

Автономная некоммерческая
образовательная организация высшего образования
«НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «СИРИУС»
Научный центр информационных технологий и искусственного интеллекта
Направление «Математическое моделирование в биомедицине и нефтегазовом
инжиниринге»

К ЗАЩИТЕ ДОПУСТИТЬ
Руководитель направления
«Математическое моделирование
в биомедицине и нефтегазовом
инжиниринге»
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН
(_____) Ю. В. Василевский
«____» _____ 2024 г.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ ПЛАСТА

Магистерская диссертация по направлению подготовки
01.04.02 «Прикладная математика и информатика»
направленность (профиль) «Математическое моделирование в биомедицине и
нефтегазовом инжиниринге»

Студент, группа М01ММ-22
(_____) Ю. С. Вожаева
«____» _____ 2024 г.

Руководитель
к.ф.-м.н., Ph.D.
(_____) С. Ю. Малясов
«____» _____ 2024 г.

Федеральная территория «Сириус» 2024

Автономная некоммерческая
образовательная организация высшего образования
«НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «СИРИУС»
Научный центр информационных технологий и искусственного интеллекта
Направление «Математическое моделирование в биомедицине и нефтегазовом
инжиниринге»

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель направления
«Математическое моделирование в
биомедицине и нефтегазовом
инжиниринге»

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

(_____) Ю. В. Василевский

«___» _____ 2024 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

обучающегося очной формы обучения 2 курса группы М01ММ-22

01.04.02 «Прикладная математика и информатика»

направленность (профиль) «Математическое моделирование в биомедицине
и нефтегазовом инжиниринге»

Вождаевой Юлии Сергеевны

1. Тема ВКР: «Восстановление параметров разрывных нарушений пласта».
2. Цель ВКР: воссоздать геологические поверхности с известными разрывами в сейсмическом кубе.

**Совместный рабочий график (план) выполнения выпускной
квалификационной работы**

№	Перечень заданий	Сроки выполнения
1	Изучить литературу по теме исследования.	30.01.2024 – 29.02.2024
2	Алгоритмически выделить сейсмо-трассы в сейсмическом кубе (2D-задача).	01.03.2024 – 31.03.2024
3	Исследовать разломы в кубе амплитуд для дальнейшего построения геологических слоев.	01.04.2024 – 30.04.2024
4	Написать код программы для построения поверхностей по выделенным сейсмо-трассам и разломам (3D-задача).	01.05.2024 – 23.05.2024

Дата выдачи: «____» { _____ 2024 г.

Руководитель ВКР к.ф.-м.н., Ph.D. (_____) С. Ю. Малясов

Задание принял к исполнению: «____» { _____ 2024 г.

Обучающийся гр. M01MM-22 (_____) Ю. С. Вожаева

Реферат

Выпускная квалификационная работа, 56 страниц, 21 рисунков, 19 источников.

Ключевые слова: СЕЙСМОРАЗВЕДКА, СТРУКТУРНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ, ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД, СТРУКТУРНЫЙ КАРКАС, ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКВАЖИН (ГИС), СЕЙСМО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Цель работы:

Разметить сейсмотрассы и разломы в сейсмическом кубе. На основе полученных данных построить геологические поверхности, учитывающие структурные нарушения пород.

В работе программно реализован алгоритмический подход к выделению сейсмических трасс и тектонических разрывов, написан код программы на языке Python с обработкой полученной информации о разрывных нарушениях с последующим выделением поверхностей.

Abstract

Final qualifying work, 56 pages, 21 figures, 19 sources.

Key words: SEISMIC SURVEY, STRUCTURAL INTERPRETATION, TECTONIC DISRUPTIONS OF STRUCTURAL FRAMEWORK, WELL LOGGING (GEOLOGICAL SURVEY OF WELLS), SEISMIC-GEOLOGICAL MODEL

Goal of the work:

Automated interpretation of seismic traces and faults in the seismic cube. Based on the obtained data, construct geological surfaces that account for structural disruptions in the rock.

In this work, an algorithmic approach to identify seismic traces and tectonic faults was developed and implemented in software. Additionally, a program was written in Python to process the received information about fault disturbances and subsequently construct surfaces.

Сокращения, обозначения, термины и определения

В настоящей работе применяют следующие сокращения и обозначения:

- ML (Machine Learning) — методы машинного обучения;
- AI (Artificial Intelligence) — искусственный интеллект;
- NN (Neural Network) — нейронные сети;
- VTK (Visualization Toolkit) — программа для трехмерного моделирования;
- SEG-Y — формат файлов, используемый для хранения сейсмических данных;
- NPY — формат файлов, используемый для хранения массивов данных;
- CNN — архитектура искусственных нейронных сетей.

Оглавление

Введение	8
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.	10
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	23
2.1 Цель работы.	23
2.2 Новизна работы	23
2.3 Практическая значимость	24
2.4 Описание входных данных	24
2.5 Описание используемых инструментов	25
3 МЕТОДОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	27
3.1 2D алгоритм выделения сейсмических трасс	27
3.2 Зависимость результатов выделения сейсмотрасс от выбранных параметров алгоритма.	34
3.3 Создание поверхностей по сейсмическим трассам	38
3.4 Метод реконструкции разломов на поверхностях	43
4 АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ	46
5 ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ	48
5.1 Практическое применение результатов.	48
5.2 Перспективы направления дальнейших исследований.	49
6 РЕЗУЛЬТАТЫ	50
Заключение	52
Список использованных источников	54

Введение

Сейсмическая разведка является одним из наиболее важных и широко используемых методов в геологии для исследования подземных структур. Метод основан на регистрации и анализе волн, отраженных от различных геологических слоев в земной коре, что позволяет создавать детализированные трехмерные модели подземных структур. Сейсмическая разведка необходима для выявления и картирования разломов, трещин и других структурных изменений.

Тектонические нарушения оказывают значительное влияние на характеристики подземных пластов, включая их проницаемость, структуру и устойчивость. Понимание таких изменений позволяет более точно оценивать запасы полезных ископаемых, планировать бурение скважин и разрабатывать эффективные методы добычи.

Проблематика исследования разломов связана с их сложной природой и разнообразием проявлений. Важно учитывать, что каждое нарушение уникально, и его параметры могут существенно варьироваться в зависимости от множества факторов, таких как геологическая история региона, тип породы, а также внешние воздействия. Неопределенность в оценке этих параметров может привести к ошибкам в моделировании и, как следствие, к неэффективной разработке месторождений.

В современных условиях, когда спрос на минеральные ресурсы продолжает расти, а месторождения становятся все более труднодоступными, задача точного восстановления разрывных нарушений пластов приобретает особую значимость. Сейсмическая разведка становится незаменимым инструментом для обеспечения безопасности и экономической эффективности добывающей деятельности.

Особую актуальность приобретает внедрение в сейсмическую разведку

компьютерных технологий, в том числе трехмерного моделирования и визуализации результатов, что позволяет создавать детализированные модели подземных структур, учитывающие все возможные тектонические нарушения. Современные программные алгоритмы позволяют автоматизировать анализ больших массивов данных, получаемых в результате сейсмической разведки и бурения скважин. Это значительно ускоряет процесс интерпретации данных, снижает вероятность человеческих ошибок и обеспечивает более высокую точность результатов. Полученные результаты служат основой для принятия обоснованных решений в области планирования и разработки месторождений, минимизируя риски и затраты.

Основная цель данной работы – разработка алгоритма и реализация программного кода для восстановления поверхностей пластов на основе комплексного анализа данных сейсмического куба.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Сейсмическая разведка представляет собой совокупность методов для исследования геологического строения земной коры. Эти методы основаны на изучении распространения упругих волн, возбужденных ударами или вибрацией, с последующей регистрацией отклика от горных пород. Эти волны распространяются во все стороны от источника колебаний, проникая в толщу земли. Распространяясь вглубь, волны претерпевают преломление и отражение на границах геологических слоёв с разными свойствами. Затем отраженные волны возвращаются на поверхность, где их колебания регистрируются специальными сейсмоприемниками. При изучении характера колебаний, измеряя время распространения и отражения волн, геофизики определяют глубины залегания и формы тех геологических границ, на которых произошло преломление, а также оценивают состав пород, через которые прошла волна. Сейсморазведка позволяет точно определять границы слоев осадочной толщи даже при большой глубине их залегания, поэтому такие методы особенно широко используют в структурно-геологической области. Сейсмические методы используют для поисков месторождений нефти, газа, углей, каменной соли, бокситов, в последнее время их применяют и в рудной геологии. Получая и анализируя сведения о глубинном строении земной коры, сейсморазведка оказывает непосредственное влияние на изучение региональной геологии [1].

При геологической обработке сейсмических данных применяется вся доступная информация о структурно-тектоническом и фациально-литологическом строении, которая основана на данных бурения, каротажа, а также полевых геофизических исследованиях. Финальный этап создания разрезов и карт, завершающий многогранный процесс исследований, включает этапы обработки и анализа данных. В результате такой обработки получается

сейсмический куб, в котором каждый воксель содержит информацию о сейсмической амплитуде в конкретной точке и на определённой глубине. В этой стадии интерпретация приобретает особое значение, поскольку формирует окончательный геологический результат.

Сейсмический куб представляет собой трехмерный массив данных, сформированный в результате обработки сейсмических сигналов. Он позволяет визуализировать подземные структуры и является ключевым инструментом для детального представления строения геологических слоёв. Такой способ моделирования позволяет специалистам оценить структурные особенности, такие как складки, разломы, и другие геологические нарушения, которые могут быть неочевидны. Это улучшает интерпретативный процесс и способствует более точному прогнозированию геологической обстановки. Создание сейсмического куба начинается со сбора данных с сейсмоприемников, расположенных на поверхности исследуемой области. Отраженные сигналы от подземных слоев и разрывов регистрируются, а затем записывается информация о времени прихода и амплитуде волн. Обработка данных включает применение алгоритмов миграции и фильтрации, что способствует созданию трехмерной модели подземных структур.

Для достижения наибольшей точности при интерпретации сейсмических данных необходимо комплексное использование всех доступных геофизических и геологических данных. Включение результатов бурения, каротажа и других наземных или подземных исследований помогает уточнить модели, основанные на сейсмических данных, и повышает их надёжность. Это особенно важно в областях с высокой геологической сложностью, где каждый метод может дополнить другой и предоставить более полное понимание подземных процессов [2—4].

Сейсмический куб организован вдоль трёх осей: X и Y, которые представляют горизонтальные координаты на поверхности Земли, и ось Z, корре-

лирующая с временем прохождения или глубиной отражения сейсмических волн. Горизонтальные координаты разбиваются на инлайны и кросслайны. Первые располагаются вдоль оси расположения сейсмоприемников, а вторые, соответственно, поперек. Каждая вертикаль куба (и среза) представляет собой отдельную сейсмотрассу. Такая трёхмерная структура данных позволяет осуществлять многоаспектный анализ, включая выделение и картирование структурных нарушений, определение границ пластов, оценку их толщины и наклона, а также прогнозирование расположения залежей полезных ископаемых.

Применение сейсмического куба обеспечивает значительные преимущества благодаря возможности интерактивного анализа данных. Современные программные решения предоставляют функционал для манипуляции кубом, включая вращение, масштабирование и применение разнообразных фильтров. Эти возможности способствуют более глубокому пониманию морфологии и геодинамических процессов подземных образований, что, в свою очередь, ускоряет процесс принятия решений в области разработки месторождений и минимизации геологических рисков.

Дополнительно, многоуровневый анализ, который возможен благодаря использованию сейсмического куба, облегчает корреляцию сейсмических данных с другими геофизическими и геологическими исследованиями. Синхронизация данных из различных источников увеличивает вероятность точного расшифровывания сложной геологической среды и прогнозирования её изменений. Таким образом, сейсмический куб не только служит инструментом для первичной интерпретации данных, но и становится основой для комплексного многоаспектного анализа, учитывающего различные геологические и геофизические параметры.

Отдельный интерес представляют разрезы сейсмического куба, которые представляют собой двухмерные сечения трехмерного сейсмического

массива данных, что позволяет исследователям визуализировать и изучать внутренние характеристики подземных слоев на различных глубинах и в разных направлениях. С помощью разрезов можно выявить и картировать разрывные нарушения, такие как разломы и трещины, а также четко идентифицировать границы между различными литологическими единицами и оценить их взаимное расположение. Дополнительно, разрезы позволяют обнаружить потенциальные места накопления углеводородов, например, антиклинальные структуры и соляные купола. Также важным достоинством является возможность планирования бурения, разрезы служат основой для выбора оптимальных мест для бурения разведочных и эксплуатационных скважин, минимизируя риски и повышая эффективность добычи.

Сейсмические разрезы, независимо от метода построения, должны соответствовать установленным стандартам. На плане разреза каждая сейсмическая граница может быть представлена линией, непрерывной в пределах, где волновой фронт прослеживается надежно, и прерывистой линией в местах сомнительной корреляции. В условиях неблагоприятной сейсмогеологии могут наблюдаться участки без устойчивых полезных волн.

При анализе сейсмических разрезов разрывные нарушения обнаруживают по геометрическим особенностям границ. Признаком разрывного нарушения может быть резкое искривление границ вблизи участка потери прослеживаемости. Сопоставление мест разрыва позволяет определить положение плоскости разлома. Далеко не всегда тектонические нарушения уверенно обнаруживаются по сейсморазведочным данным. Поэтому линии нарушений следует наносить на разрез с большой осторожностью, учитывая все имеющиеся материалы геологической разведки, бурения и других геофизических методов [5].

Разрывные нарушения являются ключевыми структурными элементами земной коры, оказывающими влияние на распределение и состояние гор-

ных пород. В структурной геологии и геотектонике эти нарушения играют решающую роль, так как определяют дифференцируемость земной коры на различных масштабах и существенно отражают ее развитие. В практическом плане разрывные нарушения имеют большое значение как проводники и аккумуляторы флюидов, включая рудоносные гидротермы и нефть. Их развитие и пространственное распределение также представляют значительный интерес для сейсмологии, инженерной геологии и других смежных дисциплин. Именно поэтому проблемам разрывной тектоники уделяется все больше внимания.

Существует несколько типов разрывов, которые классифицируются по различным признакам, таким как характер смещения и геометрические особенности. Основные типы разрывов включают (рис. 1.1) [6]:

1. *Сбросы* - разрывы, при которых блок породы смещается вниз относительно другого блока. Обычно сбросы формируются в условиях растяжения;
2. *Сдвиги* - разрывы, при которых блоки породы смещаются горизонтально друг относительно друга. Сдвиги могут быть правосторонними или левосторонними в зависимости от направления смещения;
3. *Взбросы и надвиги* - разрывы, при которых один блок породы перемещается вверх относительно другого. Эти разрывы возникают в условиях сжатия и могут формировать крупные складчатые структуры.

Классификация разрывов также может основываться на их масштабах (микроразрывы, мезоразрывы и макроразрывы), а также на характере их развития (первичные и вторичные разрывы).

Разрывные нарушения формируются в результате тектонических процессов, связанных с движениями литосферных плит. Существует три основных причины образования разрывов: тектонические напряжения, гравитационные силы и термальные воздействия. Вследствие тектонических напряжений, движения плит вызывают накопление напряжений в земной коре, ко-

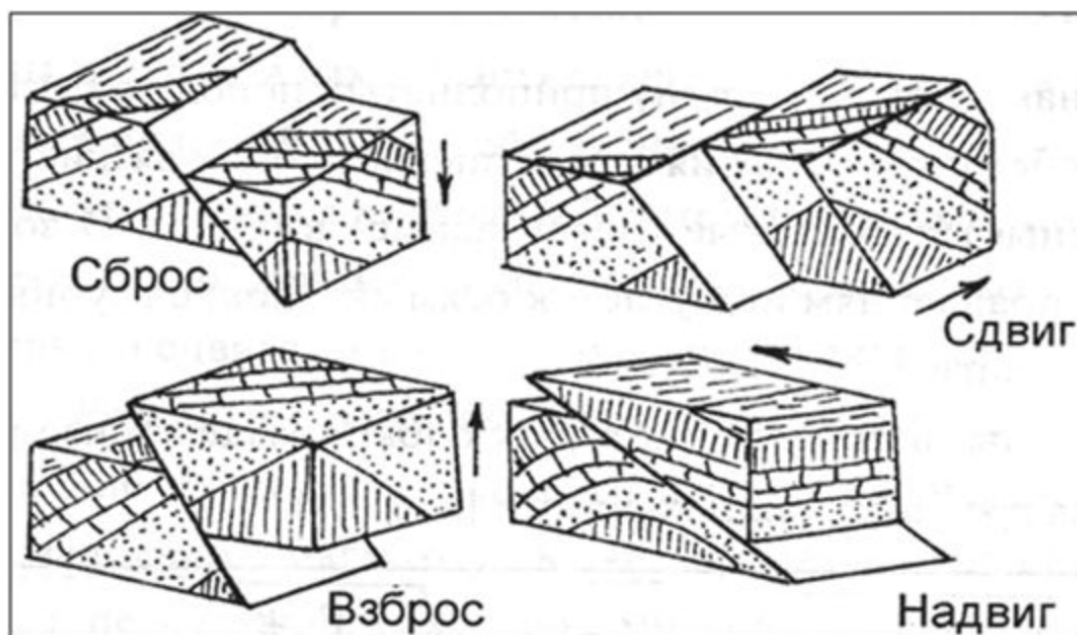


Рисунок 1.1 – Типы разломов

которые при достижении критических значений приводят к разрывам. Гравитационные силы оказывают влияние на наклонные слои породы, вызывая их смещение и образование разломов. Термальные воздействия (изменение температуры в земной коре) могут приводить к расширению или сжатию пород.

Механизмы образования разрывов связаны с накоплением и релаксацией напряжений в породах. Формирование разломов в земной коре происходит через механизмы фрикционного скольжения и хрупкого разрушения, которые играют ключевые роли в тектонических процессах. Фрикционное скольжение характеризуется смещением двух поверхностей пород относительно друг друга под воздействием накопленного тектонического напряжения, преодолевающего силу трения между ними. Этот процесс происходит вдоль существующих разломов или трещин и является основным механизмом движения литосферных плит и возникновения землетрясений. В то же время хрупкое разрушение описывается внезапным разрушением пород, когда напряжение превышает предел их прочности. В отличие от пластической деформации, хрупкое разрушение происходит без значительной предшест-

ющей деформации, приводя к образованию новых разрывных нарушений и трещин. Оба механизма являются фундаментальными для понимания процессов деформации земной коры и формирования геологических структур, а также для прогнозирования и анализа сейсмической активности, что имеет важное значение для сейсмологии и инженерной геологии.

Методы исследования разрывных нарушений делятся на традиционные и современные методы, каждый из которых обладает своими уникальными преимуществами и применим в различных контекстах геологических исследований. Традиционные методы включают фундаментальные подходы, такие как геологическое картирование, структурный анализ и полевые исследования, которые основываются на непосредственном наблюдении и измерении разрывов на поверхности земли и в горных породах. Эти методы являются основополагающими для понимания базовых характеристик и механизмов формирования разрывов.

Геологическое картирование включает детальное описание и картирование разрывов на поверхности земли, что позволяет точно определить типы разрывов, их направления и размеры. Картирование помогает выявить основные характеристики разломов и трещин, а также их пространственное распределение и взаимосвязи с другими геологическими структурами.

Структурный анализ представляет собой метод, который фокусируется на изучении деформаций горных пород, вызванных разрывными нарушениями. Такой анализ помогает понять условия и механизмы формирования разрывов путем изучения складок, слоев и других структурных элементов, а также позволяет оценить тектонические процессы, ответственные за возникновение разломов, и предоставляет важные данные для реконструкции геологической истории региона.

Полевые исследования включают сбор образцов и проведение измерений непосредственно на месте разрывов. Этот метод позволяет получить

непосредственные данные о физико-механических свойствах пород и характере разрывных нарушений. Полевые исследования являются важным этапом валидации данных, полученных другими методами, и обеспечивают основу для последующих лабораторных и аналитических работ [6].

Внедрение современных технологий значительно расширяет возможности геологов и повышает точность и надежность интерпретации данных. Современные подходы позволяют исследовать глубинные и сложные структуры, которые трудно или невозможно изучить с помощью традиционных методов, и обеспечивают более комплексное понимание процессов, формирующих разрывные нарушения в земной коре.

В инновационные методы входит сейсморазведка, использующая отраженные и преломленные сейсмические волны для создания трехмерных моделей подземных структур. Этот метод позволяет детально картировать разрывы и оценивать их параметры, такие как глубина и протяженность [7]. Сейсморазведка является особенно полезной при изучении глубокозалегающих разломов, недоступных для прямого наблюдения. На основе данных сейсморазведки и других источников с помощью 3D моделирования создаются трехмерные модели разрывов. Эти модели позволяют визуализировать и анализировать сложные структуры разрывных нарушений, предоставляя возможность исследовать их пространственные взаимоотношения и динамику. 3D моделирование является мощным инструментом для понимания механики и эволюции разрывов.

В настоящее время широко используется ГИС-анализ (Географические информационные системы), который также применяет цифровые технологии для анализа пространственных данных о разрывах. ГИС позволяет интегрировать данные из различных источников, включая карты, спутниковые изображения и результаты полевых исследований, что обеспечивает комплексный анализ разрывных нарушений [8]. Этот метод способствует точной визуали-

зации и интерпретации пространственного распределения разрывов.

Известен метод интерферометрии с использованием синтетической апертуры (InSAR), представляющий собой метод дистанционного зондирования, который использует спутниковые данные для измерения смещений земной поверхности, вызванных разрывами. Этот метод позволяет обнаружить и мониторить движения земной коры с высокой точностью, что особенно важно для изучения активных тектонических зон и прогнозирования сейсмической активности [9].

На сегодняшний день известны такие современные программные комплексы как Petrel и Kingdom, использующие алгоритмические методы для автоматического выделения и анализа тектонических нарушений. В программы встроены инструменты для интерпретации сейсмических данных и моделирования геологических структур. В литературе также рассматриваются различные подходы к интеграции данных, полученных из скважин, с сейсмическими данными, что способствует более полному и точному восстановлению параметров разрывных нарушений. Однако, несмотря на их многофункциональность и широкий спектр возможностей, такие программные продукты имеют несколько недостатков при решении сложных задач интерпретации геологических данных. Во-первых, они часто требуют значительных временных и финансовых затрат на обучение персонала, так как их использование требует специализированных знаний и навыков. Во-вторых, точность автоматических методов интерпретации, доступных в этих программных средах, может оставаться ниже, чем при ручной интерпретации, особенно в случае сложных геологических структур или неоднородных сейсмических данных. Пакеты предполагают ручной выбор начальных точек вдоль сейсмических горизонтов на сейсмических изображениях, в свою очередь автоматическое отслеживание может не прерывать трассировку горизонтов на крупных разломах, что вынуждает пользователя устанавливать новые начальные точки в

соседних блоках разломов, соответствующих тому же стратиграфическому подразделению. Кроме того, вопросы интеграции данных из различных источников (например, скважин и сейсмических данных) могут возникать из-за ограничений форматов данных и совместимости между различными системами.

Новые возможности в области обработки сейсмических данных для повышения эффективности и точности геологической интерпретации открывают развитие и использование алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта. Эти технологии позволяют автоматизировать процессы распознавания геологических характеристик и ускоряют процесс интерпретации, снижая человеческий фактор и увеличивая объективность оценок [10—12].

В настоящее время существует значительное количество исследований, посвященных интерпретации сейсмической разведки. Многие работы фокусируются на методах машинного обучения для выявления и анализа разломов. В статье [13] описан метод выделения сейсмических трасс с использованием нейронных сетей. Авторы рассматривают задачу оценки изображения RGT, которое представляет собой визуализацию относительного геологического времени в сейсмических данных. Такое изображение помогает интерпретировать геологическую историю участка путем отображения временных слоев, которые соотносятся с разными геологическими эпохами или событиями.

Проблему выделения сейсмических горизонтов авторы рассматривают как задачу регрессии и предлагают использовать архитектуру глубокой сверточной нейронной сети (CNN) для автоматической разметки двухмерного среза сейсмического куба. Архитектура предложенной сети состоит из трех частей: кодировщика, декодировщика и модуля уточнения. Кодировщик сети основан на ResNet-50, который загружает предварительно обученные ве-

са на наборе данных ImageNet для инициализации обучения. Декодировщик используется для восстановления исходного размера изображения. Модуль уточнения использует серию сверточных слоев для финального предсказания изображения RGT. Для обучения сети используется 2080 пар синтетических входных сейсмических изображений и целевых RGT изображений, после чего сеть тестируется на 960 тестовых сейсмических изображениях. Методология включает использование функции потерь в виде среднеквадратичной ошибки (MSE) для оптимизации сети и повышения её производительности. Благодаря архитектуре сети и используемым методам, предложенный подход значительно превосходит традиционные методы, особенно при работе с сложными структурами, такими как пересекающиеся разломы, без необходимости ручного выбора. Авторами показано, что даже при обучении только на синтетических данных, сеть способна генерировать точные результаты на реальных сейсмических изображениях.

В статье [14] задача распознавания сейсмических трасс рассматривается как задача классификации изображений. Сверточная нейронная сеть благодаря своей гибкости в архитектуре сети и способности иерархической экстракции признаков может эффективно отслеживать горизонты в сейсмических объемах, где имеются разрывы. В исследовании разработана структура CNN, состоящая из трех сверточных слоев, трех слоев максимального объединения (max-pooling) и двух полностью связанных слоев, завершающихся классификатором softmax. На вход сети подаются маленькие двумерные изображения сейсмического куба, центрированные на отслеживаемом образце. Для обучения моделей CNN использовали лишь 1,5 процента от общего объема сейсмических данных, что демонстрирует высокую эффективность и точность метода. Корень средней квадратичной ошибки (RMSE) и коэффициент детерминации (R^2) между горизонтами, отслеженными моделью CNN, и ручной разметкой составили 1,78 и 0,998 для одиночного горизонта, и 2,68

и 0,992 для множественных горизонтов, соответственно. Эти результаты показывают, что предложенный метод может значительно повысить точность и эффективность отслеживания сейсмических горизонтов по сравнению с традиционными методами.

Внедрение методов машинного обучения в дополнение к традиционным методам отслеживания горизонтов позволяет автоматизировать анализ больших массивов данных, получаемых в результате сейсмической разведки и бурения скважин, что значительно ускоряет процесс интерпретации результатов, снижает вероятность человеческих ошибок и обеспечивает более высокую точность результатов. Основной задачей остается выбор и реализация алгоритма, повышающего точность распознавания сейсмических трасс.

Компании в области геологоразведки и добычи полезных ископаемых испытывают необходимость в алгоритмах, не использующих нейронные сети, из-за высоких затрат, связанных с формированием качественного датасета для их обучения. Процесс создания большого набора данных, необходимого для обучения нейронных сетей, требует значительных временных и финансовых ресурсов, включая привлечение специалистов для ручной разметки данных и обеспечение достаточного объема разнообразных сейсмических изображений. В условиях ограниченного бюджета и временных рамок, использование традиционных алгоритмов, которые не зависят от объемных обучающих данных, становится предпочтительным. Такие алгоритмы могут предложить быстрые и надежные решения для интерпретации сейсмических данных, обеспечивая необходимую точность и эффективность без дополнительных расходов на создание специализированных датасетов.

Трехмерное моделирование и визуализация результатов, позволяет создавать детализированные модели подземных структур, учитывающие все возможные тектонические нарушения. Эти модели служат основой для принятия обоснованных решений в области планирования и разработки месторо-

рождений, минимизируя риски и затраты.

Таким образом, работы посвященные разработке алгоритмов и реализации программного кода для восстановления поверхностей пластов на основе комплексного анализа данных сейсмического куба являются актуальными.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

2.1 Цель работы

Цель: Разработать и реализовать алгоритм распознавания сейсмотрасс на срезах сейсмического куба (2D задача). Определить места потенциальных разломов. По выделенным трассам и известным местам разрывов построить поверхности, удовлетворяющие логике геологических структур (3D задача).

Критерий успешно построенной стратегии: Все поверхности и разломы удовлетворяют физическому смыслу и визуально повторяют логику 2D срезов.

2.2 Новизна работы

Новизна данной работы заключается в разработке и реализации алгоритма распознавания сейсмических трасс с дальнейшим построением поверхностей с разломами, который может быть применен ко всем сейсмическим кубам независимо от их специфических характеристик. Важной особенностью предлагаемого алгоритма является его низкая вычислительная сложность, что обеспечивает высокую скорость работы и эффективность в условиях ограниченных ресурсов. Кроме того, алгоритм не требует большого набора подготовленных данных для обучения, что значительно упрощает его применение и делает доступным для использования в широком спектре геологических и геофизических исследований. Благодаря своей универсальности и быстродействию, данный метод, положенный в основу алгоритма, представляет собой удобный алгоритм для автоматизации и интерпретации сейсмических данных.

2.3 Практическая значимость

Практическая значимость работы заключается в её потенциале существенно улучшить процессы интерпретации сейсмических данных в геологоразведке и добыче полезных ископаемых. Алгоритм распознавания сейсмических трасс и построения геологических поверхностей позволяет значительно ускорить и автоматизировать анализ сейсмических кубов, что ведет к снижению временных и финансовых затрат на выполнение геофизических исследований. Быстрая и точная интерпретация данных способствует более эффективному планированию буровых работ, оптимизации добычи ресурсов и улучшению безопасности инженерных проектов, что в совокупности приносит значительную пользу как для научного сообщества, так и для промышленности.

2.4 Описание входных данных

В качестве входных данных в работе используется сейсмический куб в формате SEG-Y. Файл такого формата является хранилищем для сейсморазведочных работ, записанных с помощью 3D сейсмических методов. В ходе исследования куб был переконвертирован в формат NPY, который позволяет работать более эффективно с массивами данных в языке программирования Python. 3D сейсмическое изображение юго-западной части Баренцева моря было взято из открытого источника (рис. 2.1).

Размеры сейсмического куба — (100, 400, 155), где первые два значения характеризуют масштаб по осям инлайнов и кросслайнов, последнее - размерность оси времени прохождения или глубины отражения сейсмических волн. Куб представлен в градиенте серого цвета.

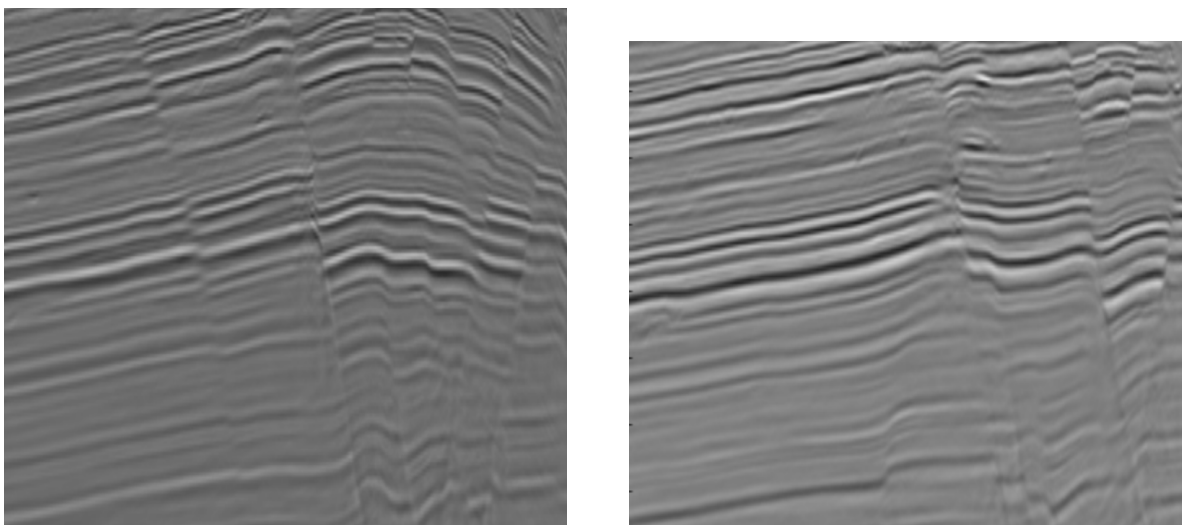


Рисунок 2.1 – Примеры срезов входного сейсмического куба

2.5 Описание используемых инструментов

Для реализации алгоритма выделения сейсмических трасс в двумерном пространстве и построения поверхностей с разломами в трехмерном пространстве используется высокоуровневый язык программирования Python. Python был выбран благодаря своей простоте и широким возможностям, предоставляемым библиотеками и инструментами для научных вычислений и анализа данных. В частности, библиотеки NumPy и SciPy обеспечивают эффективные средства для обработки массивов данных и выполнения математических операций, что значительно упрощает разработку алгоритма. Кроме того, библиотека Matplotlib используется для создания графиков и визуализации промежуточных результатов, что позволяет более детально анализировать этапы выполнения алгоритма и корректировать его работу при необходимости.

Для визуализации всех окончательных результатов, полученных в ходе работы, используется программный пакет Paraview. Приложение представляет собой мощный инструмент для визуализации больших объемов данных, который позволяет создавать трехмерные модели и интерактивные визуализации. Использование Paraview обеспечивает наглядное представление слож-

ных геологических структур и разломов, что упрощает их анализ и интерпретацию.

3 МЕТОДОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 2D алгоритм выделения сейсмических трасс

Предлагаемый метод коррелирует сейсмические горизонты с разрывами и не требует ввода данных пользователем в виде исходных точек трасс. Кроме того, метод устойчив к изменениям амплитуды вдоль сейсмического горизонта. Благодаря физике геологической структуры используется скользящее окно для сравнения трасс в окрестности, предполагая что соседние трассы будут вести себя похожим образом.

Алгоритм реализованный в данной работе принимает на вход подготовленный сейсмический куб в формате NPY, а также значения некоторых параметров:

- *GRID_STEP*. Шаг сетки. В работе используется значение равное 20.
- *WINDOW_WIDTH*. Размер скользящего окна или максимальное расстояние от рассматриваемой линии сетки до другой линии в ϵ -окрестности. В работе используется значение равное 100.
- *EXTREMUM_TYPE*. Тип экстремума: «troughs» («локальный минимум») или «peaks» («локальный максимум»), в работе использовался локальный минимум.
- *HORIZON_NUMBER*. Количество отображаемых трасс в визуализации: «all» (все трассы) или целочисленное значение, меньшее чем общее количество трасс.
- *HITRATE_PER_TRACE_PERCENT*. Критерий фильтрации в процентах. В работе используется значение равное 20 процентам.
- *POINTS_TO_COMPARATOR_COUNT*. Параметр используется для поиска локальных экстремумов, количество точек с каждой стороны от рассматриваемой точки, используемых для сравнения. В работе используется

значение равное 5.

Первым этапом алгоритма является построение сетки. С определенным *GRID_STEP* извлекается информация из куба:

$$seismic_data[:, crossline, inline],$$

где *seismic_data* представляет трехмерный массив данных, в котором берутся все значения с оси *Z*, *crossline* и *inline* значения в пересечениях шагах сетки. Визуально такое разбиение представлено на рисунке 3.1. Далее переходим в 2D размерность — выделенные срезы сейсмического куба и трасс, которые представляют множество координат (X,Y).

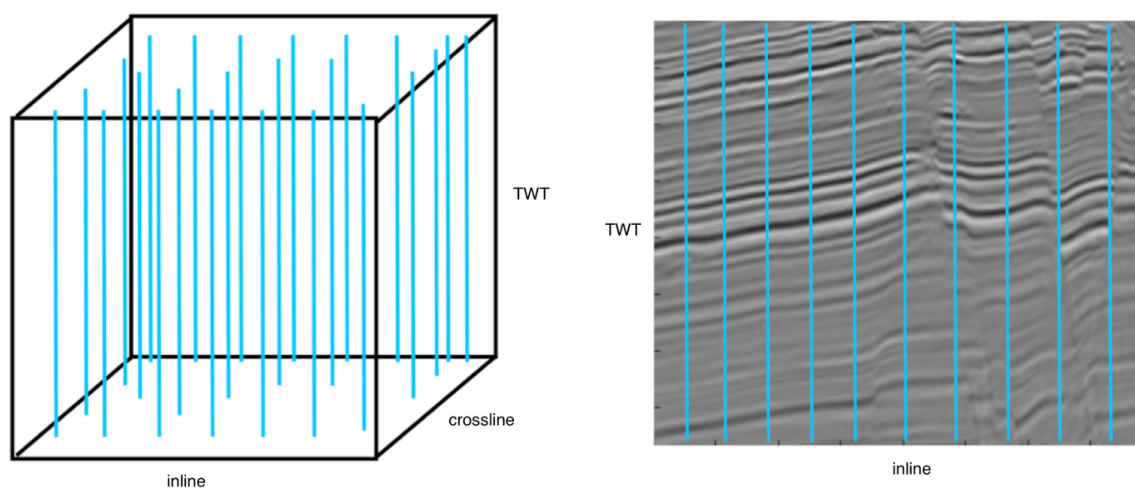


Рисунок 3.1 – Визуализации сетки

Следующим этапом выделения сейсмических трасс является построение «матрицы близости» между линиями сетки с помощью функции *metrics.dtw_path* библиотеки *tslearn*. Данная функция предназначена для вычисления оптимального пути динамического временного выравнивания (Dynamic Time Warping, DTW) между двумя временными рядами. Этот метод широко используется в задачах классификации, кластеризации и анализа временных рядов в различных областях, таких как биометрия, медицина и экономические прогнозы.

Динамическое искажение времени (DTW) изначально было представлено как алгоритм сопоставления образцов для распознавания речи [15]. Метод находит оптимальное выравнивание двух временных рядов путем нелинейного растяжения и сжатия одного временного ряда вдоль его оси времени, пока он не преобразовался в другой. DTW эффективен и точен при сопоставлении временных рядов с нелинейными колебаниями по оси времени, например, для задач распознавания речевых сигналов или выделения сейсмических трасс.

Пусть временные ряды представлены в следующем виде:

$$traceM = m_1, m_2, \dots, m_i, \quad (3.1)$$

$$traceN = n_1, n_2, \dots, n_j. \quad (3.2)$$

Определим термин выравнивание между двумя элементами временного ряда m_i и n_j , как расстояние между i и j элементами:

$$dist(m_i, n_j) = (m_i - n_j)^2. \quad (3.3)$$

По всем таким расстояниям строим некоторый путь *Path*, который будет отображать соответствие двух временным рядам.

$$dist(p_k) = dist(m_i, n_j) = (m_i - n_j)^2, \quad (3.4)$$

где p_k — k -й элемент пути *Path*.

$$Path = p_1, p_2, \dots, p_K, \quad (3.5)$$

где K — длина пути.

Оптимальным путем между рядами будет считаться:

$$DTW(M, N) = \min \left\{ \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{k=1}^K dist(p_k)} \right\}, \quad (3.6)$$

где деление на K позволяет учитывать различную длину *Path* [16].

Функция *metrics.dtw_path* принимает на вход два одномерных массива X и Y для последующего построения пути между ними. Выходными данными метода являются оптимальный путь выравнивания и соответствующее суммарное расстояние, что позволяет пользователям эффективно анализировать и сравнивать временные ряды с учетом временных несоответствий.

В алгоритме с помощью предложенной функции в рамках скользящего окна (условной ϵ -окрестности), размера *WINDOW_WIDTH*, вычисляются

оптимальные пути между точками двух рядов [17]. Все такие пути объединяются в данной работе в термин «матрица близости» (рис. 3.2).

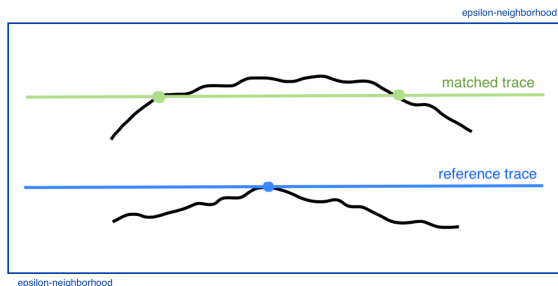


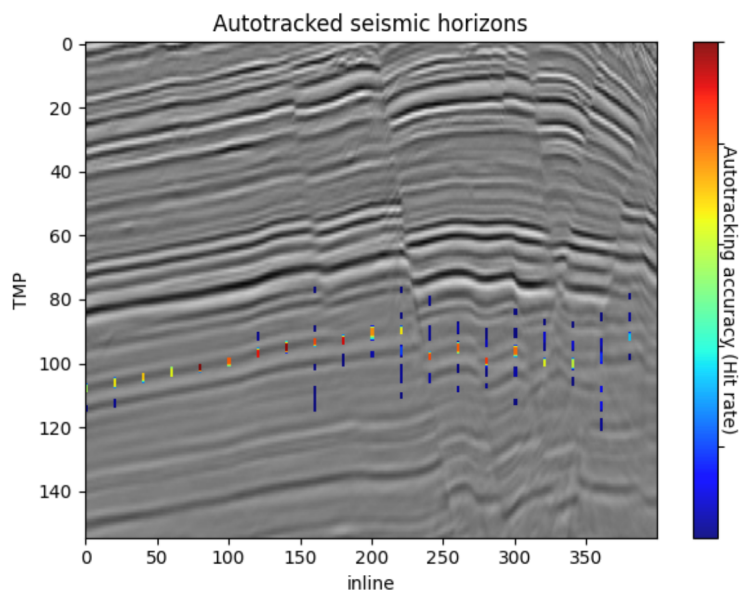
Рисунок 3.2 – Теоретическая визуализации двух линий в ϵ -окрестности для поиска оптимальных путей между совпадающими точками

На третьем этапе алгоритма реализуется нахождение локальных экстремумов на линиях сетки. Так как весь алгоритм основан на сравнении градиента серого цвета пикселей, то под нахождением экстремумов подразумевается определение самых ярких точек на прямых.

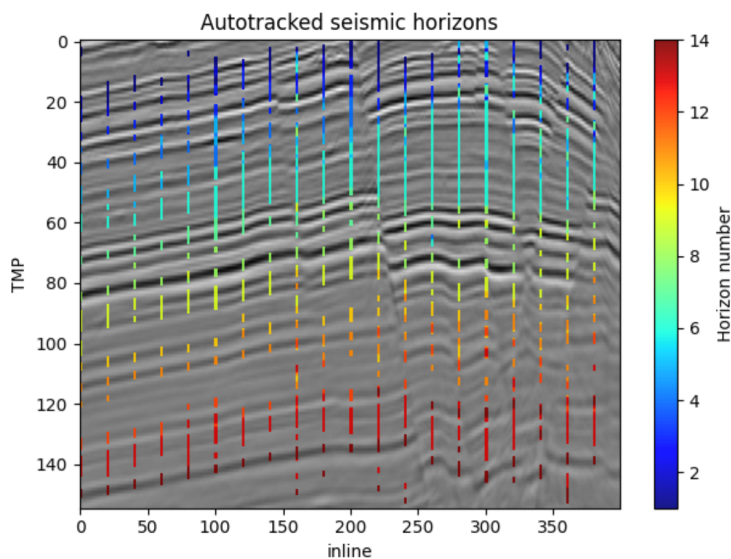
Для реализации этого пункта был использован метод «*argrelextrema*» библиотеки `scipy.signal`, который применяется для определения относительных экстремумов в одномерных массивах данных. Функция принимает на вход массив, в нашем случае линии сетки, критерий для сравнения элементов массива, в работе используется «*np.greater*» (максимум), а также целое число, указывающее, сколько соседних точек слева и справа от каждой точки должны использоваться для определения экстремума (параметр `POINTS_TO_COMPARATOR_COUNT`). Функция «*argrelextrema*» возвращает набор индексов элементов массива, которые соответствуют найденным локальным экстремумам.

Следующим пунктом является итерация по всем линиям сетки. В скользящем окне сравниваются все значения из матрицы близости с точками локальных экстремумов рассматриваемой на данном шаге линии. При совпадении, точка на референсной линии отмечается как «посещенная». Чем ча-

ще точка получает такой статус, тем ярче она визуализируется на срезе сейсмического куба. Поскольку используется ϵ -окрестность и итеративно посещаются трассы, то каждая линия будет повторно посещена несколько раз, что создает несколько возможных мест совпадения. В результате получают распознанные трассы с шумом (рис. 3.3).



(a) Десять трасс



(b) Все трассы

Рисунок 3.3 – Визуализация «посещенных» точек на срезе сейсмокуба

Последней частью алгоритма выделения сейсмических трасс служит фильтрация по самым часто посещаемым, предполагая что

такие точки являются самыми точными. С помощью параметра *HITRATE_PER_TRACE_PERCENT* регулируется количество отбрасываемых точек. Результат работы алгоритма представлен на рисунке 3.4.

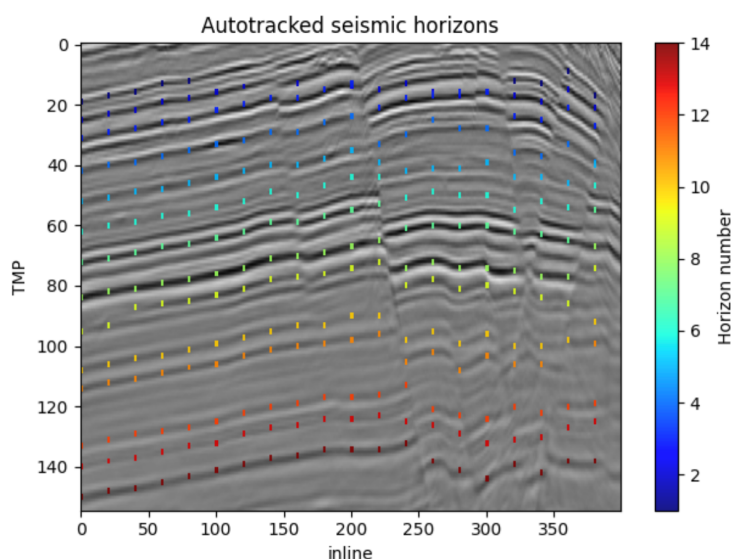


Рисунок 3.4 – Визуализации трасс на срезах сейсмического куба

Полученные точки сейсмических трасс были визуализированы в Paraview. На рисунке представлена определенная трасса на трех соседних сейсмических срезах (рис. 3.5).

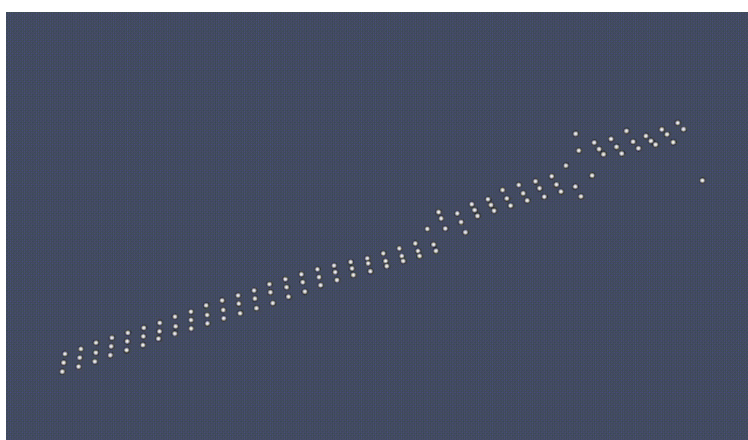


Рисунок 3.5 – Визуализации трасс на срезах сейсмического куба в Paraview

3.2 Зависимость результатов выделения сейсмотрасс от выбранных параметров алгоритма

Шаг сетки и размер скользящего окна (ϵ -окрестности) являются ключевыми параметрами алгоритма. Важно обеспечить достаточное количество трасс, представленных с каждой стороны разрыва, для достижения оптимального соотношения смещенных горизонтов. Увеличение шага сетки способствует повышению вычислительной эффективности, позволяя быстрее обрабатывать большие объемы данных. Размер окна должен быть выбран таким образом, чтобы превышать размеры разлома, что позволяет корректно учитывать все структурные особенности и минимизировать вероятность пропуска значимых геологических элементов.

Результаты работы алгоритма при изменении шага сетки представлены на рис. 3.6, 3.7, 3.8. Можно заметить, что при уменьшении шага сетки время выполнения работы значительно увеличивается и повышает вычислительную сложность задачи, однако качество распознавания трасс ухудшается. Такое явление может происходить из-за того, что сетка становится слишком мелкой, что затрудняет распознавание трасс около разломов. Другой причиной является нахождение недостаточного количества пересечений потенциально возможных точек в алгоритме.

При увеличении размера шага сетки количество распознанных точек на трассах увеличивается, что способствует более точному построению поверхностей. Если продолжить углублять сетку, то точек на трассах становится меньше, что может привести к неточному построению поверхностей.

- *GRID_STEP*: 30
- *WINDOW_WIDTH*: 100
- Время расчета: 0.986 сек

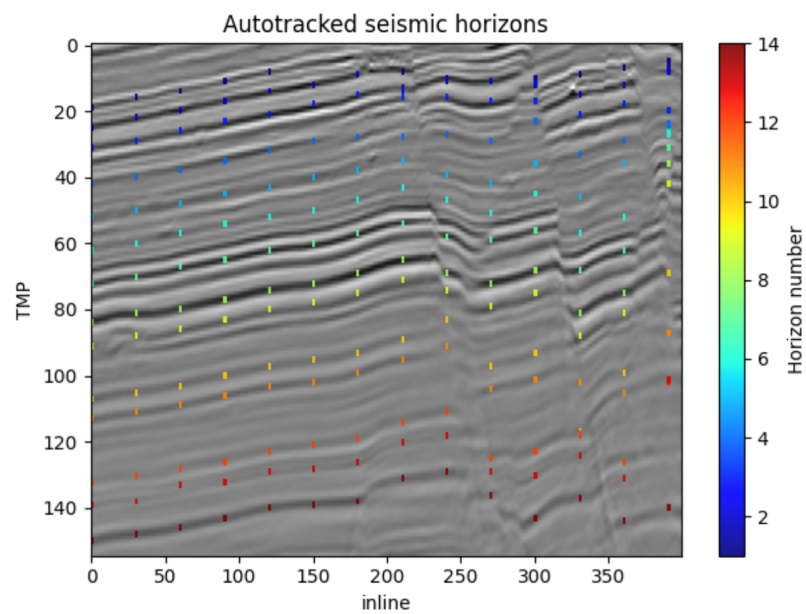


Рисунок 3.6 – Визуализации трасс на срезах сейсмического куба

- *GRID_STEP*: 20
- *WINDOW_WIDTH*: 100
- Время расчета: 1.920 сек

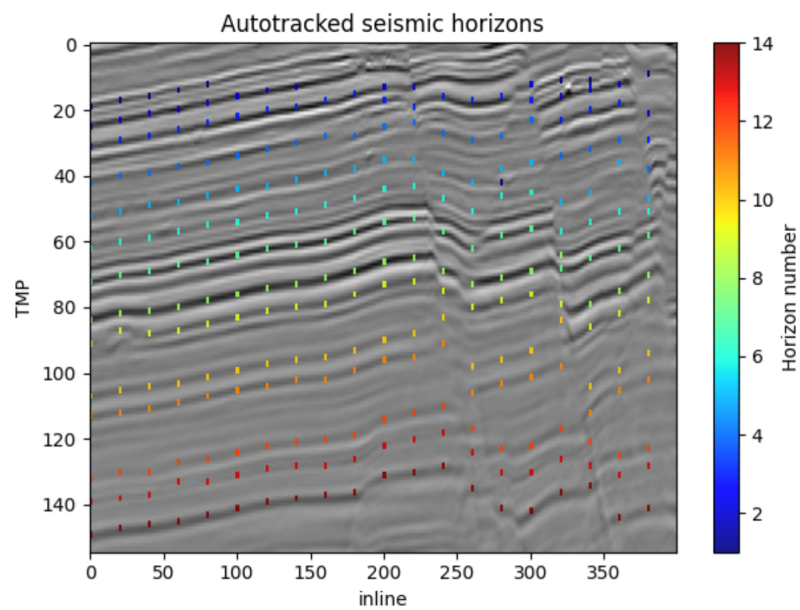


Рисунок 3.7 – Визуализации трасс на срезах сейсмического куба

- *GRID_STEP*: 5
- *WINDOW_WIDTH*: 100
- Время расчета: 526.264 сек

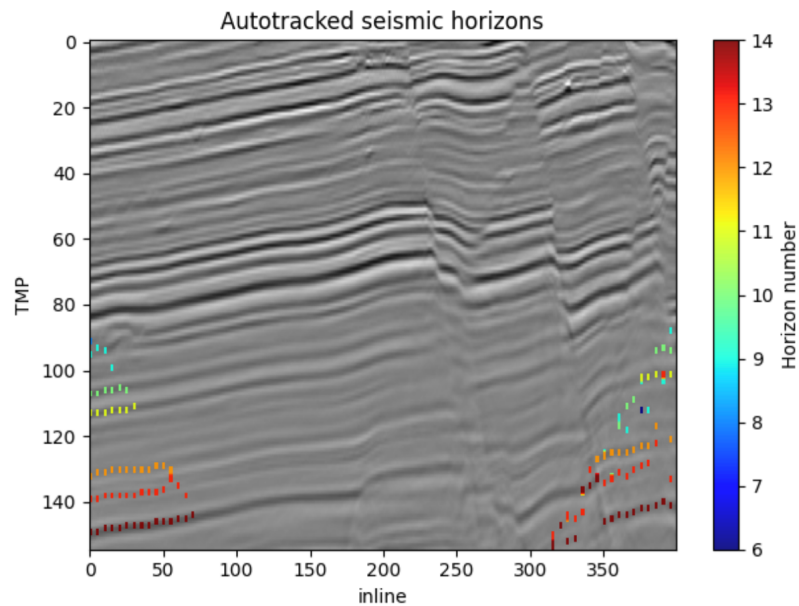


Рисунок 3.8 – Визуализации трасс на срезах сейсмического куба

Работы алгоритма также зависит от изменении параметра размера скользящего окна. Если выбрать слишком малую ϵ -окрестность, то некоторые сейсмические трассы перестают прослеживаться (рис. 3.10) и теряется точность результатов. Если же параметр слишком велик, то это может привести к анализу лишней информации. Алгоритм начинает захватывать шум, что приводит к искажениям выделения сейсмотрасс. Таким образом, также критически важно поддерживать баланс при выборе параметра скользящего окна, чтобы обеспечить точность и надежность распознавания трасс.

- *GRID_STEP*: 20
- *WINDOW_WIDTH*: 150
- Время расчета: 2.056 сек

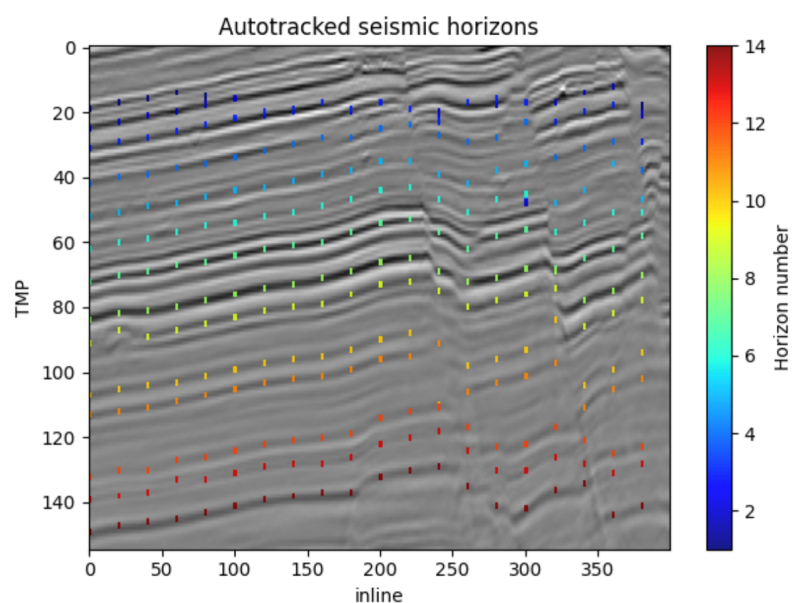


Рисунок 3.9 – Визуализации трасс на срезах сейсмического куба

- *GRID_STEP*: 20
- *WINDOW_WIDTH*: 30
- Время расчета: 0.942 сек

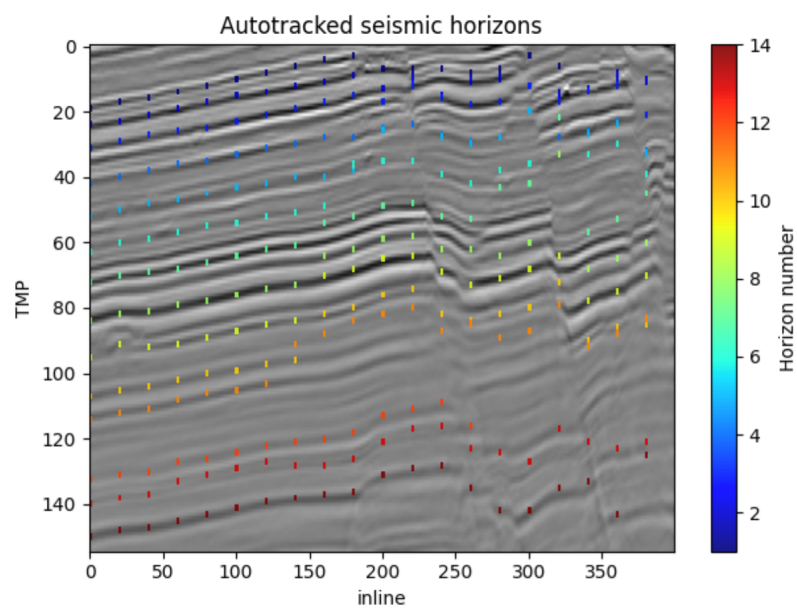


Рисунок 3.10 – Визуализации трасс на срезах сейсмического куба

3.3 Создание поверхностей по сейсмическим трассам

Первоначально, выделенные сейсмические трассы представляют собой наборы точек, которые необходимо соединить для формирования непрерывных геологических поверхностей. Для такого моделирования используются полигональные сетки.

Сеточное моделирование позволяет аппроксимировать сложные формы и поверхности, представлять данные в удобной форме для анализа и обработки, а также проводить численные расчеты в различных областях науки. Сетки играют важную роль в компьютерной графике, численном моделировании, инженерных расчетах, геологии и визуализации научных результатов.

Вычислительная сетка состоит из простых геометрических форм, таких как узлы, ребра, грани и ячейки. Все элементы сетки взаимосвязаны. Узлы могут задаваться не только координатами, но и информацией о цвете, текстуре, и векторе нормали. Ребра представляют собой соединения между двумя узлами, например, между точками сейсмической трассы. Грани образуют замкнутое множество ребер, чаще всего представляющее собой треугольники или четырехугольники. Ячейки в своей структуре объединяют все три термина.

Точки, соединенные с помощью ребер и полигонов, позволяют создать сетку, отображающую геометрическую структуру поверхности, сгруппированную в различные зоны и слои. Существует множество различных типов ячеек и сеток, и их выбор зависит от конкретной задачи и возможностей используемого решателя. Выбор сетки оказывает существенное влияние на скорость сходимости системы, точность решения и вычислительное время для достижения результата моделирования.

В данной работе была выбрана треугольная сетка для моделирования геологических поверхностей. Преимущества такой сетки включают в себя

хранение общих вершин в единственном экземпляре, что уменьшает требуемую память, и согласованность сеточных данных: изменение одного узла автоматически влияет на все связанные с ним треугольники.

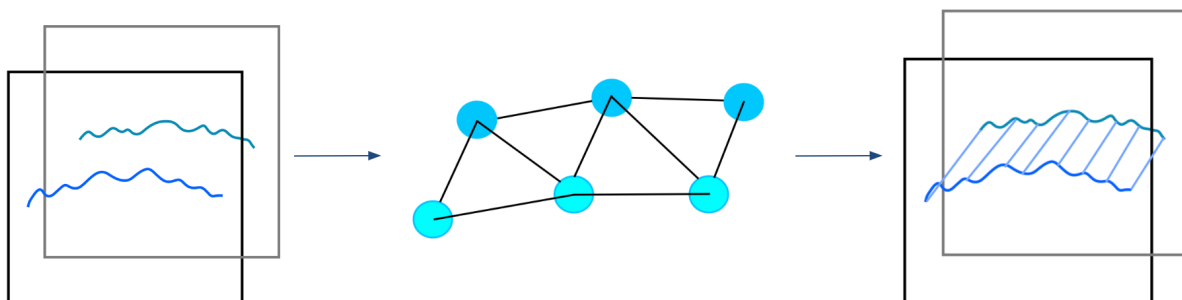


Рисунок 3.11 – Теоретическая визуализации построения поверхности из двух сейсмотрасс

Создание вычислительной сетки для гидродинамического моделирования (ГДМ) начинается с построения водонепроницаемого каркаса, который обеспечивает точное и полное представление о геологической структуре. Каркас создается путем определения границ моделируемой области, учитывая все тектонические особенности, включая разломы, породы и другие геометрические неоднородности. После построения каркаса он используется в качестве основы для последующего разбиения на вычислительные ячейки, которые составляют сетку. Таким образом, такой этап построения сетки является фундаментом, на котором базируется весь процесс гидродинамического моделирования, обеспечивая надежное и точное воспроизведение физических процессов (рис.3.12) [18].

Процесс построения водонепроницаемого каркаса включает несколько ключевых этапов, каждый из которых важен для обеспечения точности и надежности конечной модели.

Первоначально все поверхности триангулируются, что позволяет пре-

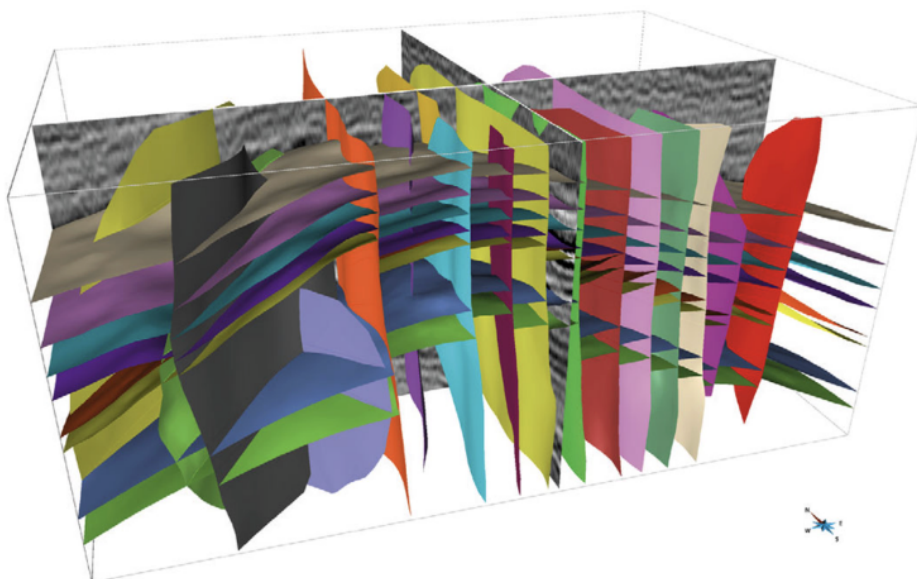


Рисунок 3.12 – Пример визуализации водонепроницаемого каркаса

образовать сложные геометрические формы в более простые треугольные элементы. Это упрощает дальнейшие вычисления и анализ. Затем устанавливаются линии пересечений, которые представляют собой кривые, образованные на границе взаимодействия различных поверхностей. Эти линии пересечений необходимы для точного определения геометрии пересекающихся объектов. В окрестности разломов такие сетки могут становиться неконформными.

После этого ненужные куски поверхностей отсекаются, что позволяет удалить из модели все избыточные элементы, не влияющие на итоговый результат. Поверхности раздела зон проектируются на горизонт, что упрощает процесс визуализации и анализа различных слоев среды.

Одним из важнейших этапов является установление области интереса (area of interest). Эта область представляет собой часть модели, в пределах которой все поверхности полностью заданы или имеют меньший объем. Ограничение всех поверхностей областью интереса позволяет сфокусировать ресурсы вычислений на наиболее значимых частях модели.

После ограничения областью интереса все поверхности подвергаются

повторной триангуляции конформным образом. Это означает, что триангуляция производится так, чтобы все элементы были согласованы между собой, что обеспечивает целостность и непрерывность модели.

Водонепроницаемый каркас, созданный таким образом, можно использовать для предварительного анализа коллектора до проведения симуляции добычи. В частности, он позволяет оценить количество углеводородов в геологических ловушках и провести предварительный анализ связности этих ловушек. Это предоставляет важную информацию для дальнейшего планирования и оптимизации процессов добычи ресурсов.

Достроенные поверхности с разломами по полученной информации о выделенных сейсмических трассах в [section:methods]подразделе 3.1 будут представлять из себя водонепроницаемый каркас.

Алгоритмом распознавания сейсмических трасс было выделено пятнадцать трасс, три из которых имели не полную информацию и содержали в себе шум. В связи с чем было выбрано двенадцать трасс для дальнейшего исследования и построения геологических поверхностей с разломами.

Каждая трасса включает двадцать распознанных точек. Важным аспектом построения поверхности является учет краевых точек, индексы которых выделены красным цветом на рисунке 3.13. Это необходимо для предотвращения создания избыточных полигонов, которые могут исказить данные.

При правильной нумерации точек с учетом вышеизложенного, соединяя их треугольниками, создается первое приближение сейсмической поверхности, не учитывающее разломы и разрывы. Также важно учитывать порядок соединения узлов сетки при создании полигонов (рис. 3.13, стрелки в прямоугольнике), поскольку это необходимо для дальнейшего гидродинамического моделирования.

Для визуализации результатов построения поверхности используется программный пакет Paraview (рис. 3.14, 3.15). Файлы в формате VTK иг-

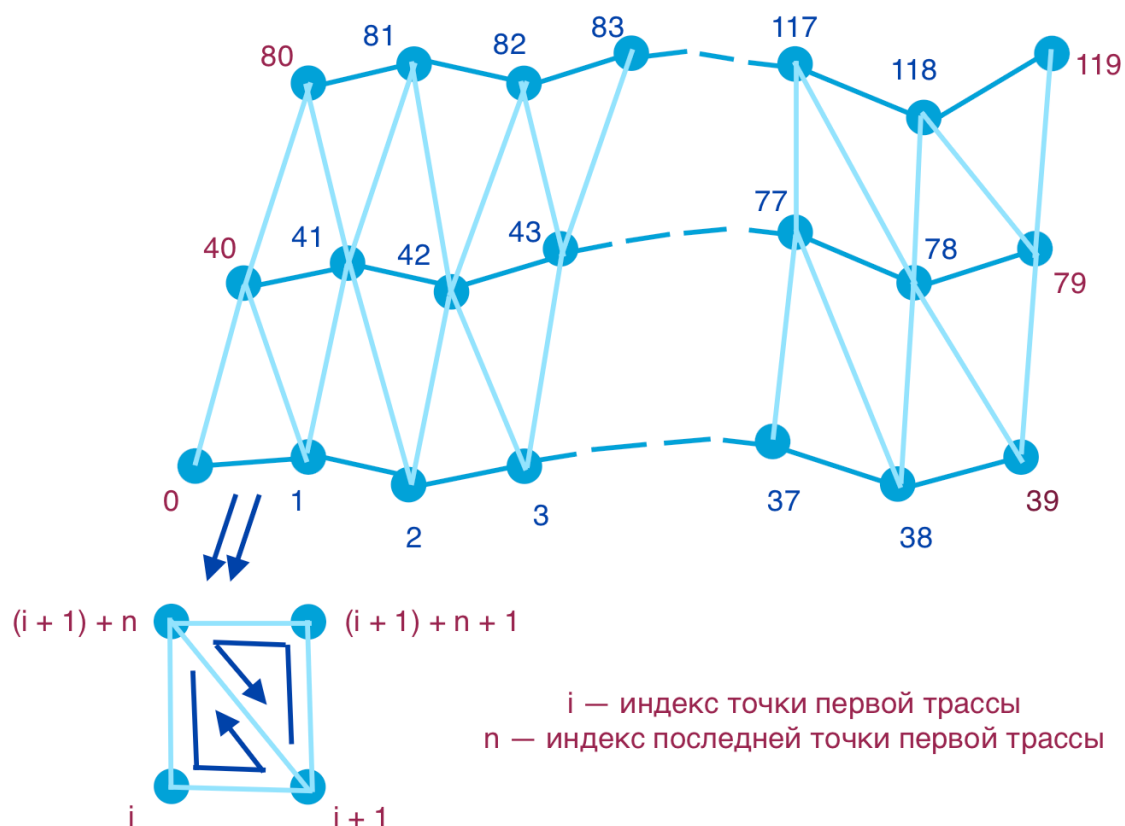


Рисунок 3.13 – Визуализации теоретического построения поверхности

рают ключевую роль в этом процессе, так как они обеспечивают совместимость данных с Paraview и позволяют эффективно отображать сложные трехмерные геологические структуры. Формат VTK поддерживает хранение данных о точках, полигональных ячейках и их связях, что делает его идеальным выбором для представления геологических слоев. При использовании Paraview, данные из файлов VTK импортируются и преобразуются в интерактивные трехмерные визуализации, которые позволяют исследователям подробно анализировать физические особенности и получать ценную информацию для дальнейших исследований и принятия решений.

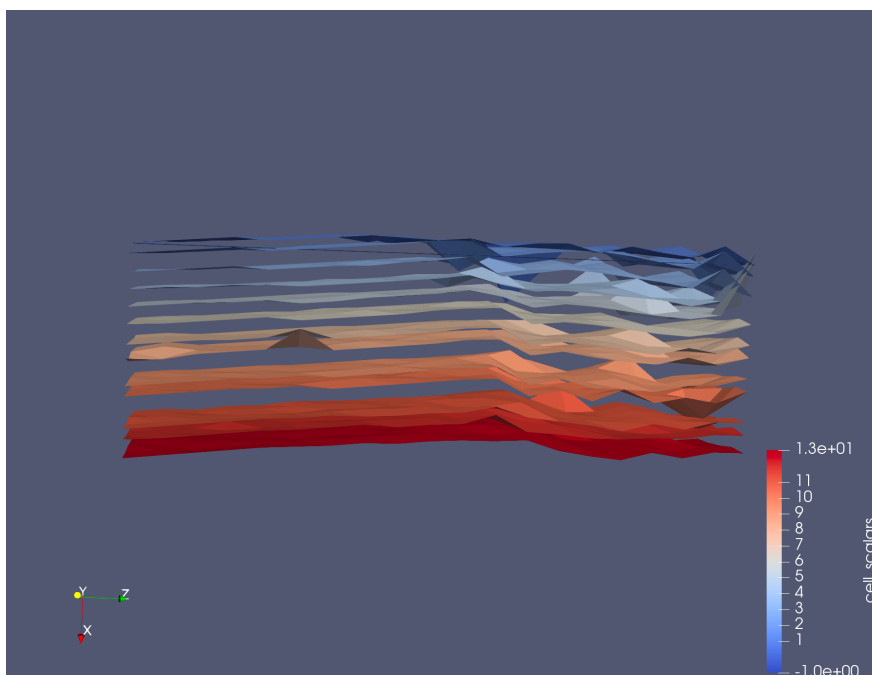


Рисунок 3.14 – Визуализации первого приближения поверхностей всего сейсмического куба в Paraview

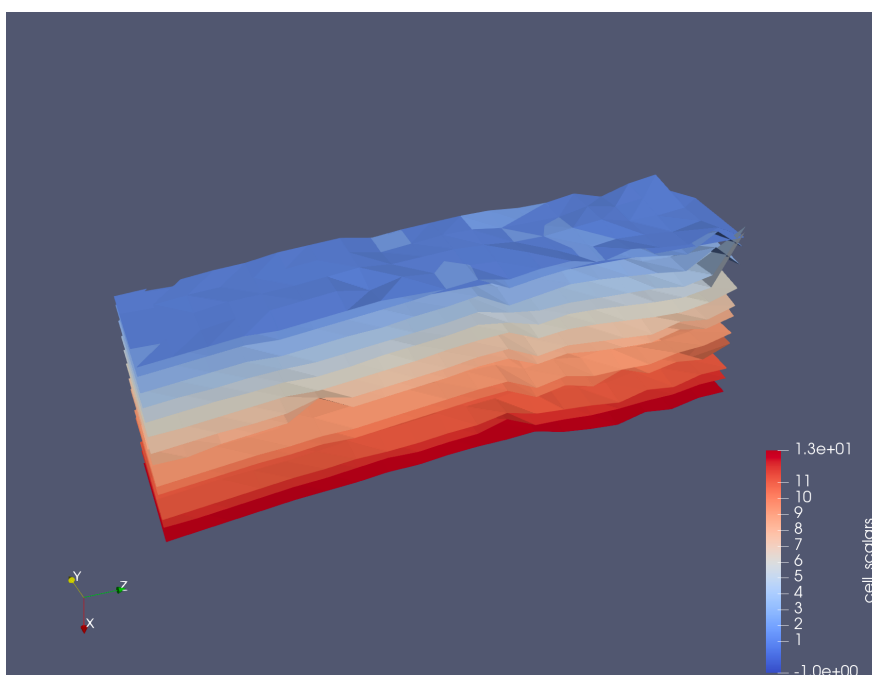


Рисунок 3.15 – Визуализации первого приближения поверхностей всего сейсмического куба в Paraview. Вид сверху

3.4 Метод реконструкции разломов на поверхностях

Метод выделения тектонических нарушений на построенных поверхностях основывается на знании, где произошел разлом и построении его по-

верхности (рис. 3.16).

Первым шагом является вычисление мест разломов. Если при итеративном проходе по точкам выделенных трасс наблюдается резкое изменение градиента, то это сигнализирует о наличии разрыва и запоминается первый индекс, где произошло такое событие. Далее все точки с выраженным изменением градиента заменяются на новые усредненные, чтобы сгладить поверхности.

Последним этапом является построение вертикальных плоскостей, которые соответствуют разломам, между соседними поверхностями. С помощью соединения точек, где произошли резкие изменения градиентов и впоследствии усредненных, и новых, которые лежат на соседней поверхности, полигонами получается полноценная плоскость разрыва (рис. 3.17, 3.18).

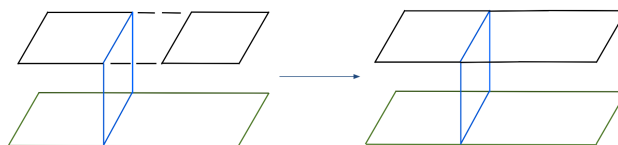


Рисунок 3.16 – Визуализация теоритического достраивания разломов

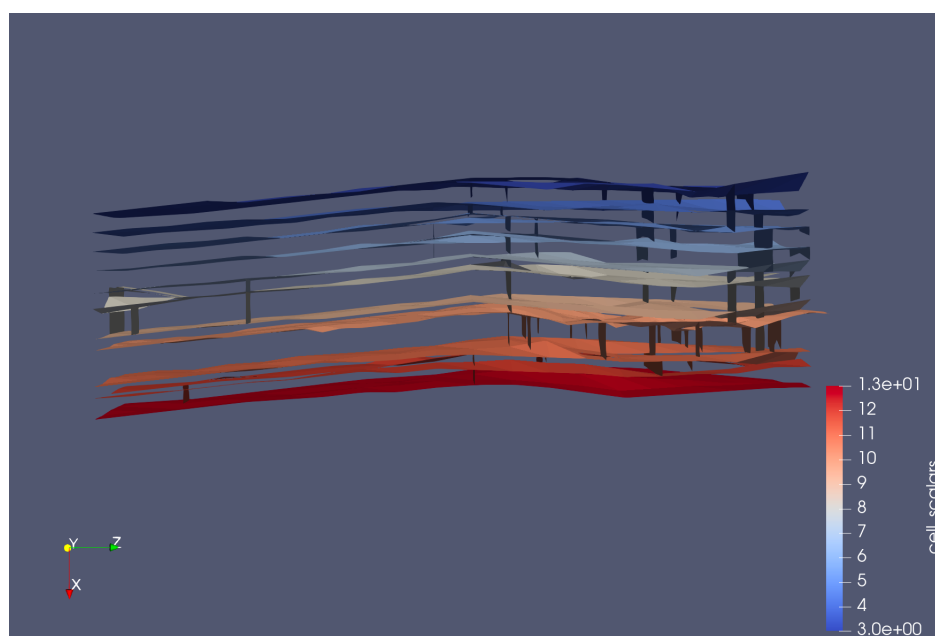


Рисунок 3.17 – Визуализация геологических поверхностей с разломами в Paraview

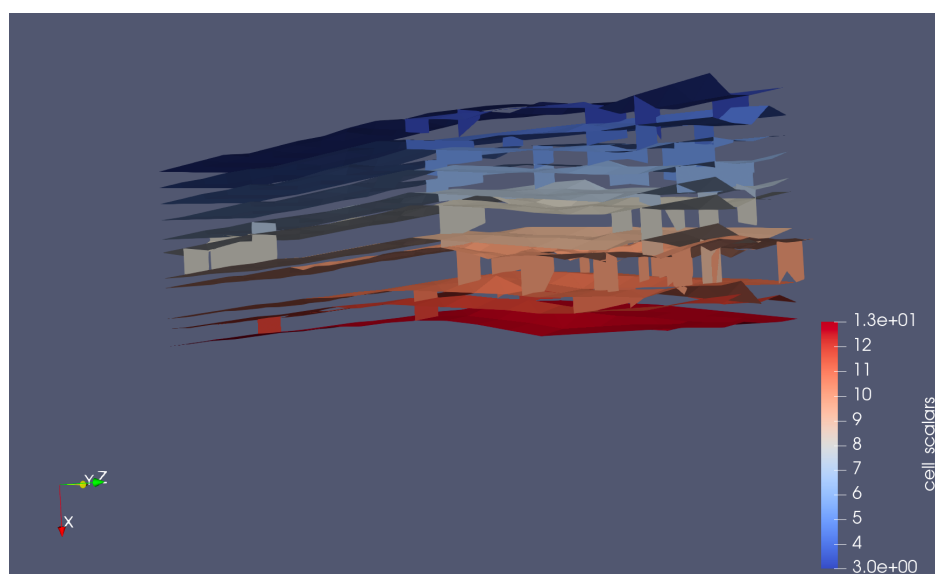


Рисунок 3.18 – Визуализация геологических поверхностей с разломами в Paraview. Вид сбоку

4 АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной главе проводится сравнение результатов выделения сейсмических трасс с разрывами, которые легко прослеживаются в сейсмическом кубе, и результатов моделирования геологических поверхностей с учетом разломов. Как видно на представленном рисунке (рис. 4.1), наблюдается совпадение мест разломов, что свидетельствует о высоком качестве моделирования.

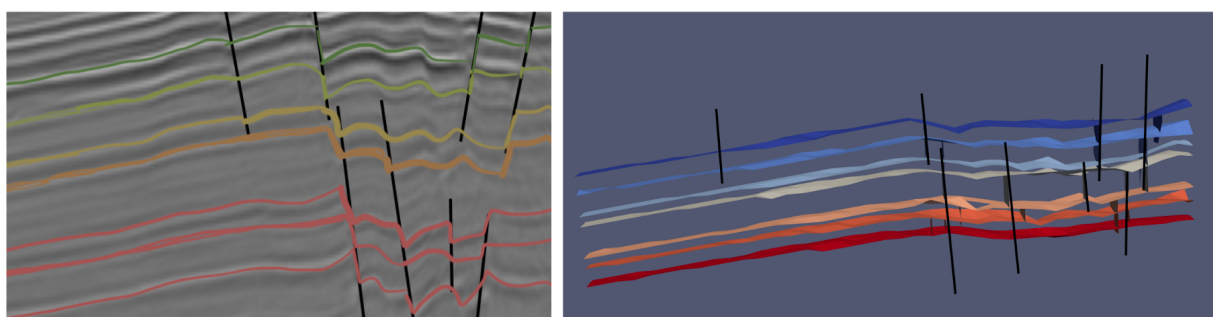


Рисунок 4.1 – Сравнение разломов в срезе сейсмического куба и полученных при моделировании поверхностей на том же номере среза

Тем не менее, несмотря на хорошие визуальные результаты, выявляются определенные неточности. Для повышения точности и надежности модели можно применить несколько методов.

Во-первых, следует усовершенствовать код для распознавания сейсмических трасс. Это может включать настройку параметров алгоритма для оптимального выделения трасс или снижения жесткости алгоритма при отсечении лишнего шума, что позволит выявить большее количество трасс. Кроме того, можно разработать методологию увеличения количества точек на выделенной трассе или интерполяцию кривых, что повысит детализацию и точность модели.

Во-вторых, привлечение методов машинного обучения (ML) и нейронных сетей (NN) может существенно улучшить результаты. Однако для этого

потребуется значительное расширение базы данных для обучения, что доступно только крупным компаниям с обширными сейсмическими объемами. Машинное обучение и нейронные сети могут помочь автоматизировать процесс распознавания и моделирования, улучшая качество и скорость анализа сейсмических кубов.

Кроме того, следует проводить регулярные проверки и калибровки модели на основе новых данных. Постоянное обновление и проверка алгоритма позволит своевременно выявлять и исправлять ошибки.

Все рассмотренные меры могут помочь в достижении более высокой точности и надежности геологических моделей.

5 ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

5.1 Практическое применение результатов

Результаты, полученные алгоритмом выделения сейсмических трасс в сейсмокубе и последующего построения геологических поверхностей с разломами, имеют значительное практическое применение в геологоразведке и добыче полезных ископаемых. Эти данные позволяют более точно определить местоположение и конфигурацию геологических структур, что существенно улучшает прогнозирование расположения месторождений нефти и газа.

Важным аспектом применения алгоритма является его использование для моделирования процесса добычи полезных ископаемых. Этот алгоритм позволяет не только оценить количество углеводородов, содержащихся в геологических ловушках, но и провести предварительный анализ их связности. Такая информация является критически важной для дальнейшего планирования добычи и оптимизации процессов извлечения ресурсов. За счет точного определения связности и объема углеводородов можно более эффективно разрабатывать стратегии бурения, что способствует снижению затрат и увеличению рентабельности добычи.

Примеры успешного применения таких методов можно наблюдать в различных проектах по всему миру. В частности, успешное моделирование сейсмических данных с разломами позволило увеличить точность оценки запасов углеводородов в Северном море, а также оптимизировать планы бурения и снизить риски в операциях по добыче. Аналогичные подходы были успешно применены в нефтяных месторождениях на шельфе Бразилии и в Пермском бассейне в США, где улучшенная интерпретация сейсмических данных привела к более эффективному освоению месторождений.

5.2 Перспективы направления дальнейших исследований

Перспективы дальнейших исследований в области анализа сейсмических данных и моделирования тектонических нарушений выглядят весьма многообещающе, особенно с учетом стремительного развития новых технологий. В частности, применение методов машинного обучения (ML) и искусственного интеллекта (AI) открывает новые возможности для более точного и быстрого анализа сейсмических данных без использования ручной разметки.

Методы машинного обучения могут существенно улучшить процессы распознавания и моделирования разломов. Автоматизация анализа данных с использованием нейронных сетей и других алгоритмов ML позволяет обрабатывать большие объемы данных с минимальным вмешательством человека, что значительно ускоряет процесс и снижает вероятность ошибок. В будущем такие подходы могут стать стандартом в индустрии, обеспечивая высокую точность и эффективность геологоразведочных работ.

Также перспективным направлением является интеграция сейсмических данных с данными других типов, такими как геологические карты, результаты бурения и спутниковые изображения, обеспечивая более полное и точное представление о структуре подземных слоев. Разработка методов для более эффективного объединения различных источников данных может привести к созданию более точных и надежных моделей подземных структур с детальным представлением о тектонических нарушениях.

Развитие новых технологий имеет потенциал значительно улучшить точность и эффективность геологоразведки и добычи полезных ископаемых, открывая новые возможности для научных и практических достижений в данной области.

6 РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе был разработан и реализован алгоритм распознавания сейсмических трасс на срезах сейсмокуба с помощью высокоуровневого языка программирования Python. В качестве входных данных использовался сейсмический куб в градиенте серого цвета в формате SEG-Y, используемый стандарт данных для обмена геофизическими данными.

Прототип алгоритма выделения сейсмотрасс был предложен группой норвежских ученых [19]. Метод, предложенный в работе [19] был адаптирован под конкретное исследование восстановления разрывных нарушений пласта, ускорен и модифицирован, что позволило получить легкий и понятный для дальнейших исследований алгоритм без лишней потребляемой памяти.

Метод использует несколько ключевых параметров, описанных в [section:methods] подразделе 3.1, которые позволяют адаптировать метод под определенные структурные особенности. Такой способ реализации позволяет получить гибкий алгоритм, применимый к различным сейсмическим кубам с тектоническими нарушениями. Метод имеет алгоритмическую сложность равную кубической размерности от сетки и требует выделения памяти пропорционально квадрату ее размерности.

Алгоритм использует несколько функций программных пакетов Python для достижения качественного и надежного метода выделения сейсмических трасс. С помощью функции *metrics.dtw_path* библиотеки *tslearn* вычисляются оптимальные пути между точками двух рядов. *Argrelextrema* из библиотеки *scipy.signal* предлагает эффективный метод нахождения локальных экстремумов. Использование готовых программных пакетов и библиотек на Python значительно повышает эффективность разработки, улучшает качество программного обеспечения и предоставляет доступ к современным техноло-

гиям.

По распознанным трассам в сейсмическом кубе были смоделированы геологические слои с помощью полигональных сеток. Триангуляция позволяет эффективно интерполировать данные и формировать непрерывные поверхности, что обеспечивает более точное моделирование подземных структур. Такие модели играют ключевую роль в геологоразведке, так как позволяют детально визуализировать расположение и конфигурацию различных пластов с тектоническими нарушениями, что важно для оценки запасов полезных ископаемых и планирования буровых работ.

Последним этапом работы является восстановление параметров разрывных нарушений пластов. При резком изменении градиента можно наблюдать нарушения в гладкости потенциальной сейсмотрассы, что свидетельствует о наличии геологических нарушений. Строение разлома в точках нарушения позволяет получить законченную 3D модель подземных поверхностей.

В [section:practical_{work}]4..2D, .

Для визуализации полученных итогов моделирования в 3D пространстве использовался программный пакет Paraview. Результаты алгоритма записываются в файл формата VTK, которые позволяют эффективно отображать сложные геологические структуры.

Заключение

В ходе данной работы была проведена серия исследований, направленных на моделирование геологических поверхностей на основе данных сейсмического куба. Основное внимание уделялось анализу распознанных сейсмических трасс и их использованию для построения полигональных сеток, моделирующих геологические слои с разломами.

В рамках работы были реализованы три этапа моделирования:

1. 2D-модель выделения сейсмических трасс. С помощью полученного адаптивного алгоритма можно обрабатывать сейсмокубы для дальнейшей интерпретации сейсмических данных. При подборе параметров удастся учесть разрывы и разные тектонические особенности подземной структуры.

2. 3D-модель построения поверхностей по выделенным сейсмотрассам. С помощью сеток удалось аппроксимировать полученные сейсмические трассы до непрерывных подземных пластов. Результатом данного этапа является первое приближение поверхностей без распознанных геологических разломов.

3. Алгоритм восстановления параметров разрывных нарушений пласта. В данном алгоритме была изучена корреляция изменения направления градиента на сеймотрассах и наличия разломов в сейсмическом кубе, а также 3D-моделирование построения разрывов.

Применение результатов для геологоразведки и добычи полезных ископаемых поможет в процессе автоматизации и интерпретации данных. Модель позволяет оценить количество углеводородов в геологических ловушках и провести предварительный анализ их связности. Это предоставляет важную информацию для дальнейшего планирования и оптимизации процессов добычи ресурсов, что способствует снижению рисков и повышению экономической эффективности проектов.

Для дальнейшего развития необходимо усовершенствовать модель, рассматривая методы машинного обучения и искусственного интеллекта. Применение ML может значительно повысить точность и скорость обработки сейсмических данных. Для этого потребуется значительное расширение базы данных для обучения алгоритмов. Также перспективными направлениями является интеграция алгоритма с данными других типов, например, геологическими картами. Такой способ позволит получить более полное представление о структуре подземных слоев.

Список использованных источников

1. *Боганик Г. Н., Гурвич И. И.* Сейсмическая разведка. — М.: Недра., 1980.
2. *Полевой А. В.* Полевой этап получения сейсмических данных: Учебно-методическое пособие к курсам повышения квалификации «Петрофизика и геофизика в нефтяной геологии». — ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 2013.
3. *Мартышко П. С., Ладовский И. В., Цидаев А. Г.* Построение региональных геофизических моделей на основе комплексной интерпретации гравитационных и сейсмических данных. // Физика земли. — №. 11. — 2010. — С. 23—35.
4. *Кочнев В. А., Гоз И. В.* Возможности гравиметрии и магнитометрии при интерпретации сейсмических данных. // Геофизика. — №. 4. — 2008. — С. 28—32.
5. *Бондарев В. И.* Основы сейсморазведки. — Екатеринбург: УГГГА., 2003.
6. *Ярошевский В.* Тектоника разрывов и складок. — Геологическое издание// Варшава, 1981.
7. *Sheriff R. E.* Encyclopedic dictionary of applied geophysics. — Society of exploration geophysicists, 2002.
8. *Bonham Carter G.* Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. — Elsevier, 1994. — №. 13, 1994.

9. Михайлов В. О. Совместная интерпретации данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере алтайского (чуйского) землетрясения. 27.09. 2003 г. // Физика Земли. – 2010. – №. 2. — 2010. — С. 3—16.

10. Вожаева Ю. С. Применение методов машинного обучения в задачах интерпретации сейсмических данных. // Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности. — 2022. — С. 260—262.

11. Bondar I. Seismic horizon detection using image processing algorithms. // Geophysical Prospecting. – Т. 40. – №. 7. — 1992. — С. 785—800.

12. Wu H. Semiautomated seismic horizon interpretation using the encoder-decoder convolutional neural network. // Geophysics. – Т. 84. – №. 6. — 2019. — B403—B417.

13. Geng Z. Deep learning for relative geologic time and seismic horizons. // Geophysics. – 2020. – Т. 85. – №. 4. – С. WA87-WA100. — 2020.

14. Yang L., Sun S. Z. Seismic horizon tracking using a deep convolutional neural network. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Т. 187. – С. 106709. — 2020.

15. Sakoe H., Chiba S. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition: IEEE Transactions on acoustics, speech and signal processing. — 1978.

16. Романенко А. А. Выравнивание временных рядов: прогнозирование с использованием DTW. // Машинное обучение и анализ данных.— Т. 1. – №. 1. — 2011. — С. 77—85.

17. *Bugge A. J., Lie J. E., Clark S.* Automatic facies classification and horizon tracking in 3d seismic data. // First EAGE/PESGB Workshop Machine Learning. – European Association of Geoscientists Engineers. — 2018. — C. 1—3.

18. *Thenin D., Larson R.* Natural fracture characterization from 3D structural attributes. // CSEG Recorder. – T. 39. — 2014. — C. 28—35.

19. *Bugge A. J.* Aspects of automated seismic interpretation. — 2020.