной событийной схемы, обновление которой происходило после каждого временного шага моделирования, это позволило воспроизвести внутреннюю структуру ачимовских отложений;

4. Показано, что результаты седиментационного моделирования могут использоваться при построении фациальных и трехмерных геологических моделей. Их комплексирование с данными сейсморазведки, ГИС и керновых исследований повышает обоснованность прогноза внутреннего строения ачимовских резервуаров.

5. На основе комплексирования результатов моделирования и геолого-геофизических данных построены фациальные схемы территории работ. Результаты расчётов могут использоваться при геометризации литологических ловушек и планировании дальнейших геологоразведочных работ на нефть и газ. Практическая применимость разработанных методических решений и алгоритма подтверждена актом внедрения результатов исследования в деятельность ООО «Газпромнефть НТЦ» (Приложение А).

Перспективы дальнейших исследований связаны с совершенствованием алгоритма и разработкой количественных критериев оценки неопределённости. Дальнейшее развитие предложенного подхода позволит расширить его применение при изучении объектов ачимовской толщи.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВАК – Высшая аттестационная комиссия;

ГИС – геофизические исследования скважин;

ГК – гамма-каротаж;

ГРР – геологоразведочные работы;

КГМ – концептуальная геологическая модель;

НГП – нефтегазоносная провинция;

ПС – каротаж методом потенциалов самопроизвольной поляризации;

ТРИЗ – трудноизвлекаемые запасы;

УВ – углеводороды;

ФЕС – фильтрационно-емкостные свойства;

NTG – коэффициент песчанистости (Net-to-Gross);

RGB – цветовая модель Red, Green, Blue, используемая при визуализации спектральной декомпозиции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, В. М. Построение концептуальных геологических моделей: монография / В. М. Александров. – Тюмень: ТИУ, 2022. – 160 с. – ISBN 978-5-9961-2856-3.
2. Бардачевский, В. Н. Особенности формирования готерив-барремских клиноформ Гыданского полуострова / В. Н. Бардачевский, Н. И. Шестакова, С. В. Ершов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2019. – Т. 14, № 4. – С. 1–28. – DOI: 10.17353/2070-5379/45_2019.
3. Бардачевский, В. Н. Сейсмогеологическая модель строения берриас-нижнеаптских отложений Гыданского полуострова / В. Н. Бардачевский, Н. И. Шестакова, С. В. Ершов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2018. – Т. 13, № 4. – С. 1–25. – DOI: 10.17353/2070-5379/41_2018.
4. Бижу-Дюваль, Б. Седиментационная геология / Б. Бижу-Дюваль; пер. с франц. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 704 с.
5. Бородкин, В. Н. Модель формирования и текстурные особенности пород ачимовского комплекса севера Западной Сибири: учебное пособие / В. Н. Бородкин, А. Р. Курчиков, А. В. Мельников, А. В. Храмцова. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 84 с.
6. Бородкин, В. Н. Характеристики геологического строения и нефтегазоносности ачимовского нефтегазоносного комплекса Западной Сибири / В. Н. Бородкин, А. Р. Курчиков. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. – 300 с. – ISBN 978-5-7692-1440-0.
7. Бочкарев, В. С. Геодинамика Западной Сибири / В. С. Бочкарев // Тюменская сверхглубокая скважина (интервал 0–7502 м). Результаты бурения и исследования. – Пермь: КамНИИКИГС, 1996. – С. 297–308.
8. Бродучан, Ю. В. Стратиграфия мезокайнозойских отложений Среднеобской нефтегазоносной области / Ю. В. Бродучан, И. И. Нестеров, А. П. Соколовский // Труды ЗапСибНИГНИ. – Тюмень, 1968. – Вып. 7. – С. 11–57.
9. Букатов, М. В. Ключевые проблемы освоения ачимовских отложений на разных масштабах исследования / М. В. Букатов, Д. Н. Пескова, М. Г. Ненашева [и

др.] // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2018. – № 2 (8). – С. 16–21. – DOI: 10.24887/2587-7399-2018-2-16-21.

10. Васильев, М. А. Эволюция представлений о геологическом строении нижнеэокомских отложений северного склона Среднеэокомского вала / М. А. Васильев, С. А. Люлякин, С. В. Михайлова [и др.] // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2022. – Т. 7, № 1. – С. 12–21. – DOI: 10.51890/2587-7399-2022-7-1-12-21.

11. Генераленко О.С. Интегрированный подход к построению геологических моделей на основе фациального анализа / О. С. Генераленко, И. В. Шелепов, О. Э. Ермакова [и др.] // Георесурсы. – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 33-42. – DOI 10.18599/grs.2024.3.5. – EDN IKIBCB.

12. Гогоненков, Г. Н. Анализ эокомской клиноформы Западной Сибири по данным сейсморазведки / Г. Н. Гогоненков, Ю. А. Михайлов, С. С. Эльманович // Геология нефти и газа. – 1988. – № 1. – С. 22–30.

13. **Грибанов, Д. А.** Воспроизведение внутреннего строения и литологического состава ачимовских отложений месторождения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции при помощи седиментационного моделирования / **Д. А. Грибанов** // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – Ч. 1. – С. 358–360.

14. **Грибанов, Д. А.** Геометризация литологических ловушек ачимовской толщи на основе алгоритма седиментационного моделирования / **Д. А. Грибанов** // Санкт-Петербург 2026. Геонауки: от современных вызовов до решений, открывающих будущее: сборник материалов 12-й международной геолого-геофизической конференции. – Санкт-Петербург: EAGE, 2026. – С. 304–308.

15. **Грибанов, Д. А.** Прогнозирование архитектуры резервуаров ачимовской толщи с использованием седиментационного моделирования / **Д. А. Грибанов**, В. И. Антончик, Д. А. Розмаитый, Ю. В. Нефедов, А. А. Коноваленко // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2025. – Т. 10, № 3. – С. 35–43. – DOI: 10.51890/2587-7399-2025-10-3-35-43.

16. **Грибанов, Д. А.** Седиментационное моделирование ачимовских отложений месторождения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции / **Д. А. Грибанов, Ю. В. Нефедов, Н. Н. Востриков** // Новые идеи в науках о Земле: материалы XVI Международной научно-практической конференции (к 105-летию МГРИ). – Москва: МГРИ, 2023. – Т. 1. – С. 322–325.

17. Гурари, Ф. Г. Геология и перспективы нефтегазоносности Обь-Иртышского междуречья / Ф. Г. Гурари // Труды СНИИГГиМС. – Ленинград: Гостоптехиздат, 1959. – Вып. 3. – 174 с.

18. Гурари, Ф. Г. Строение и условия образования клиноформ неокома Западно-Сибирской плиты (история становления представлений) / Ф. Г. Гурари. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2003. – 141 с. – ISBN 5-901805-11-2.

19. Ершов, С. В. Нефтегазоносность зон лавинной седиментации в неокоме Западной Сибири / С. В. Ершов, В. А. Казаненков, Ю. Н. Карогодин // *Xinjiang Petroleum Geology*. – 2001. – Т. 22, № 2. – С. 172–176.

20. Ершов, С. В. Особенности строения и корреляция продуктивных пластов берриас-нижнеаптских отложений Гыданского полуострова / С. В. Ершов, В. Н. Бардачевский, Н. И. Шестакова // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 11. – С. 1870–1882. – DOI: 10.15372/GiG20181110.

21. Ершов, С. В. Седиментация в раннемеловом бассейне Западной Сибири и ее влияние на нефтегазоносность / С. В., К. В. Зверев, В. А. Казаненков, Ю. Н. Карогодин // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 11-12. – С. 1908-1917.

22. Ершов, С. В. Сиквенс-стратиграфия берриас-нижнеаптских отложений Западной Сибири / С. В. Ершов // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 7. – С. 1106–1123. – DOI: 10.15372/GiG20180713.

23. Закревский, К. Е. Геологическое моделирование клиноформ неокома Западной Сибири / К. Е. Закревский, Н. В. Нассонова, Н. Н. Соловьев. – Тверь: Издательство ГЕРС, 2012. – 80 с.

24. Зверев, К. В. Седиментогенез отложений ачимовской толщи Северного Приобья / К. В. Зверев, В. А. Казаненков // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 4. – С. 25–38.

25. Иващенко, А. Е. О возможности выделения сейсморазведкой литологических ловушек в неокомских отложениях севера Западной Сибири / А. Е. Иващенко, Т. М. Онищук, А. Л. Наумов, В. Г. Смирнов // Геология и геофизика. – 1980. – № 12. – С. 117–122.

26. Конторович, А. Э. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловом периоде / А. Э. Конторович, С. В. Ершов, В. А. Казаненков [и др.] // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 5–6. – С. 745–776. – DOI: 10.15372/GiG20140504.

27. Конторович, В.А. Тектоническое строение и история развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое / В. А. Конторович, С. Ю. Беляев, А. Э. Конторович [и др.] // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 11-12. – С. 1832-1845. – EDN USJNNL.

28. Кулагин, А. В. Опыт применения программного комплекса Dionisos для седиментационного моделирования клиноформных отложений Западной Сибири / А. В. Кулагин, А. Г. Плавник, В. Н. Бородкин [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2020. – № 4 (340). – С. 34–42. – DOI: 10.30713/2413-5011-2020-4(340)-34-42.

29. Курчиков, А. Р. Условия формирования и атлас текстур пород ачимовской толщи Западной Сибири / А. Р. Курчиков, В. Н. Бородкин. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2010. – 138 с. – ISBN 978-5-902058-29-8.

30. Левинзон, И. Л. Ачимовская толща – один из основных объектов стабилизации добычи углеводородного сырья на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) / И. Л. Левинзон, А. М. Брехунцов, В. Н. Бородкин [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2001. – № 1. – С. 4–17.

31. Мегакомплексы и глубинная структура земной коры Западно-Сибирской плиты / под ред. В. С. Суркова. – Москва: Недра, 1986. – 149 с.

32. Наумов, А. Л. К методике прогнозирования ловушек углеводородов в подпесчаных ачимовских толщах Западной Сибири / А. Л. Наумов // Геология нефти и газа. – 1980. – № 11. – С. 27–32.

33. Наумов, А. Л. О литологических залежах углеводородов на севере Западной Сибири / А. Л. Наумов, Т. М. Онищук, Н. П. Дядюк [и др.] // Геология нефти и газа. – 1979. – № 8. – С. 15–20.

34. Нежданов, А. А. Геология и нефтегазоносность ачимовской толщи Западной Сибири / А. А. Нежданов, В. А. Пономарёв, Н. А. Туренков, С. А. Горбунов. – Москва: Изд-во Академии горных наук, 2000. – 247 с. – ISBN 5-7892-0051-2.

35. Ольнева, Т. В. Компьютерное моделирование терригенной седиментации как новый инструмент прогноза архитектуры резервуаров УВ / Т. В. Ольнева, В. Ю. Овечкина, Е. А. Жуковская // PRОнефть. Профессионально о нефти. – 2020. – № 2(16). – С. 12-17. – DOI:10.7868/S2587739920020019. – EDN XVYEHF.

36. Ольнева, Т. В. Обоснование концептуальной модели с использованием седиментационного моделирования / Т. В. Ольнева, О. С. Генераленко // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 12. – С. 14-19. – DOI: 10.24887/0028-2448-2022-12-14-19. – EDN IYUXNT.

37. Ольнева, Т. В. Седиментационное моделирование в программном комплексе Petrel / Т. В. Ольнева, Е. А. Жуковская. – Москва: Издательство МАИ, 2022. – 216 с. – ISBN 978-5-4316-0941-1.

38. Петрова, Н. В. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности ачимовской толщи Западно-Нерутинской нефтегазоносной зоны / Н. В. Петрова, С. В. Ершов, А. К. Карташова, Н. И. Шестакова // Геология нефти и газа. – 2018. – № 2. – С. 41–50. – DOI: 10.31087/0016-7894-2018-2-41-50.

39. Салихов, М.Р. Отчет “Дополнение к технологической схеме разработки нефтегазоконденсатного месторождения X” // М.Р. Салихов, Л.М. Старикова [и др.] – 2022.

40. Смирнов, О. А. Вопросы методики трехмерного седиментационного моделирования / О. А. Смирнов, В. Н. Бородкин, А. Г. Плавник [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2021. – № 7 (355). – С. 26–34. – DOI: 10.33285/2413-5011-2021-7(355)-26-34.

41. Соседков, В. С. Поиски неантиклинальных ловушек в неокомской толще севера Западной Сибири / В. С. Соседков // Геология нефти и газа. – 1991. – № 6. – С. 25–28.

42. Сынгаевский, П. Е. Глубоководные конусы выноса и турбидиты. Модели, циклостратиграфия и применение расширенного комплекса ГИС./ Сынгаевский П. Е., Хафизов С. Ф., Шиманский В. В. // Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2015. –484 с.

43. Хитренко, А. В. Влияние основных факторов на условия формирования ачимовской толщи / А. В. Хитренко, А. М. Минхатова, В. А. Орлов [и др.] // PRONEFTЬ. Профессионально о нефти. – 2020. – Т. 5, № 2. – С. 18–24. – DOI: 10.7868/S2587739920020020.

44. Храмцова, А. В. Гиперпикнальные турбидиты как основной тип песчаных отложений ачимовской толщи Западной Сибири / А. В. Храмцова, К. В. Зверев, А. В. Мельников // Геология нефти и газа. – 2024. – № 6. – С. 45–56. – DOI: 10.47148/0016-7894-2024-6-45-56.

45. Храмцова, А. В. Контуриты - новый объект для поисков неструктурных ловушек углеводородов в нижнемеловых отложениях Западной Сибири / А. В. Храмцова, К. В. Зверев, А. В. Мельников, Н. В. Холманских // Георесурсы. – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 65-77. – DOI: 10.18599/grs.2026.1.12. – EDN ZOMVMB.

46. Шестакова, Н. И. Прогноз распространения коллекторов ачимовской толщи в арктических районах Западно-Сибирского осадочного бассейна на основе сейсмофациального и динамического анализов / Н. И. Шестакова, С. В. Ершов, А. К. Карташова // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2020. – Т. 15, № 1. – С. 1–25. – DOI: 10.17353/2070-5379/3_2020.

47. Шпильман В.И. Тектоническая карта центральной части Западно-Сибирской плиты. / В.И. Шпильман, Н.И. Змановский // НАЦ РН. – 1999.

48. Arpat, G. B. Conditional simulation with patterns / G. B. Arpat, J. Caers // Mathematical Geology. – 2007. – Vol. 39, no. 2. – P. 177–203. – DOI: 10.1007/s11004-006-9075-3.

49. Blanchette, F. High-resolution numerical simulations of resuspending gravity currents: Conditions for self-sustainment / F. Blanchette, M. Strauss, E. Meiburg [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2005. – Vol. 110, no. C12. – Art. C12022. – DOI: 10.1029/2005JC002927.
50. Bouma, A. H. *Sedimentology of Some Flysch Deposits: A Graphic Approach to Facies Interpretation* / A. H. Bouma. – Amsterdam: Elsevier, 1962. – 168 p.
51. Burgess, P. M. A big fan of signals? Exploring autogenic and allogenic process and product in a numerical stratigraphic forward model of submarine-fan development / P. M. Burgess, I. Masiero, S. C. Toby, R. A. Duller // *Journal of Sedimentary Research*. – 2019. – Vol. 89, no. 1. – P. 1–12. – DOI: 10.2110/jsr.2019.3.
52. Caers, J. *Petroleum Geostatistics* / J. Caers. – Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2005. – 89 p. – ISBN 978-1-55563-106-2.
53. Cantero, M. I. High-resolution simulations of cylindrical density currents / M. I. Cantero, S. Balachandar, M. H. García // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2007. – Vol. 590. – P. 437–469. – DOI: 10.1017/S0022112007008174.
54. *Deep-Water Contourite Systems: Modern Drifts and Ancient Series, Seismic and Sedimentary Characteristics* / eds. D. A. V. Stow, C. J. Pudsey, J. A. Howe, J.-C. Faugères, A. R. Viana. – London: Geological Society, 2002. – 464 p. – (Geological Society Memoirs; no. 22). – ISBN 978-1-86239-114-7.
55. Deptuck, M. E. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea / M. E. Deptuck, G. S. Steffens, M. Barton, C. Pirmez // *Marine and Petroleum Geology*. – 2003. – Vol. 20, no. 6–8. – P. 649–676. – DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2003.01.004.
56. Deutsch, C. V. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide* / C. V. Deutsch, A. G. Journel. – 2nd ed. – New York: Oxford University Press, 1998. – 369 p. – ISBN 978-0-19-510015-0.
57. Dhote, P. Advances in simulation of stratigraphic-structural evolution of basin fill: A retrospective to guide future progress / P. Dhote, U. Bhan // *International Journal of Geophysics*. – 2025. – Vol. 2025. – Art. 2790962. – DOI: 10.1155/ijge/2790962.

58. Faugères, J.-C. Contour currents and contourite drifts / J.-C. Faugères, T. Mulder // *Deep-Sea Sediments (Developments in Sedimentology)*. – 2011. – Vol. 63. – P. 149–214. – DOI: 10.1016/B978-0-444-53000-4.00003-2.
59. Faugères, J.-C. Seismic features diagnostic of contourite drifts / J.-C. Faugères, D. A. V. Stow, P. Imbert, A. Viana // *Marine Geology*. – 1999. – Vol. 162, no. 1. – P. 1–38. – DOI: 10.1016/S0025-3227(99)00068-7.
60. Ferguson, R. I. A simple universal equation for grain settling velocity / R. I. Ferguson, M. Church // *Journal of Sedimentary Research*. – 2004. – Vol. 74, no. 6. – P. 933–937. – DOI: 10.1306/051204740933.
61. Galloway, W. E. Siliciclastic slope and base-of-slope depositional systems: component facies, stratigraphic architecture, and classification / W. E. Galloway // *AAPG Bulletin*. – 1998. – Vol. 82, no. 4. – P. 569–595. – DOI: 10.1306/1D9BC5B3-172D-11D7-8645000102C1865D.
62. Garcia, M. Entrainment of bed sediment into suspension / M. Garcia, G. Parker // *Journal of Hydraulic Engineering*. – 1991. – Vol. 117, no. 4. – P. 414–435. – DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:4(414).
63. Garcia, M. Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current / M. Garcia, G. Parker // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 1993. – Vol. 98, no. C3. – P. 4793–4807. – DOI: 10.1029/92JC02404.
64. Geologic process modeling / D. Tetzlaff, J. Tveiten, P. Salomonsen [et al.] // *Proceedings of the IX Conference of Hydrocarbon Exploration and Development*. – Mendoza: IAPG, 2014. – P. 1–15.
65. Gervais, V. Probability maps of reservoir presence and sensitivity analysis in stratigraphic forward modeling / V. Gervais, M. Ducros, D. Granjeon // *AAPG Bulletin*. – 2018. – Vol. 102, no. 4. – P. 613–628. – DOI: 10.1344/105.000001390.
66. Granjeon, D. Concepts and applications of a 3-D multiple lithology diffusive model in stratigraphic modeling / D. Granjeon, P. Joseph // *Numerical Experiments in Stratigraphy: Recent Advances in Stratigraphic and Sedimentologic Computer Simulations* / eds. J. W. Harbaugh [et al.]. – Tulsa: SEPM, 1999. – P. 197–210. – (Special Publication; no. 62). – DOI: 10.2110/pec.99.62.0197.

67. Gratacós, O. SIMSAFADIM-CLASTIC: A new approach to 3D forward mathematical simulation for clastic and carbonate sedimentation / O. Gratacós, K. Bitzer, L. Cabrera, E. Roca // *Geologica Acta*. – 2009. – Vol. 7, no. 3. – P. 311–322. – DOI: 10.1344/105.000001390.

68. **Gribanov, D. A.** Delineation of lithological traps using forward stratigraphic modelling: Case study in the Achimov formation / **D. Gribanov**, Y. Nefedov, I. V. Tokarev, A. M. Zharkov // *International Journal of Engineering*. – 2027. – Vol. 40, no. 2. – P. 624–632. – DOI: 10.5829/ije.2027.40.02b.21.

69. **Gribanov, D. A.** Forward Stratigraphic Modeling of Deep-Water Turbidite Deposits of the Achimov Formation / **D. Gribanov**, Y. Nefedov, A. M. Zharkov, O. V. Savenok // *Geosciences*. – 2026. – Vol. 16, no. 7. – Art. 265. – P. 1–18. – DOI: 10.3390/geosciences16070265.

70. Groenenberg, R. M. Flow-deposit interaction in submarine lobes: insights from outcrop and process-based modelling / R. M. Groenenberg, D. M. Hodgson, A. Prelat [et al.] // *Journal of Sedimentary Research*. – 2010. – Vol. 80, no. 3-4. – P. 252–267. – DOI: 10.2110/jsr.2010.028

71. Groenenberg, R. M. Process-Based Modelling of Turbidity-Current Hydrodynamics and Sedimentation: Ph.D. Thesis / R. M. Groenenberg; Delft University of Technology. – Delft: TU Delft, 2007. – 186 p.

72. Gvirtzman, Z. Constraining sediment transport to deep marine basins through submarine channels: The Levant margin in the Late Cenozoic / Z. Gvirtzman, I. Csato, D. Granjeon // *Marine Geology*. – 2014. – Vol. 347. – P. 12–26. – DOI: 10.1016/j.margeo.2013.10.010.

73. Harlow, F. H. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface / F. H. Harlow, J. E. Welch // *Physics of Fluids*. – 1965. – Vol. 8, no. 12. – P. 2182–2189. – DOI: 10.1063/1.1761178.

74. Harris, A. D. Three-dimensional numerical modeling of eustatic control on continental-margin sand distribution / A. D. Harris, J. A. Covault, A. S. Madof [et al.] // *Journal of Sedimentary Research*. – 2016. – Vol. 86, no. 12. – P. 1434–1443. – DOI: 10.2110/jsr.2016.85.

75. Haughton, P. Hybrid sediment gravity flow deposits – Classification, origin and significance / P. Haughton, C. Davis, W. McCaffrey, S. Barker // *Marine and Petroleum Geology*. – 2009. – Vol. 26, no. 10. – P. 1900–1918. – DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.02.012.

76. Hernández-Molina, F. J. Continental slope contourites / F. J. Hernández-Molina, E. Llave, D. A. V. Stow // *Developments in Sedimentology*. – 2008. – Vol. 60. – P. 379–408. – DOI: 10.1016/S0070-4571(08)10019-1.

77. Hernández-Molina, F. J. Onset of Mediterranean outflow into the North Atlantic / F. J. Hernández-Molina, D. A. V. Stow, C. A. Alvarez-Zarikian [et al.] // *Science*. – 2014. – Vol. 344, no. 6189. – P. 1244–1250. – DOI: 10.1126/science.1251306.

78. Hizzett, J. L. Which triggers produce the most erosive, frequent, and longest runout turbidity currents on deltas? / J. L. Hizzett, J. E. Hughes Clarke, E. J. Sumner [et al.] // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – Vol. 45, no. 2. – P. 855–863. – DOI: 10.1002/2017GL075751.

79. Huang, X. Numerical forward modelling of 'fluxoturbidite' flume experiments using SedSim / X. Huang, C. Dyt, C. Griffiths, T. Salles // *Marine and Petroleum Geology*. – 2012. – Vol. 35, no. 1. – P. 190–200. – DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2012.02.012.

80. Huang, X. Recent development in stratigraphic forward modelling and its application in petroleum exploration / X. Huang, C. M. Griffiths, J. Liu // *Australian Journal of Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 62, no. 8. – P. 903–919. – DOI: 10.1080/08120099.2015.1125389.

81. Hutton, E. W. H. Sedflux 2.0: An advanced process-response model that generates three-dimensional stratigraphy / E. W. H. Hutton, J. P. M. Syvitski // *Computers & Geosciences*. – 2008. – Vol. 34, no. 10. – P. 1319–1337. – DOI: 10.1016/j.cageo.2008.02.013.

82. Journel, A. G. Mining Geostatistics / A. G. Journel, C. J. Huijbregts. – London: Academic Press, 1978. – 600 p. – ISBN 978-0-12-391050-9.

83. Kirkpatrick, S. Optimization by simulated annealing / S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi // *Science*. – 1983. – Vol. 220, no. 4598. – P. 671–680. – DOI: 10.1126/science.220.4598.671.

84. Kneller, B. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: A review of some recent studies and their geological implications / B. Kneller, C. Buckee // *Sedimentology*. – 2000. – Vol. 47, suppl. 1. – P. 62–94. – DOI: 10.1046/j.1365-3091.2000.047s1062.x.

85. Kostic, S. Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 1: theory and numerical modeling / S. Kostic, G. Parker // *Journal of Hydraulic Research*. – 2003. – Vol. 41, no. 2. – P. 127–140. – DOI: 10.1080/00221680309499956.

86. Kostic, S. Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 2: experiment and numerical simulation / S. Kostic, G. Parker // *Journal of Hydraulic Research*. – 2003. – Vol. 41, no. 2. – P. 141–152. – DOI: 10.1080/00221680309499957.

87. Lamb, M. P. Do hyperpycnal-flow deposits record river-flood dynamics? / M. P. Lamb, D. Mohrig // *Geology*. – 2009. – Vol. 37, no. 12. – P. 1067–1070. – DOI: 10.1130/G30286A.1.

88. Liu, K. Y. Computer simulation of the influence of basin physiography on condensed section deposition and maximum flooding / K. Y. Liu, T. C. K. Liang, L. Paterson, C. G. St. C. Kendall // *Sedimentary Geology*. – 1998. – Vol. 122, no. 1–4. – P. 181–191. – DOI: 10.1016/S0037-0738(98)00105-5.

89. Lowe, D. R. Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents / D. R. Lowe // *Journal of Sedimentary Petrology*. – 1982. – Vol. 52, no. 1. – P. 279–297. – DOI: 10.1306/212F7F31-2B24-11D7-8648000102C1865D.

90. Matheron, G. Principles of geostatistics / G. Matheron // *Economic Geology*. – 1963. – Vol. 58, no. 8. – P. 1246–1266. – DOI: 10.2113/gsecongeo.58.8.1246.

91. McHargue, T. Architecture of turbidite channel systems on the continental slope: patterns and predictions / T. McHargue, M. J. Pyrcz, M. D. Sullivan [et al.] // *Marine and Petroleum Geology*. – 2011. – Vol. 28, no. 3. – P. 728–743. – DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2010.07.008.

92. Meiburg, E. Turbidity currents and their deposits / E. Meiburg, B. Kneller // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2010. – Vol. 42. – P. 135–156. – DOI: 10.1146/annurev-fluid121108-145618.

93. Metropolis, N. Equation of state calculations by fast computing machines / N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth [et al.] // *The Journal of Chemical Physics*. – 1953. – Vol. 21, no. 6. – P. 1087–1092. – DOI: 10.1063/1.1699114.

94. Middleton, G. V. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition / G. V. Middleton, M. A. Hampton // *Turbidites and Deep-Water Sedimentation* / eds. G. V. Middleton, A. H. Bouma. – Anaheim: SEPM Pacific Section, 1973. – P. 1–38.

95. Miramontes, E. Contourite and mixed turbidite-contourite systems in the Mozambique Channel (SW Indian Ocean): Link between geometry, sediment characteristics and modelled bottom currents. / E. Miramontes, A. Thiéblemont, N. Babonneau, P. Penven, F. Raison, L. Droz et al. // *Marine Geology*. – 2021. – 437(10). DOI: 10.1016/j.margeo.2021.106502.

96. Mulder, T. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review / T. Mulder, J. P. M. Syvitski, S. Migeon, J.-C. Faugères, B. Savoye // *Marine and Petroleum Geology*. – 2003. – Vol. 20, no. 6–8. – P. 861–882. – DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2003.01.003.

97. Mutti, E. Le torbiditi dell'Appennino settentrionale: introduzione all'analisi di facies / E. Mutti, F. Ricci Lucchi // *Memorie della Società Geologica Italiana*. – 1972. – Vol. 11. – P. 161–199.

98. Nefedov, Y. Development of Achimov deposits sedimentation model of one of the West Siberian oil and gas province fields / Y. Nefedov, **D. Gribanov**, E. Gasimov, D. Peskov, G. Han, N. Vostrikov, S. Pashayeva // *Reliability: Theory & Applications*. – 2023. – Vol. 18, no. 4 (75). – P. 441–448. – DOI: 10.24412/1932-2321-2023-575-441-448.

99. Nefedov, Y. Predicting the distribution of floor fans of the west siberian field using geological process modelling / Y. Nefedov, **D. Gribanov**, M. Gribanov // *ANAS Transactions, Earth Sciences*. – 2023. – No. 3. – P. 106–108. – DOI: 10.33677/ggianasconf20230300025.

100. Normark, W. R. Growth patterns of deep-sea fans / W. R. Normark // *Geological Society of America Bulletin*. – 1970. – Vol. 81, no. 7. – P. 2173–2196. – DOI: 10.1130/0016-7606(1970)81[2173:GPOF]2.0.CO;2.

101.Otoo, D. Geological process simulation in 3-D lithofacies modeling: application in a basin-floor fan setting / D. Otoo, D. Hodgetts // *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*. – 2019. – Vol. 67, no. 4. – P. 255–272.

102.Parsons, J. D. Hyperpycnal plume formation from riverine outflows with small sediment concentrations / J. D. Parsons, J. W. M. Bush, J. P. M. Syvitski // *Sedimentology*. – 2001. – Vol. 48, no. 2. – P. 465–478. – DOI: 10.1046/j.1365-3091.2001.00384.x.

103.Plink-Björklund, P. Initiation of turbidity currents: outcrop evidence for Eocene hyperpycnal flow turbidites / P. Plink-Björklund, R. J. Steel // *Sedimentary Geology*. – 2004. – Vol. 165, no. 1–2. – P. 29–52. – DOI: 10.1016/j.sedgeo.2003.10.013.

104.Posamentier, H. W. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings / H. W. Posamentier, V. Kolla // *Journal of Sedimentary Research*. – 2003. – Vol. 73, no. 3. – P. 367–388. – DOI: 10.1306/111302730367.

105.Prather, B. E. Controls on reservoir distribution, architecture and stratigraphic trapping in slope settings / B. E. Prather // *Marine and Petroleum Geology*. – 2003. – Vol. 20, no. 6–8. – P. 529–545. – DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2003.03.009.

106.Pyrcz, M. J. Geostatistical Reservoir Modeling / M. J. Pyrcz, C. V. Deutsch. – 2nd ed. – New York: Oxford University Press, 2014. – 448 p. – ISBN 978-0-19-973144-2.

107.Quiquerez, A. DIBAFILL: A 3-D two-lithology diffusive model for basin infilling / A. Quiquerez, P. Allemand, G. Dromart // *Computers & Geosciences*. – 2000. – Vol. 26, no. 9–10. – P. 1029–1042. – DOI: 10.1016/S0098-3004(00)00055-6.

108.Rebesco, M. Contourites / M. Rebesco, A. Camerlenghi. – Amsterdam: Elsevier, 2008. – 688 p. – (Developments in Sedimentology; vol. 60). – ISBN 978-0-444-52998-5.

109.Rebesco, M. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: state-of-the-art and future considerations / M. Rebesco, F. J. Hernández-Molina, D. Van Rooij, A. Wählin // *Marine Geology*. – 2014. – Vol. 352. – P. 111–154. – DOI: 10.1016/j.margeo.2014.03.011.

110.Rebesco, M. Seismic expression of contourites and related deposits: A preface / M. Rebesco, D. A. V. Stow // *Marine Geophysical Researches*. – 2001. – Vol. 22, no. 5–6. – P. 303–308. – DOI: 10.1023/A:1016316913639.

111.Richardson, J. F. Sedimentation and fluidisation: Part I / J. F. Richardson, W. N. Zaki // *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. – 1954. – Vol. 32. – P. 35–53.

112.Rivenæs, J. C. Impact of sediment transport efficiency on large-scale sequence architecture: Results from stratigraphic computer simulation / J. C. Rivenæs // *Basin Research*. – 1997. – Vol. 9, no. 2. – P. 91–105. – DOI: 10.1046/j.1365-2117.1997.00034.x.

113.Rodrigues, S. A new classification system for mixed turbidite-contourite depositional systems: examples, conceptual models and diagnostic criteria / S. Rodrigues, F. J. Hernández-Molina, M. Fonnesu [et al.] // *Earth-Science Reviews*. – 2022. – Vol. 230. – Art. 104030. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.104030.

114.Ross, W. C. Insights from stratigraphic modeling: Mud-limited versus sand-limited depositional systems / W. C. Ross, D. E. Watts, J. A. May // *AAPG Bulletin*. – 1995. – Vol. 79, no. 2. – P. 231–258. – DOI: 10.1306/8D2B150A-171E-11D7-8645000102C1865D.

115.Rouse, H. Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence / H. Rouse // *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. – 1937. – Vol. 102, no. 1. – P. 463–543. – DOI: 10.1061/TACEAT.0004872.

116.Salles, T. Simulation of the interactions between gravity processes and contour currents on the Algarve margin (South Portugal) using the stratigraphic forward model Sedsim / T. Salles, E. Marchès, C. Dyt [et al.] // *Sedimentary Geology*. – 2010. – Vol. 229, no. 3. – P. 95–109. – DOI: 10.1016/j.sedgeo.2009.05.007.

117.Salles, T. Turbidity current modelling on geological time scales / T. Salles, S. Lopez, R. Eschard [et al.] // *Marine Geology*. – 2008. – Vol. 248, no. 3–4. – P. 127–150. – DOI: 10.1016/j.margeo.2007.10.004.

118.Shanmugam, G. Deep-Water Processes and Facies Models: Implications for Sandstone Petroleum Reservoirs / G. Shanmugam. – Amsterdam: Elsevier, 2006. – 496

p. – (Handbook of Petroleum Exploration and Production; vol. 5). – ISBN 978-0-444-52161-3.

119.Shelf Sand and Sandstone Bodies: Geometry, Facies and Sequence Stratigraphy / eds. D. J. P. Swift, G. F. Oertel, R. W. Tillman, J. A. Thorne. – Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2009. – 540 p. – (Special Publication of the International Association of Sedimentologists; no. 14). – ISBN 978-0-632-03117-7.

120.Stow, D. A. V. Contourites: their recognition in modern and ancient sediments / D. A. V. Stow, J. P. B. Lovell // *Earth-Science Reviews*. – 1979. – Vol. 14, no. 3. – P. 251–291. – DOI: 10.1016/0012-8252(79)90001-3.

121.Stow, D. A. V. Distinguishing between deep-water sediment facies: turbidites, contourites and hemipelagites / D. A. V. Stow, Z. Smillie // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10, no. 2. – Art. 68. – DOI: 10.3390/geosciences10020068.

122.Strebelle, S. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics / S. Strebelle // *Mathematical Geology*. – 2002. – Vol. 34, no. 1. – P. 1–21. – DOI: 10.1023/A:1014009426274.

123.Strobel, J. Interactive (SEDPACK) simulation of clastic and carbonate sediments in shelf-to-basin settings / J. Strobel, R. Cannon, C. G. S. C. Kendall [et al.] // *Computers & Geosciences*. – 1989. – Vol. 15, no. 8. – P. 1279–1290. – DOI: 10.1016/0098-3004(89)90041-3.

124.Talling, P. J. Subaqueous sediment density flows: depositional processes and deposit types / P. J. Talling, D. G. Masson, E. J. Sumner, G. Malgesini // *Sedimentology*. – 2012. – Vol. 59, no. 7. – P. 1937–2003. – DOI: 10.1111/j.1365-3091.2012.01353.x.

125.Tetzlaff, D. M. Simulating Clastic Sedimentation / D. M. Tetzlaff, J. W. Harbaugh. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1989. – 202 p. – (Computer Methods in the Geosciences; vol. 5). – ISBN 978-0-442-23293-1.

126.Ulmishek, G. F. Petroleum Geology and Resources of the West Siberian Basin, Russia / G. F. Ulmishek. – Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2003. – 49 p. – (U.S. Geological Survey Bulletin; 2201-G). – DOI: 10.3133/b2201G.

127.Viana, A. R. Bottom-current-controlled sand deposits – a review of modern shallow- to deep-water environments / A. R. Viana, J.-C. Faugères, D. A. V. Stow //

Sedimentary Geology. – 1998. – Vol. 115, no. 1–4. – P. 53–80. – DOI: 10.1016/S0037-0738(97)00087-0.

128.Walker, R. G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps / R. G. Walker // AAPG Bulletin. – 1978. – Vol. 62, no. 6. – P. 932–966. – DOI: 10.1306/C1EA4F24-16C9-11D7-8645000102C1865D.

129.Waltham, D. Stratigraphic modelling of turbidite prospects to reduce exploration risk / D. Waltham, N. Jaffey, S. MacLean, V. Zampetti // Petroleum Geoscience. – 2008. – Vol. 14, no. 3. – P. 273–280. – DOI: 10.1144/1354-079308-763.

130.Wan, L. Morphological controls on delta-canyon-fan systems: Insights from stratigraphic forward models / L. Wan, V. Bianchi, S. Hurter [et al.] // Sedimentology. – 2022. – Vol. 69, no. 2. – P. 864–890. – DOI: 10.1111/sed.12930.

131.Weimer, P. Introduction to the Petroleum Geology of Deepwater Settings / P. Weimer, R. M. Slatt. – Tulsa: AAPG, 2007. – 816 p. – (AAPG Studies in Geology; no. 57). – ISBN 978-0-89181-063-6.

132.Zavala, C. A genetic facies tract for the analysis of sustained hyperpycnal flow deposits / C. Zavala, M. Arcuri, M. Di Meglio, H. Gamero Diaz, C. Contreras // Sediment Transfer from Shelf to Deep Water-Revisiting the Delivery System (AAPG Studies in Geology). – 2011. – Vol. 61. – P. 31–51. – DOI: 10.1306/13271349St613438.

133.Zavala, C. Ancient lacustrine hyperpycnites: a depositional model from a case study in the Rayoso Formation (Cretaceous) of west-central Argentina / C. Zavala, J. J. Ponce, M. Arcuri [et al.] // Journal of Sedimentary Research. – 2006. – Vol. 76, no. 1. – P. 41–59. – DOI: 10.2110/jsr.2006.12.

134.Zavala, C. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: origin and distinctive characteristics / C. Zavala, M. Arcuri // Sedimentary Geology. – 2016. – Vol. 337. – P. 36–54. – DOI: 10.1016/j.sedgeo.2016.03.008.

135.Zhang, LF. 3D modeling of deepwater turbidite lobes: a review of the research status and progress / L. Zhang, M. Pan, Z. Li // Pet. Sci. – 2020 – Vol. 17 – P. 317–333. <https://doi.org/10.1007/s12182-019-00415-y>

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

РИСУНКИ

Рисунок 1.1 – Схема взаимоотношения типов фаций в отложениях неокома [18]

Рисунок 1.2 – Принципиальная схема строения неокомских отложений Западной Сибири (1 – отложения склоновой седиментации, 2 – отложения фондоформенной части, 3 – границы циклитов, 4 – баженовская свита) [18]

Рисунок 1.3 – Принципиальная схема формирования ачимовских отложений Западной Сибири [34]

Рисунок 1.4 – Клиноформное строение ачимовской толщи (составлено автором)

Рисунок 1.5 – Принципиальная схема формирования интрабассейновых турбидитовых потоков [37]

Рисунок 1.6 – Блок-диаграмма формирования классических (интрабассейновых) и гиперпикнальных (экстрабассейновых) турбидитов [134]

Рисунок 1.7 – Профили движения для интрабассейновых и экстрабассейновых турбидитовых потоков [44, 134]

Рисунок 1.8 – Сейсмофациальный анализ по результатам анализа сейсмических атрибутов²⁴ (составлено автором)

Рисунок 1.9 – а) Схематический пример геологической модели, коллектор обозначен желтым цветом, неколлектор обозначен черным цветом, б) Геологическая модель, фиолетовым цветом показан связанные прослои песчаника; в) Традиционные объектно-ориентированные модели, г) Геологическая модель, построенная классическими геостатистическими методами [105]

Рисунок 1.10 – Модель литологии, построенная с использованием методов многоточечной геостатистики [135]

Рисунок 1.11 – Результаты седиментационного моделирования глубоководных конусов выноса (составлено автором)

Рисунок 1.12 – Интеграция результатов моделирования в геологическую модель (составлено автором)

Рисунок 1.13 – Классификация методов седиментационного моделирования (составлено автором)

Рисунок 2.1 – Сводная литолого-стратиграфическая колонка [39]

Рисунок 2.2 – Фрагмент тектонической карты [46]

Рисунок 2.3 – Схема изученности территории работ (составлено автором)

Рисунок 2.4 – Тонко-мелкозернистые массивные песчаники с прослоями заглинизированных песчаников и песчаных алевролитов, тонкие прослои горизонтальнослоистых и линзовиднослоистых глинистых алевролитов и аргиллитов (составлено автором)

Рисунок 2.5 – Песчаник мелкозернистый светло-серый, с мелкослойчатой рябью течений с многочисленными сдвоенными глинистыми слойками, встречаются мелкие обломки углефицированной древесины (составлено автором)

Рисунок 2.6 – Массивном мелкозернистый песчаник с слабо выраженным полосчатым строением и обогащенный рассеянным углефицированным растительным детритом (составлено автором)

Рисунок 2.7 – Признаки гиперпикнального потока по результатам спектральной декомпозиции (составлено автором)

Рисунок 2.8 – Признаки гиперпикнальных турбидитов по результатам анализа сейсмических атрибутов (составлено автором)

Рисунок 2.9 – Основные течения, циркулирующие в нижнемеловом Западно-Сибирском морском бассейне [44]

Рисунок 2.10 – Мелкозернистые песчаники с интенсивной биотурбацией, с мелкой кривой разнонаправленной слоистостью, присутствует рябь течения, обратная градиционная текстура (составлено автором)

Рисунок 2.11 – Межфэновые (дна бассейна) ритмичнослоистые глинистые алевролиты с линзами тонкими слойками тонко-мелкозернистого песчаника с рябью течения и резкой кровлей (составлено автором)

Рисунок 2.12 – Многочисленные сдвоенные глинистые слойки в кровле прослоя массивного турбидитового песчаника и под ним указывают на переработку приливами турбидитовых осадков (составлено автором)

Рисунок 2.13 – Признаки контурных течений по результатам спектральной декомпозиции (составлено автором)

Рисунок 2.14 – Сейсмические разрезы для пласта с признаками контурных процессов (а – Спектральная декомпозиция, б – Сумма положительных амплитуд) (составлено автором)

Рисунок 2.15 – Проявление в сейсмическом поле осадочных волн (составлено автором)

Рисунок 3.1 – Рабочая схема разработанного алгоритма седиментационного моделирования ачимовских отложений (составлено автором)

Рисунок 3.2 – Последовательные слайсы седиментационной модели гравитационного потока (составлено автором)

Рисунок 3.3 – Последовательные слайсы седиментационной модели гиперпикнального потока (составлено автором)

Рисунок 3.4 – Последовательные слайсы седиментационной модели с действием придонных течений (составлено автором)

Рисунок 4.1 – Структурная карта пласта НП5 (составлено автором)

Рисунок 4.2 – Сейсмофациальный комплекс пласта НП5 в волновом поле (составлено автором)

Рисунок 4.3 – Сейсмический разрез пласта НП5 (составлено автором)

Рисунок 4.4 – Седиментационный срез пласта НП5 (составлено автором)

Рисунок 4.5 – Фотодокументация керна пласта НП5 (составлено автором)

Рисунок 4.6 – Рассчитанная палеоповерхность пласта НП5 (составлено автором)

Рисунок 4.7 – Трехмерная реализация седиментационной модели (составлено автором)

Рисунок 4.8 – Базовая карта эффективных толщин по седиментационной модели (составлено автором)

Рисунок 4.9 – Распределение песчанистости по площади для различных сценариев (составлено автором)

Рисунок 4.10 – Используемые материалы для построения КГМ пласта НП8 (а – Изохроны пласта НП8, б – Мощности пласта НП8, в – мощность между НП8 и арктической пачкой, г – сейсмический атрибут “Сумма положительных амплитуд”) (составлено автором)

Рисунок 4.11 – Сейсмический разрез пласта НП8 (составлено автором)

Рисунок 4.12 – Фациальная схема пласта НП8 (составлено автором)

Рисунок 4.13 – Трехмерная реализация седиментационной модели (составлено автором)

Рисунок 4.14 – Базовая карта эффективных толщин по седиментационной модели (составлено автором)

Рисунок 4.15 – Распределение песчанистости по площади для различных сценариев (составлено автором)

Рисунок 5.1 – Фациальные схемы новопортовской толщи (а – пласт НП1, б – пласт НП2-4, в – пласт НП5) (составлено автором)

Рисунок 5.2 – Формирование глубоководных конусов выноса на изучаемой территории (а – пласт НП6, б – пласт НП7, в – пласт НП8) (составлено автором)

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика подходов к седиментационному моделированию глубоководных систем (составлено автором)

Таблица 2.1 – Сравнительная характеристика основных типов седиментационных потоков, участвующих в формировании ачимовских песчано-алевритовых тел (составлено автором)

Таблица 3.1 – Входные данные для седиментационного моделирования (составлено автором)

Таблица 3.2 – Исходные параметры разработанного алгоритма седиментационного моделирования (составлено автором)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в производство



Для предъявления
по месту требования

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ГАЗПРОМНЕФТЬ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР»
(ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ НТЦ»)

Россия, 190000, г. Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 75-79, лит. Д
ОКПО 833760719, ОГРН 10278847039673,
ИНН 7838395487, КПП 783801001
Тел.: +7 (812) 313-60-24, факс: +7 (812) 313-60-27
e-mail: ntz_oob@gazprom-neft.ru
http://ntz.oob.gazprom-neft.ru

№ _____
от _____ 08.06.2026

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Грибанова Даниила Александровича

на тему «Прогнозирование внутреннего строения ачимовской толщи севера
Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на основе
седиментационного моделирования»

по научной специальности 1.6.11 Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных
и газовых месторождений (геолого-минералогические науки)

Комиссия (рабочая) в составе:

Председатель: руководитель центра геологических решений ООО
«Газпромнефть НТЦ» О.А. Захарова

Члены комиссии:

1. Руководитель проекта развития дисциплины «Геологическое моделирование»
ООО «Газпромнефть НТЦ» С.А. Люлякин
2. Руководитель проекта развития дисциплины «Сейсморазведка» ООО
«Газпромнефть НТЦ» М.А. Васильев
3. Ведущий эксперт, к-г.м.н. ООО «Газпромнефть НТЦ» А.В. Буторин
4. Ведущий эксперт, к-г.м.н. ООО «Газпромнефть НТЦ» А.П. Вилесов
5. Руководитель проекта по экспертизе продуктов ООО «Газпромнефть НТЦ»
Н.В. Жуйкова
6. Старший научный сотрудник к-г.м.н. Научно-образовательного центра
«Газпром нефть НГУ» К.В. Зверев
7. Руководитель программы развития продуктов «Перспективные проекты ГРП»
ООО «Газпромнефть НТЦ» М.В. Букатов



ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ
НТЦ»

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования на тему: «Прогнозирование внутреннего строения ачимовской толщи севера Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на основе седиментационного моделирования», представленного на соискание ученой степени кандидата наук, приняты к использованию в деятельности ООО «Газпромнефть НТЦ» при решении задач прогноза внутреннего строения, литолого-фациальной неоднородности и архитектуры резервуаров глубоководных конусов выноса.

Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении работ по проекту «Южный Ямал», связанных с геологическим обоснованием перспектив нефтегазоносности, уточнением строения ачимовских резервуаров и повышением достоверности прогноза зон развития песчаных тел.

Практическая значимость внедрения заключается в возможности применения разработанного алгоритма и методики при планировании программы геологоразведочных работ для снижения неопределенностей и рисков при поиске и разведке месторождений нефти и газа и более обоснованного прогнозирования площадного распространения ачимовских отложений.

Руководитель центра геологических
решений



О.А. Захарова

О.А. Захарова
+79111810050

Руководитель проекта
по маркетингу продукции *Мурза* *И.В. Мурзаков*

Руководитель проекта
по разработке проектов *В.И. Васильев*

Руководитель проекта
развитие дисциплины
Сейсморастворения *Васильев В.А.*



ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ
НТЦ»