

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кемеровский государственный университет»
(КемГУ)

На правах рукописи

Степанов Иван Юрьевич



Методика создания информационно-аналитического обеспечения
обнаружения дизъюнктивных нарушений в горных породах
на основе интеллектуального анализа сейсмических данных

1.6.20. Геоинформатика, картография

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук
Бурмин Леонид Николаевич

Кемерово – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ	11
1.1 Описание проблематики предметной области.....	11
1.2 Сущность способа геофизической разведки	13
1.3 Обзор существующих программных решений	17
1.4 Особенности построения моделей пластов	29
1.5 Технология исследования шахтного поля на наличие дизъюнктивных нарушений породного массива.....	30
1.6 Выводы по первому разделу	36
2 МЕТОДЫ АНАЛИЗА НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....	39
2.1 Методы регистрации структурных нарушений угольных пластов	39
2.2. Алгоритмы машинного обучения детектирования дизъюнктивных нарушений.....	42
2.3 Адаптация архитектуры нейронных сетей семейства автоэнкодеров.....	53
2.4 Интерпретация полученных результатов	63
2.5 Визуализация пластов.....	68
2.6 Выводы по второму разделу	75
3 АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.....	78
3.1 Описание концептуальной модели цифрового решения	78
3.2 Описание структуры информационной системы	85
3.3 Описание информационной модели ГИС.....	90
3.4 Визуализация получаемых результатов и создание картографических материалов	96
3.5 Выводы по третьему разделу	100
4 МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ТЕМАТИЧЕСКИХ КАРТ ДИЗЪЮНКТИВНЫХ НАРУШЕНИЙ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ.....	103
4.1 Подготовка исходных данных	103

4.2 Описание технологии апробации системы.....	110
4.3 Построение тематических карт и 3D-моделей угольных пластов	123
4.4 Интерпретация и анализ геопространственных данных	139
4.5 Выводы по четвертому разделу	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Рыночные условия, складывающиеся в России, требуют перехода угольной промышленности на высокоинтенсивные технологии выемки угля, которые могут быть достигнуты за счет автоматизации производственных процессов угледобычи и увеличения качества принимаемых решений. Наличие дизъюнктивных нарушений является одним из факторов, способных привести к полной остановке ведения горных работ, поэтому важно своевременно выявлять такие нарушения в пределах шахтного поля.

Одной из причин, снижающих эффективность внедрения высокоинтенсивных технологий выемки угля, является отсутствие методик прогнозирования и моделирования разломов горных пород с использованием ГИС-технологий. До сих пор существующие методы и инструменты обнаружения нарушений горного массива ограничены в своей точности и применимости, поскольку не интегрируемы в распространенные ГИС-решения.

Отсутствие единого геоинформационного пространства порождает необходимость работы в нескольких программных системах с разнородными данными и плохо совместимыми форматами. Избыточная широта цифрового инструментария не позволяет с нужным уровнем достоверности оперативно принимать решения об упреждающем изменении в технологическом процессе ведения горных работ. К тому же, влияние человеческого фактора на интерпретацию результатов анализа данных сейсморазведки, ввиду объемов и разнородности исходных данных, может привести к высокому уровню ошибки при обнаружении нарушения, а его пространственная локализация и вовсе невозможна.

Отечественные наработки в этой сфере, хоть и имеют возможности интерфейсной интеграции, не обладают самостоятельной функциональностью моделирования и анализа, позволяющей обеспечить качественное составление паспорта выемочного участка с учетом предполагаемого развития нарушений в горной породе на основе геопространственных данных.

Использование современных архитектур глубокого обучения позволит как выявлять разрывные нарушения в реальных данных об объектах, так и моделировать поведение сейсмограмм, имитируя наличие нарушений, с целью балансировки обучающих выборок для других архитектур.

В связи с этим целесообразно конструировать специализированные геоинформационные системы с открытой архитектурой, способные не только хранить атрибутивные данные с геопространственной привязкой, но и проводить интеллектуальный анализ данных сейсмограмм. Такая система позволит получать результаты исследования с высокой достоверностью выявления дизъюнктивных нарушений горных пород.

Таким образом, для устойчивого функционирования высокопроизводительных предприятий по подземной разработке пластовых месторождений целесообразно использование специализированных ГИС-приложений для формирования тематических трехмерных картографических геоизображений на основе обработки пространственно-атрибутивных данных моделей горного массива.

Актуальность исследования заключается в применении современных подходов к конструированию, специализированных ГИС и адаптации алгоритмов машинного обучения для выявления дизъюнктивных нарушений на основе обработки массивов геопространственных данных.

Степень разработанности темы изучена по опубликованным работам в сфере теоретических и прикладных аспектов проектирования и разработки геоинформационных систем Алексева В. В., Ивакина Я. А., Шека В. М., Потресова Д. К., Степанова Ю. А., Карпика А. П., Лисицкого Д. В. и др., основ геоинформатики – Берлянта А. М., Бескида П. П., Биденко С. И., Тикунова В. С. и др., методов прогнозирования влияния горно-геологических условий на процесс угледобычи – Анциферова А. В., Батугина А. С., Захарова В. Н., Зыкова В. С., Клишина В. И., Коликова К. С., Курлени М. В., Опарина В. Н., Лапина С. Э. и др.

Целью исследования является разработка информационно-аналитического обеспечения геоинформационных систем выявления дизъюнктивных нарушений

в углепородном массиве на основе нейросетевого анализа сейсморазведочных данных и компьютерного моделирования геометрии сплошности породного массива, направленного на выбор и обоснование технологии выемки угля при составлении паспорта выемочного участка для обеспечения стабильной и безопасной работы угольного предприятия при ведении горных работ.

Идея работы состоит в системном подходе к компьютерному моделированию геометрии сплошности горных пород на основе анализа данных, с использованием методов машинного обучения и средств электронного картографирования, для выбора и обоснования технологического процесса выемки угля.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие *задачи исследования*.

1 На основе ранее выполненных исследований проанализировать технологию процесса интерпретации данных, полученных в результате проведения сейсморазведочных работ, пригодных для формирования киосков данных по каждому горному отводу.

2 Выбрать и обосновать методы машинного обучения для выявления дизъюнктивных нарушений горных пород на основе анализа данных сейсморазведки.

3 Разработать архитектуру информационно-аналитического обеспечения специализированной ГИС для создания специализированных программных средств электронного картографирования горногеологического строения массивов горных пород в пределах угольных отводов предприятия на основе полученных данных методами глубокого обучения.

4 Адаптировать методику создания информационно-аналитического обеспечения построения тематических карт с указанием мест дизъюнктивных нарушений горных пород.

Объектом исследования являются тектонические дислокации породных массивов в виде дизъюнктивных нарушений сплошности геологических тел.

Предметом исследования являются алгоритмы определения дизъюнктивных нарушений методами глубокого обучения на основе геопространственных данных, полученных в результате проведения сейсморазведочных работ.

Научная новизна диссертационных исследований состоит в том, что:

- предложены методы и подходы к обработке и анализу сейсмических данных с целью выявления дизъюнктивных нарушений горных пород с использованием искусственных нейронных сетей архитектурного семейства автоэнкодеров;
- разработана архитектура специализированной ГИС, позволяющей строить геометрическую модель пласта и визуализировать результаты анализа сейсмических данных для выявления разрывного нарушения углепородного массива в рамках динамической интерпретации данных сейсморазведки ОГТ;
- разработана методика построения тематических карт дизъюнктивных нарушений угольных пластов на основе смоделированных геопространственных данных и предложен способ группировки данных в операционные тематические витрины на основе модифицированного плотностного пространственного алгоритма кластеризации с шумами.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии новых методов и инструментов анализа данных сейсморазведки и выявления дизъюнктивных нарушений горных пород для информационной поддержки управленческих решений по предотвращению аварийных ситуаций с использованием предложенных видов компьютерных геоизображений. Разработанные методы и подходы к проектированию и реализации специализированной ГИС могут быть применены и в других областях знаний, требующих анализа геологических структур и моделирования геометрии пластов для расширения возможностей и получения более качественного представления о структуре горных пород.

Практическая значимость работы заключается:

- в упрощении маркшейдерской подготовки данных для ведения горных работ при эксплуатации специализированных программных средств электронного картографирования с использованием хранилища данных о горно-геологическом строении массивов горных пород;
- ускорении идентификации геологических тел с дизъюнктивными нарушениями методами глубокого машинного обучения и уточнении положения дефектов

структуры углепородного массива в пределах выемочного участка с использованием динамических параметров отраженных волн и ретроспективных данных о свойствах горных пород.

Методология и методы исследований. В процессе выполнения работы использовались методы геоинформационного картографирования; статистической обработки и использования геопространственных данных с применением распределенных баз данных и знаний; математического и имитационного моделирования; объектно-ориентированного проектирования и программирования; методы нейросетевого анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1 Качество обработки геопространственных данных обеспечивается использованием современных интеллектуальных методов нейросетевого анализа и технологий искусственного интеллекта для поиска аномальных областей горного массива, позволяет улучшить процесс исследования геологического строения породного массива и повысить эффективность добычи полезных ископаемых.

2 За счет применения предметно-ориентированных программных решений, реализованных в виде специализированного ГИС-приложения с открытой архитектурой, позволяющего прогнозировать местоположение разломов горных пород, повышается достоверность принимаемых управленческих решений и рекомендаций при проектировании и эксплуатации горнотехнических систем, по сравнению с применением типовых ГИС.

3 Адаптивность компьютерных систем поддержки принятия решений к горно-геологическим условиям при проектировании горнотехнических систем в специализированной ГГИС обеспечивается использованием компьютерного моделирования подземной части горного предприятия с использованием средств электронного трёхмерного картографирования горно-геологического строения углепородного массива и горных выработок на основе объектно-ориентированного подхода и проведением декомпозиции массива данных на операционные витрины, позволяющие объединять данные из различных источников.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Основные положения диссертации соответствуют областям исследования: 11 – Геоинформационные системы (ГИС). Математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение ГИС и их приложений, 12 – Методы и технологии визуализации пространственных данных. Создание анимационных, виртуальных геоизображений и других мультимедийных продуктов на основе пространственных данных. Геоинформационное картографирование и 19 – Большие данные в задачах геоинформационного и картографического моделирования. Разнородные, разномасштабные и разновременные пространственные данные, вопросы их интеграции и совместного использования. Применение искусственного интеллекта для обработки пространственных данных паспорта научной специальности 1.6.20. Геоинформатика, картография, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Диссертация выполнена в рамках соглашения № 075-15-2022-1195 от 30.09.2022, заключенного между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Кемеровский государственный университет». Результаты работы использованы при разработке специализированного программного обеспечения в рамках инициативной НИР ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных научно-практических конференциях: VI Международной научно-практической конференции «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (Прокопьевск, 2018 г.); VIII Международной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (Томск, 2019 г.); II национальной конференции «Актуальные вопросы науки и техники: проблемы, прогнозы, перспективы» (Кемерово, 2020 г.); XVII Международной научной конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования в физике, математике и информатике» (г. Кемерово, 2022 г.); Международной конференции «Научные исследования стран ШОС: синергия и интеграция»: доклады участников на английском языке (Пекин, 2021 г.); на заседаниях научных семинаров Института фундаментальных наук (Кемерово, 2018–2022 г.).

Публикации по теме диссертации. Основные положения и результаты исследований отражены в 12 научных работах, 2 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 2 публикации – в журналах, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus, получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 169 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 125 наименований, содержит 2 таблицы, 65 рисунков.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

1.1 Описание проблематики предметной области

Дизъюнктивное нарушение угольных пластов – это нарушение целостности угольных пластов, которое происходит в результате деформации горных пород, вызванной действием различных факторов, таких как геологические процессы, нестабильность инженерных сооружений, эксплуатация угольных месторождений и т. д. Дизъюнктивное нарушение угольных пластов является одним из основных рисков при ведении горных работ, связанных с отработкой угольных пластовых месторождений [66].

Задача поиска дизъюнктивных нарушений угольных пластов заключается в выявлении и анализе зон разломов, трещин, скважин и других деформационных процессов в горных породах, что может привести к образованию опасных газовых выбросов, пожаров, осадков и др [65]. Для этого необходимо использовать современные методы геофизических и геологических исследований, которые позволят определить границы и характер деформационных зон, а также предсказать возможные последствия нанесения ущерба эксплуатируемым угольным пластам и окружающей среде [83].

В настоящее время используются такие методы геофизических и геологических исследований [26], как:

- 1) сейсмические исследования – проводятся для определения глубинного строения горных пород и выявления зон деформации;
- 2) гравитационные и магнитные методы – используются для оценки плотности горных пород и определения расположения трещин и разломов;
- 3) геодезические методы – позволяют определять изменения деформации горных пород во времени;
- 4) гидрогеологические исследования – используются для изучения водных режимов в горных породах и выявления мест утечки подземных вод;

5) радиационные методы – позволяют обнаруживать наличие газов в горных породах;

б) бурение скважин – позволяет получать непосредственные данные о характере горных пород, их плотности и структуры, а также наличии различных деформационных зон.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения и используется в зависимости от конкретной ситуации. Но несмотря на то, что классические методы геофизических и геологических исследований являются эффективными во многих ситуациях, они имеют и свои ограничения [43]. Одним из ключевых моментов применения данных методов является время выполнения. Эти методы могут быть довольно затратными по времени, особенно при обработке больших объемов данных, как входных, так и выходных [80].

Также стоит отметить вопрос точности снятия показаний. К сожалению, далеко не все классические методы способны обеспечить абсолютную точность из-за некоторых геостатистических сложностей, а также связанной с интерполяцией и экстраполяцией данных вероятности возникновения ошибок [1]. К тому же, стоит учесть, что некоторые из классических методов могут быть неприменимы в труднодоступных или опасных районах, что обуславливает их ограниченность с точки зрения применимости.

Ресурсоемкость — еще одна проблема, ведь традиционные исследования часто требуют значительных затрат на оборудование, материалы и человеческие ресурсы. Не стоит забывать и об экологическом аспекте, так как проведение традиционных исследований, в частности геологических бурений, может сопровождаться неблагоприятным воздействием на окружающую среду.

Несмотря на эти ограничения, классические методы сохраняют свою значимость в геофизических и геологических исследованиях, формируя основу для более детального понимания структуры и процессов Земли [14]. Однако их применение необходимо грамотно балансировать с использованием современных подходов и технологий.

Метод анализа сейсмотрасс является одним из распространенным и эффективным инструментом для решения задачи поиска дизъюнктивных нарушений в горных породах и демонстрирует ряд значительных преимуществ, одним из наиболее заметных является его способность обеспечивать детальные внутренние изображения недр Земли. Это позволяет исследователям глубже понять структуру горного массива, что неопределимо при изучении геологических процессов, поиск нефти и газа, а также для проведения инженерно-геологических изысканий.

Метод анализа сейсмотрасс также характеризуется высокой точностью измерений. Он представляет собой точный инструмент для определения расположения и характеристик различных геологических структур, включая разломы, пласты и кровли. Кроме того, метод анализа сейсмотрасс способен к применению на больших пространственных масштабах. Он может применяться для исследования как местного участка, так и целых регионов, что делает его универсальным инструментом геофизического исследования [49].

Однако, стоит отметить, что применение этого метода требует определенного профессионального знания и опыта, а также сложного оборудования. Но с учетом великолепной разрешающей способности и глубины проникновения, возможности данного метода значительно превышают его ограничения. Помимо этого, анализ сейсмотрасс имеет одно неявное преимущество – визуализируя сейсмотрассы, исследователь может наглядно сделать предположение о наличии или отсутствии дизъюнктивных нарушений, так как поверхность сейсмотрасс, полученных при исследовании угольных пластов с дизъюнктивными нарушениями, не будет «плавной», т. е. будет иметься разрыв первого рода для описывающей аппроксимирующей гиперплоскости.

1.2 Сущность способа геофизической разведки

Сейсморазведка представляет собой геофизический метод исследования, который использует принципы сейсмологии для картографирования структуры подземных слоев. Основываясь на регистрации и анализе сейсмических волн, которые

возбуждаются искусственно, этот метод применяется во многих отраслях, включая нефтегазовую промышленность, геологию и геотехнику [98]. Он не только обеспечивает получение важных сведений о структуре и состоянии подземных формаций, но также может дать представление об их механических свойствах, что важно для проектирования и выполнения инженерных работ.

Процесс сейсморазведки состоит из нескольких этапов. Первым этапом необходимо создать сейсмическую волну, т. е. сгенерировать направленную акустическую энергию, которая проникает сквозь геологические слои Земли [85]. Она генерируется в результате механического воздействия на горные образования.

Вторым этапом является процесс распространения волны в геологическом теле. При возникновении сейсмических возмущений в геологических слоях возникают различные виды сейсмических волн (рисунок 1).

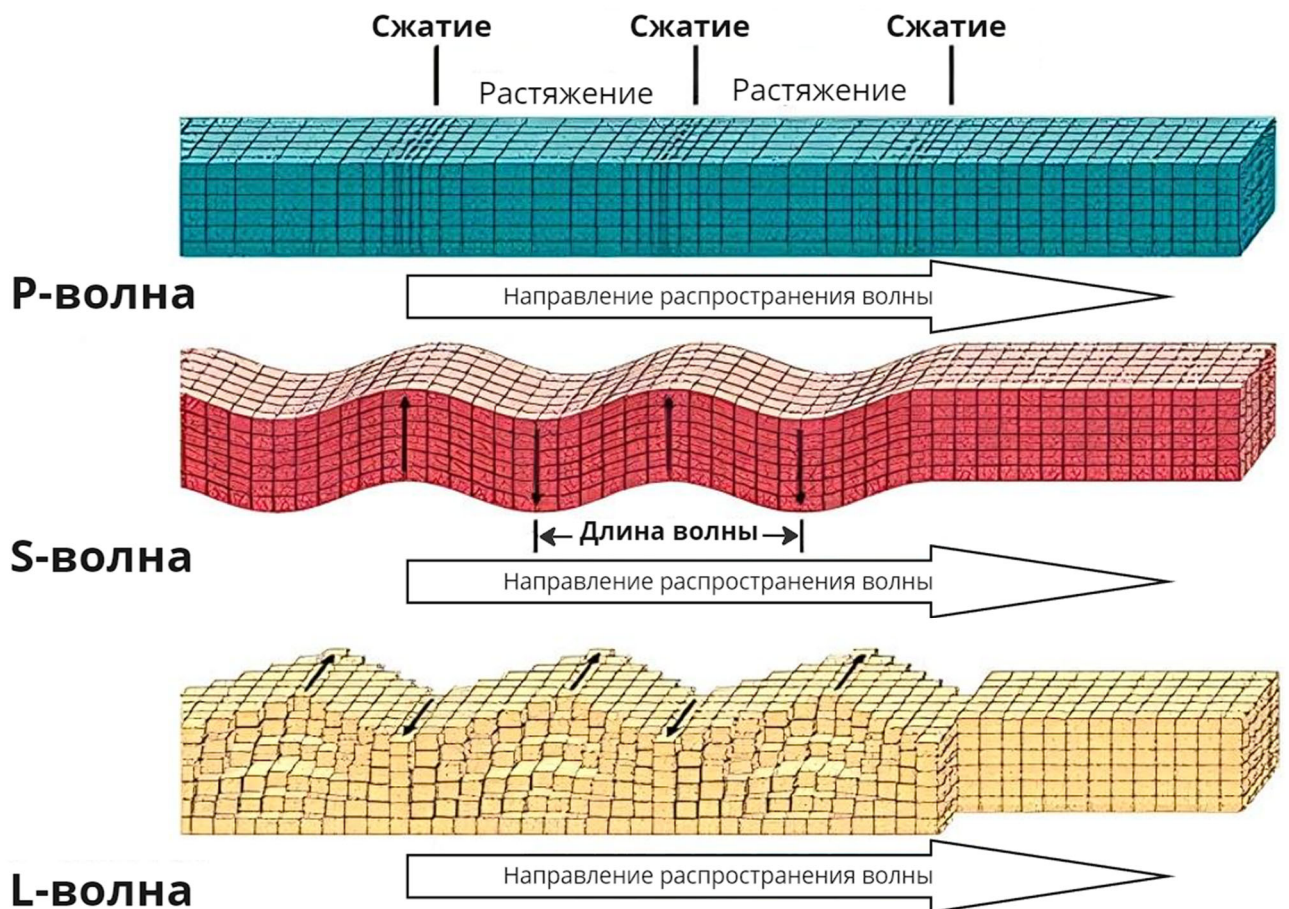


Рисунок 1 – Виды сейсмических волн

Среди них продольные волны, или Р-волны, обладают свойствами, схожими со звуковыми, передвигаясь путем сжатия и растяжения материалов. Они генерируются первыми, поэтому регистрируются сейсмическими станциями вначале. Помимо способности проходить как через твердые, так и жидкие среды, эти волны отличаются высокой скоростью движения. Так, в верхних слоях Земли их скорость составляет около 4–5 км/ч, увеличиваясь до 11 км/ч в центральной части планеты. Их разрушительная сила относительно слаба, вызывает лишь незначительные повреждения, например, разрушение оконных стекол.

С другой стороны, при деформации горных пород посредством сдвига генерируются поперечные, или S-волны. Их скорость передвижения в 1,7 раза ниже, чем у продольных, и они не могут проходить через жидкую среду, такую как магма или вода океана. Поперечные волны могут вызвать серьезные разрушения, исходя из своей скорости и амплитуды.

Существуют также поверхностные сейсмические волны, иначе называемые L-волнами, или длинными. Они не проникают глубже 160 км и обладают бóльшим воздействием на структуры, чем объемные волны. Однако сила этих волн уменьшается в зависимости от расстояния до эпицентра землетрясения. Эти волны распространяются со скоростью 3,2–4,4 км/с и обычно регистрируются после Р- и S-волн. Существует два вида поверхностных волн: волны Рэлея и Лява, первые движутся по эллиптической траектории, а вторые – горизонтально, что может привести к разрушению зданий [48].

Следует также отметить, что Р- и S-волны могут отражаться и преломляться при прохождении через слои Земли, отличающиеся по упругости и плотности. Если эти характеристики меняются постепенно, это приводит к преломлению волн, в то время как резкое изменение вызывает их отражение.

При проведении сейсморазведочных работ большое внимание уделяется анализу различных аспектов сейсмических волн. Основными характеристиками, которые принимаются во внимание, являются время прихода волны, ее амплитуда, частота и поляризация [36].

Время прихода волны — это интервал между моментом создания волны и моментом ее регистрации датчиками. Информация о времени прихода используется для определения скорости волн в различных слоях подземных структур и помогает создать карту скоростей, что в свою очередь позволяет геологам определить глубину и геометрию подземных слоев.

Изменения в амплитуде могут свидетельствовать о различных геологических свойствах породных массивов. К тому же, амплитуда отражает степень затухания волны при прохождении через различные геологические структуры. Частота волны влияет на разрешающую способность сейсмического изображения, так как волны высокой частоты могут предоставить более детальную информацию, но они более подвержены затуханию.

Однако, несмотря на значительные преимущества сейсморазведки, ее эффективность сильно зависит от качества собранных сейсмических данных и сложности геологических структур. В реальности, углепородный массив обычно имеет сложную геологическую структуру со множеством нелинейных границ и аномалий, которые могут затруднить интерпретацию сейсмических данных [5].

Проведение сейсморазведочных работ в условиях неоднородной поверхности земли является сложной задачей, но при этом она обладает определенными особенностями. Основная проблема заключается в том, что поверхностная неоднородность влияет на распространение сейсмических волн и может вызвать их преломление или отражение, что искажает итоговые данные. В этом случае стандартные модели распространения волн, основанные на предположении о гомогенности поверхности, могут не дать достаточно точных результатов.

Для учёта таких сложностей геофизики применяют ряд методов. Один из таких подходов предусматривает использование более сложных моделей распространения волн, которые учитывают неоднородность горных пород. Эти модели позволяют более точно предсказать путь волн и соответственно корректировать полученные данные. Также важную роль играет корректное расположение сейсмических датчиков или геофонов. Размещение геофонов должно быть спланировано так,

чтобы минимизировать влияние поверхностной неоднородности на записываемые данные. Это может потребовать применения большего количества датчиков или более плотного их расположения в неоднородных областях залегания пород [76].

Существуют и другие методы преодоления проблемы неоднородности поверхности, такие как использование различных типов сейсмических волн (Р-волны, S-волны) или разных источников волн (взрывы, удары, вибрационные источники), которые могут вести себя по-разному в различных геологических условиях. Более того, существуют различные методы сейсморазведки, такие как отражательная и просветная сейсморазведка, и выбор между ними определяется поставленными исследовательскими задачами и условиями работы.

Сейсморазведка является критически важным инструментом для изучения подземного мира. Она не только обеспечивает ценную информацию для различных отраслей, включая нефтегазовую и строительную, но и способствует нашему общему пониманию геологических процессов и структур Земли.

1.3 Обзор существующих программных решений

История развития инструментов выявления дизъюнктивных нарушений, в основном, идет параллельно развитию геологии и сейсмологии как наук, и со временем эти инструменты стали все более сложными и точными. В глубокой древности люди замечали признаки дизъюнктивных нарушений, такие как трещины и сдвиги в породном массиве, но у них не было инструментов для их точного определения или изучения. Со временем, по мере развития общества и технологий, люди начали разрабатывать ранние методы и инструменты для исследования геологических структур, включая дизъюнктивные нарушения.

В XVIII в. с развитием научного подхода к изучению мира, начали появляться первые научные теории и инструменты, которые могли быть использованы для исследования дизъюнктивных нарушений. В это время начали разрабатываться первые геологические карты, которые позволяли изучать структуру породного массива и выявлять различные геологические структуры. В XIX в. геологи начали ак-

тивно использовать такие инструменты, как компасы, уровни и теодолиты, для измерения углов и определения горизонтов в геологических структурах. Эти инструменты позволили ученым с большей точностью изучать дизъюнктивные нарушения и понимать их природу.

В XX в. с развитием технологий, в том числе с появлением компьютеров, были разработаны новые и более точные методы и инструменты для выявления дизъюнктивных нарушений. Сейсмическое исследование, радиометрия, гравиметрия и многие другие методы геофизического исследования стали неотъемлемой частью инструментария геолога. На рубеже XX и XXI вв. началось активное использование геоинформационных систем и спутниковых технологий, что позволило не только точнее определять местоположение дизъюнктивных нарушений, но и наблюдать за их динамикой.

Сегодня ученые используют сложное сочетание различных техник и инструментов для изучения и мониторинга дизъюнктивных нарушений, и развитие этих инструментов продолжается. Существуют специализированные программные решения, которые используются для поиска дизъюнктивных нарушений угольных пластов, однако, как и любое другое технологическое решение, они имеют свои недостатки. Большинство этих программ требуют значительной степени обучения и технической подготовки для эффективного использования. Это может быть препятствием для организаций с ограниченными ресурсами или персоналом, не имеющим нужного уровня подготовки. К тому же, остается актуальным вопрос стоимости лицензий на такого рода программное обеспечение, так как они, ввиду своей специфики, могут быть дорогостоящими, а также иметь дополнительные затраты на обновления и поддержку. Это может стать проблемой для малых и средних исследовательских групп и предприятий [2].

Однако, одними из наиболее критичными для работы могут стать недостатки, напрямую связанные с процессом выявления и локализации разрывных нарушений [42]. Так, качество всей работы будет зависеть от качества исходных данных. Поиск дизъюнктивных нарушений зависит от точности и полноты исходных геологиче-

ских и сейсмических данных. Если данные некачественные или неполные, результаты моделирования могут быть неточными или вводящими в заблуждение. Также необходимо помнить, что большинство проприетарных решений лоббируют использование своих собственных уникальных форматов, что увеличивает вероятность того, что данные, в процессе преобразований и конвертации, могут быть испорчены или утрачены.

Недостатками иного рода является недостаток гибкости. Когда мы говорим о недостатке гибкости в контексте специализированных программных решений для поиска дизъюнктивных нарушений угольных пластов, мы подразумеваем, что эти инструменты могут быть недостаточно адаптивными к уникальным условиям и параметрам конкретных геологических структур. Это означает, что они не могут точно моделировать сложные и уникальные геологические процессы, происходящие в угольных пластах [61].

Каждый угольный пласт и регион обладают своими особенностями, такими как характер дизъюнктивных нарушений, глубина залегания угольного пласта, его мощность и другие параметры. Таким образом, в идеале, программное решение для моделирования должно обладать достаточной гибкостью, чтобы вмещать эти разнообразные параметры и обеспечивать точность моделирования [106]. Но в реальности некоторые программные решения могут быть ограничены в своих возможностях. Они могут быть заточены под определенный набор параметров и не способны учитывать все нюансы конкретного угольного пласта или региона. Это может приводить к недостаточной точности моделей и, как следствие, к недостаточно эффективному поиску дизъюнктивных нарушений.

Наконец, стоит упомянуть проблему интерпретации результатов. Модели угольного пласта могут быть сложны для понимания и интерпретации, особенно если они включают в себя сложные геологические структуры и процессы [45]. Это может привести к ошибкам при принятии решений. Использование современных технологий визуализации может существенно помочь в процессе интерпретации моделей. Так, использование 3D-моделей позволяет быстрее производить обзорно-

аналитическую деятельность, а получаемые на основании 3D-модели 2D-срезы в виде сечений в различных проекциях позволяют представить сложные данные в виде понятных и интуитивно ясных изображений и диаграмм, что может помочь как в понимании модели, так и в принятии решений на ее основе.

С развитием технологий было разработано множество программных решений для помощи в исследованиях сплошности геологических тел. Эти решения включают в себя инструменты для сбора, обработки и визуализации данных сейсморазведки, а также для моделирования геологических структур и сценариев [44]. Тем не менее, выбор подходящего решения требует глубокого понимания особенностей каждого программного продукта, включая его возможности по визуализации, геореференцированию данных, поддержке принятия решений и моделированию распространения дизъюнктивных нарушений.

Одним из популярных решений является SeisWare – интегрированное решение для обработки и интерпретации сейсмических данных [116]. Интерфейс программы Geophysics by SeisWare представлен на рисунке 2.

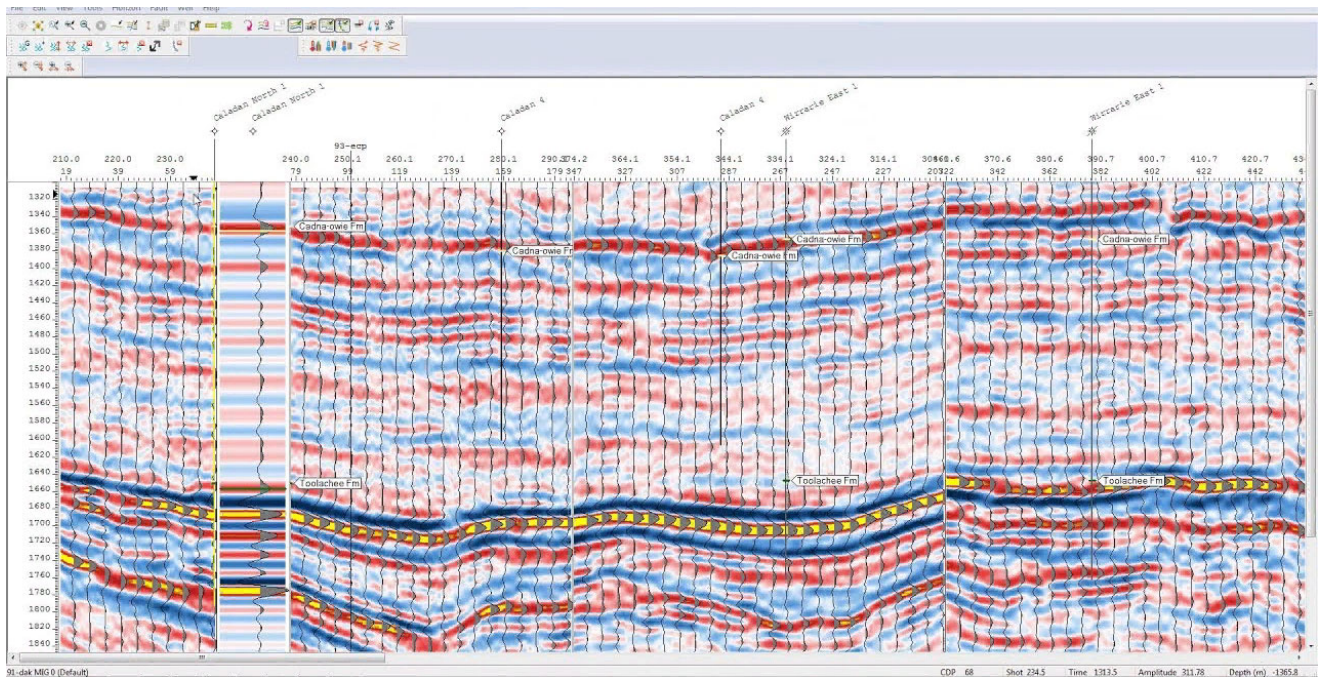


Рисунок 2 – Графический интерфейс Geophysics by SeisWare

Одним из наиболее важных преимуществ Kingdom Suite является его возможность работать с различными типами данных, включая данные сейсморазведки, которые могут быть геореференцированы и визуализированы в формате 2D и 3D. Система позволяет создавать комплексные модели геологических структур, что особенно полезно при выявлении дизъюнктивных нарушений. Кроме того, Kingdom Suite включает в себя систему поддержки принятия решений, которая может облегчить процесс интерпретации данных и определения оптимальных стратегий действий при обнаружении нарушений.

Однако, несмотря на все его возможности, у Kingdom Suite есть и существенный недостаток – отсутствие возможности интеграции накопленных данных в единое хранилище с возможностью использовать их для дальнейшего анализа и моделирования. К тому же, Kingdom Suite является достаточно дорогим решением, особенно для малых и средних компаний, которые не могут позволить себе большие инвестиции в программное обеспечение.

Не менее востребованным в своей профессиональной сфере остается программная платформа Petrel (рисунок 4) [122].

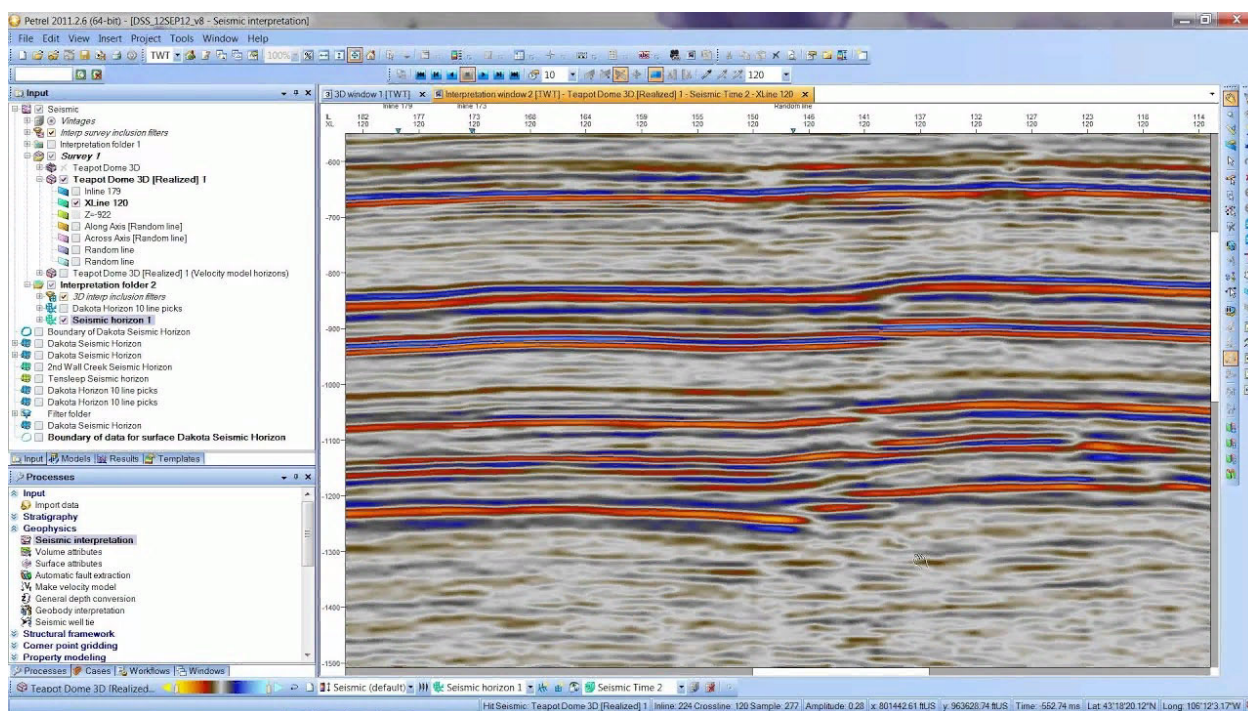


Рисунок 4 – Графический интерфейс Petrel Geophysics

Поставляемые модули «Петро» и «Геофизические исследования» предоставляют такие функциональные возможности, как усреднение в ячейке 3D-модели непрерывных каротажных и точечных данных, использование трендов, распределений и вторичных переменных при моделировании непрерывных свойств.

Платформа также позволяет проводить моделирование распространения петрофизических свойств с помощью детерминистических и стохастических методов, согласовывать модель петрофизических свойств с фациальной моделью, обновлять непрерывные свойства по мере поступления новых скважинных данных, сохраняя при этом связность данных. Все это сопровождается инструментами контроля качества, редактирования и фильтрации непрерывных свойств, а также расчетом средневзвешенных карт по построенному свойству. Но, к сожалению, ввиду неэффективных подходов к построению структурных моделей и 3D-сеток, использование платформы практически неприменимо для районов со сложным тектоническим строением, подсолевыми отложениями или сложно-ориентированными стратиграфически несогласными залежаниями пород.

Перечисленные выше решения являются решениями с закрытым исходным кодом, но OpendTech от dGB Earth Sciences имеет одно важное отличие – открытый исходный код, что позволяет пользователям настраивать его функции в соответствии с их специфическими потребностями и применять новейшие исследовательские методы в рамках уже существующей программной среды, а также имеет возможность встраиваться в среду Petrel в качестве плагина [114]. Вид графического интерфейса OpendTech представлен на рисунке 5.

Это программное решение также поддерживает геореференцирование данных сейсморазведки, обеспечивая надежное представление о пространственном расположении геологических структур. Такой подход обеспечивает более глубокое понимание пространственной динамики дизъюнктивных нарушений.

Однако, несмотря на эти преимущества, у OpendTech есть и некоторые недостатки. Например, хотя он и предоставляет современные инструменты обработки и интерпретации данных, его интерфейс может быть сложным для новых пользователей.

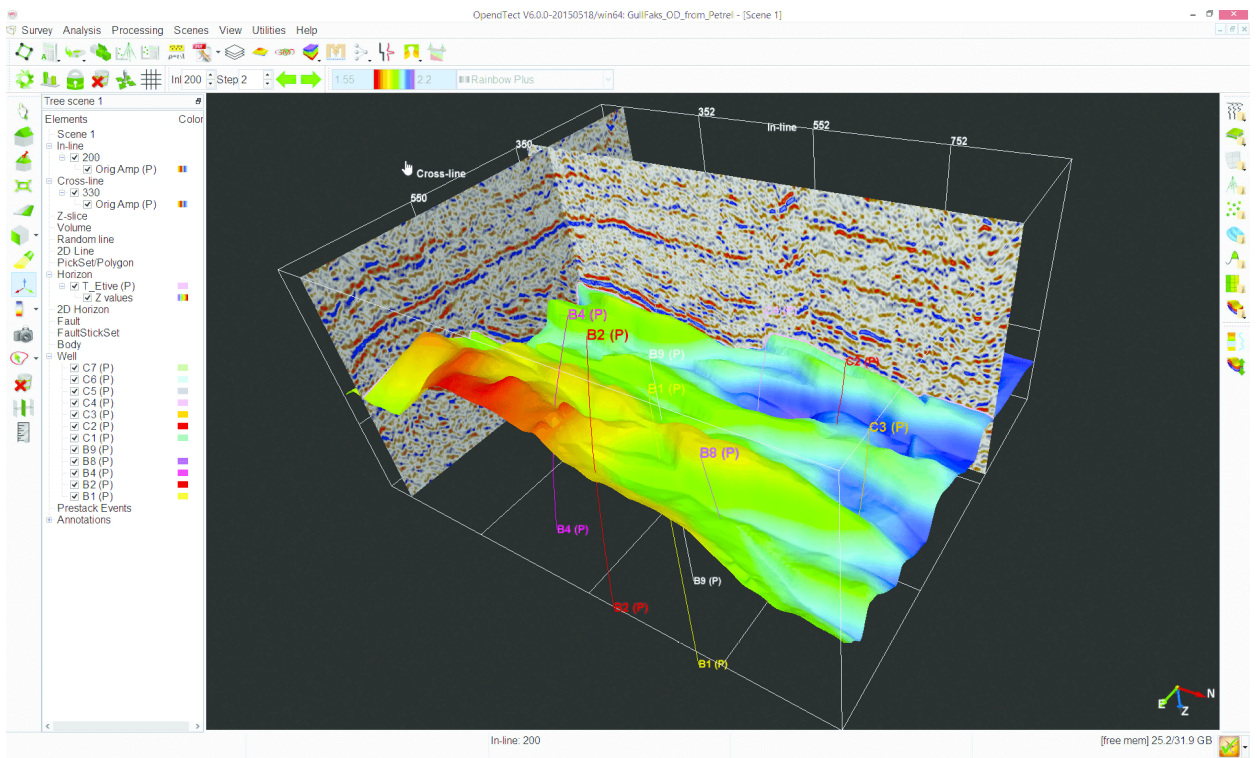


Рисунок 5 – Графический интерфейс OpendTech

Из-за множества функций и инструментов, в нем может быть сложно найти и использовать конкретные инструменты, особенно без подробной документации или обучения. Система поддержки принятия решений в OpendTech также требует достаточного уровня знаний в области сейсмологии и геологии. Если же рассматривать инструменты моделирования распространения дизъюнктивных нарушений, OpendTech предлагает модели для моделирования распространения дизъюнктивного нарушения, но точность этих моделей сильно зависит от качества исходных данных, что делает необходимым внимательный и тщательный сбор и обработку данных, а это, в свою очередь, увеличивает нагрузку на специалиста, проводящего исследование.

Каждое программное решение имеет свои преимущества и недостатки, а также может быть более или менее подходящим для конкретного случая. Выбор подходящей программы зависит от многих факторов, включая доступность данных, бюджет и требования к точности и скорости анализа. Важно отметить, что эти

недостатки не означают, что программные решения неэффективны. Они просто подчеркивают важность того, чтобы при их использовании учитывать эти ограничения и стремиться их преодолеть, чтобы получить наиболее точные и полезные результаты. Однако использование композиции хотя бы пары из таких решений предъявляет повышенные требования к аппаратной составляющей.

Работа с сейсмическими данными требует значительных вычислительных ресурсов, поскольку данные часто бывают очень объемными и сложными для обработки. Поэтому рабочий компьютер должен быть оборудован мощным процессором, большим объемом оперативной памяти и большим объемом хранилища на жестком диске или SSD. Кроме того, для работы с 3D-моделированием и визуализацией данных полезна высокопроизводительная видеокарта. Для детального просмотра и анализа сейсмических данных инженеру-геофизику обычно требуется один или несколько больших мониторов. Двухмониторная или трехмониторная настройка может быть полезна для одновременного просмотра данных сейсморазведки, аналитических программ и других документов.

Часто такие устройства требуются не одному пользователю, а целому отделу, который также задействован при решении схожих или вспомогательных задач. В таком случае особенно остро стоит вопрос о том, как эффективнее хранить и манипулировать данными. Данные сейсморазведки и другие связанные данные часто хранятся на локальных компьютерах специалистов, которые проводят соответствующие исследования. Это приводит к определенным трудностям ввиду затруднительной по скорости и доступу передачи данных от компьютера к компьютеру, дублирования файлов, отсутствия версионирования и резервного хранения рабочих файлов.

Возможным решением проблемы хранения и манипулирования данными может являться хранение данных сейсморазведки и других связанных данных на удаленных серверах или в облаке, однако такое решение требует продуманного подхода, так как эти данные могут быть очень объемными и важными для операций [67]. Следует учесть, что данные сейсморазведки могут быть очень большими, по-

этому они часто требуют большого объема хранилища и высокоскоростного интернет-соединения для загрузки и скачивания. Некоторые облачные сервисы предлагают специализированные решения для работы с такими большими наборами данных, включая инструменты для эффективного управления данными и их передачи.

Также необходимо помнить о том, что такие данные являются критически важными для операций организации и часто составляют как коммерческую, так и служебную и иную тайну, поэтому очень важно обеспечить их безопасность и надежность. Для обеспечения высокого уровня конфиденциальности такое хранилище желательно располагать непосредственно на объекте или в исследовательском центре, чтобы организовать доступ к данным в рамках локальной сети, тем самым увеличив скорость доступа к данным и снизив вероятность сетевых ошибок в процессе работы с ними.

Некоторые из критериев сравнения, которые могут использоваться для ПО выявления дизъюнктивных нарушений анализа сейсмотрасс:

1) наличие методов анализа и их точность – в зависимости от того, насколько точно программное обеспечение может обнаруживать дизъюнктивные нарушения в сейсмических данных (при наличии такой возможности), можно ускорить процессы обработки и анализа сейсмотрасс, повышая общий уровень эффективности проводимого исследования;

2) доступность данных – перечень видов сейсмических данных (например, волновые поля, сканы, снимки) и расширений, которые можно использовать с программным обеспечением, поскольку при наличии интерфейса для загрузки данных, процесс работы с программным обеспечением может существенно упроститься;

3) степень интегрируемости – способность программного обеспечения взаимодействовать с другими инструментами за счет открытой масштабируемой архитектуры, прямого доступа к базе данных, открытого API или функциональных возможностей импорта-экспорта через структурированные текстовые файлы;

4) условия использования – в зависимости от условий лицензирования и стоимости доступа к ПО, более доступные программы могут быть предпочтительнее

для более широких кругов пользователей, не предоставляя требуемого функционала, и наоборот: ПО, которое предоставляет более совершенные методы анализа, может быть недоступно для малых исследовательских групп и/или индивидуальных исследователей по причине высокой стоимости продукта;

5) возможности визуализации – способность формировать на основе данных интерпретируемое графическое представление данных: графики и диаграммы, наглядное представление модели в виде двух- или трехмерного компьютерного изображения, способности к анимации;

6) привязка к координированному пространству – способность и сложность добавления пространственной компоненты к атрибутивным данным модели возможностями информационной системы;

7) составление рекомендаций – предоставление набора потенциально полезных мероприятий для поддержки принятия решений по влиянию на моделируемую ситуацию с целью стабилизации процессов ведения горных работ;

8) возможности моделирования – функциональность, позволяющая моделировать и проверять гипотезы, имитируя различные ситуации, путем изменения начальных состояний и характеристик с целью анализа результирующего поведения объекта.

Проведя анализ существующих решений на рынке программного обеспечения для решения задач построения гипсометрии породного массива на основе данных, полученных с сейсмодатчиков, позволил определить группы функциональных возможностей того или иного программного решения. На основе данных, приведенных в сравнительной таблице 1 программных решений для анализа сейсмотрасс от их возможностей, можно сделать вывод о том, что ни одно из представленных в настоящее время решений не может удовлетворить все потребности исследовательских групп, так как не обладает полным набором возможностей, необходимым для обоснованного принятия решения при составлении плана ведения горных работ.

Таблица 1 – Сравнительный анализ программных решений для анализа сейсмотрасс

Возможности	Geophysics (SeisWare)	Kingdom Suite (IHS Markit)	Geophysics (Petrel)	OpendTech	Российское ПО «Петро-ИнфоКомплекс»	Российское ПО iNSTA-Geo
Доступные методы анализа	Сейсмический анализ, интерпретация данных	Широкий спектр геофизических и геологических анализов	Расширенный анализ и интерпретация сейсмических данных, геологическое моделирование	Основные геофизические и геологические анализы	Расширенный анализ и интерпретация сейсмических данных, геологическое моделирование	В основе программного комплекса лежит подход интерактивной коррекции статических поправок, основанный на анализе разрезов, полученных на пространственно-зафиксированных базах суммирования
Доступность данных	Высокая, с поддержкой различных форматов	Высокая, включая интеграцию с внешними источниками	Высокая, с возможностью интеграции больших объемов данных	Стандартная, с поддержкой основных форматов	Высокая, включая интеграцию с внешними источниками	Стандартная, с поддержкой основных форматов
Интеграции	Высокая, с поддержкой различных форматов	Широкие возможности интеграции	Обширные интеграционные возможности с другими Schlumberger продуктами и сторонними системами	Ограниченные интеграции	Широкие возможности интеграции	Высокая, с поддержкой различных форматов
Лицензия	Коммерческая	Коммерческая	Коммерческая	Наличие бесплатных или открытых версий	Коммерческая	Коммерческая
Наличие встроенной визуализации	Да	Да	Да	Да	Да	Да

Окончание таблицы 1

Возможности	Geophysics (SeisWare)	Kingdom Suite (IHS Markit)	Geophysics (Petrel)	OpendTech	Российское ПО «Петро-ИнфоКомплекс»	Российское ПО iNSTA-Geo
Работа с геопространственными данными	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Наличие рекомендательной системы	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Возможности моделирования	Ограниченные	Расширенные возможности геологического и геофизического моделирования	Обширные возможности моделирования, включая 3D	Основные возможности моделирования	Обширные возможности моделирования, включая 3D	Развитые средства анализа данных и информации в заголовках трасс

1.4 Особенности построения моделей пластов

Процесс построения модели угольного пласта при поиске дизъюнктивных нарушений включает несколько этапов. Прежде всего, необходимо провести сбор данных о конкретном участке породного массива. Для этого обычно используются методы геологического исследования, такие как бурение скважин, анализ проб и сейсмические измерения. Эти данные необходимы для создания начальной модели угольного пласта и обнаружения возможных нарушений его структуры.

Затем данные подвергаются обработке и анализу, что позволяет создать первичную модель угольного пласта [50]. Обычно это делается с использованием специализированного программного обеспечения, которое может создать трехмерные модели на основе собранных данных. В процессе построения модели необходимо учесть различные аспекты. Один из них – это стратиграфические особенности угольного пласта. Изучение этих особенностей помогает понять, как слои породного массива уложены друг на друга, что может помочь в выявлении дизъюнктивных нарушений.

Еще одним важным фактором является интерпретация полученных сейсмических данных [112]. Используя эти данные, можно определить, где в угольном пласте могут находиться дизъюнктивные нарушения. После создания модели ее используют для предсказания расположения дизъюнктивных нарушений и планирования дальнейших исследований. Этот этап включает в себя анализ полученной модели, ее корректировку и оптимизацию.

Важно отметить, что процесс построения модели угольного пласта при поиске дизъюнктивных нарушений может различаться в зависимости от использованных методов и инструментов, а также географических особенностей конкретного участка. Поскольку речь идет о наборе геопространственных данных, то конечным продуктом должен быть набор тематических карт горного отвода угольного предприятия.

1.5 Технология исследования шахтного поля на наличие дизъюнктивных нарушений породного массива

Для проведения анализа в рамках существующих решений необходимо рассмотреть имеющийся процесс поиска дизъюнктивных нарушений в реальных сценариях работы [78]. Поскольку чаще всего такой вид анализа проводится или сотрудниками специализированного подразделения компаний по добыче угля, или сотрудниками научно-исследовательских институтов, то можно сделать допущение, что такие подразделения играют четыре основные роли.

Инженер-геофизик – занимается применением физических принципов и методов для изучения физических свойств Земли. В контексте сейсморазведочных испытаний инженер-геофизик специализируется на изучении распространения сейсмических волн и их взаимодействия с подземными структурами. Он оценивает глубину, состав и геометрию геологических формаций, а также помогает определить возможные риски и препятствия при строительстве или добыче ресурсов.

Инженер-технолог – занимается разработкой и применением технологических методов и процессов для проведения сейсморазведочных испытаний. Он ор-

ганизовывает работу сейсмических приборов, координирует процесс сбора данных, контролирует точность и качество полученных результатов. Инженер-технолог также занимается анализом данных и подготовкой отчетности.

Инженер-техник – выполняет последующую обработку данных, полученных от инженера-технолога. Он разрабатывает геопространственные модели на основе полученных данных с учётом геопространственной привязки в глобальных или локальных координатах. Инженер-техник также может заниматься ремонтом и обслуживанием приборов и оборудования, проводить измерения и контролировать качество данных.

Главный инженер при проведении сейсморазведочных испытаний обычно руководит всеми аспектами проекта. Он координирует работу инженеров-геофизиков, инженеров-технологов и инженеров-техников. Главный инженер разрабатывает стратегию и план проведения исследований, участвует в анализе данных и принимает решения на основе полученных результатов. Он также может взаимодействовать с заказчиками, учреждениями и организациями, связанными с проектом.

Каждая из этих ролей необходима для успешного проведения сейсморазведочных испытаний, обеспечивая сбор точных и надежных данных о подземных структурах и условиях, которые могут быть использованы для принятия решений в областях геологии, геотехники и инженерии. Стоит заметить, что иногда один и тот же сотрудник может принимать на себя несколько ролей одновременно, однако типовой бизнес-процесс может иметь вид, приведенный на рисунке 6.

Рассмотрим процесс исследования фрагмента шахтного поля на наличие разрывных нарушений сплошности породного массива более подробно. Проведение сейсморазведочных исследований подразумевает непосредственное проведение кинематических испытаний, включая ряд этапов, позволяющих получить информацию о подземных структурах и геологических формациях с использованием сейсмических методов. На этом этапе определяются цели и задачи исследования, а также выбирается район, который будет исследован.

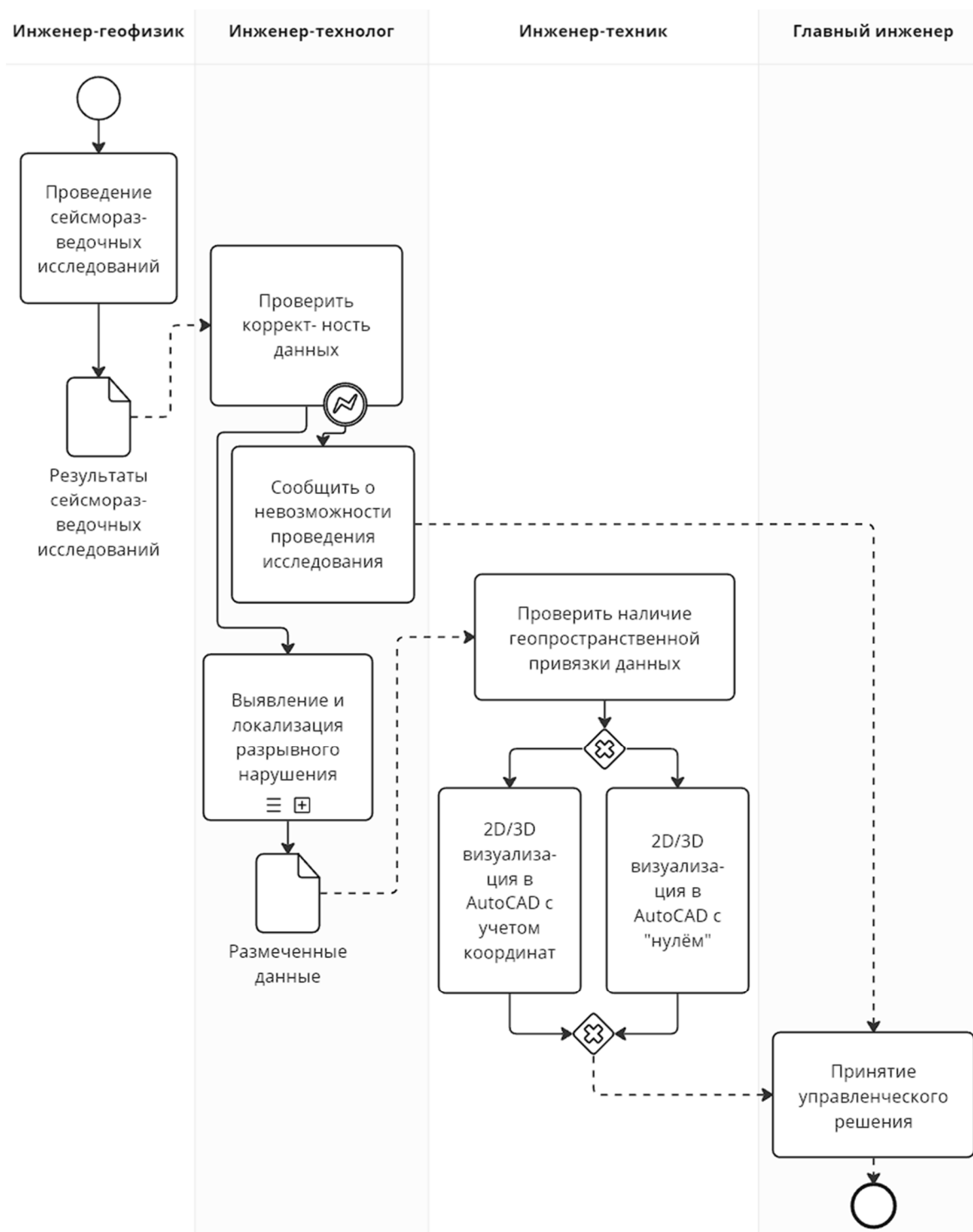


Рисунок 6 – Процесс исследования фрагмента шахтного поля на наличие разрывных нарушений сплошности геологического тела

В свою очередь, главные инженеры и специалисты разрабатывают стратегию сейсморазведки, выбирают оптимальные параметры исследования, а инженеры-геофизики устанавливают сейсмические приборы (геофоны и сейсмический молот

или взрывные заряды) на земной поверхности в соответствии с заранее определенной схемой. Приборы размещаются вдоль линий или профилей, которые позволят улавливать отраженные сигналы от мест перехода или изменений геофизических свойств горного массива. По результатам интерпретации получаемых данных, т. е. преобразования аналоговых сигналов в цифровой, появляется возможность предоставить общую картину о структурах внутри породного массива исследуемого участка.

На этом этапе проводится исследование по уже имеющимся данным о геологических формациях исследуемой области, при этом не учитывается вероятность того, что данные потеряли свою актуальность. Это приводит к тому, что запланированное исследование не будет являться релевантным ввиду некорректно сформированного профиля исследования за счёт перекрывающихся геологических формаций, некорректно рассчитанных углов для проекции и других факторов.

Результаты сейсморазведочных исследований представляют собой геоданные, состоящие из амплитуды, времени прихода сейсмических волн и метаданных, собираемых геофонами. Данные, собранные с геофонов, записываются и сохраняются на цифровых носителях в виде файлов сериализованных данных, т. е. приведенных к битовой последовательности структуры с возможностью обратного преобразования к исходному виду [81]. В целях минимизации ресурсов, эти данные сохраняются в локальной памяти геофона с возможностью последующего извлечения посредством подключения внешних устройств. Отсутствие возможности оперативного мониторинга качественной составляющей данных, собранных при проведении сейсморазведочных испытаний, приводит к тому, что невозможно оценить их пригодность «на месте» с целью оперативного проведения повторного считывания. Это может привести к дополнительным как временным, так и ресурсным издержкам [13].

Проверка корректности данных является критически важным этапом в связи с тем, что перед тем, как приступить к непосредственному анализу собранных данных, необходимо провести ряд предварительных обработок [38]. Эти обработки включают в себя не только коррекцию времени прихода сейсмических волн, но

также удаление артефактов, амплитудную нормализацию и ряд других процедур, нацеленных на обеспечение высокого качества и максимальной точности данных, что обеспечивает как повышение качества результатов анализа, так и точность последующих управленческих решений, основывающихся на результатах этого анализа [47]. К сожалению, при проведении таких работ возможны два ограничения – либо такие работы проводятся в специализированных решениях, что требует их наличия у проводящей исследование организации, равно как и специально обученных операторов ПО, либо самостоятельно, но это требует знания не только методов предобработки данных от оператора, но и языков программирования и наличия навыков написания кода и тестирования реализованных скриптов.

Выявление и локализация разрывных нарушений подразумевает обнаружение и определение местоположения разломов и трещин в породном массиве [74]. На этом этапе происходит анализ сейсмических данных, собранных с помощью геофонов с целью выявления аномалий в данных, таких как отражения, которые могут указывать на наличие разрывных нарушений в породном массиве. Путем анализа времени прихода сейсмических сигналов, отраженных от геологических структур, можно определить глубину и форму разломов [79].

Разрывы и трещины могут влиять на путь распространения сейсмических волн и вызывать характерные изменения времени прихода сигналов. Для более точного выявления и локализации разрывных нарушений могут использоваться дополнительные геологические данные, такие как поверхностные структуры, геологические карты и геофизические данные [95]. С помощью сейсмических данных можно определить ориентацию и направление разломов. Анализ амплитуды и формы сейсмических сигналов может дать представление о том, как разрывные нарушения расположены и как они проходят через породный массив [82]. В качестве результата этого этапа важно получить размеченное геоизображение, на котором отмечены как области без разрывных нарушений, так и с ними.

Под проверкой наличия геопространственной привязки подразумевается верификация и коррекция данных для обеспечения точного пространственного рас-

положения относительно географических координат. Этот этап является важным для того, чтобы собранные сейсмические данные имели правильную привязку к поверхности Земли и могли быть правильно интерпретированы. Если такая привязка отсутствует, то возникает необходимость перехода к локальной системе координат. Вне зависимости от этого, инженером-техником строятся модели исследуемой области как в 2D, так и в 3D – в виде тематических карт, САД и иных моделей. Выбор именно САД-моделей обосновывается широкой поддержкой со стороны программных комплексов обработки геоизображений и доступностью редакторов, однако наиболее распространенным среди них является AutoCAD, который распространяется по лицензии для предприятий, а это накладывает дополнительные ресурсные издержки.

Заключительным этапом является непосредственное принятие управленческого решения. Главный инженер анализирует полученные результаты сейсморазведки, включая данные о наличии дизъюнктивных нарушений, их местоположении, ориентации и характеристиках. Он выявляет ключевые параметры, которые влияют на принятие решения, а также оценивает потенциальные риски и последствия, связанные с обнаруженными дизъюнктивными нарушениями. Это включает оценку влияния на инженерные проекты, стабильность грунтов, безопасность сооружений и другие аспекты.

На основе анализа данных, оценки рисков и целей проекта главный инженер принимает управленческое решение о дальнейших действиях. Это может включать в себя планы дополнительных исследований, разработку инженерных решений, оценку воздействия на окружающую среду и другие аспекты. Разрабатывается детальный план действий на основе принятого решения и начинается непосредственная реализация этого плана. Это может включать в себя организацию дополнительных исследований, проведение инженерных работ и мониторинг результатов [58].

Однако не стоит забывать, что принятое решение основывается лишь на неизмеримом субъективном эмпирическом опыте, а это значит, что невозможно рассчитать процент правильности того или иного решения непосредственно в момент

его принятия, что может привести не только к ресурсным издержкам в случае неправильного выбора траектории прокладки выемочной линии, но и выхода из строя оборудования, вплоть до частичного или полного обрушения горной выработки.

1.6 Выводы по первому разделу

Дизъюнктивные нарушения в горных породах являются важными геологическими структурами, которые могут влиять на распределение полезных ископаемых, гидрогеологические условия и геомеханические свойства пород. Понимание их распределения и характеристик имеет важное значение для различных отраслей, включая горнодобывающую промышленность, строительство, оценку рисков землетрясений и другие. Понимание структуры дизъюнктивных нарушений имеет важное значение для оценки геологических рисков, таких как оползни, землетрясения и обвалы.

Анализ существующего состояния технологий сейсморазведки в контексте решения задачи определения дизъюнктивного нарушения позволяет сделать несколько выводов. Сейсморазведка является важным инструментом для изучения горных пород, позволяющим исследователям получать детальные внутренние изображения породного массива. При этом местоположение и геометрия некоторых частей горного массива нуждается в уточнении различными способами.

Эффективные методы анализа данных сейсморазведки могут способствовать разработке более точных моделей предсказания таких явлений и, следовательно, улучшению мер по их предотвращению. Современные технологии сейсморазведки позволяют получать все более детализированные и точные данные о структуре подземных пород. Разработка новых моделей и алгоритмов для анализа этих данных может значительно улучшить наше понимание геологических процессов и структур, включая дизъюнктивные нарушения.

Применение сейсморазведки требует специальных знаний, опыта и сложного оборудования, что подразумевает необходимость в узкой квалификации специалистов предметной области, совмещающей знания о сейсморазведке, геологии и осо-

бенностях ведения подземных горных работ. Успешное проведение сейсморазведочных испытаний требует тесного сотрудничества и взаимодействия между различными специалистами. Сам процесс построения модели угольного пласта при поиске дизъюнктивных нарушений включает сбор данных, анализ с использованием методов геологического исследования, и создание начальной модели угольного пласта, что требует интегрированной информационной системы для поддержки принятия решения.

Однако в результате сравнительного анализа современных программно-аналитических решений, реализующих анализ результатов сейсморазведки, было выявлено, что ни один из существующих подходов не отвечает всем необходимым требованиям, связанным с задачей определения пространственного положения дизъюнктивного нарушения на основе данных сейсмотрасс.

В связи с этим, обоснована целесообразность и актуальность разработки информационно-аналитического обеспечения для геоинформационных систем компьютерного моделирования геометрии сплошности углепородного массива с использованием технологий искусственного интеллекта на этапах хранения, манипулирования и анализа геопространственными данными. Научные работы в этой области могут предложить новые подходы к разведке полезных ископаемых, помогая определять наиболее перспективные участки для добычи. Это особенно актуально в условиях возрастающей необходимости в эффективных и экологически безопасных методах разведки [55].

Разработка программных решений, включающих в себя современные модели и алгоритмы выявления дизъюнктивных нарушений горных пород на основе анализа данных сейсморазведки, является крайне важной ввиду необходимости импортозамещения программного обеспечения, так как в сфере сейсморазведки, где данные могут быть чувствительными и стратегически важными, использование отечественного программного обеспечения гарантирует контроль над обработкой и хранением данных. Это также способствует развитию внутреннего ИТ-сектора, стимулируя местные компании и научные организации к разработке собственных

продуктов и решений. Такой подход поддерживает экономическое развитие страны и создает новые рабочие места в высокотехнологичных отраслях.

Локализованные программные решения для анализа сейсморазведки могут быть более точно адаптированы к специфическим условиям и потребностям региона, включая учет геологических, географических и климатических особенностей, что, в перспективе, обеспечивает более эффективный и точный анализ данных. Однако сам факт разработки такого ПО также включает в себя и необходимость в проведении комплекса образовательных мероприятий, направленных на обучение местных специалистов и развитие инфраструктуры технической поддержки, что повышает квалификацию кадров и укрепляет научно-технический потенциал страны.

Повышение доступности анализа сейсмограмм для малых исследовательских групп и НИИ может быть достигнуто благодаря использованию открытого программного обеспечения, что включает в себя бесплатные аналитические инструменты, которые могут быть легко модифицированы и адаптированы под конкретные исследовательские задачи. Это уменьшает финансовую нагрузку на малые группы и способствует более широкому внедрению инновационных методов анализа.

Современное программное обеспечение должно разрабатываться с учетом гибкости и возможности интеграции с другими инструментами. Это позволяет эффективно адаптировать и интегрировать новые технологии в свои исследовательские процессы, упрощая анализ сейсмограмм и выявление дизъюнктивных нарушений, а это приводит к тому, что очень важно применять современные, но уже апробированные иными разработчиками практики разработки открытых систем, поддерживающих возможность расширений за счёт внешних модулей.

Таким образом, для устойчивого функционирования высокопроизводительных предприятий по подземной разработке пластовых месторождений целесообразно использование специализированных ГИС-приложений для формирования тематических трехмерных картографических геоизображений на основе обработки пространственно-атрибутивных данных моделей горного массива.

2 МЕТОДЫ АНАЛИЗА НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

2.1 Методы регистрации структурных нарушений угольных пластов

Алгоритмы регистрации структурных нарушений угольных пластов играют критически важную роль в горной промышленности, особенно в контексте обнаружения различных геомеханических аномалий в пластах, включая деформации, дислокации и пластические потоки [84]. Эти аномалии, такие как трещины, изломы и другие структурные нарушения, могут быть предвестниками серьезных проблем, приводящих к повреждению или даже разрушению горных выработок. Без точного и своевременного обнаружения этих аномалий через специализированные геофизические и геотехнические оценки, риск аварийных ситуаций в шахтах и других горных объектах может значительно возрасти, влияя на стабильность пластов, эффективность добычи и, в конечном итоге, на безопасность рабочих и экологическую устойчивость региона.

Использование алгоритмов регистрации структурных нарушений угольных пластов, формальный алгоритм которых приведен на рисунке 7, не только помогает в обеспечении гарантий эксплуатационной безопасности, но и могут способствовать оптимизации процесса добычи, путем более точного понимания структуры пластов. Такие алгоритмы обеспечивают взаимосвязь между геологическими исследованиями, технологическими процессами и стратегическим планированием, делая их неотъемлемой частью современной горной промышленности. Они поддерживают взаимодействие между различными дисциплинами, включая геологию, геомеханику и горное планирование, обеспечивая многогранную картину структурных нарушений и потенциальных геомеханических рисков. Эффективное использование таких алгоритмов может привести к снижению операционных затрат, повышению производительности и улучшению безопасности рабочих на горных объектах [46].

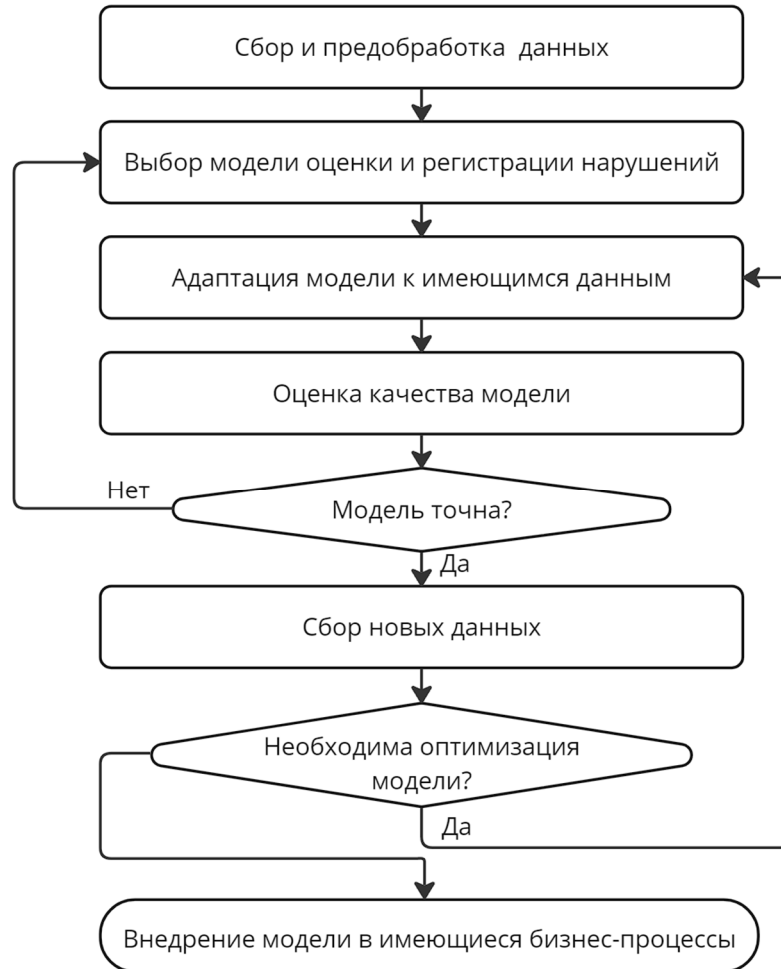


Рисунок 7 – Обобщенный алгоритм процесса обнаружения нарушений

Одним из таких алгоритмов является метод геомеханического анализа микросейсмических данных, который позволяет идентифицировать зоны возможного срыва горных выработок, а также следить за динамикой повреждения горных пород. Микросейсмические события возникают, когда происходит деформация горных пород, что может привести к различным геомеханическим аномалиям, таким как образование трещин, срывы горных выработок и другие нарушения.

Метод геомеханического анализа микросейсмических данных широко применяется в горной промышленности для обнаружения и предотвращения различных геомеханических нарушений, таких как обрушения, срывы и другие аварийные ситуации, что способствует повышению безопасности и эффективности горных работ. Он основывается на мониторинге микросейсмических событий с по-

мощью специальных сенсоров и их анализе с использованием математических методов. В процессе анализа микросейсмических событий определяются их параметры, такие как энергия, величина, направление волны и другие, что позволяет оценить местоположение и характер нарушений, происходящих в горных выработках.

Существуют и другие алгоритмы, используемые для регистрации структурных нарушений угольных пластов, которые включают методы обработки данных геофизических и буровых исследований. Эти алгоритмы и методы обеспечивают комплексный подход к анализу и регистрации структурных нарушений в угольных пластах, используя различные типы данных и технологий [18]. Они могут быть настроены и оптимизированы для конкретных условий пласта и задач обнаружения нарушений, обеспечивая более точные и надежные результаты.

Таковыми алгоритмами являются:

- сейсмическая интерпретация с использованием обратных задач, включающая в себя использование сейсмических данных для построения трехмерных моделей пласта, выявляя структурные аномалии, такие как трещины и изломы [93];
- гидроакустическая диагностика с использованием алгоритмов обработки сигналов при помощи обработки звуковых волн, отраженных от пласта, позволяет создать образ нарушений структуры, таких как трещины или пустоты внутри пласта [21];
- томографический анализ скважин, включающий в себя использование различных типов излучения для создания поперечных сечений пласта вдоль скважины, обнаруживая трещины и другие структурные нарушения [107];
- геоэлектрические и магнитотеллурические методы, основанные на измерении электрического и магнитного полей, связанных с структурными нарушениями, используются для выявления аномалий в пластах [109].

Кроме того, для регистрации структурных нарушений угольных пластов могут быть использованы нейросетевые алгоритмы [25], которые позволяют обрабатывать и анализировать большие объемы данных с высокой скоростью и точно-

стью, выявляя скрытые закономерности и паттерны в поведении горных пород и помогая предотвращать негативные последствия нарушений [99].

2.2. Алгоритмы машинного обучения детектирования дизъюнктивных нарушений

Задача определения аномалий методами машинного обучения в контексте координированного пространства заключается в поиске объектов или явлений, которые отличаются от нормального поведения или распределения в геопространственных данных [8]. Такие аномалии могут возникать, например, в результате ошибок в сборе и/или обработке данных, проблем с качеством источников данных, а также из-за природных или человеческих факторов [6].

Примерами задач определения аномалий в пространственно-атрибутивном виде могут быть следующие:

- обнаружение изменений в поверхностных водах или землепользовании, которые могут указывать на модификацию природной среды;
- выявление точек данных, которые не соответствуют ожидаемым распределениям, например, по количеству транспортных аварий, уровню загрязнения воздуха и т. д.;
- выделение зон, где наблюдается сильное нарушение или отсутствие каких-либо географических объектов, например, странных геологических образований, необычной плотности заболевших деревьев в лесном массиве и т. д. [62].

Для решения задач определения аномалий используются различные методы машинного обучения, включая статистические методы, методы классификации и кластеризации и др. [68]. Проведем сравнительный анализ наиболее распространенных.

Isolation Forest. Алгоритм *Isolation Forest* является методом обнаружения аномалий и хорошо подходит для выявления аномальных структур в данных. В контексте дизъюнктивных нарушений в геофизических исследованиях этот алгоритм может использоваться для определения аномальных сейсмических событий, которые указывают на наличие разрывов или сдвигов в породном массиве. Приме-

нение этого алгоритма имеет свои особенности – Isolation Forest генерирует случайные леса для разделения нормальных и аномальных данных. Основным преимуществом использования Isolation Forest в этом контексте является его эффективность при работе с большими объемами данных и способность обрабатывать сложные и многомерные данные [113]. Это делает его подходящим инструментом для анализа сейсмических данных, где дизъюнктивные нарушения могут быть сложными и неочевидными с точки зрения числовых значений в массиве собранных данных.

Как и любой метод машинного обучения, Isolation Forest имеет несколько гиперпараметров (например, количество деревьев и глубина деревьев), которые необходимо настроить для максимальной производительности. Также важно привести данные сейсморазведки к подходящему виду, а именно – произвести очистку шума, нормализацию и выбор определенных характеристик, таких как амплитуда, частота и продолжительность сигналов. Эти характеристики могут быть особенно релевантны при поиске дизъюнктивных нарушений. Важно помнить, что дизъюнктивные нарушения могут быть редкими в данных, что приводит к несбалансированным данным. Isolation Forest может иметь проблемы в таких случаях и требуется дополнительная обработка данных [34].

Затем, применяя алгоритм Isolation Forest, можно построить модель, которая «изолирует» аномальные точки данных. Этот алгоритм работает путем случайного выбора характеристик и деления данных с использованием случайно выбранных значений между минимальным и максимальным значениями. Аномальные точки могут быть изолированы быстрее, чем нормальные, что позволяет обнаружить потенциальные дизъюнктивные нарушения.

Результаты затем интерпретируются в контексте изучаемой геологической области. Аномалии, обнаруженные с помощью Isolation Forest, могут указывать на различные геологические структуры и процессы, включая дизъюнктивные нарушения. Эта информация может быть дополнена другими данными и методами анализа для более полного понимания геологической картины.

Использование Isolation Forest для обнаружения дизъюнктивных нарушений может потребовать дополнительного анализа и настройки параметров. Так, выбор определенных гиперпараметров, таких как количество деревьев или длина пути в алгоритме, может существенно влиять на результаты, поскольку некорректная настройка этих параметров может привести к низкой точности обнаружения. Ещё одним нюансом в работе Isolation Forest является сложность интерпретации результатов – он может выделять аномалии, но не всегда ясно, почему конкретное наблюдение было классифицировано как аномальное. Это может затруднить понимание и интерпретацию дизъюнктивных нарушений в сложных геофизических контекстах. В некоторых случаях алгоритм может ошибочно классифицировать нормальные сейсмические события как аномальные, особенно если структура данных сложная или зашумленная.

Сам по себе, Isolation Forest может не всегда достаточно точно справляться с задачей, и его результаты, возможно, потребуется комбинировать с другими методами анализа для получения более точной картины [103], однако, он является достаточно эффективным методом для обнаружения аномалий, включая дизъюнктивные нарушения, несмотря на то, что он не позволяет локализовать область дизъюнктивного нарушения, а лишь ответить на вопрос наличия или отсутствия разрывного нарушения на некоторой исследуемой области, без привязки к геоданным.

One-Class Support Vector Machines. One-Class SVM – это метод машинного обучения, который обучается на нормальных данных и используется для обнаружения аномалий и отклонений. В контексте геофизических исследований, этот метод может быть применен для обнаружения дизъюнктивных нарушений, которые представляют собой разрывы или трещины в геологических структурах. Процесс работы с алгоритмом начинается с предварительной обработки сейсмических данных, а затем – в обучении модели на наборе данных, который считается «нормальным» и не содержит дизъюнктивных нарушений. После обучения модель может быть применена для обнаружения аномальных сигналов в новых данных, которые могут указывать на наличие дизъюнктивных нарушений.

Одним из преимуществ One-Class SVM является его чувствительность к аномалиям, т. е. способность работать с данными, где аномалии редки или неизвестны во время обучения. Это позволяет ему обнаруживать даже слабые отклонения, которые могут быть связаны с дизъюнктивными нарушениями. Его применимость к различным типам сейсмических данных и способность работать в пространствах с высокой размерностью делают его подходящим для сложных сейсмических данных.

Однако у One-Class SVM есть и недостатки. Определение правильных гиперпараметров, таких как ядерные функции и параметры регуляризации, может быть сложным и требовать тщательной настройки. Неправильная настройка может привести к низкой чувствительности к аномалиям или, наоборот, к высокому уровню ложных срабатываний, что может затруднить применение метода в сложных и шумных данных сейсморазведки. Кроме того, One-Class SVM может быть вычислительно дорогостоящим, особенно при работе с большими объемами данных [19]. Это может замедлить процесс анализа и потребовать значительных вычислительных ресурсов. Алгоритм может иметь проблемы в случае несбалансированных данных, когда дизъюнктивные нарушения являются редкими.

В отличие от алгоритма Isolation Forest, алгоритм One-Class SVM использует гиперплоскость для разделения данных на два класса: «нормальные» и «аномальные», в то время как Isolation Forest использует случайный лес для разбиения данных на несколько подгрупп. В Isolation Forest аномальным считается объект, которому необходимо меньше разделений, чтобы его изолировать от других объектов, что позволяет алгоритму быстрее находить аномалии, чем One-Class SVM [121].

При этом One-Class SVM имеет лучшую производительность в задачах, связанных с нахождением аномалий в одном классе данных, в то время как Isolation Forest показывает лучшую производительность в задачах, связанных с нахождением аномалий в нескольких классах данных. В свою очередь, Isolation Forest является более простым и быстрым алгоритмом, чем One-Class SVM, что делает его более подходящим для больших объемов данных. Однако, One-Class SVM может

быть более точным в нахождении аномалий в данных, особенно в случаях, когда данные имеют сложную структуру.

Local Outlier Factor. Алгоритм Local Outlier Factor (LOF) относится к методам обнаружения аномалий, и его можно использовать для выявления дизъюнктивных нарушений по данным сейсморазведки. LOF оценивает локальную плотность каждой точки в данных и сравнивает её с плотностью её соседей. Если плотность наблюдения намного ниже плотности его соседей, это наблюдение может быть классифицировано как аномалия [60].

Для детектирования аномалий в задаче поиска дизъюнктивных нарушений угольного пласта, LOF может использоваться для определения нарушений, которые не соответствуют общему профилю пласта.

Алгоритм LOF имеет много особенностей, одной из которых является выбор числа соседей – k . Для определения числа соседей LOF использует эмпирические правила и методы перекрестной проверки. Выбор оптимального числа соседей имеет непосредственное влияние на производительность и точность алгоритма. Связанным с этой особенностью является процесс определение размера окрестности, который рассчитывается для каждого объекта в выборке до его k -ближайших соседей. Размер окрестности может влиять на производительность алгоритма, поскольку слишком большая окрестность может привести к высокой вычислительной сложности, а слишком маленькая – к упущению аномалий [24].

Применение LOF в сейсморазведке может начаться с предварительной обработки данных, включая нормализацию и устранение шума. Далее, алгоритм можно применить непосредственно к данным, чтобы определить аномальные сейсмические события, которые могут указывать на дизъюнктивные нарушения.

Одним из преимуществ LOF является его способность работать с локальными аномалиями, что может быть полезным при анализе сложных геофизических структур, поскольку алгоритм оценивает частоту выборки для определения, является ли наблюдаемый объект «нестандартным» в своей окрестности. Он основан на предположении о том, что аномальные объекты имеют более низкую плотность,

чем объекты в нормальной области. В отличие от One-Class SVM, LOF не требует обучения только на нормальных данных и может быть менее чувствителен к выбору гиперпараметров [64].

Однако LOF также может иметь недостатки, в сравнении с другими алгоритмами. Например, он может быть менее устойчив к шуму по сравнению с Isolation Forest. В данных сейсморазведки, где шум может быть обиденным, это может снизить эффективность LOF. В отличие от Isolation Forest, который может быстро работать на больших наборах данных, LOF может быть вычислительно более дорогостоящим, особенно при анализе больших объемов сейсмических данных.

Но несмотря на это, LOF предлагает уникальный подход к обнаружению аномалий, который может быть полезен для выявления дизъюнктивных нарушений в данных сейсморазведки. Его способность обнаруживать локальные аномалии делает его мощным инструментом в этом контексте, но его эффективность может зависеть от специфики данных и требовать тщательного подбора параметров. Сравнивая с Isolation Forest и One-Class SVM, LOF может предложить дополнительную гибкость в обнаружении локальных аномалий, но также может быть более требовательным к ресурсам и чувствительным к шуму [40].

Нейросетевые алгоритмы. Нейронные сети – это математические модели, которые разрабатываются для решения задач, связанных с обработкой информации, распознаванием образов, классификацией данных и других задач машинного обучения. Нейросетевые алгоритмы были созданы исследователями, которые вдохновлялись процессами, происходящими в мозге, и состоят из многих связанных между собой «нейронов», которые могут обучаться распознавать сложные шаблоны и зависимости в данных, обрабатывают их и передают полученные сведения далее, через связи между нейронами.

Нейронные сети могут использоваться для решения различных задач, например, они могут помочь в анализе сейсмических данных для обнаружения структур, полезных ископаемых или оценки рисков, таких как залежи нефти и газа или потенциально опасные разломы. Также они могут быть использованы для автоматизи-

зации процессов классификации и интерпретации геологических образцов, обеспечивая более быстрое и точное выявление геологических особенностей. Использование нейронных сетей для прогнозирования геологических событий или моделирования геологических процессов может существенно улучшить понимание подземных условий, а способность анализировать исторические и текущие данные позволяет использовать их для определения наиболее перспективных мест для разведки.

Нейронные сети также могут быть применены в качестве вспомогательного инструмента обеспечения безопасности при проведении геологоразведческих работ, позволяя определять дизъюнктивные нарушения углепородного массива и автоматизировать процесс обнаружения потенциально опасных зон в горных выработках. Это позволяет повысить безопасность работников и экономическую эффективность добычи полезных ископаемых. Для выявления дизъюнктивных нарушений в угольных месторождениях используются такие архитектуры нейронных сетей, как сверточные нейронные сети (CNN) и рекуррентные нейронные сети (RNN) [111].

CNN применяют для анализа спутниковых и сейсмических данных, что позволяет обнаружить разрывные нарушения, которые могут влиять на безопасность и эффективность добычи угля. В экологическом контексте дизъюнктивные нарушения могут вызывать землетрясения и другие проблемы, которые влияют на окружающую среду. Архитектуры, такие как глубокие вероятностные сети и генеративно-состязательные сети (ГСС, англ. GAN - Generative Adversarial Networks), могут использоваться для моделирования и прогнозирования таких нарушений. Это позволяет своевременно реагировать на потенциальные угрозы и минимизировать экологические риски [119].

Быстрое преобразование Фурье. Модель обнаружения разрывного нарушения на основе Быстрого преобразования Фурье демонстрирует важные преимущества в выявлении наличия дизъюнктивного нарушения в пределах горизонта залегания угольного пласта по изменениям спектральной плотности. Этот метод опирается на анализ спектральных характеристик сейсмических данных, что позволяет

выявить особенности в структуре породного массива, связанные с разрывными нарушениями [101].

Применение быстрого преобразования Фурье к сейсмическим данным позволяет разложить временные волны на частотные составляющие, выявив спектральные паттерны. Перемены в спектральной плотности могут свидетельствовать о различных геологических изменениях, например, разрывных нарушений, визуальная демонстрация которых приведена на рисунке 8.

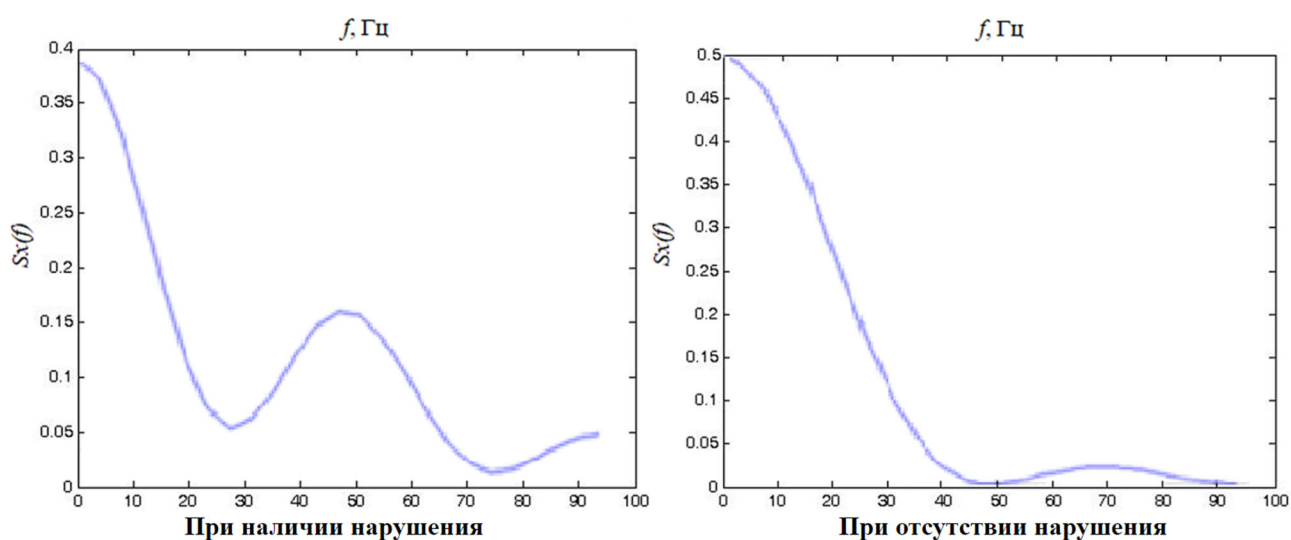


Рисунок 8 – Графики спектральных плотностей участков с наличием и отсутствием дизъюнктивного нарушения

Этот метод позволяет детектировать даже небольшие изменения в спектральных характеристиках, что делает его чрезвычайно чувствительным инструментом для выявления структурных аномалий. Однако следует отметить, что данная модель также имеет свои ограничения. Она может быть чувствительной к шумам и артефактам, что может привести к ложным срабатываниям. Также метод основан на предположении о стационарности структуры, что может быть не совсем верным в реальных геологических условиях. Кроме того, интерпретация спектральных данных может потребовать экспертных знаний и определенной степени субъективности.

Каскадная нейронная сеть. Модель обнаружения разрывного нарушения на основе каскадной нейронной сети использует принципы и преимущества нейронных сетей для более точного анализа сейсмических данных и обнаружения структурных аномалий. Архитектура такой сети представляет собой многократно связанные слои нейронов, выполняющие последовательное преобразование данных, объединенные полной послойной связью. Визуальное представление данной архитектуры приведено на рисунке 9. В контексте обнаружения разрывных нарушений такая модель может быть обучена распознавать характерные особенности сейсмических данных, связанные с нарушениями в породном массиве.

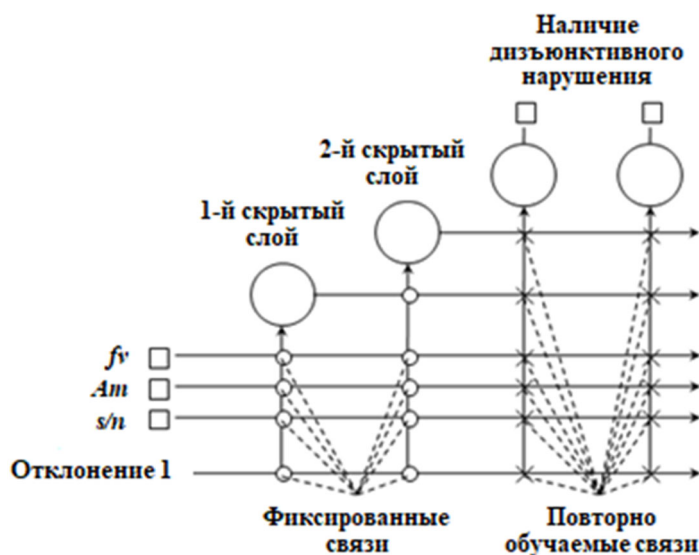


Рисунок 9 – Концептуальная схема архитектуры нейронной сети

Преимущества этого метода включают высокую адаптивность и способность выявлять сложные закономерности в данных. Каскадная структура нейронной сети позволяет поочередно выделять и анализировать различные уровни абстракции в данных, что повышает эффективность обнаружения дизъюнктивных нарушений. Однако следует отметить, что использование нейронных сетей также сопряжено с определенными сложностями [32]. Обучение нейронной сети требует большого объема данных и времени. Кроме того, подбор оптимальных параметров нейронной сети может потребовать экспериментов и итераций.

Интерпретация решений, полученных с помощью нейронных сетей, также может быть нетривиальной. Нейронные сети могут быть восприняты как «черные ящики», что затрудняет понимание того, каким образом они делают прогнозы и принимают решения. Модель обнаружения разрывного нарушения на основе каскадной нейронной сети представляет собой перспективный подход к анализу сейсмических данных. Её способность выявлять сложные паттерны и аномалии может быть полезной для геологов и инженеров при более точном планировании и оценке рисков на этапе горных работ [118].

Генеративно-сопоставительные сети. Генеративно-сопоставительные сети – это класс алгоритмов машинного обучения, представляющий собой систему из двух нейронных сетей: генератора и дискриминатора, которые конкурируют между собой. ГСС используются для генерации данных, которые могут быть похожи на реальные данные, а также для анализа и преобразования данных. В контексте горного дела, ГСС могут быть применены как для анализа сейсмических данных, так и для выявления дизъюнктивных нарушений.

Сначала ГСС обучается на реальных сейсмических данных, которые содержат информацию о разрывных структурах и дизъюнктивных нарушениях. Генератор создает синтетические данные, а дискриминатор оценивает, насколько синтетические данные похожи на реальные. После обучения ГСС генератор может создавать синтетические сейсмические данные, которые подобны реальным данным. Эти синтетические данные могут содержать характеристики дизъюнктивных нарушений, которые сходны с теми, что обнаруживаются в реальных данных.

Полученные синтетические данные могут быть использованы для анализа и сравнения с реальными сейсмическими данными. Путем сопоставления характеристик и особенностей синтетических данных с реальными данными можно выявить области, где возможно наличие дизъюнктивных нарушений. ГСС позволяют уточнить и дополнить информацию о дизъюнктивных нарушениях, которые могут быть не так очевидны в первоначальных сейсмических данных. Это может помочь геологам и инженерам лучше понять структуры в породном массиве и принять более обоснованные решения на этапе планирования и проектирования [27].

Однако сети с такой архитектурой имеют свои ограничения и недостатки, которые следует учитывать при их использовании. Один из недостатков ГСС заключается в сложности обучения и настройки оптимальных параметров для генератора и дискриминатора. Кроме того, сети могут страдать от проблемы «доминирования» во время обучения, когда генератор и дискриминатор не могут достичь баланса, что может привести к низкому качеству сгенерированных данных, поскольку одна из сетей по выбранной метрике получает оптимальное решение с точки зрения данных, но такое решение является некорректным с точки зрения реальной задачи.

Другой недостаток ГСС связан с проблемой обобщения. Сгенерированные данные могут быть похожи на реальные данные, но в то же время они могут содержать искажения и неточности, которые могут повлиять на качество анализа и принятия решений. Это особенно критично при применении ГСС в горном деле, где точность данных играет важную роль в прогнозировании геологических структур и инженерных аспектов. Также следует учитывать, что для обучения ГСС требуется большой объем данных, а их качество может сильно влиять на результаты [125]. Недостаточное количество данных или некорректный датасет может привести к неудовлетворительным результатам и снижению производительности сети. К тому же, сама архитектура подразумевает наличие не одной, а двух глубоких нейронных сетей, поэтому процессы обучения и работы сами по себе являются вычислительно интенсивными задачами и требуют больших вычислительных ресурсов.

Современные архитектуры нейронных сетей, такие как Transformer и Graph Neural Networks (GNN), объединяют данные разных источников, включая сейсмические, геологические и спутниковые изображения, для комплексного анализа дизъюнктивных нарушений. Интеграция этих технологий способствует более точному определению и прогнозированию нарушений, что критически важно как для угледобывающей, так и для экологической отраслей. Для решения задачи детектирования разрывных нарушений по данным сейсморазведочных исследований достаточно использовать многослойную нейронную сеть, процесс обучения которой основывается на данных о геологической структуре углепородного массива и исторических данных о

нарушениях. В качестве входных данных можно использовать как «сырые» данные, так и предобработанные (например, карта исследуемой области, состоящая из сейсмотрасс). Для поиска быстрого детектирования таких нарушений можно использовать нейронные сети архитектурного семейства автоэнкодеров.

2.3 Адаптация архитектуры нейронных сетей семейства автоэнкодеров

Автоэнкодер (англ. autoencoder) – это класс нейронных сетей, используемых для обработки данных со снижением размерности в скрытых слоях. Они работают на основе двух компонент: кодировщика и декодировщика. Кодировщик принимает входные данные x и преобразует их в латентное представление h меньшей размерности m , что можно выразить как функцию $h = f(x)$, где f – нейронная сеть, преобразующая входные данные в скрытое представление. Целью этого процесса является уменьшение размерности и извлечение значимых характеристик из данных, в частности, процесс позволяет сжать и упростить информацию, выделяя ключевые признаки данных. Пусть у нас есть входные данные в виде вектора x размерности n , представляющего собой данные, полученные с геофонов в процессе сейсморазведки, тогда кодировщик позволит получить компактное представление h , состоящее из m значимых признаков, которыми могут являться как отдельные признаки из реальных данных, так и композиция нескольких из них [3].

В теории автоэнкодеры могут рассматриваться как способ аппроксимации функции тождественного отображения, где выход сети стремится быть равным входу. Однако, ключевым моментом является то, что при этом важно обеспечить, чтобы скрытое представление h содержало достаточно информации для восстановления x , но при этом было достаточно компактным, чтобы обучение модели не привело к простому копированию входных данных [53]. В математическом анализе автоэнкодеров важно учитывать, что они пытаются аппроксимировать сложные распределения данных, и их эффективность зависит от способности модели изучить подходящее преобразование для конкретной задачи. Эта способность напрямую связана с выбором архитектуры, функции активации, оптимизатора и гиперпараметров.

Декодировщик принимает латентное представление и, напротив, выполняет обратное преобразование, восстанавливает данные обратно из этого представления, т. е. преобразует скрытое представление h обратно в восстановленное представление данных x' . Это можно описать как $x' = g(h)$, где g – это другая нейронная сеть, которая пытается воссоздать исходные данные из скрытого представления. Цель декодировщика – восстановить данные так, чтобы они были максимально похожи на исходные.

В процессе обучения параметры обеих нейронных сетей (кодировщика и декодировщика) оптимизируются таким образом, чтобы минимизировать функцию потерь, т. е. процесс обучения автоэнкодера заключается в настройке его параметров таким образом, чтобы суммарная разница между входными данными x и восстановленными данными x' была минимальной. Это обычно реализуется с помощью использования функций потерь L (loss function). Обычно используется среднеквадратическая ошибка (MSE), выражаемая как $L(x, x') = ||x - x'||^2$.

В контексте сейсморазведки, автоэнкодеры могут помочь в выявлении дизъюнктивных нарушений. Процесс начинается с обучения автоэнкодера на наборе реальных сейсмических данных. В ходе обучения, автоэнкодер «учится» выделять ключевые признаки и структуры в данных. Когда автоэнкодер успешно обучен, его можно использовать для анализа новых данных. Архитектура глубокого автоэнкодера представлена на рисунке 10.

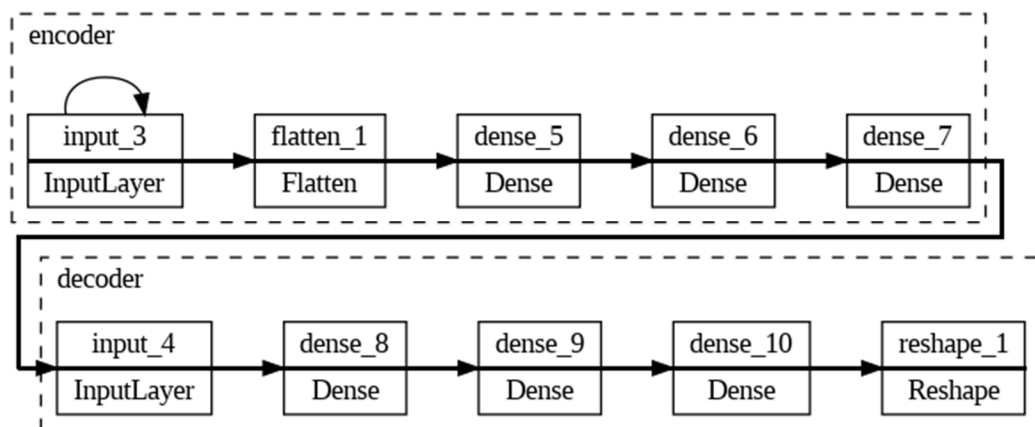


Рисунок 10 – Архитектура глубокого автоэнкодера

После обучения автоэнкодера его можно использовать для анализа новых данных. Пропуская данные через кодировщик, мы получаем латентное представление z , которое может содержать информацию о ключевых признаках данных. Затем, через декодировщик, мы можем восстановить данные обратно. Если на вход поданы данные без дизъюнктивных нарушений, автоэнкодер сможет точно восстановить эти данные из такого представления. Однако, когда на вход поданы данные с дизъюнктивными нарушениями, алгоритм столкнется с необычными структурами, которые трудно сжать и восстановить. Это приведет к отклонениям между входными и восстановленными данными.

Таким образом, анализ различий между входными и восстановленными данными позволяет выявлять области, где есть аномалии, включая дизъюнктивные нарушения. По сути, автоэнкодер выявляет «неподходящие» образцы данных, которые не соответствуют общим структурам [115]. Это делает его полезным инструментом для обнаружения аномалий в сейсмических данных, таких как дизъюнктивные нарушения, которые могут иметь важное значение для планирования и оценки горных работ.

В некоторых случаях автоэнкодеры могут быть расширены до регуляризованных автоэнкодеров, где в функцию потерь включается дополнительный регуляризационный член для предотвращения переобучения. Примерами таких моделей являются разреженные автоэнкодеры, которые добавляют штраф за активацию слишком большого количества нейронов, и вариационные автоэнкодеры, которые добавляют штраф за отклонение распределения скрытых переменных от некоторого априорного распределения [69].

Вариационные автоэнкодеры (англ. variational autoencoders, VAE) представляют собой модификацию классической архитектуры автоэнкодеров для создания аугментированных данных (рисунок 11). Они объединяют в себе возможности сжатия и восстановления данных, а также способность генерировать новые примеры, соответствующие обучающим данным, без потери контекста. В контексте горного дела и сейсморазведки, VAE может использоваться в качестве инструмента для

расширения и обогащения имеющихся данных новыми сэмплами без проведения полевых сейсморазведочных работ с различных участков.

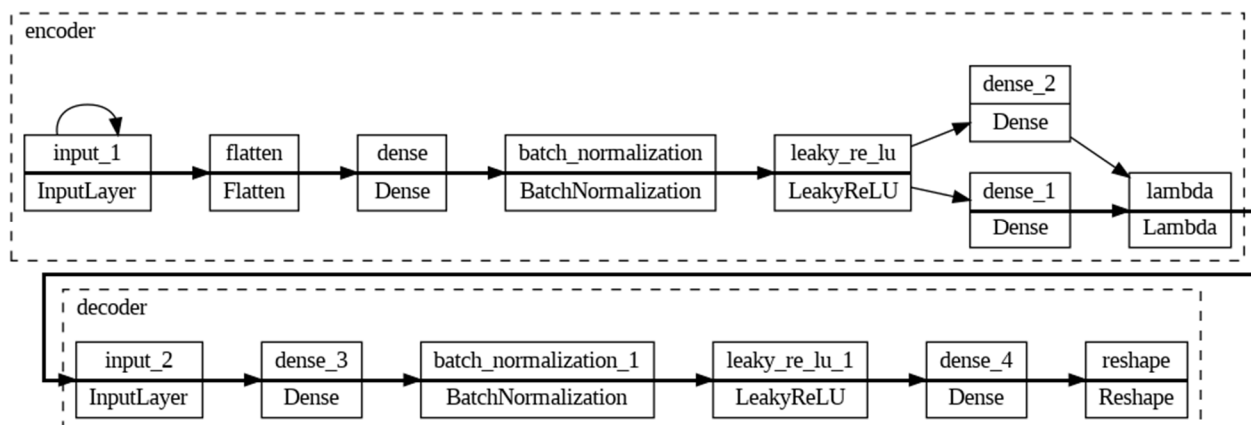


Рисунок 11 – Архитектура вариационного автоэнкодера

Процесс включает в себя кодирование входных сейсмических данных в латентное пространство и генерацию новых данных путём сэмплирования из этого пространства. Этот процесс позволяет получать разнообразные вариации данных, сохраняя важные структурные характеристики и особенности исходных данных. Аугментированные данные могут включать различные варианты геологических структур, аномалий и дизъюнктивных нарушений. Таким образом, VAE позволяет увеличить разнообразие обучающего датасета, что может улучшить способность модели обнаруживать аномалии и предсказывать геологические структуры.

VAE использует вероятностный подход для моделирования латентного пространства, где каждая точка представляет собой скрытое представление данных. Этот подход основан на предположении, что данные могут быть сгенерированы из некоторого непознанного распределения в латентном пространстве. Вариационный автоэнкодер формализует эту идею, используя совместное вероятностное распределение $p(x, z) = p(x|z)p(z)$, где $p(z)$ – априорное распределение скрытых переменных, обычно предполагаемое нормальным, а $p(x|z)$ – условное распределение наблюдаемых данных, заданное скрытыми переменными. Таким образом, скрытые переменные (и скрытое представление в частности) и точки данных могут быть выбраны из $p(z)$ и $p(x|z)$ соответственно.

Основная задача заключается в том, чтобы найти правильные значения для скрытых переменных с учетом конкретного набора данных, который известен как апостериорное $p(z|x)$. Мы можем использовать правило Байеса для вычисления этого значения следующим образом: $p(z|x) = p(x|z)p(z)/p(x)$, где $p(x)$ – вероятность наблюдаемых данных, которая часто трудно вычислима из-за необходимости интегрирования по всем возможным значениям z . Тем не менее $p(x|z)$ не может быть эффективно вычислен, поскольку он должен быть оценен по всем возможным z , при этом сам z может быть любым распределением.

Семейство распределений может быть выражено как приближенное распределение $q_\lambda(z|x)$, которое стремится аппроксимировать неизвестное апостериорное распределение. В роли $q_\lambda(z|x)$ часто выступает нормальное распределение с параметрами, определяемыми нейронной сетью, зависящей от входных данных; λ относится к определенному семейству, но если мы работаем с гауссианами, то λ будет соответствовать среднему значению и дисперсии скрытых переменных для каждой точки данных, что позволяет модели гибко адаптироваться к различным типам данных.

Будем использовать $q(z|x)$ для аппроксимации $p(z|x)$. Для оценки качества аппроксимации используется дивергенция Кульбака – Лейблера, которая измеряет разницу между приближенным и истинным апостериорными распределениями. Эта дивергенция представлена как

$$KL(q_\lambda(z|x) \parallel p(z|x)) = E_q[\log q_\lambda(z|x)] - E_q[\log p(z|x)] + \log p(x).$$

Необходимо минимизировать это расхождение, хотя прямой расчет $\log p(x)$ часто невозможен. Для обхода этой проблемы вводится функция нижней границы оценки данных (ELBO – Evidence Lower Bound), которая служит для оптимизации параметров модели, определённая как

$$ELBO(\lambda) = E_q[\log q_\lambda(z|x)] - E_q[\log p(z|x)].$$

Эта функция представляет собой нижнюю границу логарифма вероятности наблюдаемых данных, и ее максимизация позволяет увеличить вероятность наблюдаемых данных.

Комбинируя два предыдущих уравнения, получим

$$-\log p(x) = ELBO(\lambda) + KL(q_\lambda(z|x) | p(z|x)).$$

А полагая, что дивергенция Кульбака – Лейблера всегда больше или равна нулю, использование максимизации ELBO позволяет избавиться от члена $KL(q_\lambda(z|x) | p(z|x))$.

В VAE кодировщик принимает входные данные и выводит λ -параметры, аппроксимирующие $q_\theta(z|x)$, а декодер добавляет скрытые переменные в исходное распределение данных $p_\phi(z|x)$, где θ и ϕ – это веса нейронных сетей. Таким образом, можно записать функцию $ELBO$ (разворачивая член совместной вероятности), которая будет являться функцией потерь в виде:

$$ELBO_i(\lambda) = E_{q_\theta(z|x_i)}[\log p_\phi(x_i|z)] - KL(q_\theta(z|x_i) | p(z)).$$

Исходя из записанного выражения, необходимо обратить внимание на некоторые моменты. Прежде всего, можно применить обратное распространение к этой функции (предыдущее уравнение определено для отдельных точек данных). Во-вторых, функция потерь в глубоком обучении всегда минимизируется, поэтому придется работать с отрицательным значением ELBO.

Как уже говорилось ранее, используемое семейство распределений является гауссовым. Обычно, $p(Z) = Normal(0, I)$, поэтому, если кодировщик выводит представления z , которые значительно отличаются от этого распределения, то модель будет штрафовать за счет увеличения KL-дивергенции. Это помогает удерживать распределение скрытых переменных в определенных рамках и способствует лучшей генерализации модели, при этом декодер будет выбирать значения z из $q_\theta(z|x)$.

Особое внимание стоит уделить методу репараметризации, который позволяет включить случайность в процесс обучения, сохраняя при этом возможность использования градиентного спуска. Проблема здесь в том, что обратное распространение ошибки не сможет проходить через этот случайный узел, поскольку он является стохастическим и недетерминированным по параметрам сетей. Мы можем применить это на практике, зная, что нормальная распределенная переменная со средним μ и стандартным отклонением σ , может быть взята из $z = \mu + \sigma \odot \epsilon$, где ϵ получена из стандартного нормального распределения. Это позволяет зафиксировать значения для μ и σ , что позволяет свести всю недетерминированную составляющую в ξ -член, чтобы производные могли быть рассчитаны через детерминированные узлы.

Применение VAE к сейсморазведочным данным начинается с обучения модели на реальных образцах. Затем, используя полученную модель, можно генерировать новые данные, варьируя параметры в латентном пространстве. Это создает возможность получать альтернативные вариации сейсмических изображений, которые сохраняют суть исходных данных. Важно отметить, что хотя VAE имеет потенциал для генерации аугментированных данных, успешное применение требует грамотного обучения и настройки. Также необходимо оценить качество и приемлемость генерируемых данных, чтобы убедиться, что они соответствуют геологической реальности и улучшают анализ сейсморазведочных данных [63].

Несмотря на то, что использование автоэнкодеров позволяет быстро понять, имеются ли нарушения на исследуемой области, их недостатком остается ограниченная способность локализовать область несовпадения между оригинальным объектом и полученным. Это означает, что когда автоэнкодер восстанавливает данные, он может не всегда точно определить, где именно произошли изменения или аномалии в исходных данных. В контексте сейсморазведочных данных это может означать, что автоэнкодер может упустить важные сигналы о нарушениях или аномалиях в горной структуре. В результате, способность автоэнкодера точно локализовать и выделить области несовпадения между оригинальными данными и их восстановленными версиями может быть ограниченной.

Для преодоления этого недостатка может потребоваться комбинирование автоэнкодеров с другими методами, такими как анализ аномалий или использование более сложных архитектур нейронных сетей. Если представлять собранные данные сейсморазведочных исследований в виде плоских геоизображений, то для решения такой задачи возможно адаптировать алгоритмы компьютерного зрения, в частности – сети семейства сегментации изображений, такие как U-Net и Mask R-CNN, которые были разработаны специально для сегментации и демонстрируют высокую точность в этой задаче.

Алгоритмы локализации дизъюнктивных нарушений. Другой подход – это использование нейросетевых алгоритмов сегментации изображений, таких как U-Net или Mask R-CNN. Эти алгоритмы могут обучаться на размеченных изображениях, где каждый пиксель помечен как нормальный или аномальный. Затем они могут использоваться для сегментации новых изображений и определения аномальных областей.

Mask R-CNN (Mask Region-Based Convolutional Neural Network) является продвинутой архитектурой для сегментации объектов на изображениях. Он комбинирует алгоритмы Faster R-CNN для обнаружения объектов и свойства сетей для генерации масок пикселей, чтобы точно определить границы объектов.

В основе Mask R-CNN лежит сверточная нейронная сеть, которая служит основой для извлечения признаков из входного изображения. Обучение Mask R-CNN происходит на размеченных данных, где для каждого объекта известны его класс, ограничивающий прямоугольник и соответствующая маска. Процесс обучения позволяет модели «научиться» выявлять объекты, а также генерировать точные маски пикселей для каждого объекта.

После этого используется Region Proposal Network (RPN), чтобы предложить области, в которых могут находиться объекты. RPN использует сверточную сеть для сканирования изображения сеткой якорных (anchor) окон различных размеров и соотношений сторон, предсказывая вероятности объектов и регрессионные смещения для каждого якоря. Это можно выразить как $P_{obj}(a)$ и Δa для каждого якорного окна a .

Затем, для каждой предложенной области, применяется механизм ROI Align, который позволяет точно вырезать и адаптировать подрегионы для дальнейшего анализа. После получения предложений о регионах, они передаются в сеть для классификации объектов и уточнения их границ. Здесь классификация обозначается как $P_{class}(r)$, а уточнение границ – как Δr для каждого региона r .

Однако ключевая особенность Mask R-CNN заключается в слое генерации масок. Этот слой используется для создания плотных масок пикселей, обозначающих границы и формы объектов. Mask R-CNN расширяет Faster R-CNN, добавляя третий модуль для предсказания сегментационной маски каждого региона. Для каждого региона r и класса c сеть генерирует маску M_{rc} , представляющую сегментацию объекта [120].

Mask R-CNN часто использует Feature Pyramid Network (FPN) для извлечения признаков на разных масштабах, что позволяет эффективно обрабатывать объекты разного размера. Обучение Mask R-CNN включает в себя минимизацию нескольких функций потерь: потери классификации, потери регрессии границ и потери сегментационной маски. Это обеспечивает одновременное обучение на задачах обнаружения, классификации и сегментации. В практической реализации Mask R-CNN важно эффективно управлять предложениями регионов и использовать методы, такие как Non-Maximum Suppression (NMS), для устранения перекрывающихся предложений.

U-Net – это архитектура нейронной сети, разработанная для сегментации изображений. Её ключевая особенность – симметричная структура, напоминающая букву «U». Она состоит из двух частей: контрактирующего (уменьшающего размерность) и расширяющего пути, а принцип работы основан на комбинировании кодировщика, который извлекает признаки из входного изображения, и декодировщика, который восстанавливает сегментированное изображение.

Контрактирующий путь похож на типичную архитектуру сверточной нейронной сети. Он содержит повторяющиеся блоки, состоящие из сверток, функций активации (часто ReLU) и операций пулинга, которые постепенно

уменьшают размер изображения и извлекают его характеристики. Это уменьшение размера помогает сети изучать контекстную информацию и увеличивать её «поле зрения». Это позволяет кодировщику выделить важные признаки из входных данных. Затем следует узкое место – бутылочное горлышко (bottleneck), где создаётся компактное представление признаков.

Расширяющий путь предназначен для точной локализации и восстановления размера изображения. В нём используются операции апсемплинга для увеличения размера карт признаков. Каждый шаг апсемплинга сочетается с соответствующими картами признаков из контрактирующего пути (через операции конкатенации), что обеспечивает передачу контекстной и локализационной информации.

Эффективность U-net заключается в её способности учитывать как локальную, так и глобальную информацию, что критично для точной сегментации. Эта сеть обладает высокой точностью, даже если обучается на относительно небольших наборах данных, благодаря эффективному использованию контекстной информации из различных слоёв сети.

В обоих случаях необходимо правильно подготовить данные для обучения нейросети, чтобы она могла корректно определить аномальные области. Это может включать предподготовку данных (нормирование, стандартизация и т. д.) и разметку данных для обучения. Для обучения нейросети необходимо иметь достаточное количество данных о нарушениях, которые могут быть использованы для обучения классификационной модели. В процессе обучения нейросеть находит закономерности в данных, которые могут помочь в предсказании мест возможных нарушений [11].

Важно отметить, что использование нейросетевых методов требует высококвалифицированных специалистов в области геологии, добычи полезных ископаемых и машинного обучения, чтобы правильно настроить и обучить нейросеть. Дальнейшая работа предполагает, что наличие таких специалистов уже не требуется, за исключением ситуаций дообучения моделей.

2.4 Интерпретация полученных результатов

Результаты геопространственного моделирования тектонического нарушения в угольном пласте могут быть использованы для проведения различных мероприятий, связанных с различными аспектами ведения горных работ. В зависимости от интерпретации полученных результатов, специалисты по горному делу могут применить эти данные в нескольких прикладных направлениях.

1 Определение безопасных зон для добычи.

Это направление подразумевает анализ и интерпретацию полученных данных с целью обеспечения безопасности и эффективности горных работ. Процесс начинается с тщательного изучения результатов моделирования для определения характеристик и местоположения тектонических нарушений. Это позволяет выделить области, где риск возникновения опасных ситуаций может быть выше. Далее, на основе этих данных, специалисты определяют безопасные зоны для добычи, то есть участки, которые представляют наименьший риск для работников и оборудования.

Ключевым результатом в этом направлении является составление плана мероприятия по принятию мер адаптации ведения горных работ в соответствии с геологическими условиями. Это может включать изменение параметров добычи, таких как направление добычи, скорость добычи и методы укрепления выработок. С учетом данных геопространственного моделирования, специалисты также могут оптимизировать планы эвакуации, обеспечивая безопасность работников в случае изменения геологических условий. Кроме того, специалисты также могут предложить улучшенные планы эвакуации и меры предосторожности для рабочих в зонах повышенного риска, что позволит грамотно проводить горные работы с учетом геологических условий и тем самым обеспечить безопасность персонала и оборудования, а также повысить эффективность добычи.

2 Оптимизация планирования шахтных работ.

Направление ориентировано в первую очередь на применение данных моделирования для совершенствования процессов планирования и реализации горных

работ, с целью максимизации эффективности при ведении горных работ на шахтных объектах. Пространственные данные о структурных нарушениях пластов позволяют лучше понять геологическую структуру месторождения угля. Это может быть важной информацией для оптимизации планирования шахтных работ, таких как прокладка горизонтальных или вертикальных штреков, определение наиболее эффективных мест для бурения скважин и расположения вентиляционных систем. Интеграция результатов геопространственного моделирования в планирование шахтных работ позволяет специалистам горного дела эффективно учесть геологические особенности и потенциальные риски, связанные с тектоническими нарушениями.

На начальном этапе, после анализа полученных данных, происходит точная локализация и характеристика тектонических нарушений, что позволяет более точно оценить реальное геологическое состояние пласта. С учетом этих данных, специалисты оптимизируют параметры планирования и организации горных работ. Кроме того, на основе анализа моделирования можно разрабатывать более эффективные пути и методы добычи, чтобы снизить воздействие на зоны с тектоническими нарушениями.

Важной частью оптимизации является также планирование укрепительных и поддерживающих мероприятий. Здесь результаты геопространственного моделирования помогают определить оптимальные методы укрепления и уделять особое внимание областям с выявленными тектоническими деформациями. Это способствует поддержанию стабильности выработок и снижению рисков аварийных ситуаций. Оптимизированный план действий помогает снизить риски и обеспечить максимальную эффективность деятельности на шахтном объекте.

3 Прогнозирование качества угольных пластов.

Это направление ориентировано на использование данных моделирования для предвидения характеристик и свойств угольных пластов, что позволяет оптимизировать добычу, обеспечивать высокое качество угля и эффективно управлять горными работами. Анализ результатов геопространственного моделирования поз-

воляет специалистам горного дела более точно определить геологическую структуру и характеристики угольных пластов. Это включает информацию о тектонических нарушениях, распределении пород разной пригодности, деформациях и возможных дефектах.

С помощью этих данных специалисты могут прогнозировать качество угольных пластов. На основе распределения пород различной качественной характеристики в пласте можно определить участки с более высоким качеством угля. Это позволяет эффективно планировать добычу, выбирая наилучшие точки начала и методы добычи для максимизации выхода качественного угля.

Прогнозирование качества угольных пластов также может включать анализ деформаций и структурных изменений, вызванных тектоническими нарушениями. Это позволяет предвидеть возможные проблемы с горными работами и подготовить соответствующие меры для минимизации потерь. Анализ данных о дизъюнктивных нарушениях может помочь оценить качество угольных пластов и их геологических характеристик. На основе такого анализа специалисты горного дела могут принимать решения относительно выбора наиболее пригодных для добычи участков, что повышает эффективность процесса добычи угля.

Интеграция результатов геопространственного моделирования в процессы прогнозирования качества угольных пластов дает возможность оптимизировать стратегии добычи и обогащения угля. Специалисты могут выбирать оптимальные места добычи, регулировать параметры обогащения в зависимости от предсказанных характеристик угля, что приводит к повышению качества продукции.

4 Планирование технологических работ.

Эта сфера ориентирована на оптимизацию и улучшение технических процессов, связанных с горными работами, с учетом геологических особенностей, обеспечивая более эффективную и безопасную деятельность. Исходной точкой для планирования технологических работ является анализ результатов геопространственного моделирования. Эти результаты предоставляют информацию о структуре угольного пласта, тектонических деформациях, дефектах и деформационных зо-

нах. Это дает специалистам возможность более глубоко понять геологические особенности месторождения.

С учетом этой информации, специалисты могут оптимизировать процессы разработки и добычи угля. Например, они могут планировать маршруты разработки таким образом, чтобы минимизировать воздействие на зоны с тектоническими деформациями. Также можно рассмотреть возможность применения более эффективных методов добычи, учитывая геологические особенности.

Планирование технологических работ также включает в себя определение оптимальных методов укрепления и обеспечения стабильности выработок. Технологи горного дела могут использовать данные о тектонических нарушениях для определения участков шахты, которые требуют ремонтных работ или укрепления. По полученным данным они могут разрабатывать планы установки опор, систем укрепления, а также регулирования нагрузок, чтобы минимизировать риск деформаций и обрушений в зонах с тектоническими нарушениями. Это поможет снизить риск аварийных ситуаций и повысить надежность шахтной инфраструктуры. Дополнительно геопространственное моделирование позволяет оптимизировать распределение ресурсов на шахтных объектах. Например, можно более эффективно планировать распределение рабочих, оборудования и материалов в соответствии с геологическими характеристиками пласта и зонами деформаций.

5 Оптимизация добычи.

Это направление ориентировано на максимизацию эффективности добычи угля, снижение рисков и затрат, а также обеспечение безопасности шахтных работ. Геопространственное моделирование предоставляет специалистам горного дела детальную картину геологической структуры угольного пласта, включая тектонические нарушения и деформационные зоны. Эта информация позволяет более точно определить характеристики и качество угольных слоев, а также локализовать зоны, подверженные деформациям и опасностям.

С учетом этих данных, специалисты могут оптимизировать процессы добычи угля. Например, они могут разработать более эффективные схемы разработки, учи-

тивная геологическую структуру и тектонические особенности пласта. Это может включать определение оптимальных точек начала разработки, выбор наилучших методов добычи для минимизации воздействия на деформационные зоны.

Оптимизация добычи также включает в себя планирование работы выемочных машин и оборудования. Распределение ресурсов на шахтном объекте может быть адаптировано в соответствии с данными моделирования, что помогает сократить затраты и улучшить эффективность работы машин.

Анализ пространственных данных позволяет лучше понимать структуру угольных пластов и распределение угля внутри них. Специалисты могут более точно определить характеристики угольных слоев и выбрать наиболее эффективные методы выемки для получения наилучших результатов. Это может быть полезно для оптимизации процесса добычи, позволяя выбирать более пригодные участки для добычи и выбирать оптимальный угол расположения и движения очистного комплекса.

6 Планирование рекультивации.

При добыче угля территория шахты может подвергаться значительным изменениям. Знание о тектонических нарушениях поможет спланировать процесс рекультивации, чтобы восстановить природную среду наиболее эффективным образом после окончания добычи. Рекультивация – это процесс восстановления природной среды и ландшафта после завершения горных работ, включая добычу угля. Геопространственные данные, полученные в результате моделирования, играют ключевую роль в планировании этого процесса.

Анализ результатов геопространственного моделирования предоставляет специалистам подробную информацию о геологической структуре и деформациях. Эти данные позволяют более точно определить области, подверженные отложенной напряженной деформации и разрушениям, что важно для планирования рекультивации [97]. С использованием данных моделирования специалисты могут определить оптимальные методы и стратегии рекультивации. Например, они могут решить, какие виды растительности следует восстанавливать, какие методы почво-

обработки использовать и какие меры по восстановлению ландшафта применять в зонах деформации.

Планирование рекультивации на основе геопространственных данных также позволяет определить потенциальные риски и проблемы, связанные с тектоническими нарушениями. Это позволяет разработать меры предотвращения и снижения воздействия на окружающую среду. Специалисты могут выбрать оптимальные места для размещения остатков пород и материалов, чтобы минимизировать негативное воздействие на природную среду. Кроме того, геопространственные данные позволяют провести мониторинг рекультивации на разных этапах. Сравнение данных до и после рекультивации позволяет оценить эффективность мероприятий и внести корректировки в планы, если необходимо.

Интерпретация пространственных данных о тектонических нарушениях позволяет лучше понять геологические особенности месторождения угля, предсказать возможные опасности и принимать информированные решения для повышения безопасности и эффективности горнодобывающих работ.

2.5 Визуализация пластов

Визуализация породных пластов является важным инструментом в геологии и геоинформатике, позволяющим наглядно представить геологическую структуру породного массива. Для визуализации породных пластов используются различные методы и техники, которые позволяют создать трехмерные модели и изображения, отражающие слоистость, структуру, состав и распределение пород в горной массе. Применяются как традиционные методы, так и современные компьютерные технологии.

Один из традиционных способов визуализации породных пластов – это построение геологических сечений и планов на основе геологических карт. Геологические сечения представляют собой вертикальные или наклонные «разрезы» породного массива, которые позволяют увидеть вертикальное распределение породных пластов. Геологические планы представляют горизонтальное распределение

пород на поверхности земли. Эти методы позволяют анализировать слоистость, структуру и форму породных пластов.

С развитием компьютерных технологий стали широко использоваться методы виртуальной и аугментированной реальности для визуализации породных пластов. С помощью специальных программ и программных пакетов можно создавать трехмерные модели горной массы, которые позволяют исследовать структуру пластов в объеме. Это особенно полезно при изучении сложных геологических структур, таких как складчатые и разломные зоны.

Геоинформационные системы (ГИС) также играют важную роль в визуализации породных пластов. С помощью ГИС можно создавать интерактивные карты и модели, интегрировать различные геологические данные (геологические карты, скважинные данные, сейсмические данные и др.) и анализировать их в пространственном контексте.

Современные технологии также включают использование геофизических методов для визуализации породных пластов [9]. Например, сейсмические и гравиметрические данные могут быть обработаны и интерпретированы для создания моделей структуры подземных слоев. Применение методов и моделей компьютерного моделирования позволяет создавать реалистичные трехмерные визуализации, которые могут быть использованы для обучения, планирования горных работ, исследований и других целей. Эти методы способствуют более глубокому пониманию геологической структуры и помогают принимать более информированные решения в геологической и горнодобывающей индустрии [51].

Интерпретация данных сейсморазведки, обработанных с помощью нейронных сетей-автоэнкодеров, представляет собой передовой подход в геофизике и геологии, позволяющий проводить исследование выемочного участка на предмет наличия или отсутствия дизъюнктивных нарушений, затрачивая на него гораздо меньшее количество времени. Ввиду того, что процесс подготовки модели такой нейронной сети основывается на обучении с учителем, т. е. на обучающей, тестовой и валидационной выборках, предварительно подготовленных специалистами, ве-

рификация полученных с помощью автоэнкодеров результатов анализа не требуется, но не исключает возможности проведения дополнительных сейсморазведочных исследований.

Одним из основных преимуществ использования нейронных сетей-автоэнкодеров в этом контексте является их способность обрабатывать и анализировать большие объемы данных с высокой степенью сложности, выявляя при этом не только очевидные, но и скрытые закономерности и зависимости. Эти скрытые паттерны могут включать в себя нестандартные геологические формации, необычные сочетания пород или аномалии, которые могут быть пропущены или неправильно интерпретированы при использовании более традиционных, линейных методов анализа.

В рамках применения таких нейронных сетей к задачам геофизики и сейсмологии, особое внимание необходимо уделить разработке и обучению моделей, способных эффективно работать с данными, имеющими высокую степень неоднородности и сложность. Одним из направлений является обучение нейронных сетей на специально подготовленных наборах данных, которые могут быть ориентированы либо на обучение в условиях отсутствия дизъюнктивных нарушений, либо на работу с данными, где такие нарушения присутствуют, но в ограниченном количестве. Это подходы, адаптированные для решения задач одноклассовой классификации и классификации с несбалансированными классами соответственно.

При обучении модели на данных, исключаящих дизъюнктивные нарушения, реализуется методика одноклассовой классификации. Эта методика предполагает, что модель обучается распознавать только данные, представляющие «нормальное» состояние исследуемого объекта. Такой подход может использоваться для выделения участков, не содержащих признаков аномалий или нарушений структурного порядка. Математически, задача может быть представлена в форме оптимизации функции потерь $L(x, \theta)$, таким образом, чтобы минимизировать разницу между предсказанными и истинными значениями для «нормальных» сейсмограмм, где x – входные данные, а θ – параметры модели.

С другой стороны, обучение на выборках, содержащих данные о дизъюнктивных нарушениях в меньшинстве, ставит перед нейронной сетью задачу классификации с несбалансированными классами. В этом случае, модель должна научиться распознавать редкие события или объекты в данных, что требует особой настройки алгоритма обучения для учета дисбаланса классов. Такое обучение часто включает в себя методы взвешивания классов или искусственное увеличение представленности минорного класса через техники аугментации данных.

В результате применения обученных моделей к анализу сейсмограмм, специалисты могут получать либо сейсмограммы, которые остаются «неизмененными» в терминах значений, сохраняя исходную информацию с минимальными отклонениями, либо сейсмограммы, где наблюдаются кардинальные изменения. Эти изменения могут указывать на наличие или отсутствие дизъюнктивных нарушений. Таким образом, если исходная сейсмограмма и полученная после обработки нейронной сетью сейсмограмма различаются не более чем на заранее определенный порог, можно сделать вывод о схожести условий и отсутствии аномалий. В противном случае, значительные различия могут свидетельствовать о наличии геологических нарушений или аномалий, требующих дополнительного анализа и, возможно, подтверждения с помощью других методов исследования.

Дополнительным способом верификации полученных значений является использование методов визуального анализа сейсмограмм, который подразумевает получение геоизображений. Такой подход позволяет повысить точность и надежность геофизических исследований, минимизируя риск пропуска важных данных о структуре и состоянии подземных слоев.

Геоизображения создаются путем преобразования сейсмических данных, полученных в результате сейсморазведки, в визуальные образы, которые могут быть интерпретированы специалистами. Этот процесс включает в себя использование различных алгоритмов и техник визуализации, таких как цветовая кодировка, контурное картографирование, объемный рендеринг и др., каждый из которых может выделить определенные характеристики данных. Целью визуализации является

преобразование «сырых» сейсмических данных в формат, который легко интерпретируется человеческим глазом, выявляя при этом ключевые геологические особенности, такие как слои пород, разломы, соляные купола и прочие структуры и геологические формации.

Визуальный анализ геоизображений позволяет быстро оценить общую структуру и состояние подземных слоев, выявить наличие аномалий или несоответствий, которые могли бы остаться незамеченными при исключительно количественном анализе. В качестве примера геоизображения можно рассматривать совокупность сейсмограмм с датчиков, расположенных на исследуемой области, объединенных со смещением в пространстве (рисунок 12).

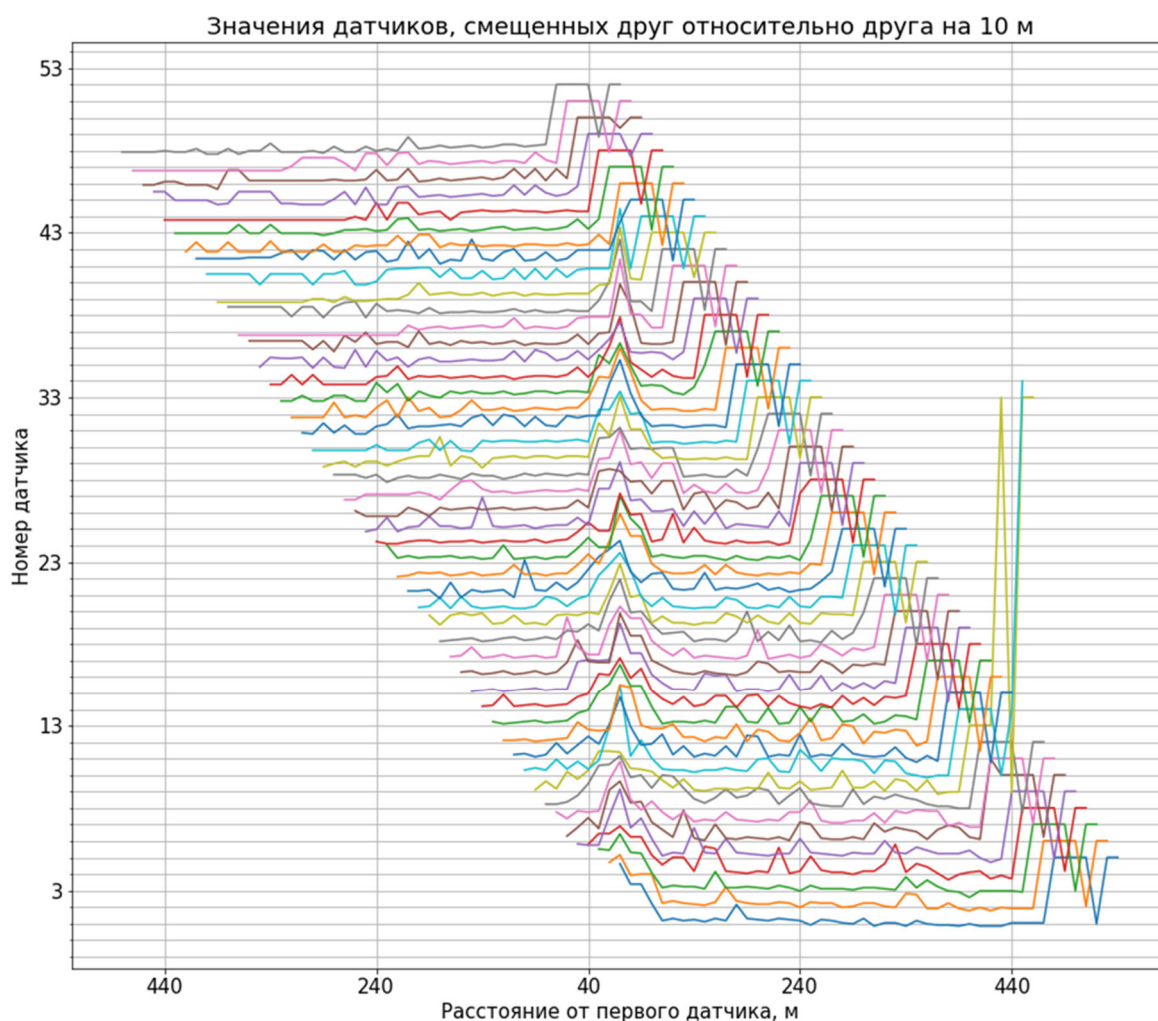


Рисунок 12 – Пример геоизображения, полученного
с сейсмограммы исследуемой области

Визуальный анализ, как правило, выступает в качестве инструмента первичной проверки, подтверждая или опровергая предварительные выводы, полученные с помощью автоматизированных методов обработки данных. Но при этом его применение способствует более глубокому пониманию геологических процессов, протекающих в исследуемой области, что критически важно для принятия решений уполномоченными структурными подразделениями горнодобывающих предприятий.

Использование визуального анализа геоизображений значительно повышает точность и надежность геофизических исследований, минимизируя риск пропуска важных данных. Это достигается за счет того, что визуальный анализ позволяет исследователям непосредственно «видеть» подземные структуры в контексте их естественного расположения и взаимосвязей с окружающими породами [39]. Такой подход улучшает интерпретацию геологической структуры местности, облегчает идентификацию потенциальных областей, содержащих разрывные нарушения, что, в свою очередь, способствует более эффективному планированию дальнейших исследований и разработок.

В рамках апробации возможностей применимости нейронных сетей семейства автоэнкодеров для ускорения процесса детектирования областей потенциально содержащих дизъюнктивное нарушение, были предварительно выбраны две сейсмограммы, которые не использовались в обучающей выборке, одна из которых содержит дизъюнктивное нарушение, предварительно верифицированное специалистами, проводившими исследование на территории, а другая – не содержащая каких либо нарушений.

При обработке данных сейсмограммы по области, не содержащей дизъюнктивных нарушений, была получена сейсмограмма, которая приведена вместе с исходной сейсмограммой на рисунке 13, наглядно демонстрирующая отсутствие кардинальных отличий в паттернах на изображении, что говорит об отсутствии дизъюнктивных нарушений.

Однако, при обработке данных сейсмограммы по области, которая содержит дизъюнктивные нарушения, получена шумная сейсмограмма, которая приведена

вместе с исходной сейсмограммой на рисунке 14. Такое отличие между геоизображениями происходит ввиду особенностей архитектуры автоэнкодеров, а именно – этапов приведения к скрытому представлению и последующему обратному преобразованию. Обученная модель содержит в себе веса, которые могут успешно восстановить (т. е. получить изображение, отличающееся от исходного не более чем на некоторую наперед заданную пороговую величину) только такие геоизображения, на которых дизъюнктивные нарушения отсутствуют.

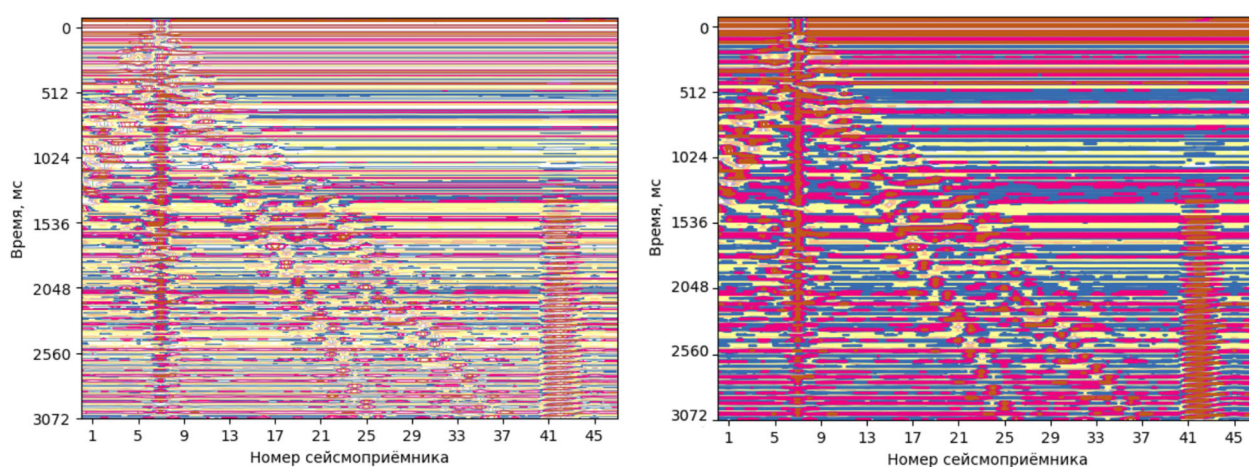


Рисунок 13 – Пример геоизображения, полученного с сейсмограммы исследуемой области

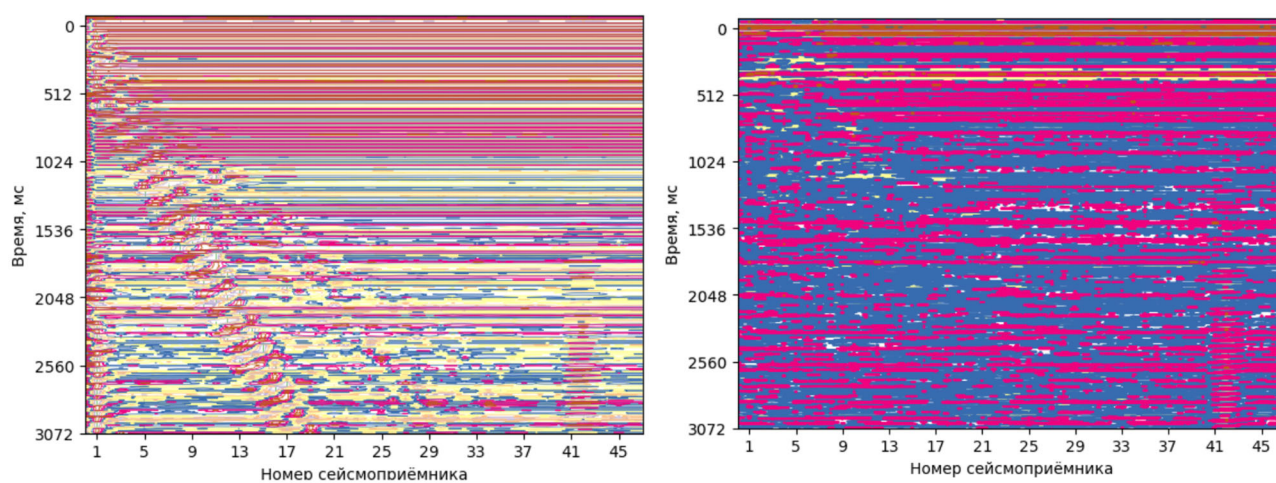


Рисунок 14 – Пример геоизображения, полученного с сейсмограммы исследуемой области

Ввиду того, что на изображении в районе 22 сейсмоприёмника, имеется дизъюнктивное нарушение, данные, содержащиеся в сейсмограмме, приводят к тому, что итоговые значения получаются кардинально иными. При этом не имеет особого значения, в какой цветовой палитре представлено геоизображение, так как исходные сейсмограммы содержат только «один канал» – значения амплитуд, а значит итоговый «шум» будет однозначно различим.

Визуальный анализ геоизображений, полученных в результате анализа сейсмограмм посредством автоэнкодеров, позволяет сократить время получения первичных результатов о наличии дизъюнктивных нарушений в исследуемой области посредством внедрения современных геофизических исследований, обеспечивая ценное дополнение к традиционным методам анализа и значительно повышая эффективность и точность исследовательских работ в области геологии и разведки полезных ископаемых.

2.6 Выводы по второму разделу

Таким образом, анализ существующих методов машинного обучения показал, что все методы обладают определенными преимуществами и недостатками. Задача определения аномалий методами машинного обучения в контексте координированного пространства заключается в поиске объектов или явлений, которые отличаются от нормального поведения или распределения в геопространственных данных. Такие аномалии могут возникать, например, в результате ошибок в сборе и/или обработке данных, проблем с качеством источников данных, а также из-за природных или человеческих факторов.

Нейронные сети могут быть использованы для автоматизации процессов классификации и интерпретации геологических образцов, обеспечивая более быстрое и точное выявление геологических особенностей. Использование нейронных сетей для прогнозирования геологических событий или моделирования геологических процессов может существенно улучшить понимание подземных условий,

а способность анализировать исторические и текущие данные позволяет использовать их для определения наиболее перспективных мест для разведки.

Для выявления дизъюнктивных нарушений в угольных месторождениях используются такие архитектуры нейронных сетей, как сверточные нейронные сети (CNN) и рекуррентные нейронные сети (RNN). Эти алгоритмы могут обучаться на размеченных изображениях, где каждый пиксель помечен как нормальный или аномальный. Затем они могут использоваться для сегментации новых изображений и определения аномальных областей.

Для решения задачи детектирования разрывных нарушений по данным сейсморазведочных исследований достаточно использовать многослойную нейронную сеть, процесс обучения которой основывается на данных о геологической структуре углепородного массива и исторических данных о нарушениях. В качестве входных данных можно использовать как «сырые» данные, так и предобработанные (например, карта размещения сейсмотрасс). Для поиска быстрого детектирования таких нарушений можно использовать нейронные сети архитектурного семейства автоэнкодеров.

Это класс нейронных сетей, используемых для обработки данных со снижением размерности в скрытых слоях. После обучения автоэнкодера его можно использовать для анализа новых данных. анализ различий между входными и восстановленными данными позволяет выявлять области, где есть аномалии, включая дизъюнктивные нарушения. По сути, автоэнкодер выявляет «неподходящие» образцы данных, которые не соответствуют общим структурам. Это делает его полезным инструментом для обнаружения аномалий в сейсмических данных, таких как дизъюнктивные нарушения.

Ввиду большого количества результирующих данных, одним из вопросов является выбор подхода к интерпретации и анализу полученных результатов анализа геопространственных данных углепородных массивов.

В работе рассмотрена структура информационной модели единого координированного пространства для объединения семейств геоданных с учетом отличий

в размерностях и шкалах измерений для их хранения, анализа, обработки и интерпретации. Предлагается процесс унификации – приведения к одной структуре разнородных атрибутивно-пространственных данных. Особое внимание уделяется ценности в уточнении морфологии разрывных нарушений со смещением и их пространственной локализации, за счет которой существенно улучшается качество интерпретации результатов.

Для большей наглядности предлагается использование в качестве визуализации итогового результата трехмерного компьютерного изображения, совмещенного с тематическими картами ведения горных работ.

Такой подход позволяет не только локализовать области тектонических аномалий, но и в перспективе, спроектировать систему поддержки принятия решений для специалистов горнодобывающего производства, что позволит повысить оперативность принятия управленческих решений и обеспечить дополнительную безопасность ведения горных работ [77].

Таким образом, обосновано следующее научное положение: качество обработки геоинформации обеспечивается использованием современных интеллектуальных методов нейросетевого анализа и технологий искусственного интеллекта для поиска аномальных областей горного массива, позволяет улучшить процесс исследования геологического строения породного массива и повысить эффективность добычи полезных ископаемых.

3 АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

3.1 Описание концептуальной модели цифрового решения

Информационные системы обработки геопространственных данных играют важную роль в современной геоинформатике и геофизике. Они позволяют собирать, хранить, обрабатывать, анализировать и визуализировать географическую информацию с целью получения ценных знаний и принятия решений. Существующие системы обработки геопространственных данных играют ключевую роль в различных областях, где применяются геоинформационные технологии и геофизические методы. Эти системы используются для анализа, обработки, визуализации и интерпретации разнообразных геоданных с целью получения ценных знаний и поддержки принятия решений. Они находят применение в горнодобывающей, нефтегазовой, экологической, строительной и других отраслях, где важно понимать и управлять геопространственными аспектами [52]. Эти системы помогают исследовать и изучать подземные структуры и ресурсы с использованием геофизических данных, прогнозировать поведение геологических процессов, таких как землетрясения и вулканическая активность, оптимизировать планирование горнодобывающих работ, оптимизируя добычу и управление ресурсами, а также создавать детальные карты и атласы для навигации и пространственного анализа для поддержки принятия решений в сфере риск-менеджмента.

В контексте информационных системы анализа геопространственных данных сейсморазведки, критическое значение имеет рациональная организация всего процесса – от сбора данных до получения конечных результатов [31]. Эффективное хранение и управление данными, а также надежная визуализация результатов играют существенную роль в успешной реализации сложных задач анализа сейсмических данных [92]. Важно не только учитывать технические аспекты при реализации и работы такой системы, но и создавать гармоничное взаимодействие между разными этапами обработки и интерпретации, будь то передача данных между модулями или межсистемная интеграция.

Текущий процесс исследования фрагмента шахтного поля на наличие разрывных нарушений сплошности геологического тела, представленный в первом разделе на рисунке 6, имеет потенциальную возможность к улучшению. Ряд недостатков данного бизнес-процесса связан с большим количеством рутинной и монотонной работы, требующей взгляда компетентного специалиста. Некоторый объем этой механической работы можно автоматизировать и перенести на функциональность специализированных информационных систем. Особенно это касается части «проверки корректности данных» и «проверки наличия геопространственной привязки». Некоторая помощь может осуществляться и в блоке «принятие управленческого решения», однако важно отметить, что итоговое решение по внедрению конкретных мероприятий принимает именно пользователь с соответствующим уровнем компетенции.

Начало анализа геопространственных данных сейсморазведки начинается с процесса сбора и обработки данных. На этом этапе система должна обеспечить эффективное хранение огромных объемов данных, предоставляя легкий доступ к ним и обеспечивая их целостность.

Следующим этапом является анализ собранных и предобработанных сейсмических данных. Информационная система должна предоставлять инструменты для проведения разнообразных анализов, включая выявление структурных особенностей и определение подземных характеристик. Следует отметить, что сейсмические данные обычно имеют высокую размерность и сложную структуру, требующую специализированных методов обработки и анализа. В этом контексте, система должна обеспечивать возможность применения различных алгоритмов и моделей, а также поддерживать интеграцию с инструментами машинного обучения для более глубокого анализа.

Наконец, правильная интерпретация и использование результатов анализа геопространственных данных сейсморазведки имеют важное значение для принятия стратегических решений. Удобная и понятная визуализация результатов играет решающую роль в этом процессе, позволяя специалистам исследовать данные на

различных уровнях детализации и проводить точные сравнения. Информационная система должна поддерживать не только создание отчетов и визуализацию, но и обеспечивать совместное использование данных между разными специалистами и отделами. Таким образом, комплексная организация системы, эффективное хранение данных и надежная визуализация результатов становятся ключевыми факторами в обеспечении успешного анализа геопрограмственных данных сейсморазведки и принятия информированных решений на основе них.

Концептуальная модель предлагаемой ГИС представляет собой набор нескольких компонентов (рисунок 15). Каждый из этих компонентов выполняет определенный набор действий, обеспечивая свою уникальную функциональность, и взаимодействует с другими модулями через программные интерфейсы, обеспечивая комплексный исследовательский процесс [87].

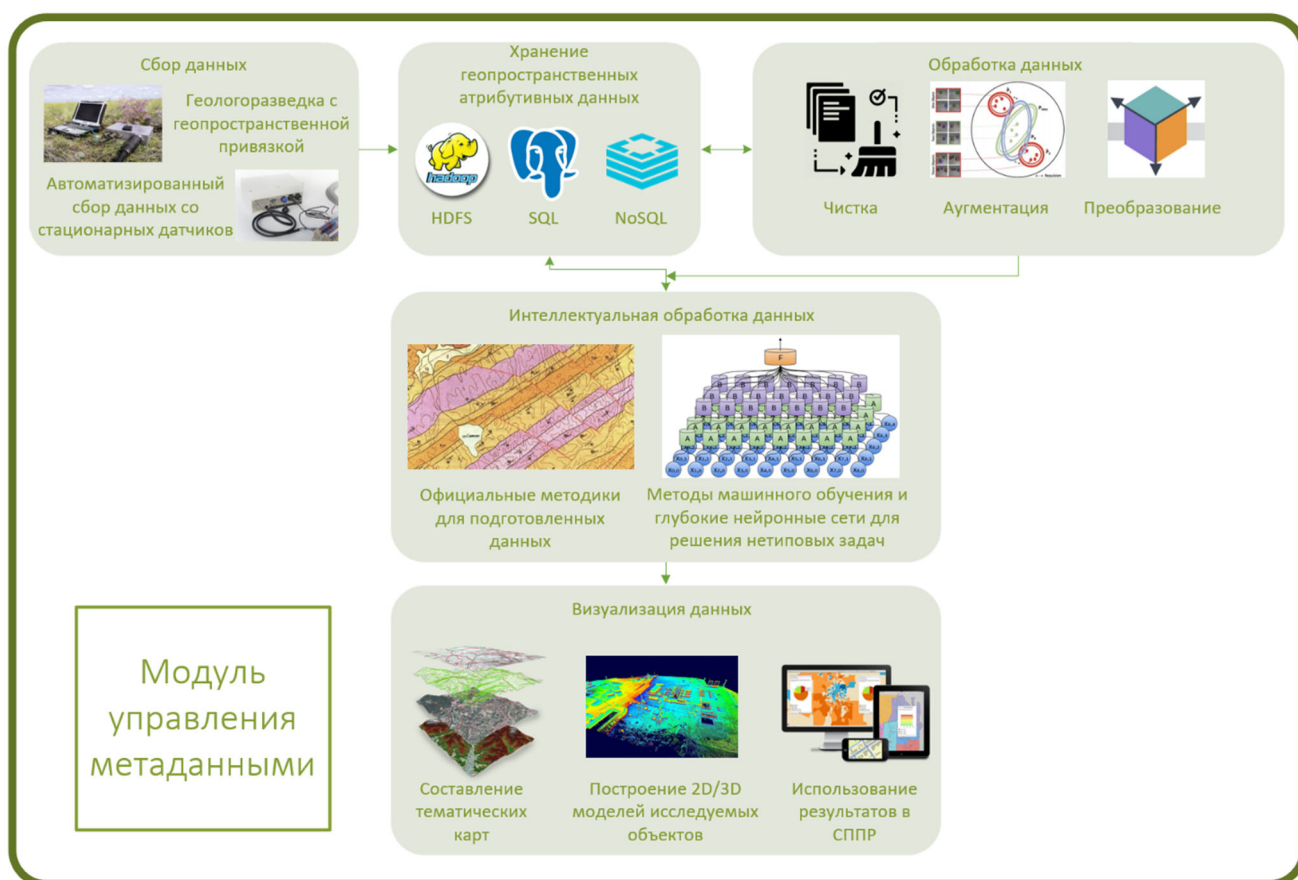


Рисунок 15 – Концептуальная модель специализированной ГИС

Компонент «Сбор данных». Компонент сбора данных предназначен для сбора, обработки и анализа геопространственных данных. В рамках концептуальной модульной архитектуры ГИС этот модуль играет ключевую роль, осуществляя сбор сейсмических данных для последующего анализа. Эти данные получаются в результате сейсморазведочных работ, включающих установку исследовательских станций на определенном расстоянии друг от друга.

При воздействии источника вибрации на пласт, например, при ударе или взрыве, исследовательские станции регистрируют отраженные сейсмические волны. Извлеченные данные, такие как время, амплитуда, частота и др., записываются, фильтруются и готовятся для последующего анализа и интерпретации.

Для отображения атрибутивных данных на тематических картах необходимо выполнить их географическую привязку к пронумерованным датчикам. Программный модуль, зная географическое положение первого датчика, расстояние между ними и угол размещения сейсмотрассы относительно карты, обеспечивает привязку данных к геопространственным координатам. Положение первого датчика может быть получено из различных источников, таких как GPS, БПЛА, спутниковые системы и др. [4].

Таким образом, компонент сбора данных должен автоматизированно собирать и хранить сейсмические данные, предварительно обрабатывать их для устранения шума и улучшения качества сигнала. Эффективный процесс сбора данных является основой для успешного анализа и поиска дизъюнктивных нарушений в угольных пластах. Необходимо обеспечивать отказоустойчивую загрузку, учитывая, что данные могут представлять единичные измерения, которые невозможно повторить [7].

Компонент «Хранение пространственных атрибутивных данных». Компонент хранения данных выполняет управление и обработку пространственных данных на различных уровнях, начиная от сохранения в базах данных и заканчивая обновлением при необходимости. Он также частично решает вопросы безопасности данных через операции, такие как резервное копирование и восстановление

в случае сбоев в системе. Кроме того, обеспечивает гибкость при работе с атрибутивными данными, что может быть полезно в различных сценариях, например, он поддерживает различные форматы данных, упрощая интеграцию и обмен информацией с другими системами и программами [20]. Также компонент предоставляет разные уровни доступа к данным для разных пользователей в системе при совместной работе над данными в команде. Для увеличения ценности данных они готовятся и представляются в нужном формате с предварительной обработкой данных. Результаты обработанных данных могут быть представлены в специализированных киосках или витринах данных.

Компонент «Обработка данных». Компонент обработки данных, или модуль «препроцессинга», выполняет преобразование данных, полученных из различных источников, таких как базы данных, файлы различных форматов, сенсоры и т. д. Этот компонент включает в себя методы для сохранения и загрузки весовых коэффициентов, необходимых для применения методов нейросетевого анализа и моделей машинного обучения. Это позволяет повторно использовать заранее обученные модели и сохранять результаты обучения для последующей работы с данными, что экономит время и упрощает процесс анализа данных [23].

Компонент «Интеллектуальная обработка данных». Компонент интеллектуальной обработки данных представляет собой важный элемент концептуальной модульной архитектуры геоинформационной системы (ГИС) для исследования угольных пластов с использованием методов сейсморазведки. Основная задача модуля анализа заключается в глубоком исследовании сейсмических данных с целью выявления и классификации дизъюнктивных нарушений в угольных пластах. Компонент включает в себя сложные алгоритмы и методы анализа данных, которые позволяют исследователям получить более подробное представление о структуре и состоянии угольных пластов. Проводит исследование геологических данных и моделирование углепородного массива, используя информацию из различных источников, таких как геологические карты, сейсмические данные и измерения гравитационного поля. Для эффективного анализа данных [105] реализует методы ма-

шинного обучения и искусственного интеллекта, что позволяет автоматизировать процесс классификации и обнаружения нарушений, а также повысить точность и скорость анализа. В процессе работы выявляет дизъюнктивные нарушения углепородного массива и оценивает их масштабы. Полученные результаты могут быть использованы для принятия решений и планирования дальнейших шагов в ходе разведки угольных пластов.

Компонент «Визуализация данных». Результаты анализа могут быть представлены в различных форматах, таких как карты, графики и таблицы, что облегчает последующий обзор данных и принятие соответствующих решений. Поскольку термин «геоинформационные системы» охватывает не только обработку геопространственных данных, но и инструменты визуализации, в предлагаемой системе предусмотрено использование собственных средств визуализации. Эти инструменты поддерживают экспорт данных в широко используемые форматы, такие как PNG/BMP для сохранения изображений и последующей публикации, DXF/DST/DWG для работы с AutoCAD Map, а также форматы SHP/KML для взаимодействия с другими ГИС (ArcGIS, Google Earth и др.). Для визуализации результатов анализа сейсмограмм, например, в рамках поиска дизъюнктивных нарушений в углепородном массиве, можно также использовать специализированные программы обработки сейсмических данных, такие как SeisWorks, Kingdom, GeoFrame.

Управления метаданными. Одной из ключевых задач управления метаданными является создание, изменение и удаление записей метаданных, а также возможность осуществления поиска и извлечения информации о метаданных [41]. Эта информация включает детальное описание данных и их атрибутов, что крайне важно для понимания и использования данных в геоинформационных системах (ГИС). Этот модуль обеспечивает безопасный и контролируемый доступ к геопространственным данным только авторизованным пользователям в рамках ГИС. Это также гарантирует, что данные доступны в соответствующих форматах и стандартах, что упрощает их использование и интеграцию с другими системами. Предо-

ставляет функции управления пользователями. Это включает в себя аутентификацию пользователей, авторизацию и контроль доступа, гарантируя, что только авторизованные пользователи имеют доступ к ГИС и ее данным. Это также предоставляет системным администраторам возможность управлять учетными записями пользователей, их ролями и разрешениями.

Для реализации процессов обработки и анализа данных, а также для управления хранением и доступом к информации разрабатывается специализированная информационная система с открытой архитектурой [75]. Эта система объединяет в себе алгоритмы обработки данных, методы машинного обучения, геоинформационные технологии и визуализацию результатов. Информационная система предоставляет эргономичный интерфейс для работы с данными и позволяет исследователям и горнодобывающим компаниям получать интерпретируемые результаты и тематические карты на основе обработанных данных.

При проектировании архитектуры системы учитывается возможность интеграции существующих программных решений и баз данных. Это позволяет использовать уже накопленные данные и результаты исследований, что способствует повышению эффективности работы и обеспечивает более всесторонний анализ данных о тектонических нарушениях в угольных пластах. Интеграция также обеспечивает возможность взаимодействия с другими специализированными системами, используемыми в горнодобывающей промышленности, что способствует более глубокому исследованию и оптимизации процессов добычи угля.

Компонентная архитектура предлагаемой ГИС значительно улучшает процесс исследования угольных пластов на наличие дизъюнктивных нарушений. Использование такой структуры придает системе гибкость и масштабируемость [108], позволяя добавлять и изменять компоненты в соответствии с требованиями исследования. В результате ученые и геологи получают мощный инструмент, способный эффективно обрабатывать геопространственную информацию для выявления и характеристики дизъюнктивных нарушений в угольных пластах с использованием метода сейсморазведки. Это, в свою очередь, способствует более эффективному

принятию управленческих решений при формировании паспорта для горных работ на выемочном участке.

3.2 Описание структуры информационной системы

После построения концептуальной модели, описывающей последовательности процесс этапов сбора, анализа, обработки, визуализации и генерации отчетов, была разработана специализированная информационная система на архитектурном уровне. На рисунке 16 представлена структура этой информационной системы, включающая совокупность программных модулей, реализованных в виде отдельных подсистем [89].

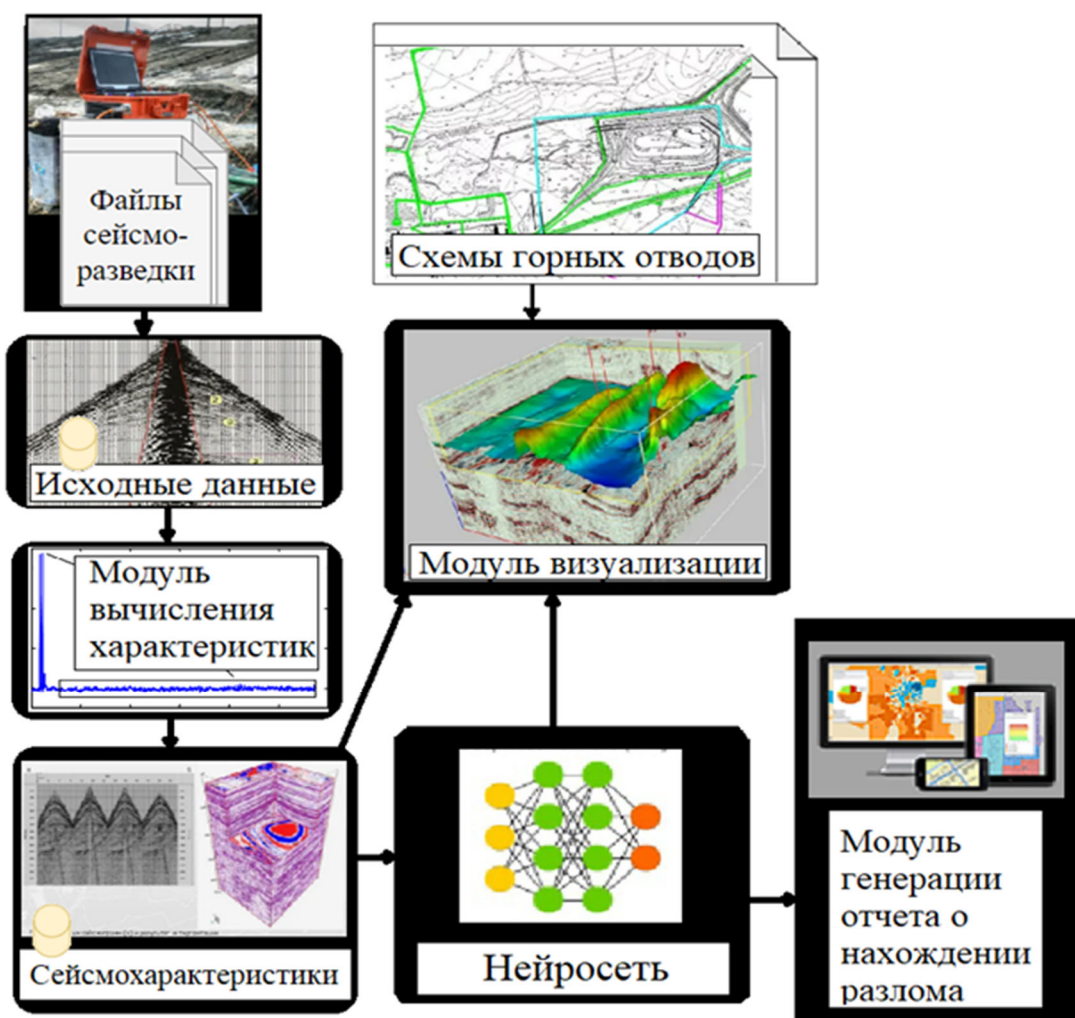


Рисунок 16 – Структура информационной системы

Первоначальная визуализация исходных данных, таких как схемы горных отводов и результаты сейсморазведки, преобразованные в 3D-модель, была проведена в соответствии с соглашением № 075-15-2022-1195 от 30.09.2022 между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» по программе «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу». Дальнейшее развитие функциональности предполагается в виде самостоятельной отечественной информационной системы, учитывая наличие множества модулей и нейронной сети, выполняющей обработку вводимых данных и расчеты.

В описываемой системе в качестве исходных данных, загружаемых пользователем, используются результаты кинематических испытаний, представленные в виде сериализуемых файлов сейсморазведочных данных. Сеть профилей, а также источники и приемники, играют ключевую роль в этом процессе. Исходные данные по профилям, включая координаты профилей и расположение датчиков, хранятся в отдельных сущностях в файлах формата SEG-Y. Эти файлы содержат информацию о сейсмических данных в виде временных рядов, представляющих собой записи временных изменений сейсмического сигнала, отраженного различными слоями геологической структуры.

Детальное описание системы наблюдений, такие как конфигурации приемников и источников, методы активации источников и используемое оборудование, выходит за рамки данной работы. Эти вопросы обычно решаются на практике в соответствии со спецификой конкретного объекта исследования и целями сейсморазведки, и такие сведения могут быть внесены в систему оператором, учитывая разнообразие оборудования и особенности исследуемых объектов [57].

Предполагается, что полученные амплитуды сейсмических сигналов будут использоваться не в исходной форме, а для расчета различных сейсмических характеристик через кинематическую обработку данных сейсморазведки. Эта обработка позволяет определить геометрию и свойства геологических формаций на ос-

нове сейсмических сигналов, а также охарактеризовать область, подвергшуюся сейсморазведочным работам. В этой связи разрабатывается модуль расчета сейсмических характеристик, включающий методы и алгоритмы кинематической обработки данных, такие как расчет априорных статических поправок, определение скоростей суммирования, расчет амплитуд помех и другие. Модуль должен включать методы для расчета показателей, таких как среднеквадратичное значение амплитуды, отношение сигнал/шум, средние и пиковые значения частот и амплитуды сигнала [123]. Рассчитанные значения этих характеристик представляют ценность для текущих вычислений и ретроспективного анализа.

Для анализа сейсмических характеристик предлагается создать программный модуль, автоматизирующий процесс отделения полезного сигнала от зашумленного. «Полезными сигналами» считаются отраженные или преломленные волны, несущие информацию о свойствах подземных слоев.

«Помехи» могут представлять различные источники шума, такие как фоновые шумы, шумы от других источников сейсмической волны, нежелательные отражения и преломления от поверхностных структур. В рамках предложенной модели данные сейсморазведки проходят первичную обработку, включая методы фильтрации, коррекции смещения, взвешивания и деконволюции, для улучшения качества полезного сигнала.

Декомпозиция определения геометрических дефектов пластов, таких как разломы, на основе данных сейсморазведки может значительно влиять на оперативность принятия решений в технологическом процессе [70]. Например, отсутствие угольной массы требует дополнительных исследований геометрии породного массива, что влияет на длительность простоев и, как следствие, на экономические аспекты проекта по добыче угля.

Интерпретация результатов, полученных с использованием нейронных сетей, осуществляется на основе важности признаков, связанных с амплитудами сейсмических сигналов [16]. Сигналы с высокими амплитудами могут указывать на наличие дизъюнктивных нарушений в горных породах. Физическая интерпретация

результатов связана с определением структуры горных пород, и эти данные могут быть использованы для принятия решений в добыче угля [15].

В процессе работы модуль может выявить дизъюнктивные нарушения углепородного массива и оценить их масштабы [37]. Результаты анализа могут быть представлены в виде карт, графиков, таблиц и других форматов, что поможет произвести дальнейший анализ данных и принять необходимые решения [17].

Одной из ключевых функций модуля управления геоданными является управление метаданными. Это включает в себя создание, редактирование и удаление записей метаданных, а также возможность поиска и извлечения информации о метаданных. Эта информация содержит подробное описание данных и их атрибутов, что важно для понимания и использования данных в ГИС.

Еще одной важной функцией модуля управления геоданными является доступ к данным. Этот модуль обеспечивает безопасный и контролируемый доступ к геопространственным данным авторизованным пользователям в рамках ГИС. Это также гарантирует, что данные доступны в соответствующих форматах и стандартах, что упрощает их использование и интеграцию с другими системами.

Кроме того, модуль управления геоданными предоставляет функции управления пользователями. Это включает аутентификацию пользователей, авторизацию и контроль доступа, гарантируя, что только авторизованные пользователи могут получить доступ к ГИС и ее данным. Это также позволяет системным администраторам управлять учетными записями пользователей, ролями и разрешениями, обеспечивая высокий уровень контроля над системой.

Все вышеперечисленные модули взаимодействуют вместе, образуя программную часть ГИС, и обеспечивают работу системы. Благодаря этой программной части, пользователи могут не только собирать и обрабатывать геопространственные данные, но и использовать их для решения различных задач и проблем. ГИС является мощным инструментом для исследования, планирования, мониторинга и управления геопространственными данными, что делает его незаменимым инструментом для многих организаций и учреждений. Применение подхода кон-

структурирования ГИС-приложений на основе открытой архитектуры расширяет перечень решаемых задач при проектировании горно-технических систем угольных предприятий за счет взаимозаменяемости компонентов и интеграции с существующими цифровыми продуктами.

На рисунке 17 представлена схема потоков данных [96], иллюстрирующая последовательность операций в системе. Согласно представленной схеме, начальным этапом работы системы является загрузка пользователем набора файлов в формате SEG-Y, содержащих информацию, полученную в результате сейсморазведки. Из этих файлов извлекаются сведения о конфигурации сеймопрофилей, а также массивы амплитуд сейсмических сигналов и другие данные, сохраненные в процессе кинематических испытаний породного массива [12].



Рисунок 17 – Схема потоков данных

После структуризации полученной информации она загружается в соответствующую таблицу базы данных, где хранятся геоданные кинематических испыта-

ний. Эти данные послужат основой для проектирования динамических характеристик волн, которые в свою очередь являются входными данными для алгоритмов модуля интеллектуального анализа. Этот модуль объединяет модели машинного и глубокого обучения, применяемые для локализации разрывных нарушений различного характера.

В результате проведенного анализа должен быть сделан вывод о наличии дизъюнктивных нарушений на исследуемом участке угольного пласта. В случае выявления дизъюнктивного нарушения также необходимо выделить зоны с наибольшей потенциальной вероятностью наличия разломов. Эта информация используется для визуализации углепородного пласта.

3.3 Описание информационной модели ГИС

В связи с постоянным расширением объемов обрабатываемых сведений и разнообразием форматов данных, создание оптимальной информационной модели (рисунок 18) становится ключевым аспектом обеспечения функциональности и производительности ГИС.

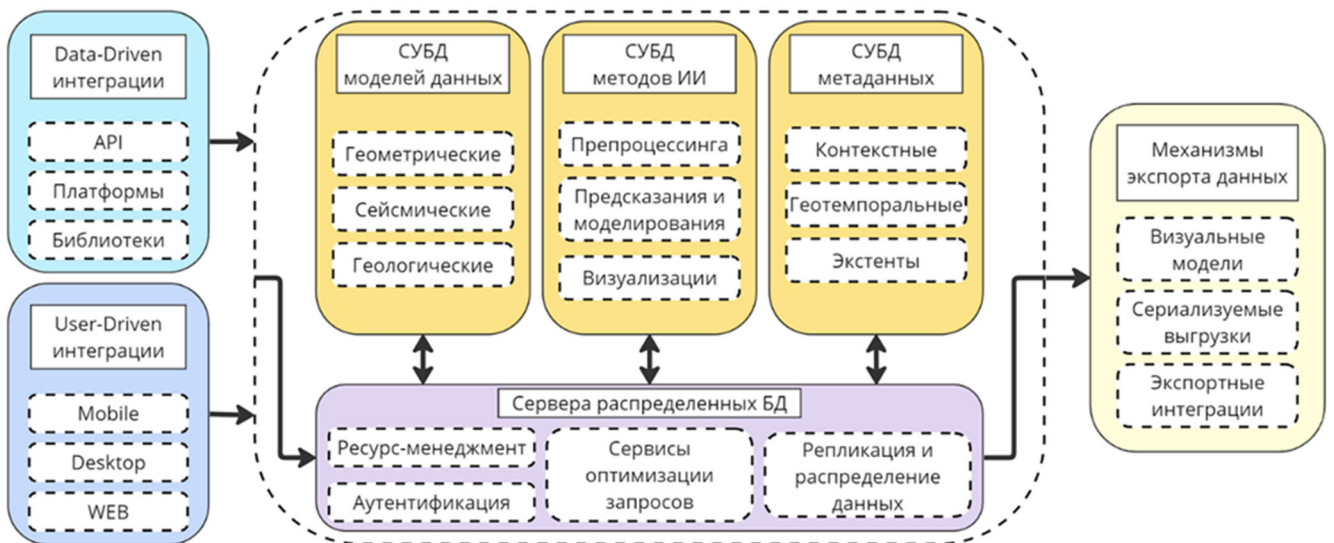


Рисунок 18 – Информационная модель специализированной ГИС

Проектирование информационной модели позволит определить набор используемых современных инструментов и технологий, позволяющих обрабатывать, анализировать и визуализировать геоданные [91].

Особое внимание следует уделять информационной модели при разработке специализированной ГИС, созданной для управления данными о геометрии породного массива методом сейсморазведки [10]. В этом контексте важно провести анализ ключевых кластеров данных, которые необходимо учесть при проектировании информационной модели. Кроме того, целесообразно выделить отдельные банки данных для эффективного хранения информации, что является неотъемлемой частью создания оптимальной инфраструктуры для управления геоинформационными ресурсами в данной области.

Также неотъемлемой задачей является разработка инструментов для визуализации и анализа геоданных, особенно в трехмерном контексте, с целью предоставить исследователям и специалистам в области геологии и горного дела более наглядные средства интерпретации результатов анализа и понимания геометрии породного массива. Важно учесть особенности распределенных баз данных в контексте геоинформационных систем, чтобы обеспечить эффективное хранение и обработку данных о геометрии породного массива. Это способствует повышению производительности и отказоустойчивости системы, особенно при обработке больших объемов данных.

1 *Система управления базами данных.* Программное обеспечение, которое управляет хранением данных в хранилище данных. Оно может быть реляционным, объектно-ориентированным или другим типом базы данных [22]. В ГИС для хранения данных, как правило, используются реляционные модели базы данных. Однако, нереляционные базы данных, такие как MongoDB или Cassandra, могут быть полезны для определенных видов данных в ГИС.

Например, если в ГИС используется большой объем данных, то нереляционная база данных может обеспечить более быстрое и эффективное хранение и обработку этих данных. Также, для хранения крупномасштабных изображений и тайлов

нереляционные базы данных могут быть более подходящим выбором, поскольку они предоставляют возможность хранения и обработки данных в виде документов или хранилищ ключ-значение [29].

2. *Модели данных.* Способ организации данных для хранения и обработки. Они определяют, как данные будут представлены, какие типы данных будут использоваться в базе данных, а также взаимодействие между различными элементами данных, представленными на рисунке 19.

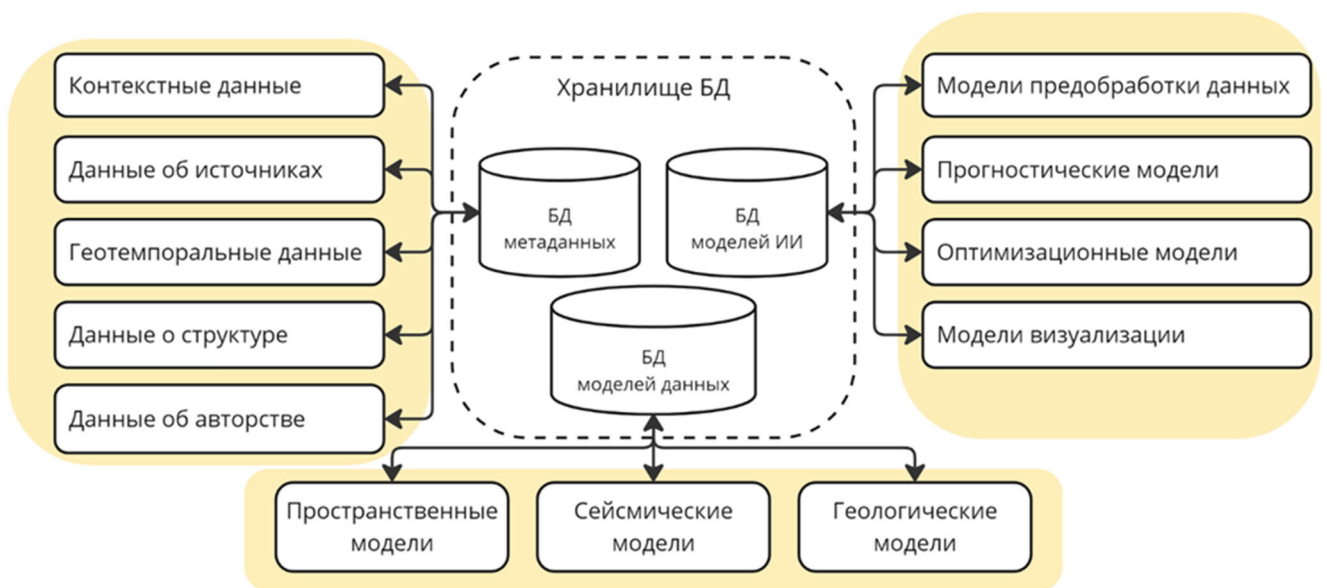


Рисунок 19 – Структура баз данных

Геометрические данные включают в себя географические координаты точек, линий или полигонов, описывающих границы и форму породных массивов. Эти данные могут быть представлены в формате векторных или растровых данных. Сейсмические данные представляют собой информацию, полученную в результате сейсмозондирования, такую как сейсмические профили, изображения сейсмических разрезов, амплитудные карты и другие параметры, характеризующие геологические структуры [35]. Геологические данные включают в себя информацию, связанную с геологическими характеристиками породных массивов, такими как тип пород, стратиграфические единицы, литология, структура, содержание полезных ископаемых и т. д. [100].

База данных моделей искусственного интеллекта (ИИ) и методы ИИ для управления данными об исследовании геометрии породного массива методом сейсморазведки могут принести значительные преимущества [56]. Нейронные сети и алгоритмы машинного обучения могут быть обучены распознавать и классифицировать различные типы геологических структур и неоднородностей в породном массиве на основе сейсмических данных. На основе сейсмических данных и исторических наблюдений ИИ может создать модели, которые предсказывают возможные изменения в геометрии породного массива и помогают принимать решения о безопасности и оптимизации добычи ресурсов. Алгоритмы оптимизации могут учитывать геологические данные и ограничения, чтобы предложить оптимальные пути разработки и использования ресурсов. ИИ может помочь улучшить визуализацию и коммуникацию данных о геометрии породного массива. Алгоритмы компьютерного зрения и обработки изображений могут использоваться для создания трехмерных моделей и визуализаций, которые наглядно демонстрируют геологические структуры и неоднородности. Внедрение искусственного интеллекта в информационную модель ГИС для управления данными об исследовании геометрии породного массива методом сейсморазведки требует хорошего понимания задач, данных и потребностей конкретного проекта. Возможность хранения нескольких моделей ИИ позволит существенно повысить гибкость системы.

Метаданные содержат сведения об объектах, включая название, автора, дату создания, проекцию и другие атрибуты. Метаданные обычно хранятся в расширенных файлах, которые описывают структуру базы данных [104]. *Контекстные метаданные* включают информацию о самом проекте сейсморазведки, такую как название проекта, описание, цель, временные рамки, географический охват и другую контекстуальную информацию. Они служат средством для пользователя для более глубокого понимания контекста и характеристик проекта. *Метаданные об источниках* предоставляют информацию об источниках данных, используемых в ГИС, таких как организации, учреждения, исследовательские группы и т. д. Эти метаданные включают детали о точности, достоверности, надежности и актуально-

сти данных, а также методах сбора [59]. Предоставление метаданных об источниках данных помогает пользователям оценить качество и доверие к данным. *Метаданные о структуре и описании* данных включают информацию о таблицах, атрибутах, связях между таблицами, кодировках, классификациях и других схемах данных. Эти метаданные помогают пользователям понять, какие атрибуты доступны, как они связаны между собой и как использовать данные для анализа и принятия решений.

3 User- и Data-driven интеграции. Этот контур представляет собой набор интерфейсных инструментов и библиотек, которые облегчают доступ к данным из хранилища данных, включая запросы и анализ геоданных. Существует широкий набор программного обеспечения и инструментов, которые облегчают доступ к данным из хранилища данных, включая запросы и анализ геоданных. Это позволяет модернизировать систему таким образом, чтобы покрыть широкий спектр задач независимо от предметной области [94]. Для упрощения доступа к инструментам геоинформационной системы необходимо учесть набор инструментов для создания интерфейса пользователя. Существует несколько библиотек графических пользовательских интерфейсов (GUI), которые облегчают создание интерфейса пользователя для доступа к данным и инструментам геоинформационной системы.

ГИС-платформы: геоинформационные системы предоставляют комплексный набор инструментов для работы с геоданными. Некоторые популярные ГИС-платформы включают ArcGIS от Esri, QGIS (с открытым исходным кодом), MapInfo, GRASS GIS и другие. Эти платформы обеспечивают возможности для визуализации, анализа, редактирования и управления геоданными.

Инструменты для пространственного анализа и моделирования. Специализированные инструменты для пространственного анализа и моделирования, которые позволяют выполнять сложные задачи, такие как интерполяция, буферизация, расчленение и моделирование геопространственных процессов. Некоторые из таких инструментов включают GRASS GIS, Whitebox GAT, GeoDa и SAGA GIS.

Веб-интерфейсы и API: Многие ГИС-платформы и сервисы предоставляют веб-интерфейсы и API для доступа к данным. Например, ArcGIS API for JavaScript,

Leaflet.js, OpenLayers и Google Maps API предоставляют возможности для веб-картографии и взаимодействия с геоданными через браузер. Подобное программное обеспечение позволяет осуществлять комплексный доступ к данным, что способствует формированию возможности системного анализа геометрии горного массива и сопряжения нескольких модулей.

4 Серверы распределённых баз данных.

Это компьютерные системы, которые обеспечивают хранение и обработку данных на нескольких узлах, где каждый узел является частью распределенной сети. Каждый узел сервера распределенной базы данных (RDBMS) имеет свою собственную базу данных, которая может быть размещена на разных физических машинах или серверах. Распределенные базы данных используются в случаях, когда объем данных очень большой, и такая база данных просто не может находиться на одном сервере [54]. Они также используются для распределения нагрузки на несколько серверов, чтобы обеспечить более высокую производительность и отказоустойчивость в случае сбоев в работе одного из серверов [102].

Серверы распределенных баз данных с учетом топологии размещения для распределения нагрузки между несколькими узлами позволяют обеспечить более высокую производительность за счёт уменьшения времени обработки данных. На практике в текущей ситуации рабочее время от обработки данных до формирования отчета занимает 74 часа. После внедрений распределенной системы удалось снизить часть рутинных операций и сократить время работы до 46 часов, т. е. уменьшить время до 62 % от изначального. Таким образом, использование подхода витрин данных в поиске дизъюнктивных нарушений способно оказать влияние на повышение скорости обработки данных на 38 % за счет применения средств навигации, фильтрации и регулярной реиндексации. Также это позволило улучшить отказоустойчивость за счет создания системы резервного копирования данных и передачи данных между узлами с помощью сетевых протоколов. В текущем режиме перенос данных осуществляется с помощью внешних носителей памяти.

5 Механизмы экспорта данных. Для визуализации результатов анализа сейсмограмм, направленного на выявление дизъюнктивных нарушений углепород-

ного массива, целесообразно применять специализированные программы обработки сейсмических данных. Процесс работы с указанными программными продуктами охватывает следующие этапы:

1 В программе происходит импорт исходных данных, включая сейсмические данные и информацию о их местоположении на поверхности Земли.

2 Затем выполняется обработка данных, включающая фильтрацию, калибровку и коррекцию времени прихода сигнала.

3 После обработки проводится интерпретация сейсмических данных, что позволяет выявить зоны дизъюнктивных нарушений углепородного массива.

4 Полученные результаты могут быть визуализированы в форме трехмерных моделей, карточек и сечений, обеспечивающих более ясное представление о геологической структуре массива и выявленных зонах нарушений.

Визуализация результатов анализа сейсмических данных дает возможность провести более детальное изучение геологической структуры участка и определить оптимальные точки для бурения скважин и последующих геологоразведочных работ [28].

3.4 Визуализация получаемых результатов и создание картографических материалов

Используя метод триангуляции Делоне, каждый треугольник создается таким образом, что внутри него не содержится ни одной точки, описанной окружностью вокруг треугольника, за исключением точек, являющихся его вершинами. Это обеспечивает оптимальное распределение треугольников и предотвращает их пересечение, что важно для точного представления геометрии пласта. Метод триангуляции Делоне представляет собой алгоритмический подход к разбиению плоскости (или пространства в трехмерном случае) на треугольники таким образом, чтобы ни один два треугольника не имели общих ребер, а описанная окружность каждого треугольника не содержала внутри себя других точек из набора. Визуализация геометрии выемочного пласта с использованием метода триангуляции Делоне осно-

вана на создании таких треугольных сеток, где точки контура выступают в качестве вершин. Этот метод обеспечивает равномерное и оптимальное покрытие пласта треугольниками, что позволяет создать плавные и реалистичные трехмерные модели с высокой точностью. Такой подход также способствует созданию плавных поверхностей с высокой степенью детализации, что особенно полезно при анализе дизъюнктивных нарушений и других геологических особенностей пласта. На рисунке 20 представлена трехмерная модель выемочного пласта, созданная с использованием этого метода. Модель наглядно демонстрирует геометрию пласта, включая нанесенное дизъюнктивное нарушение.

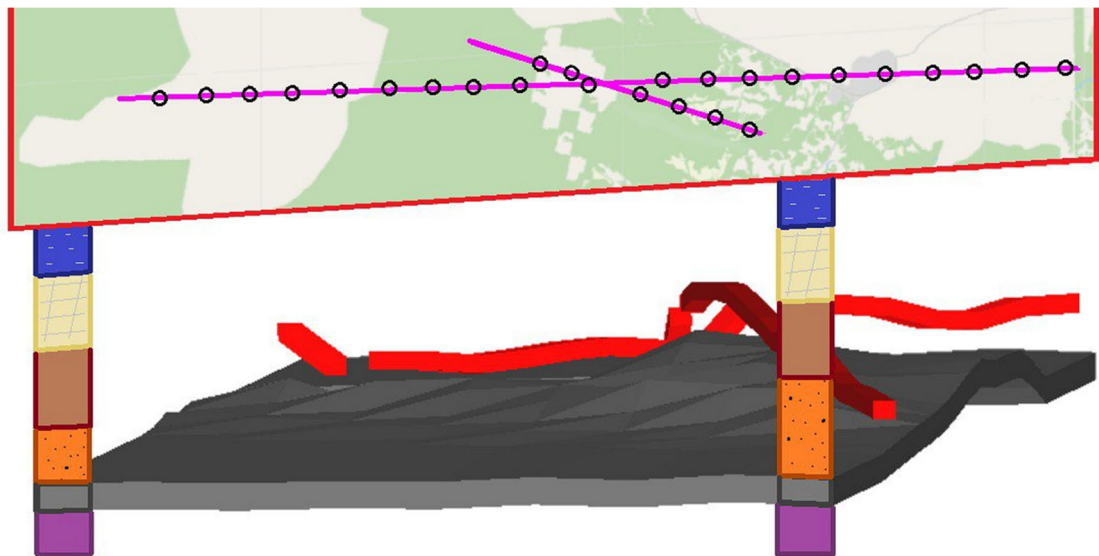


Рисунок 20 – Визуализация геометрии угольного пласта

Для визуализации результатов анализа сейсмограмм, производимого в целях поиска дизъюнктивных нарушений угленородного массива, можно использовать специализированные программы для обработки сейсмических данных, например, SeisWorks, Kingdom, GeoFrame [110].

Сам процесс работы с вышеприведёнными программными продуктами сводится к следующим шагам:

1 В программе импортируются исходные данные – сейсмические данные и информация об их расположении на поверхности Земли.

2 Затем производится обработка данных, включающая фильтрацию, калибровку и коррекцию времени прихода сигнала.

3 После обработки проводится интерпретация сейсмических данных, позволяющая выявить зоны дизъюнктивных нарушений углепородного массива.

4 Полученные результаты могут быть визуализированы в виде 3D-моделей, карточек и сечений, которые позволяют более наглядно представить геологическое строение массива и выявленные зоны нарушений.

Визуализация данных, полученных из анализа сейсмических данных, играет важную роль в проведении более глубокого изучения геологического строения области и выборе оптимальных мест для бурения скважин и проведения дальнейшей геологической разведки. Представление результатов может осуществляться в различных форматах, включая двухмерные и трехмерные варианты, что облегчает понимание и интерпретацию данных для горняков и технологов. Это позволяет более достоверно выявить нарушения и принимать обоснованные решения на основе анализа предсказаний. Такой подход помогает исследователям и специалистам в области геоинформатики лучше понять данные, сформулировать информированные выводы и разработать соответствующие стратегии и планы действий.

С использованием обученных моделей происходит построение тематических карт дизъюнктивных нарушений угольных пластов. Генерация тематических карт позволяет наглядно представить пространственные данные исследуемой области, а также выделить и визуализировать конкретные аспекты и характеристики, такие как геологические структуры, наличие разрывов или дизъюнктивных нарушений. На рисунке 21 представлено окно открытого редактора САD-файлов с открытой тематической картой. Необходимость использования таких редакторов связана с тем, что специалистами на предприятиях используются файлы формата *dwg*, который используется приложением AutoCAD.

Для проведения визуализации необходимо воспользоваться набором топографических карт со схемами шахтных полей в пределах горного отвода [30]. Поскольку сейсмодатчики имеют пространственную привязку, то на поверхность

электронной карты будут нанесены сейсмопрофили с соответствующим расположением датчиков.

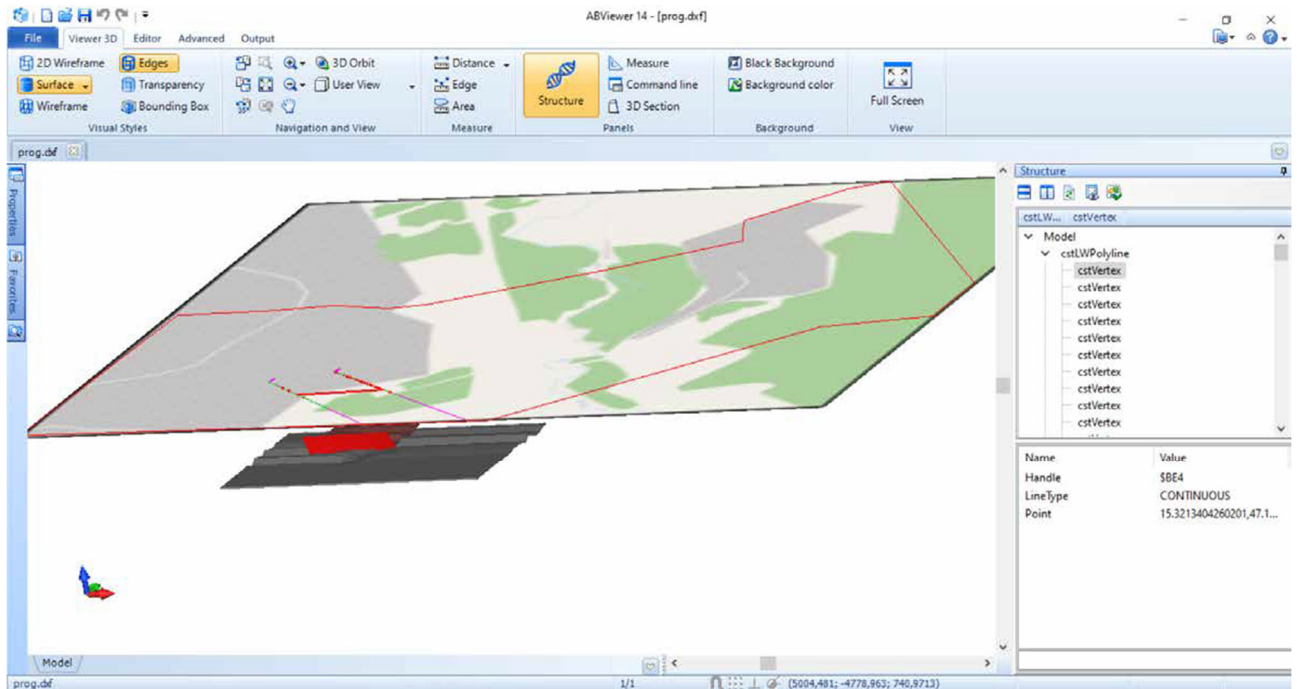


Рисунок 21 – Отображение деформации породного массива в ГИС

По результатам обработанных атрибутивных данных мы получаем тематическую электронную карту, на которой будет отрисован деформированный угольный пласт с опорой на данные сейсморазведки. Итоговый отчет, который может получить пользователь на выходе системы, включает в себя информацию о наличии или отсутствии дизъюнктивных нарушений в области проведения сейсморазведочных работ вместе с визуализацией залегания пластов в случае наличия деформаций, которые необходимо отразить на изображении. Пример части отчета представлен на рисунке 22.

Результатом проведенного визуального анализа должен стать вывод о наличии дизъюнктивных нарушений на исследуемом участке угольного пласта. В случае, если дизъюнктивное нарушение было выявлено, необходимо также выявить зоны наибольшей потенциальной вероятности нахождения разломов.

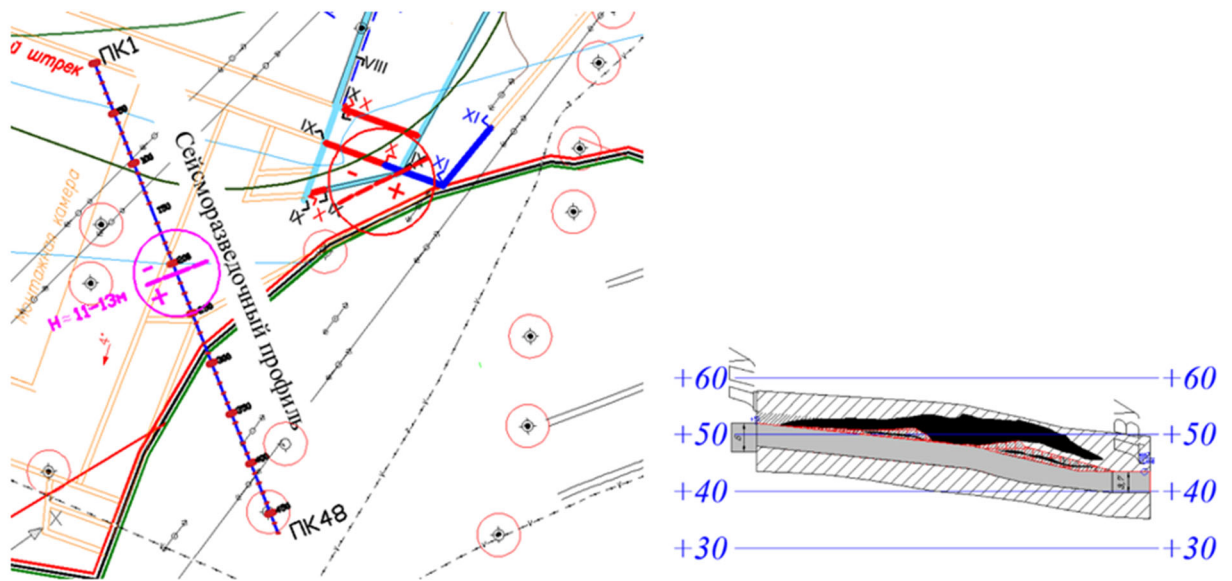


Рисунок 22 – Наличие геологического нарушения
по результатам проведения сбойки

По результатам анализа полученного отчета, с учетом особенностей разломов, принимается решение по внедрению различных мероприятий или корректировке технологии процесса ведения очистных работ, например каким горношахтным оборудованием провести отработку угольного пласта, либо о своевременном переходе на новый уровень в пределах выемочного участка.

3.5 Выводы по третьему разделу

Предлагаемая модульная архитектура ГИС позволяет существенно повысить эффективность и точность исследования угольных пластов на наличие дизъюнктивных нарушений. Использование модульной архитектуры обеспечивает гибкость и масштабируемость системы, позволяя добавлять и модифицировать компоненты в зависимости от потребностей исследования. В результате, ученые и геологи получают мощный инструмент, способный эффективно обрабатывать и анализировать геопространственную информацию для выявления и характеристики дизъюнктивных нарушений угольных пластов методом сейсморазведки. Открытая архитектура позволяет интегрироваться с существующими системами ведения горных ра-

бот выемочного участка, повысить общую отказоустойчивость подсистемы хранения данных.

Таким образом, обосновано следующее научное положение: достоверность принимаемых управленческих решений и рекомендаций при проектировании и эксплуатации горнотехнических систем повышаются, по сравнению с типовыми ГИС, за счет применения предметно-ориентированных программных решений, реализованных в виде специализированного ГИС-приложения с открытой архитектурой, позволяющего прогнозировать местоположение разломов горных пород.

Одним из вопросов, ввиду описываемой архитектуры, является управление данными в ГИС, в связи с чем предлагается подход к построению информационной модели на основе витрин данных. В работе рассмотрены типы моделей данных, способы организации и хранения информации, а также принципы доступа и обновления данных. Излагается идея модуля метаданных – сведения об объектах данных, которые могут включать в себя название, автора, дату создания, проекцию и другие атрибуты. Описанные метаданные формализуют устойчивый фактор интеграции, позволяющий зафиксировать состояние модели по разным аспектам – тематическим, хронологическим или пространственным геоданным. Благодаря этой интеграции формируется устойчивое отношение, представляющее собой структурированную геоинформационную модель, описывающее одновременно атрибутивные и пространственные составляющие модели. Для повышения эргономики это устойчивое отношение целесообразно стратифицировать – разбить на тематические слои, состоящие из конкретного набора объектов, закрепленных за своей тематикой. В результате проведения исследования, получены выводы о том, что серверы распределённых баз данных с учетом топологии размещения для распределения нагрузки между несколькими узлами, позволяют обеспечить более высокую производительность за счёт уменьшения времени обработки данных на 38 % и повысить общую отказоустойчивость подсистемы хранения данных.

Таким образом, обосновано следующее научное положение: адаптивность компьютерных систем поддержки принятия решений к горно-геологическим усло-

виям при проектировании горнотехнических систем в специализированной ГГИС обеспечивается использованием объектно-ориентированного подхода и проведением декомпозиции массива данных на операционные витрины, позволяющие объединять данные из различных источников.

4 МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ТЕМАТИЧЕСКИХ КАРТ ДИЗЬЮНКТИВНЫХ НАРУШЕНИЙ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

4.1 Подготовка исходных данных

Этап подготовки и обработки исходных геопространственных данных, которые используются для построения карт дизъюнктивных нарушений угольных пластов, является критически важным, так как от качества и точности исходных данных зависит достоверность и информативность окончательных результатов анализа. Процесс состоит из нескольких аспектов.

Сбор данных и оцифровка геопространственных информации. Первоначальным шагом в подготовке исходных данных является сбор разнообразных геопространственных информации, необходимых для анализа дизъюнктивных нарушений угольных пластов. Эти данные могут включать сейсмические снимки, лидарные данные, геологические карты, данные гравиметрии и магнитометрии, информацию о горизонтальных и вертикальных скважинах и другие. Важно собрать информацию из различных источников для получения комплексного представления о геологической структуре месторождения угля с учетом его положения в координированном пространстве.

Калибровка и геореференцирование. Собранные геопространственные данные могут иметь различные форматы и пространственные координаты. Поэтому на этом этапе производятся калибровка и геореференцирование данных, чтобы обеспечить их согласованность и возможность взаимного использования. Геореференцирование позволяет привязать данные к определенной системе координат, что необходимо для дальнейшей визуализации и анализа на карте.

Фильтрация и устранение артефактов. Исходные геопространственные данные могут содержать шумы, артефакты или неправильные измерения. Поэтому на этом этапе производятся фильтрация и устранение возможных артефактов. Применяются различные методы обработки сигналов и фильтрации данных для получения чистых и точных наборов информации, что существенно повышает достоверность и точность анализа.

Интеграция данных. Для построения карт дизъюнктивных нарушений угольных пластов может потребоваться объединение данных разных типов и форматов. На этом этапе осуществляется интеграция данных, чтобы получить комплексный и всесторонний обзор о геологической структуре и распределении тектонических нарушений. Это позволяет совместно использовать информацию из различных источников и получить более полное представление о рассматриваемой теме.

Геопространственная интерполяция. Для создания тематических карт дизъюнктивных нарушений угольных пластов может потребоваться интерполяция данных. Это процесс, при котором отсутствующие или неполные данные заполняются на основе известных значений и математических моделей. Геопространственная интерполяция помогает создать гладкие и непрерывные карты, что облегчает визуальное восприятие и анализ результатов исследования. На этом же этапе происходит стратификация данных – организация в слои, которые группируются в соответствии с задаваемой тематикой.

Подготовка исходных геопространственных данных является сложным и ответственным процессом, требующим аккуратности и точности. Этот этап играет важную роль в обеспечении успешного анализа и построения карт дизъюнктивных нарушений угольных пластов, что в свою очередь способствует более эффективному планированию и управлению горнодобывающими операциями.

Апробация вышеописанной процедуры может быть проведена на примере профилей некоторой шахты, данные для которой были получены в 2019 г., что позволяет произвести валидацию путем проведения повторных измерений. Все данные проведенного исследования сохранены в файлах формата DWG, который используется для хранения проектных данных и чертежей в области геоинженерии и геотехнологии. Данный формат широко поддерживается различными программами для проектирования и моделирования, что обеспечивает легкость обмена данными между разными специалистами и организациями, он позволяет сохранять высокую точность геометрических данных, что критически важно для инженерных расчетов и проектирования, а также поддерживает возможность сохранять инфор-

мацию о сложной структуре слоев и объектов, что дает возможность детально организовывать данные, упрощая их анализ и редактирование.

Наглядное представление исследуемых профилей приведено на рисунке 23. Для лучшей ориентации по точкам профилей исследуемый участок шахтного поля размечен равномерной сеткой, линии которой выделены красным, а сами профили изображены розовыми линиями и подписаны соответствующими подписями с учетом маркировки данных с учетом задачи понижения класса ИСПДн референсных обозначений. Серые линии рядом с профилями показывают схематичное расположение горных выработок. Всего предоставлено шесть профилей, два из которых являются длинными профилями – А и Б и 4 – короткие, коими являются профили В, Г, Д и Е.

В каждом из профилей шахтного поля представлены уникальные точки, которые являются местами генерации искусственных сейсмических волн. Эти точки обозначены порядковыми номерами для удобства идентификации и анализа.

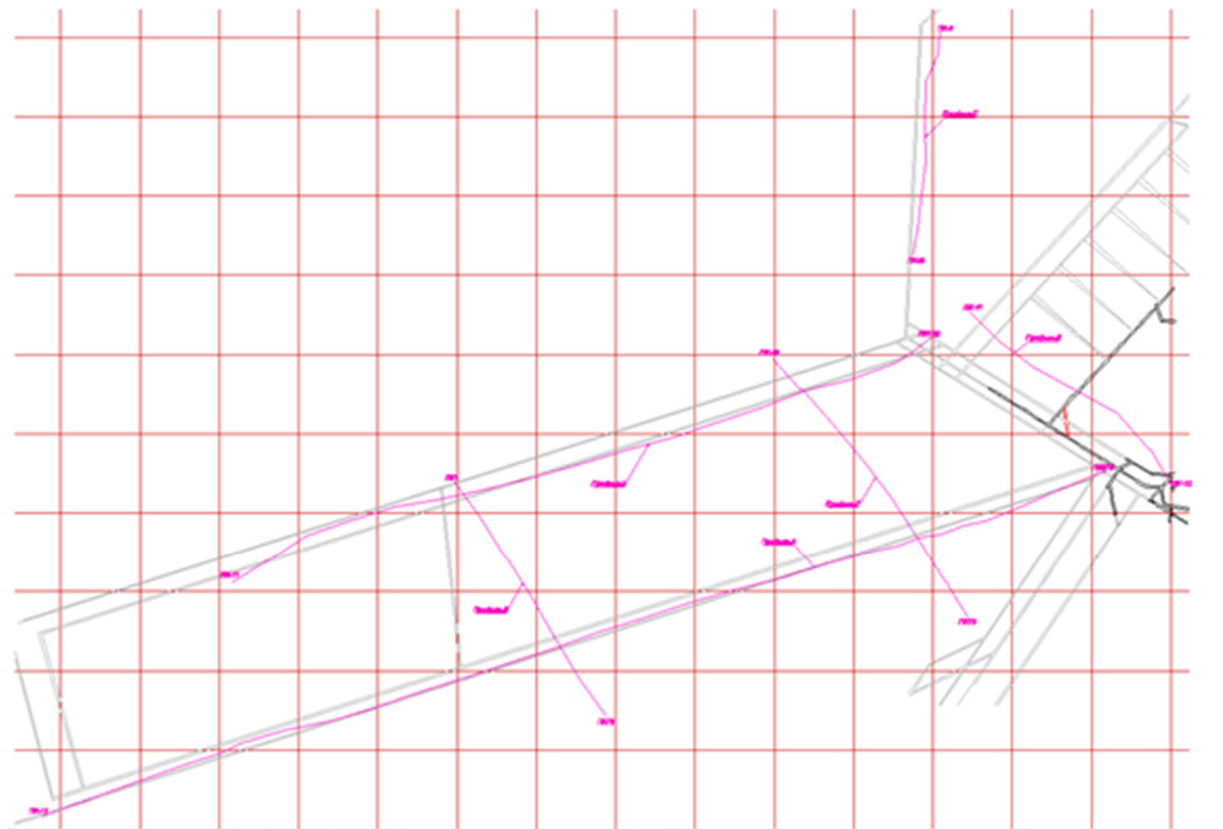


Рисунок 23 – Схема расположения профилей

Кроме того, некоторые из этих точек дополнительно маркированы символами «+» или «-», что имеет важное значение для интерпретации сейсмических данных. Наличие этих символов в начале названия файла с данными указывает на положение источника сейсмических колебаний относительно расположения датчиков сейсмической активности. Использование символа «-» интерпретируется как факт того, что источник колебаний находится вне зоны обнаружения датчиков, что может означать, что источник еще не достиг зоны детектирования или уже прошел ее. Обычно это указывает на положение источника до линии, где установлены датчики.

В случаях, когда в названии файла отсутствует какой-либо символ, это свидетельствует о том, что источник колебаний расположен непосредственно в зоне детектирования датчиков. Символ «+», напротив, сигнализирует о том, что источник колебаний переместился за пределы линии датчиков. Такая система маркировки позволяет точно определить положение источника сейсмических колебаний относительно датчиков, что критически важно для анализа сейсмических данных и последующего моделирования геологических процессов в шахтном поле.

На рисунке 24 демонстрируется система нумерации файлов, связанных с профилем Д, которая отражает последовательность расположения источника сейсмических колебаний и датчиков на маршруте исследования. Файлы упорядочены в соответствии с определенной схемой: начинаются с файлов, обозначенных номерами от -11 до -1, что указывает на предварительное положение источника колебаний до достижения основной зоны детектирования.

Далее следуют файлы с номерами от 1 до 48, что соответствует основной зоне, где установлены датчики сейсмической активности. Эти датчики расположены в точках с номерами от 1 до 48, и именно в этой зоне происходит основное наблюдение за сейсмическими процессами. После этого идут файлы с обозначениями от +1 до +12, что отражает перемещение источника колебаний за пределы основной зоны детектирования.

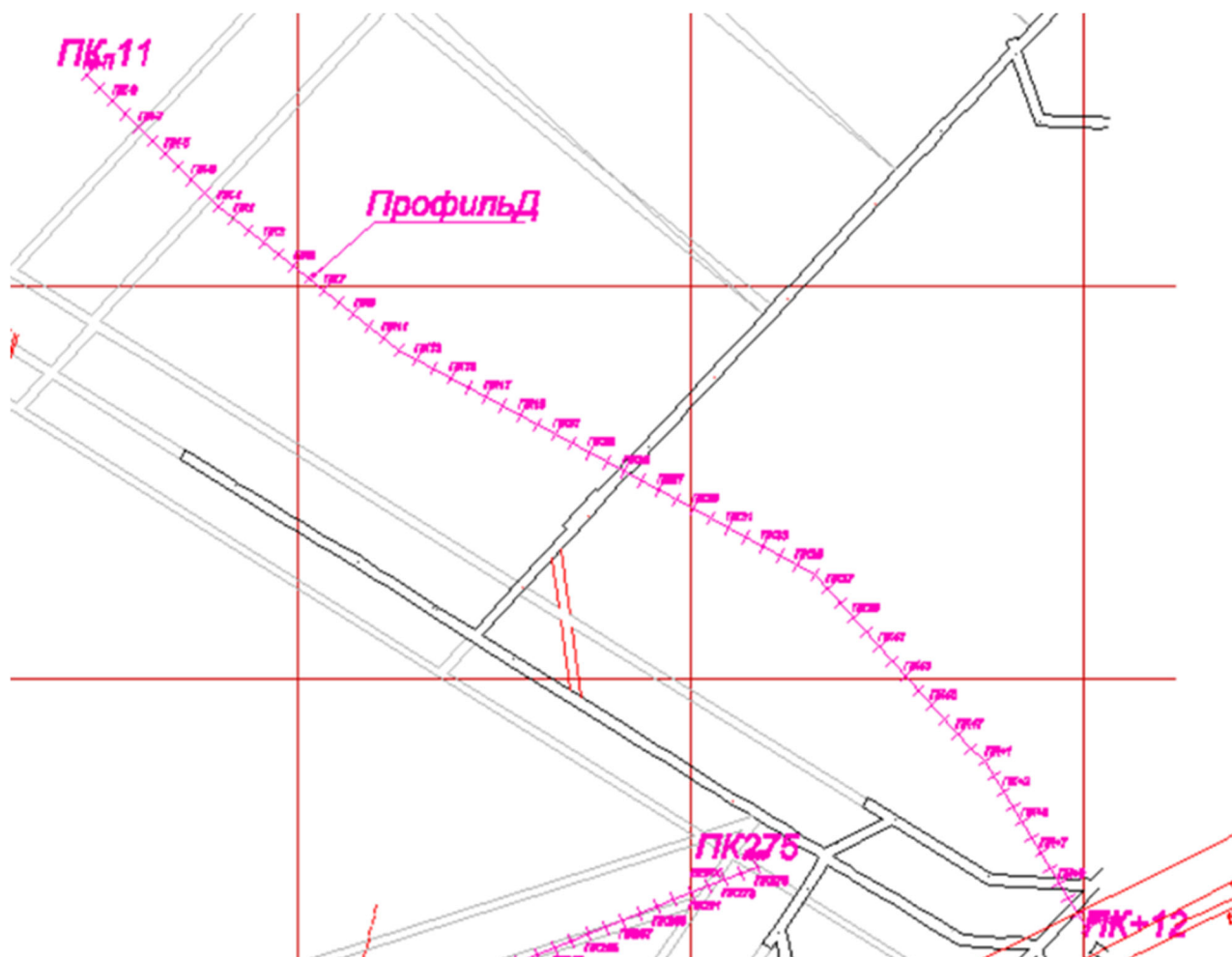


Рисунок 24 – Номера файлов профиля Д

Таким образом, источник колебаний последовательно двигался по маршруту, начиная с точки -11 и заканчивая точкой +12. Эта система нумерации и расположения файлов позволяет точно отслеживать динамику перемещения источника колебаний относительно датчиков, что является ключевым для анализа сейсмических данных и понимания геологических процессов в исследуемой области.

В ходе регистрации сейсмических данных по различным профилям было задействовано 48 датчиков сейсмической активности. Для профилей Д и Е количество датчиков оказалось достаточным для полного покрытия необходимой области исследования без необходимости их перемещения.

Однако, в случае с другими профилями, процедура сбора сейсмоданных была более сложной и многоэтапной. На первом этапе датчики устанавливались в определенной начальной точке, где проводилась первичная регистрация сейсмических

волн. После завершения замеров в этой начальной точке датчики перемещались на следующий участок, предназначенный для измерений. Такой подход позволял последовательно охватывать различные участки исследуемой территории, обеспечивая тем самым полноту и точность сейсмических данных. Каждый цикл измерений вдоль линии датчиков фиксировался и систематизировался в отдельной папке, что облегчало последующую обработку и анализ собранных данных. Таким образом, была обеспечена эффективная и точная регистрация сейсмических данных для всех профилей, несмотря на различия в методах сбора данных для разных участков.

На рисунке 25 демонстрируется сегмент профиля А, охватывающий диапазон датчиков с 13-го по 35-й. Этот фрагмент иллюстрирует обнаруженные геологические нарушения в исследуемой области. Визуализация включает вертикальные розовые линии, которые точно указывают местоположение каждого из датчиков. Для обеспечения четкости и удобства восприятия схемы, названия файлов, соответствующих каждому датчику, размещены через одно место. Это позволяет избежать перегрузки визуальной информации и упрощает интерпретацию данных.

Дополнительно на изображении присутствует тонкая зеленая линия, которая отображает высотный уровень, на котором расположен первый датчик в данной последовательности. Это важно для понимания вертикального распределения геологических слоев. Область, заштрихованная косыми черными линиями, представляет собой 20-метровый слой основной кровли, который в данном контексте характеризуется переслаиванием песчаников различной зернистости, от тонкой до мелкой. Наконец, тонкая черная линия, расположенная над заштрихованной областью, отражает рельеф местности, на которой проводились замеры.

Этот элемент схемы критически важен для понимания топографических особенностей исследуемой территории и их влияния на распределение геологических слоев и обнаруженные нарушения.

В представленном анализе наблюдается нарушение структурной целостности геологического пласта. Это нарушение иллюстрируется с помощью горизонтальной черной линии значительной толщины, которая символизирует угольный

пласт. Данная линия разделена на три отдельные секции двумя красными линиями, имеющими порядковые номера. Эти красные линии нарисованы для визуализации и количественной оценки угловых отклонений между отдельными частями пласта, что является ключевым для понимания степени и характера геологических нарушений.

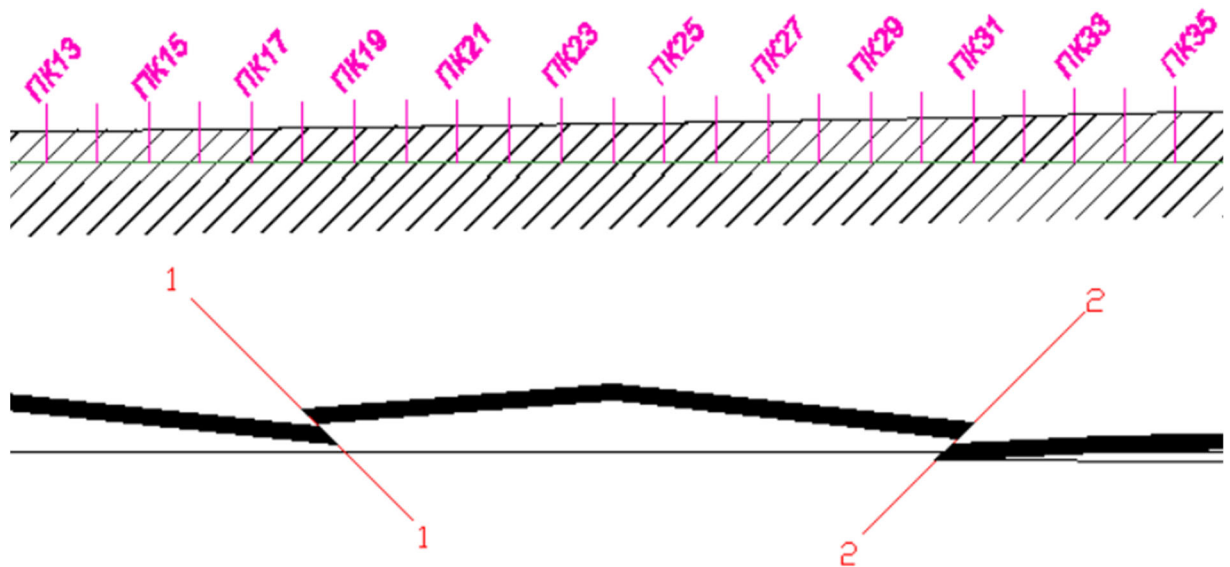


Рисунок 25 – Фрагмент начала профиля А

Рядом с угольным пластом расположена тонкая черная линия, которая представляет собой высотную отметку на уровне -100 метров. Эта отметка важна для определения глубинного положения пласта относительно поверхности земли. Особое внимание в анализе уделяется точкам разрыва пласта, которые расположены в точках ПК 18 и ПК 31. Идентификация этих точек разрыва имеет решающее значение для оценки структурной стабильности пласта и планирования дальнейших геологических исследований или добычных работ. Эти разрывы могут указывать на наличие геологических нарушений, таких как сдвиги или трещины, которые могут влиять на безопасность и эффективность горнодобывающих операций.

На рисунке 26 демонстрируется профиль А, на котором наблюдается другой тип геологического нарушения в структуре угольного пласта. В данном случае, пласт не подвергается физическому разделению на отдельные сегменты, однако

выявлены зоны внутри пласта с отличительными свойствами. Эти специфические участки пласта обозначены с помощью синей пунктирной линии.

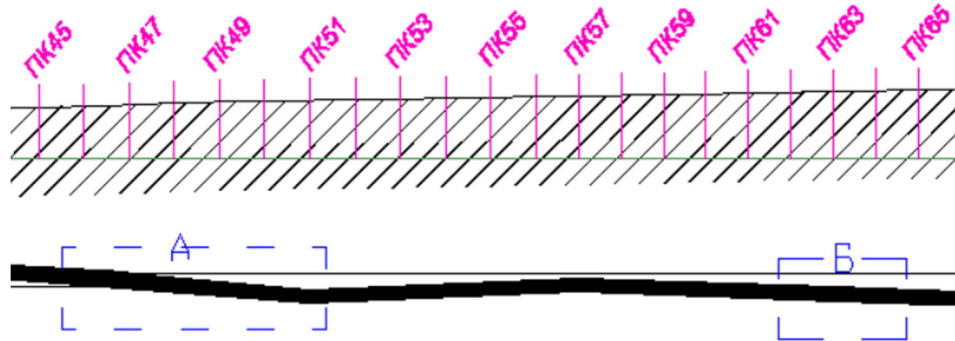


Рисунок 26 – Фрагмент середины профиля А

Отличительные свойства этих участков могут включать изменения в составе, плотности, пористости или других физико-механических характеристиках угольного пласта по сравнению с его основными свойствами. Такие различия в свойствах внутри одного пласта могут быть результатом различных геологических процессов, таких как метаморфизм, тектонические движения или изменения в условиях осадконакопления. Эти изменения в свойствах пласта, хотя и не приводят к его физическому разделению, тем не менее, представляют собой форму геологического нарушения. Они могут оказывать значительное влияние на эксплуатационные характеристики пласта, включая его прочность, устойчивость и добычу угля. Понимание и оценка этих изменений в свойствах пласта являются важными аспектами при планировании горнодобывающих работ и оценке рисков, связанных с добычей угля.

4.2 Описание технологии апробации системы

После подготовки исходных данных можно приступить к процедуре прогнозирования параметров для построения плановых карт с целью уточнения паспорта выемочного участка, что позволяет визуализировать результаты анализа и предоставить горнякам и технологам горного дела понятные и информативные карты, которые помогут принимать важные решения.

Для прогнозирования параметров дизъюнктивных нарушений используются различные методы машинного обучения, статистические и геоинформационные алгоритмы. Важно выбрать наиболее подходящие методы, учитывая характер данных и задачу прогнозирования. Ключевыми параметрами для прогнозирования могут быть глубина дизъюнктивных нарушений, их форма, размеры, ориентация и степень опасности для шахтных работ. Нейросетевые методы классификации также могут применяться для определения типов нарушений.

Для построения прогнозирующих моделей необходимо провести обучение на предоставленных геопространственных данных. Обученные модели затем проверяются на валидационных данных для оценки их точности и обобщающей способности. В случае необходимости модели подвергаются доработке для повышения качества прогнозов. Важно учитывать особенности геопространственных данных и их влияние на результаты прогнозирования.

Отличительной особенностью является возможность экстраполяции разлома на соседние выемочные участки для упреждающей корректировки технологии ведения горных работ.

Рассмотрим работу программы на примере профилей Г и Д. В данном контексте, организация данных сейсмических профилей осуществляется путем их размещения в специализированных папках, каждая из которых имеет соответствующее название, отражающее связь с конкретным профилем. В каждой из этих папок находятся файлы в формате sgu, которые являются стандартным форматом для хранения сейсмографических данных. Каждый sgu-файл включает в себя не только данные сейсмических трасс, но и сопутствующую метаинформацию, которая хранится в формате заголовков, такую как расстояние от пункта приема до пункта взрыва, координаты этих пунктов, количество отсчетов в трассе и другие важные параметры. В данном случае максимальное количество заголовков в файле достигает 76.

Для анализа и интерпретации содержимого этих файлов используется специализированное программное обеспечение, такое как SeiSee. Эта программа позволяет не только просматривать данные сейсмических файлов, но и анализировать их

структуру и заголовки, что является ключевым для глубокого понимания сейсмических процессов и характеристик исследуемой территории.

На рисунке 27 представлена детализированная информация, касающаяся отсчетов сейсмических данных профиля Г. Эта информация организована в форме таблицы, состоящей из трех столбцов, каждый из которых выполняет определенную функцию.

Index	Time (ms)	Sample
0	0	62.000
1	0.5	18.000
2	1	36.000
3	1.5	126.000
4	2	113.000
5	2.5	-3.000
6	3	-57.000
7	3.5	-23.000
8	4	-2.000
9	4.5	-43.000
10	5	-53.000
11	5.5	19.000
12	6	75.000
13	6.5	86.000
14	7	65.000
15	7.5	1.000
16	8	-19.000
17	8.5	16.000
18	9	4.000

Рисунок 27 – Амплитуды и время отсчетов профиля Г

В первом столбце приведены порядковые номера отсчетов, что позволяет идентифицировать каждый конкретный отсчет в рамках общего массива данных. Второй столбец содержит данные о временных интервалах каждого отсчета, что критически важно для понимания временной динамики сейсмического процесса. Третий столбец демонстрирует значения амплитуд сейсмических волн при каждом отсчете, что является ключевым параметром для анализа сейсмической активности и характеристик геологической среды.

Кроме того, в используемом программном обеспечении предусмотрена функция визуализации амплитуд сейсмических трасс, что облегчает интерпретацию и анализ данных. Эта функциональность иллюстрируется рисунком 28, где визуально пред-

ставлены амплитудные характеристики сейсмических волн различных трасс. Визуализация амплитуд трасс позволяет наглядно оценить интенсивность и распределение сейсмической активности в исследуемой области, что является важным аспектом при проведении сейсморазведочных работ и анализе геологических структур.

На рисунке 29 представлен обзор основных заголовков сейсмических трасс профиля Г, включающих в себя критически важные данные для выполнения последующих аналитических расчетов. Эти заголовки включают несколько ключевых параметров, каждый из которых играет важную роль в процессе сейсмического анализа.

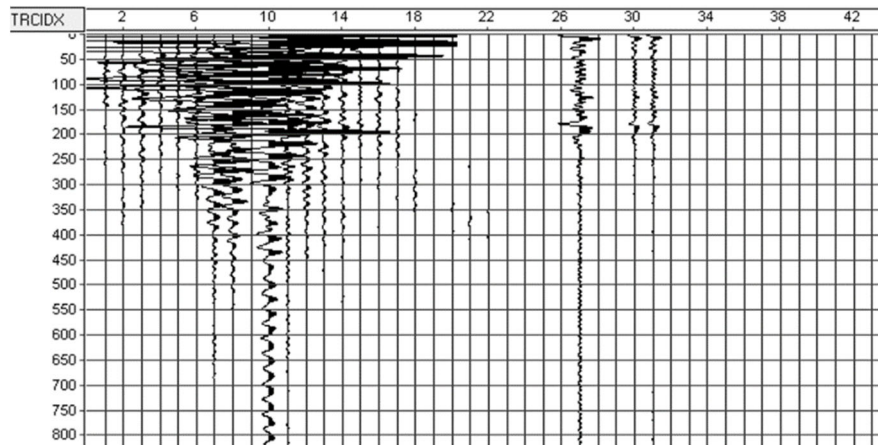


Рисунок 28 – Визуализация амплитуд трасс профиля Г

SEQWL	DSREG	NSMP	SI
1	0	3072	500
2	10	3072	500
3	20	3072	500
4	30	3072	500
5	40	3072	500
6	50	3072	500
7	60	3072	500
8	70	3072	500
9	80	3072	500
10	90	3072	500
11	100	3072	500
12	110	3072	500
13	120	3072	500
14	130	3072	500
15	140	3072	500
16	150	3072	500
17	160	3072	500
18	170	3072	500

Рисунок 29 – Пример заголовков профиля Г

SEQWL обозначает порядковый номер трассы, что является идентификатором для отслеживания и анализа конкретной сейсмической трассы. DSREG указывает на относительную координату приемника по оси X, что позволяет определить географическое положение приемника относительно исследуемой области. NSMP отражает общее число отсчетов в трассе, то есть общее количество записей сейсмических колебаний, зафиксированных за время проведения замеров. Этот параметр критически важен для понимания объема и детализации собранных сейсмических данных. SI представляет собой интервал времени между последовательными записями колебаний, измеряемый в миллисекундах, что важно для оценки временной разрешающей способности сейсмических данных.

Структура таблицы заголовков в файлах всех профилей стандартизирована, что обеспечивает унификацию и удобство в обработке данных. Для выявления нарушений в структуре горных пород необходимо провести комплексный анализ всех доступных сейсмических данных. Это требует предварительной загрузки всех файлов с данными сейсмотрасс исследуемого участка в единую базу данных. Интеграция этих файлов в централизованную базу данных позволяет эффективно обрабатывать, анализировать и сравнивать сейсмические данные, что является ключевым для точного определения и характеристики геологических нарушений.

На рисунке 30 иллюстрируется процесс загрузки файлов, относящихся к конкретному профилю, в данном случае профилю Д.

Этот процесс включает в себя отображение в журнале загрузок специфической папки, содержащей файлы с сейсмическими данными, необходимыми для дальнейшей обработки. Эта папка появляется в конце списка загрузок, что указывает на успешное добавление соответствующих файлов в систему обработки данных.

После завершения процесса загрузки файлов становится возможным извлечение и анализ атрибутов сейсмотрасс. В рамках этого аналитического процесса используются различные параметры, записанные в сейсмических данных. К ним относятся амплитуды сейсмических волн, временные интервалы между отсчетами, выраженные в миллисекундах, общее количество отсчетов, количество трасс, содержащихся в одном файле, а также частота дискретизации сигнала.

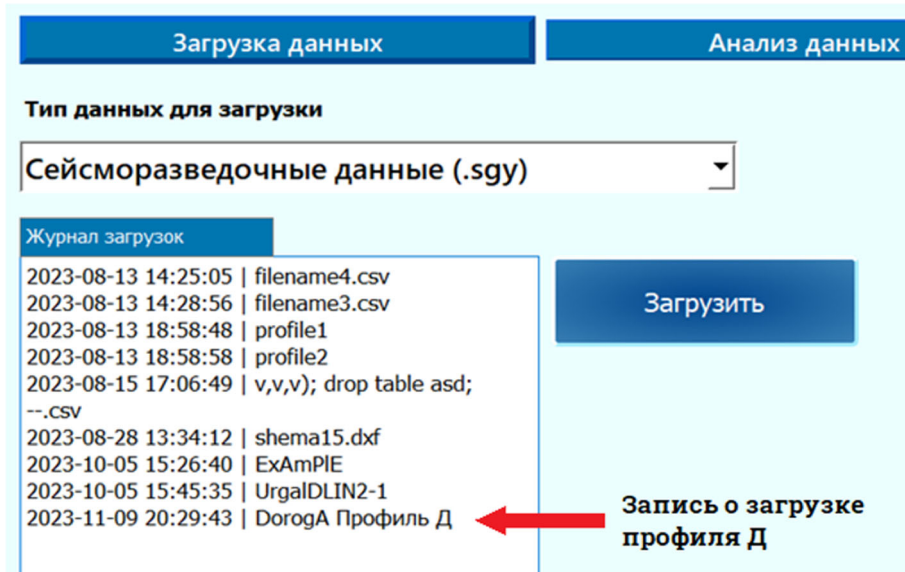


Рисунок 30 – Загрузка файлов профиля Д

Эти параметры являются фундаментальными для точного анализа сейсмических данных и позволяют провести глубокий анализ сейсмической активности и структуры геологических слоев.

Все результаты вычислений и анализа данных были систематизированы и сохранены в базе данных. Примерные визуализации структуры таблиц, содержащих результаты этих расчетов, представлены в таблицах на рисунках 31 и 32.

peak_freq	centr_freq	appar_freq	a_rms	bandwidth	sn_ratio	max_amp	min_amp	max_abs_amp
18.22916603	64.4997558	67.91954803	269.1268	62.7488708	0.0	2059.1469	2351.0871	2351.0871582
18.88020896	55.7854309	46.24467086	221.5058	58.9855117	2.2522320	1566.1248	2614.7170	2614.71704102
37.109375	46.0826950	48.93267822	191.3672	49.9837722	1.4182373	2195.2692	1278.6163	2195.26928711
17.578125	62.3996505	48.38182449	61.10834	38.6957092	0.8764484	384.53674	305.18615	384.536743164
16.27604103	72.3256149	53.23693847	50.00411	51.9014244	0.9209607	223.48893	210.28515	223.488937378
13.02083301	56.5046081	51.04408264	51.02495	49.3844871	0.5565415	189.36994	219.14028	219.140289307
16.27604103	58.0326004	45.23107147	50.12288	46.9628677	0.5079231	177.56425	201.35093	201.35093689
29.296875	69.1503448	50.68672180	57.75531	50.1701087	0.4882184	276.33688	302.85794	302.857940674
11.71875	71.7036285	48.75621795	39.99772	54.9356231	0.4196161	126.76716	142.69856	142.698562622
23.4375	59.3405227	50.65789413	49.96068	52.0282707	0.3597725	226.58912	187.73649	226.589126587
13.02083301	65.9001235	50.87545394	42.40772	53.7845153	0.4874665	140.89910	140.60113	140.899108887
39.71354293	64.4838562	57.66062545	42.92877	65.1635971	0.4638628	120.60211	130.41587	130.415878296
23.4375	57.8326568	51.24792099	47.80760	49.0375172	0.4796099	158.91040	151.50524	158.910400391
18.88020896	74.6494827	49.30509567	51.12186	51.9144666	0.5602619	146.94743	186.06141	186.061416626
106.1197891	79.1499099	61.29137802	52.50510	52.4024842	0.4626053	389.64971	235.48808	389.649719238
19.53125	69.5655212	53.11475372	38.79977	58.9085966	0.4097664	106.72177	140.42662	140.426620483
27.99479103	72.1840286	47.57217788	44.70006	53.0578422	0.4796063	155.67317	123.87247	155.673171997
22.78645896	65.7080993	46.96223449	40.40314	45.2927366	0.5711619	125.73000	128.44703	128.447036743

Рисунок 31 – Атрибуты сеймотрасс профиля Г

peak_freq	centr_freq	appar_freq	a_rms	bandwidth	sn_ratio	max_amp	min_amp	max_abs_amp
50.130207	61.7313423	52.1140594	107.586	12.024478	0.0	264.60153	277.95538	277.955383301
50.130207	35.2457351	32.7439422	700.943	15.083499	0.9773882	1932.0561	1918.8952	1932.05615234
27.34375	31.9457340	24.1322307	581.559	18.532735	0.9556540	1414.1417	1890.0600	1890.06005859
13.020833	51.1373252	18.8616809	501.005	20.932584	0.7553701	1418.7199	1428.8778	1428.87780762
50.130207	96.4088897	49.9671287	400.174	5.5274739	0.4486443	701.17034	719.09960	719.099609375
13.020833	36.9616508	19.4334659	722.215	15.744056	0.4781654	2513.3935	1979.4720	2513.39355469
13.020833	70.1141967	19.4142818	684.452	14.759462	0.7821466	2767.0283	2019.6280	2767.02832031
16.276041	42.1739082	21.9926700	647.149	16.809127	1.2243041	2107.3542	1883.4724	2107.35424805
16.276041	35.8030052	18.7103233	821.742	12.115306	2.1070902	2916.6843	2071.9770	2916.68432617
11.71875	60.4203987	17.9163894	609.590	15.424901	1.4643601	1901.0035	2053.4548	2053.45483398
11.71875	62.4456520	19.1229801	509.191	12.049419	1.0604996	1159.7911	1385.7966	1385.79663086
11.71875	43.6552734	16.7112293	522.440	11.349250	1.1493475	1149.9390	1455.1921	1455.19213867
12.369791	40.2369537	25.4293270	621.012	14.735334	1.2097716	1749.7431	1818.2489	1818.24890137
12.369791	34.4462966	21.0042667	610.123	11.326208	1.4608517	1943.9129	1819.0635	1943.91296387
12.369791	52.6341743	17.2700099	614.534	9.9614505	1.1437504	1813.3975	1932.4915	1932.49157715
12.369791	86.9029388	18.5185184	612.826	9.9916591	1.0826219	1723.5657	1840.9400	1840.94006348
12.369791	41.6803207	27.1265907	560.636	16.742317	0.8440946	1838.3660	1453.8886	1838.36608887

Рисунок 32 – Атрибуты сейсмоотрасс профиля Д

Эти таблицы обеспечивают наглядное представление аналитических результатов и являются важным инструментом для дальнейшего исследования и интерпретации сейсмических данных.

В процессе выполнения аналитических операций по определению сейсмохарактеристик в программе, предназначенной для обработки и анализа сейсмических данных, активируется визуальный индикатор прогресса на вкладке «Анализ данных». Этот индикатор прогресса представляет собой шкалу, которая постепенно заполняется зеленым цветом в соответствии с ходом обработки файлов. На этой шкале также отображается процентное значение, указывающее на долю уже обработанных файлов от общего количества, что обеспечивает наглядное представление о степени завершенности текущего аналитического процесса.

По завершении расчета всех сейсмохарактеристик, шкала прогресса достигает своего максимального значения, становясь полностью зеленой. Это служит визуальным подтверждением того, что аналитический процесс был успешно завершен. В дополнение к этому, в журнале анализа программы появляется соответствующая запись, которая фиксирует факт завершения расчета характеристик для выбранного профиля. Эта запись служит документальным подтверждением выполне-

ния расчетов и является важным элементом в процессе документирования и отслеживания хода аналитических работ.

На представленном рисунке 33 визуализирована конкретная папка, содержащая файлы для профиля Д (обозначенная как «DorogA Профиль Д»), а также отображен идентификатор набора сейсмохарактеристик (profile_d), который является необходимым элементом для проведения последующего аналитического процесса. Кроме того, на изображении присутствует журнал, в котором зафиксирована запись о том, что расчет характеристик для профиля Д был успешно выполнен. Подобным образом были проведены расчеты характеристик и для других профилей, включая А, Б, В и Е.

Рисунок 33 – Расчет характеристик профиля Д

В дальнейшем, локальные участки этих профилей подверглись анализу на предмет наличия локальных дизъюнктивных нарушений в их структуре. Для этой цели использовался классификатор машинного обучения Random Forest, с использованием сбалансированных весов классов. Этот метод позволил обработать сейсмические данные и выявить потенциальные нарушения. В результате его применения были получены массивы данных, каждый из которых состоял из 48 элемен-

сейсмопрофиля (`analysis_id_d`). Этот идентификатор является ключевым элементом для систематизации и хранения результатов анализа в базе данных. Также на рисунке представлена запись в конце журнала анализа, которая служит документальным подтверждением успешного выполнения аналитических процедур. Эта запись важна для обеспечения прозрачности и отслеживания хода аналитического процесса, а также для подтверждения достоверности и актуальности полученных результатов анализа.

Рисунок 36 – Результат анализа характеристик профиля Д

Для точного определения глубины залегания угольного пласта был применен математический подход, основанный на использовании уравнения годографа монотипной отраженной волны, адаптированного для двухслойной геологической модели. Это уравнение представлено в виде формулы:

$$t(x) = \frac{1}{v_1} \sqrt{x^2 + 4h_0 x \sin \varphi + 4h_0^2}, \quad (1)$$

где $t(x)$ обозначает время пробега отраженной волны от источника до точки приема. В данной формуле v_1 является скоростью распространения акустических волн

в первом слое, расположенном над угольным пластом. Параметр x представляет собой координату точки приема отраженной волны, h_0 – это вертикальное расстояние от источника волн до угольного пласта, а φ обозначает угол наклона пласта.

Данное уравнение позволяет аналитически вычислить глубину залегания пласта, учитывая различные геометрические и физические параметры, такие как скорость распространения волн в верхнем слое, расстояние до пласта и его угол наклона. Рисунок 37 был использован для иллюстрации и обоснования вывода данного уравнения, предоставляя визуальное представление геометрических и физических соотношений, лежащих в основе уравнения годографа.

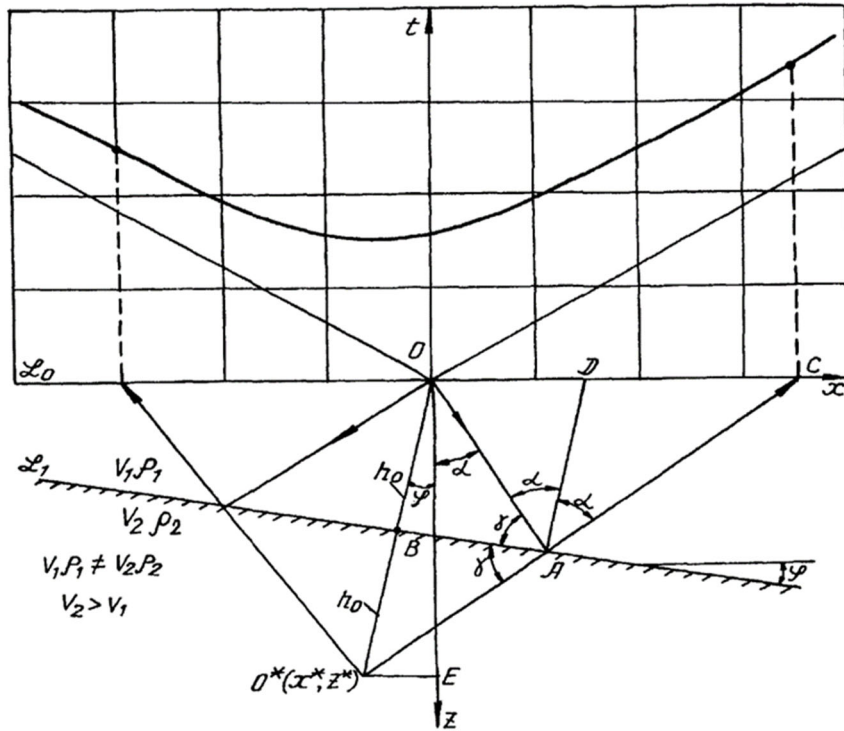


Рисунок 37 – Лучевая схема, поясняющая вывод уравнения годографа монотипной отраженной волны для двухслойной модели среды

В рамках нашего исследования ключевым параметром является h_0 , представляющий собой вертикальное расстояние от источника сейсмических волн до угольного пласта. Используя уравнение годографа монотипной отраженной волны, мы можем вывести следующее квадратное уравнение для определения h_0 :

$$h_0^2 + h_0 x \sin \varphi - \frac{v_l^2 t(x)^2 - x^2}{4} = 0. \quad (2)$$

В данном контексте мы принимаем v_l – скорость распространения звуковых волн в среде над пластом равной 1 м/с, а угол наклона пласта – равным 0° . Подставляя эти значения в уравнение (2), мы можем решить его относительно h_0 . Полученное значение h_0 позволяет нам вычислить глубину залегания пласта, соответствующую второй стороне треугольника, прилегающей к углу φ . Это значение представляет собой искомую глубину залегания пласта.

Дополнительно, на основе полученных значений глубин, можно построить графики, которые будут способствовать визуализации и пониманию примерной формы угольного пласта. Такой график, пример которого представлен на рисунке 38, может быть полезен для оценки геометрических характеристик пласта, включая его наклон, толщину и общую конфигурацию, что является важным аспектом при планировании горнодобывающих работ и оценке геологических рисков.



Рисунок 38 – Графическое представление глубины залегания пласта под датчиками профиля Г

Обладая данными о глубинах залегания пласта, мы можем перейти к определению углов, под которыми происходят разломы в геологической структуре. Для вычисления этих углов используются следующие математические формулы:

$$\cos \varphi = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2}}; \quad (3)$$

$$\arccos \alpha = \cos \varphi, \quad (4)$$

где x_1 и y_1 являются координатами первого вектора, а x_2 и y_2 – координатами второго вектора. Угол, который мы определяем, располагается между полиномиальной функцией первой степени, описывающей общую траекторию всего пласта, и вектором, представляющим либо цельный участок пласта, либо часть пласта с нарушениями структуры.

В процессе этих вычислений были определены не только углы, под которыми проходят разломы, но также и углы залегания цельных частей пластов. В случаях, когда датчики, фиксирующие нарушения, располагались как справа, так и слева от датчика без нарушений, участок без нарушений рассматривался как участок с нарушениями. Это означает, что к таким участкам применялись те же методы вычисления углов, что и к участкам с явными нарушениями структуры. Такой подход позволяет обеспечить более точное и целостное представление о геометрии и структуре разломов, а также о характере залегания различных частей пластов в исследуемой геологической среде.

В таблице 2 представлены значения углов пласта в том месте, где были обнаружены разломы. Видно, что присутствуют одинаковые значения углов, это можно интерпретировать так: цельный участок пласта, находящийся между датчиками с номерами, например, 1 – 4, лежит под углом 41°. Там, где угол изменяется, находится разлом. Таким же образом были вычислены результаты анализа остальных профилей.

Таблица 2 – Фрагмент таблицы углов залегания целых частей и разломов

17,92976	41,22645
17,92976	41,22645
62,01427	41,22645
24,33154	41,22645
24,33154	24,98177
24,33154	6,728344
24,33154	6,728344
24,33154	6,728344

4.3 Построение тематических карт и 3D-моделей угольных пластов

Взаимодействие пользователя с модулем визуализации включает в себя ряд последовательных шагов, направленных на обработку и анализ графических данных, связанных с горным отводом исследуемой территории. Начальным этапом является выбор графического файла из предложенного списка. Этот файл должен содержать схему горного отвода исследуемой области. Далее пользователь должен ввести координаты начальной точки, которая будет использоваться как базовая отсчетная точка для дальнейшего определения координат объектов в рамках предоставляемой пользователю информации. Этот этап критически важен, так как начальная точка служит референсом для всех последующих измерений и расчетов в рамках визуализации. Вид главного окна модуля визуализации представлен на рисунке 39.

После успешного выбора файла и ввода начальных координат следующим шагом является определение режима работы с сейсмопрофилями. Этот этап включает в себя выбор специфических параметров и настроек, которые будут использоваться для анализа и интерпретации сейсмических данных в контексте графической схемы горного отвода. Выбор режима работы с сейсмопрофилями является ключевым для обеспечения точности и релевантности визуализированных данных, а также для адаптации процесса анализа к конкретным целям и задачам пользователя.

В контексте работы с схемой графических отводов, линии, представляющие сейсмопрофили, обычно реализуются в виде графических объектов, классифици-

руемых как «Line» или «Polyline». Эти типы объектов определены и описаны в стандартах формата DXF (Drawing Exchange Format), который является широко распространенным в инженерной и геологической графике.

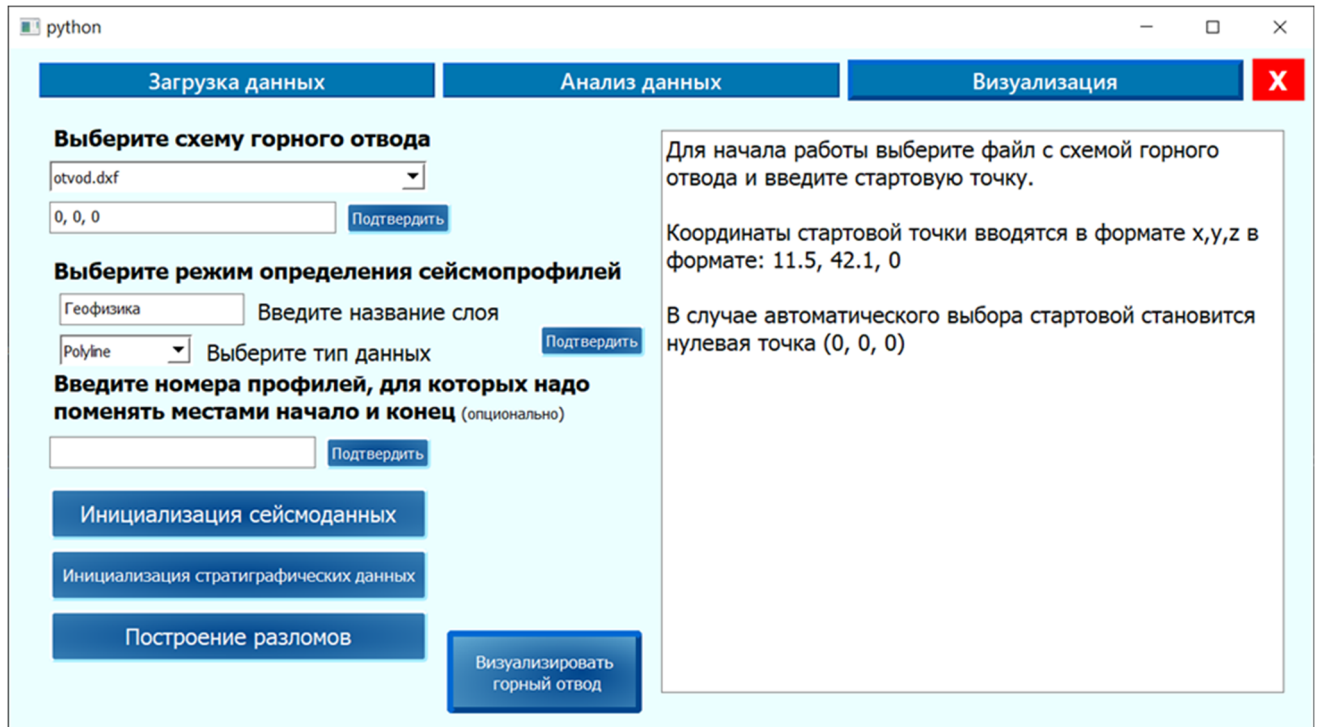


Рисунок 39 – Главное окно модуля визуализации

Пользователю предстоит сделать выбор между этими двумя типами графических объектов, а также определить слой внутри графического файла, на котором расположены сейсмопрофили. Вид окна с отображением выбранных линий в журнале представлен на рисунке 40.

После выбора соответствующего типа объекта и слоя, система приступает к процессу идентификации и выделения тех объектов на чертеже, которые должны быть распознаны как сейсмопрофили в рамках последующей визуализации. Этот этап включает в себя анализ графических данных с целью определения и выделения сейсмопрофилей среди прочих элементов чертежа.

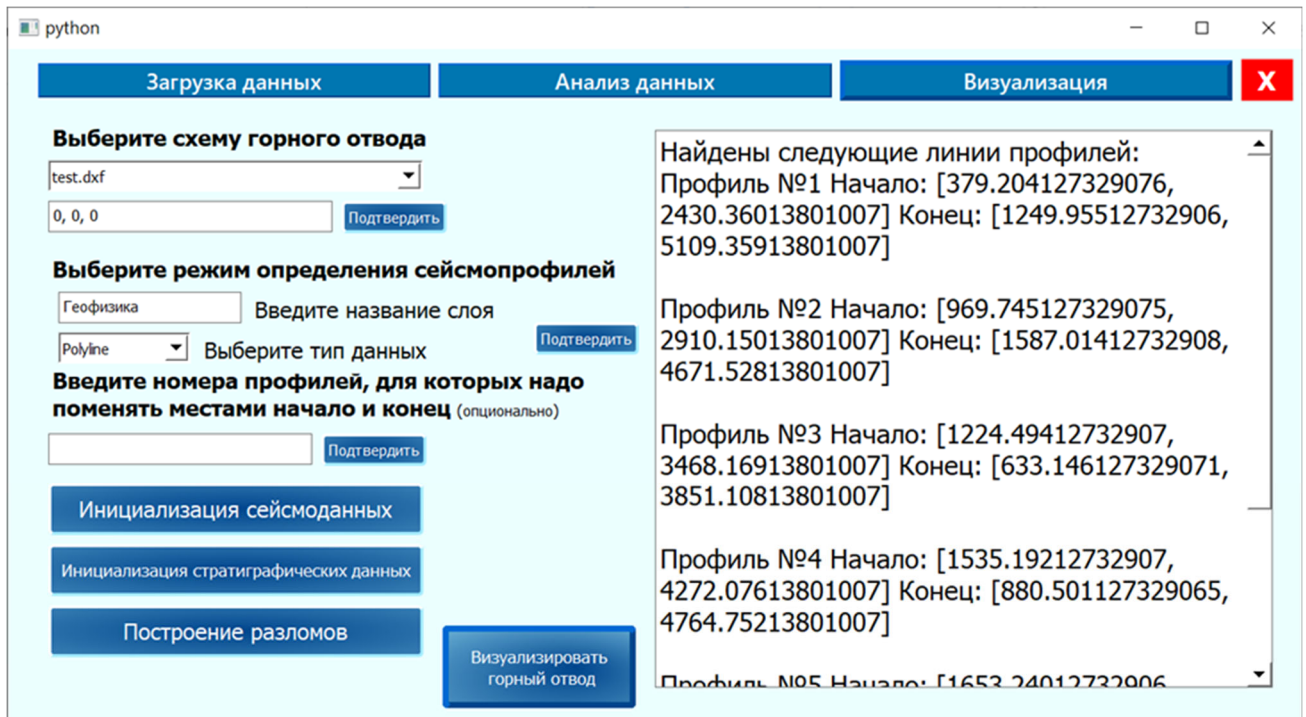
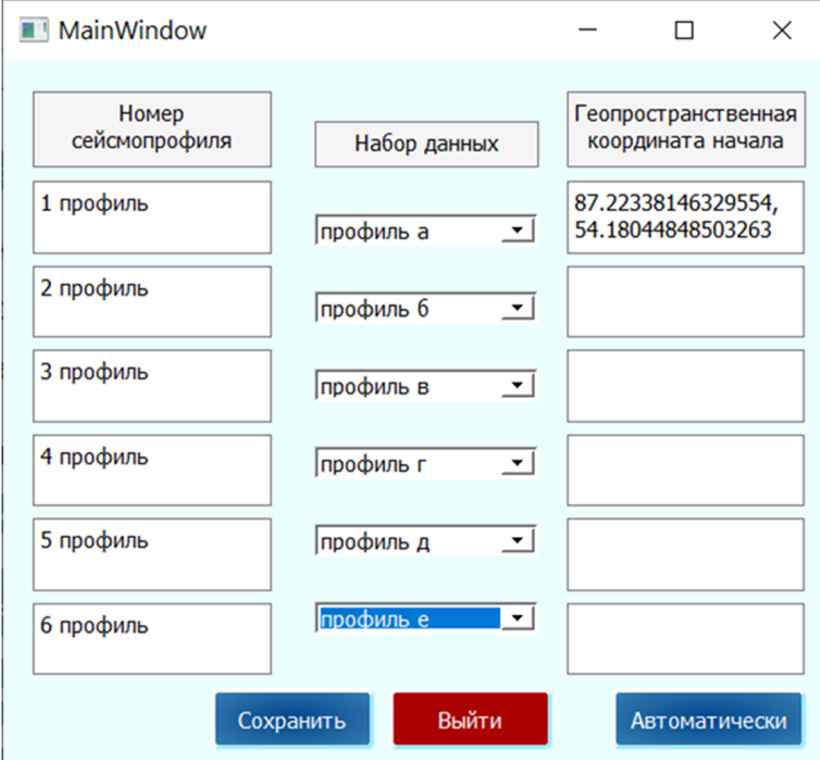


Рисунок 40 – Вид окна с отображением выбранных линий в журнале

Для обеспечения точности и достоверности идентификации пользователю предоставляется информация о координатах начальных и конечных точек каждого выделенного сейсмопрофиля. Это позволяет пользователю провести верификацию и убедиться в том, что система корректно опознала и выделила сейсмопрофили. Такой подход способствует повышению точности визуализации и анализа сейсмических данных, а также обеспечивает пользователю контроль над процессом обработки графической информации.

В процессе работы с системой визуализации сейсмопрофилей может возникнуть ситуация, когда автоматически определенные системой координаты начальной и конечной точек сейсмопрофиля не соответствуют их фактическому физическому расположению, установленному в ходе сейсморазведочных работ. В таких случаях пользователю предоставляется возможность корректировки данных. Для этого в специализированном интерфейсе предусмотрена функция, позволяющая ввести номера тех сейсмопрофилей, для которых требуется инвертировать координаты начала и конца. Это действие осуществляется путем ввода соответствующих

номеров профилей в специально предназначенное для этого окно, представленное на рисунке 41.



Номер сейсмопрофиля	Набор данных	Геопространственная координата начала
1 профиль	профиль а	87.22338146329554, 54.18044848503263
2 профиль	профиль б	
3 профиль	профиль в	
4 профиль	профиль г	
5 профиль	профиль д	
6 профиль	профиль е	

Сохранить Выйти Автоматически

Рисунок 41 – Окно инициализации сейсмоданных

После внесения изменений и подтверждения своего выбора пользователь получает уведомление о выполнении операции через системный журнал модуля. Это сообщение информирует пользователя о статусе обработки данных и подтверждает успешное выполнение корректировки координат.

Далее, для полноценного анализа, пользователю необходимо провести сопоставление результатов анализа сейсмоданных с сейсмопрофилями, обнаруженными на схеме горного отвода. Этот процесс инициируется нажатием на кнопку «Инициализация сейсмоданных», после чего активируется соответствующее диалоговое окно. В этом окне пользователь может просмотреть и анализировать сейсмические данные в контексте графической схемы, что позволяет установить корреляцию между сейсмическими характеристиками и геологической структурой исследуемой области.

В интерфейсе таблицы, расположенной в левой части экрана, будут отображаться сейсмопрофили, идентифицированные на графическом плане горного отвода, выбранном пользователем. В центральной части этой таблицы для каждой строки предусмотрен выпадающий список, содержащий различные наборы данных.

Эти наборы данных включают информацию о наличии разломов в зоне расположения датчиков, которая была рассчитана и классифицирована в процессе анализа в модуле анализа данных. Пользователю предстоит задача сопоставления этих наборов данных с соответствующими сейсмопрофилями. Отметим, что не обязательно выбирать данные для всех профилей, обнаруженных на схеме. Профили, для которых не будут выбраны данные, в дальнейшем не смогут быть использованы для визуализации разломов.

В этой же таблице предусмотрена возможность ввода геопространственных координат для точной геопространственной привязки местности. Теоретически, эти координаты могут быть уже включены в сейсмические файлы формата sgu. В таком случае пользователь может воспользоваться функцией автоматического заполнения, активируемой нажатием на кнопку «Автоматически», расположенную в правой нижней части экрана. Эта функция позволяет автоматически заполнить поля таблицы для всех профилей с выбранным набором данных. Однако на практике в sgu-файлах не всегда содержатся актуальные данные о геопространственных координатах, и в таких случаях пользователю придется вводить их вручную.

Последующий этап работы включает построение визуализации разломов. Этот процесс осуществляется в специальном окне, которое вызывается соответствующей кнопкой на главном экране модуля визуализации. Этот этап позволяет пользователю наглядно представить расположение и характеристики разломов на основе сопоставленных данных и геопространственных координат. Вид окна построения разломов представлен на рисунке 42.

Для начала построения гипсометрии породного массива в модуле визуализации сейсмических данных пользователю необходимо выполнить ряд действий.

На первом этапе, в левой верхней части интерфейса, следует произвести выбор номеров сейсмопрофилей, которые будут включены в процесс визуализации.

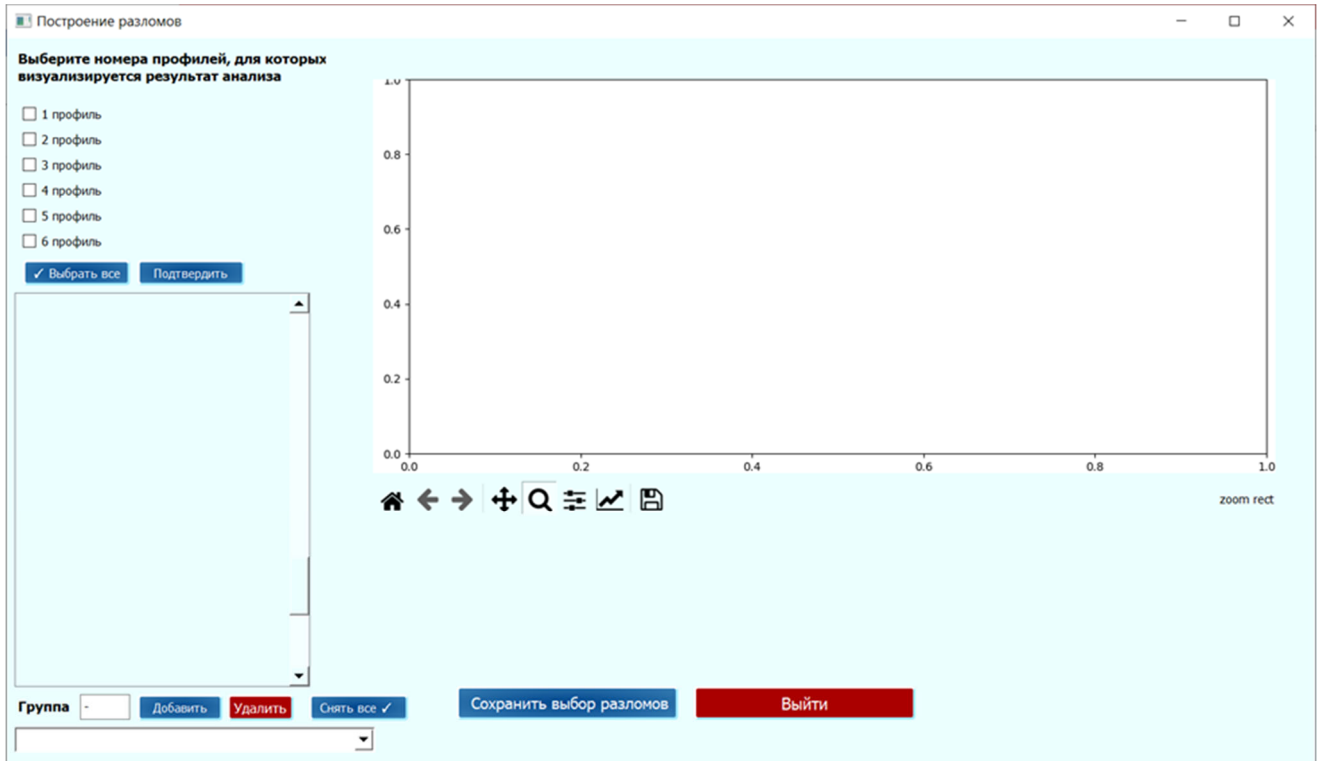


Рисунок 42 – Вид окна построения разломов

Важно отметить, что для всех профилей, выбранных для визуализации, должны быть предварительно загружены соответствующие наборы данных в рамках этапа «Инициализация сейсмоданных». Однако пользователю не обязательно выбирать все профили, для которых доступны данные; можно ограничиться теми, которые необходимы для конкретных целей анализа.

После подтверждения выбора профилей, на экране будут отображены номера тех датчиков, в районе которых на этапе анализа были выявлены разломы. Для удобства визуализации, данные по каждому профилю будут представлены в отдельном цвете. Это позволяет пользователю легко идентифицировать и сравнивать данные по различным профилям.

В правой части экрана, после подтверждения выбора, будут визуализированы выбранные профили на графической схеме горного отвода, как показано на ри-

сунке 43. На этой схеме также будут отображены датчики, соответствующие номерам, указанным в списке слева. Таким образом, пользователь получает наглядное представление о расположении сейсмопрофилей и связанных с ними датчиков, что способствует более глубокому пониманию геологической структуры исследуемой области.

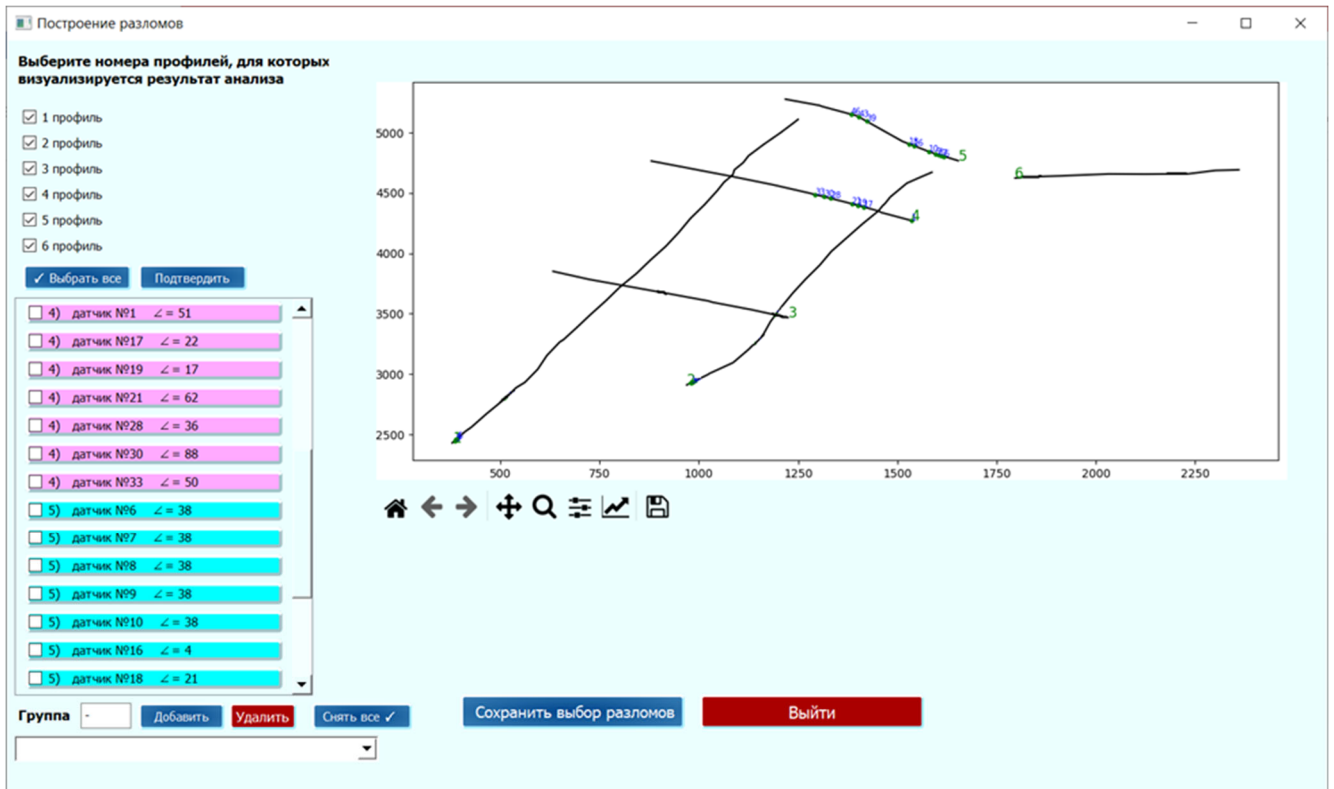


Рисунок 43 – Окно построения разломов после выбора профилей

Графическая схема горного отвода, расположенная в правой части экрана, является интерактивной и обеспечивает пользователю возможность масштабирования и детального изучения отдельных фрагментов. Эта функциональность позволяет проводить тщательный анализ и визуализацию конкретных элементов схемы при необходимости более глубокого рассмотрения.

В левой части экрана находится список датчиков, где каждая запись начинается с номера сейсмопрофиля, к которому относится датчик. Номер профиля отделен от остальной части записи круглой скобкой. Далее следует номер самого дат-

чика, а затем указывается величина угла вероятного залегания разлома. Этот угол, рассчитанный на стадии анализа данных, представлен в градусах Цельсия.

Для включения определенных датчиков в итоговый файл визуализации, пользователю необходимо выбрать два датчика, ориентируясь на предоставленные данные о потенциальных углах разлома (рисунок 44).

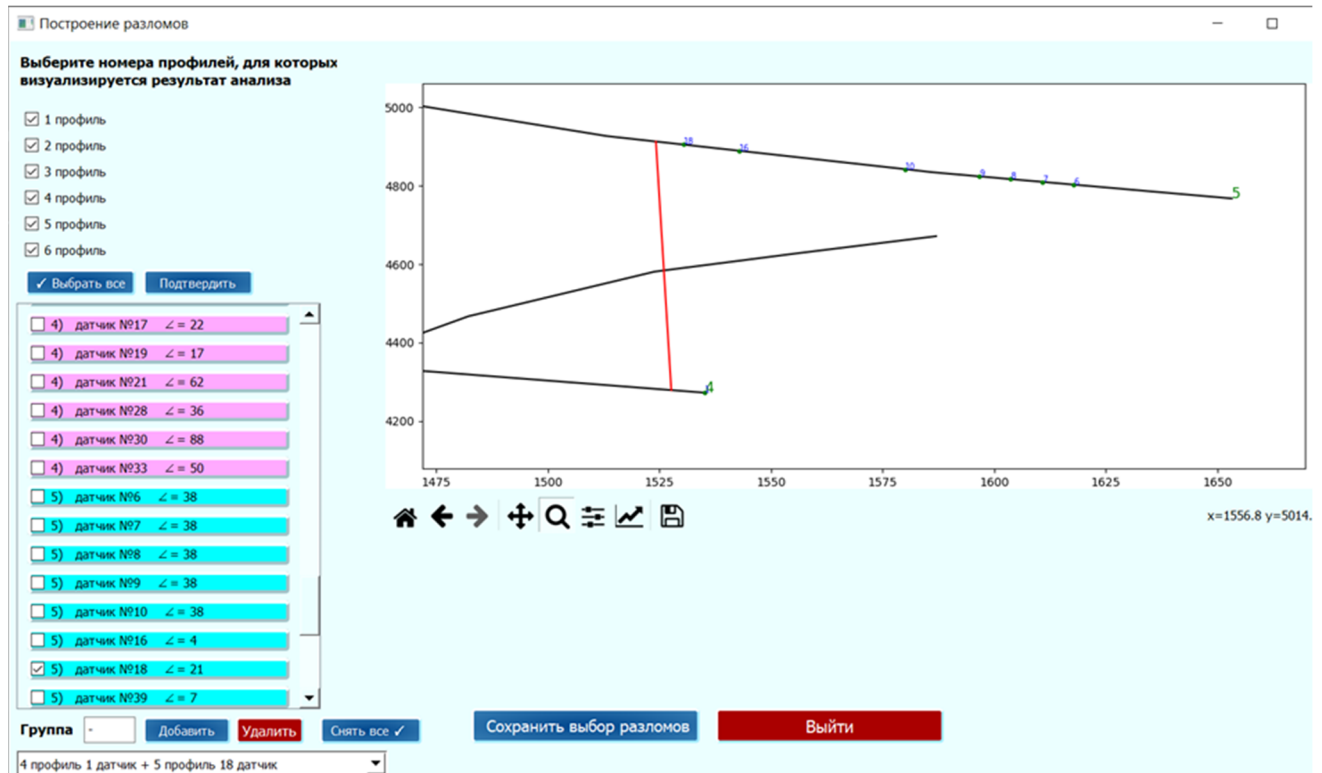


Рисунок 44 – Изменения в схеме после выбора разлома

Выбор осуществляется путем установки галочек в соответствующих полях слева от записей. Этот выбор должен быть основан на профессиональных знаниях и компетенциях пользователя. После выбора датчиков следует нажать на кнопку «Добавить», что приведет к их добавлению в итоговый файл визуализации. Выбранные датчики также будут отображены на интерактивной схеме в правой части экрана, что обеспечивает наглядное представление о их расположении и связанных с ними разломах.

Разломы, добавленные пользователем, будут визуализированы и представлены в интерактивном выпадающем списке, расположенном в нижней части поль-

зовательского интерфейса. Каждый из этих разломов будет уникально идентифицирован посредством номеров двух выбранных датчиков, а также номеров сейсмопрофилей, на которых эти датчики расположены. В той же области экрана предусмотрена функциональная кнопка, позволяющая удалять ранее добавленные разломы в случае необходимости корректировки выбора.

После завершения процесса добавления и настройки всех необходимых разломов, пользователю требуется подтвердить свой выбор и вернуться на главный экран модуля визуализации. Для запуска процесса визуализации горного отвода следует нажать на кнопку «Визуализировать горный отвод». Пример схемы горного отвода представлен на рисунке 45.

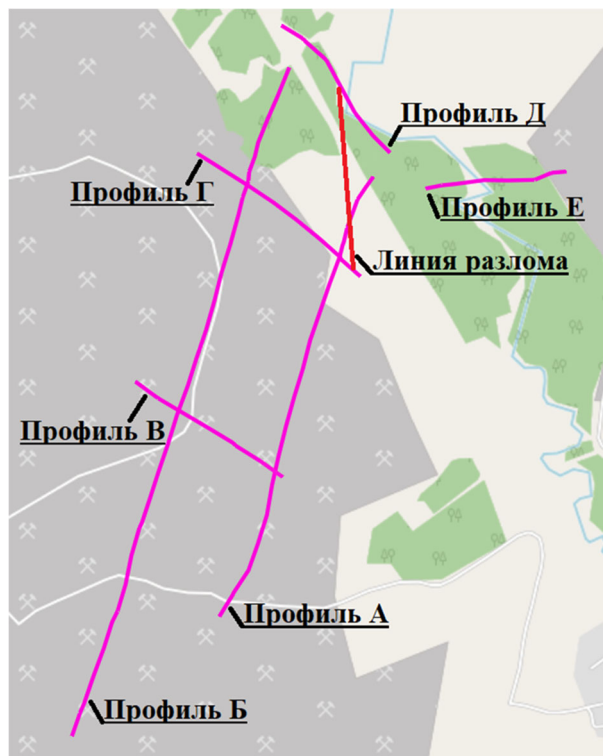


Рисунок 45 – Схема горного отвода

Это действие инициирует создание графического файла в формате DXF, который будет включать в себя схему горного отвода, трехмерное изображение угольного пласта и визуализацию выбранных разломов. Примеры визуализации срезов сейсмоданных по профилям А, Б, Г, и Д представлены на рисунках 46–49.



Рисунок 46 – Срез сейсмоданных по профилю А



Рисунок 47 – Срез сейсмоданных по профилю Б



Рисунок 48 – Срез сейсмоданных по профилю Г



Рисунок 49 – Срез сейсмоданных по профилю Д

В рамках контрольного расчета, основанного на результатах анализа данных, была выполнена визуализация определенного участка углепородного массива. Результаты этой визуализации представлены в виде трехмерной модели, начальное состояние которой описывается с помощью последующих изображений. На этих изображениях демонстрируется карта с наложенной на неё схемой сейсмических профилей, а также представлены срезы сейсмических данных, соответствующие анализируемым профилям. Это обеспечивает комплексное представление о геоло-

гической структуре исследуемой области, а также о распределении и характеристиках разломов в углепородном массиве.

На представленном ниже изображении демонстрируется общий обзор горного отвода. Этот обзор включает в себя наложенную карту территории, на которой расположен угольный пласт. Карта обеспечивает визуальное представление географического расположения и границ исследуемой области. В дополнение к этому, на изображении четко виден сам угольный пласт, который является ключевым объектом исследования. Пласт представлен в контексте его геологического расположения и структуры.

Кроме того, на рисунке 50 отображено дизъюнктивное нарушение, обнаруженное в ходе исследований. Это нарушение указывает на наличие разломов или других геологических аномалий в структуре угольного пласта. Визуализация дизъюнктивного нарушения позволяет лучше понять его характеристики и потенциальное влияние на геологическую стабильность и добычу угля в данной области. Таким образом, изображение предоставляет ценную информацию, которая может быть использована для дальнейшего анализа и планирования горнодобывающих работ.

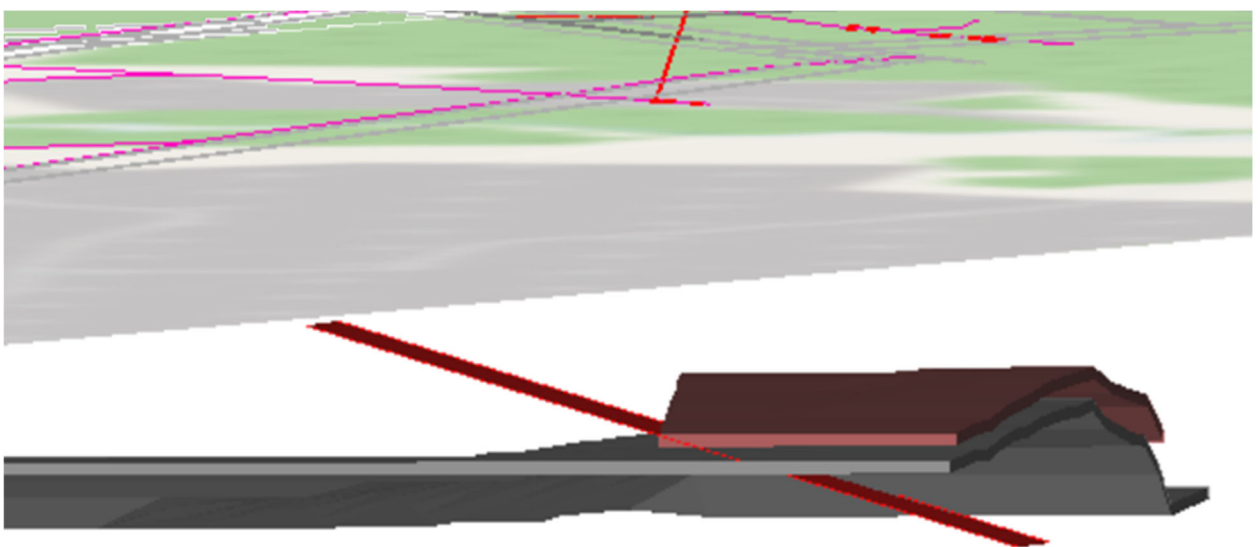


Рисунок 50 – Трехмерная модель пласта с нарушением и наложенной плоскостью карты

На рисунке 51 представлен визуализированный фрагмент исследуемого углепородного массива, интегрированный с элементами графической схемы горного отвода. Однако в данную визуализацию не включены элементы, отображающие дизъюнктивные нарушения, обнаруженные в ходе геологического анализа. На схеме сейсмические профили обозначены фиолетовыми линиями, что позволяет наглядно представить расположение и траектории сейсмических исследований в пределах исследуемой территории.

Черные линии на схеме схематически демонстрируют раскрой шахтного поля, обеспечивая представление о геометрии и распределении шахтных работ в углепородном массиве. Эти линии могут отражать как реальные, так и планируемые направления разработки шахтного поля, что важно для понимания текущего состояния и планирования будущих добычных операций.

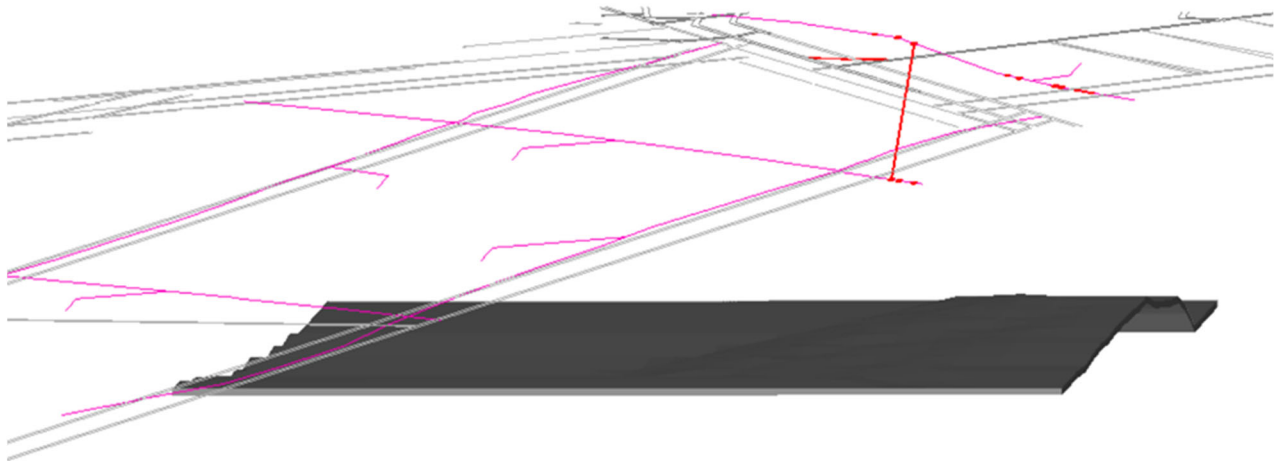
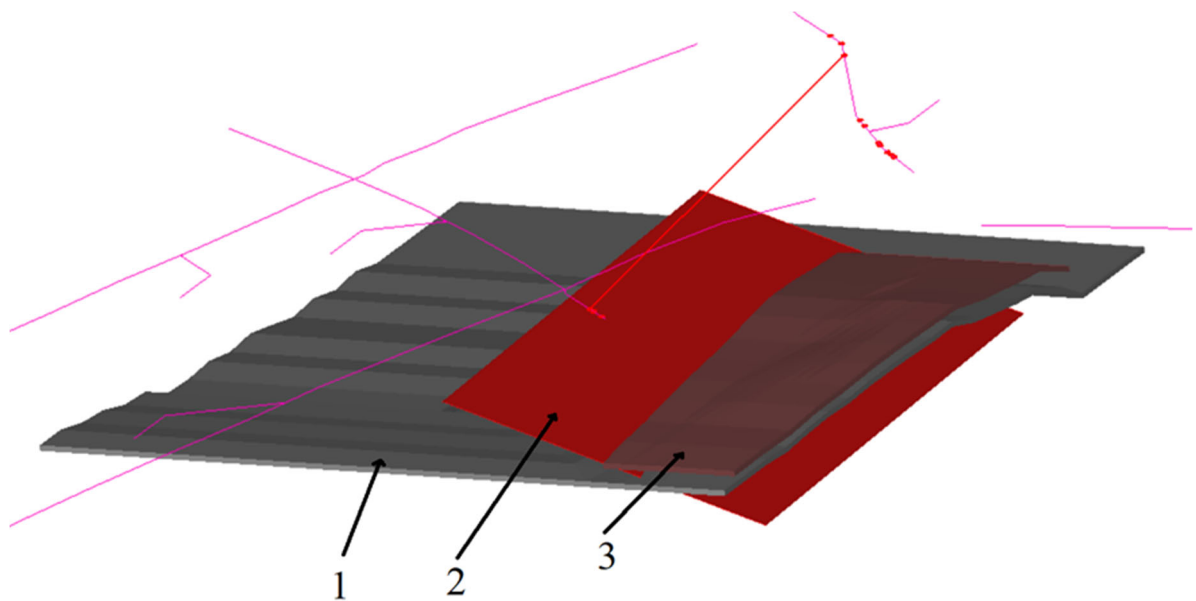


Рисунок 51 – Трехмерная модель фрагмента угольного пласта

Красная линия на схеме представляет собой проекцию плоскости сместителя на поверхность Земли. Этот элемент визуализации критически важен для понимания геологических процессов, влияющих на структуру и стабильность угольного пласта, а также для оценки потенциальных рисков, связанных с эксплуатацией угольного массива. В целом, данное изображение предоставляет комплексное

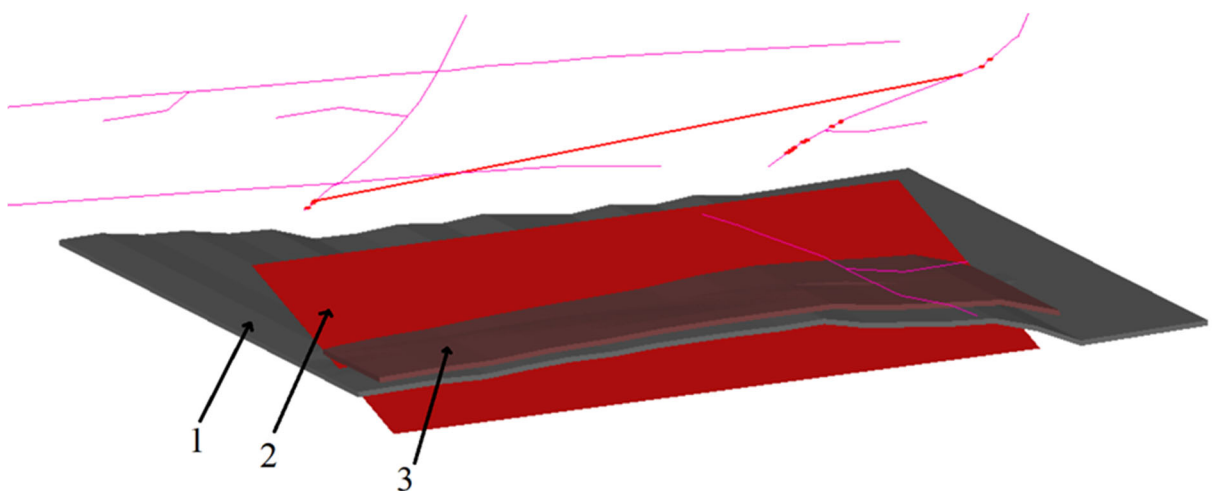
представление о геологической структуре исследуемой области, включая расположение сейсмопрофилей и ключевые элементы шахтного поля.

На представленных ниже рисунках 52–54 демонстрируется угольный пласт с визуализированным разломом.



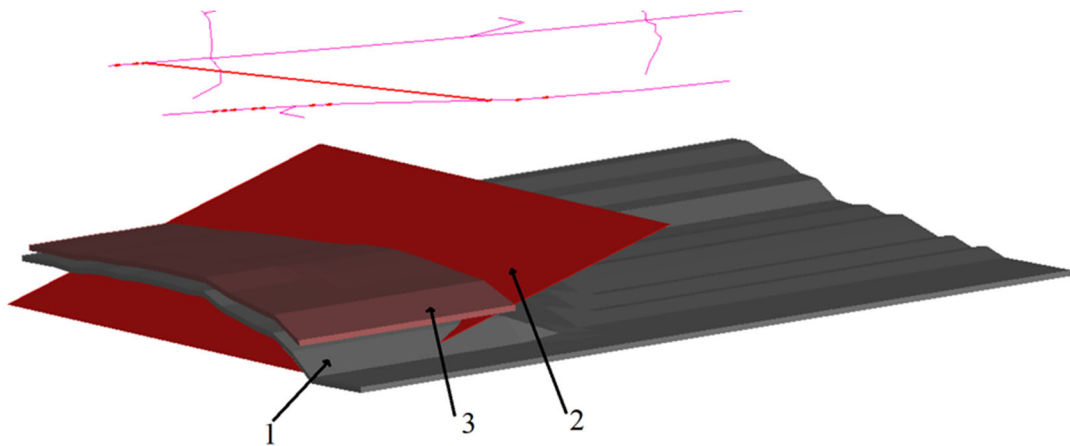
1 – угольный пласт; 2 – плоскость сместителя; 3 – деформированная область

Рисунок 52 – Модель пласта с выявленным нарушением, отображённая вдоль плоскости сместителя со стороны профиля Г



1 – угольный пласт; 2 – плоскость сместителя; 3 – деформированная область

Рисунок 53 – Модель пласта с выявленным нарушением, отображённая поперёк плоскости сместителя



1 – угольный пласт; 2 – плоскость сместителя; 3 – деформированная область

Рисунок 54 – Модель пласта с выявленным нарушением, отображённая вдоль плоскости сместителя со стороны профиля Д

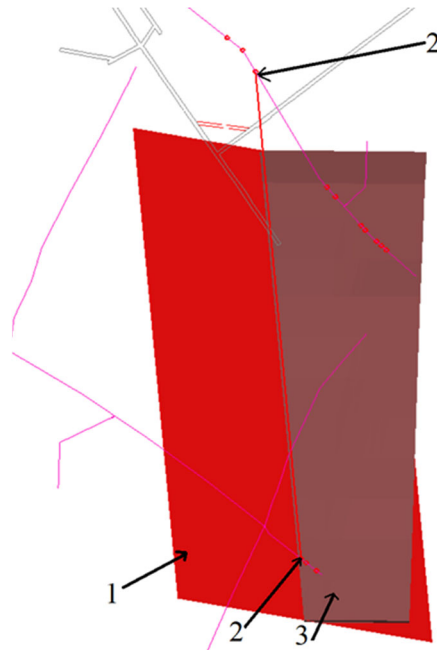
Красная плоскость, проходящая через угольный пласт, представляет собой плоскость сместителя, характерную для дизъюнктивного нарушения. Эта плоскость иллюстрирует локализацию и угол наклона разлома, обнаруженного в ходе геологических исследований. Она служит индикатором структурных изменений в угольном пласте и предоставляет информацию о характере и направлении разлома.

Темно-розовая область, показанная на изображении, представляет собой зону деформации в исследуемом участке углепородного массива. Эта область указывает на место, где произошли значительные структурные изменения в результате геологической активности, приведшей к образованию разлома. В результате возникновения разлома произошло отделение этой деформированной области от основной массы угольного пласта, что наглядно демонстрируется на трехмерной модели.

Таким образом, эти изображения дают детальное представление о геометрии и масштабах дизъюнктивного нарушения в угольном пласте, а также о влиянии этого нарушения на структурную целостность и геологическую стабильность углепородного массива. Визуализация разлома с различных ракурсов позволяет глубже понять его характеристики и потенциальное влияние на добычу угля и безопасность шахтных работ.

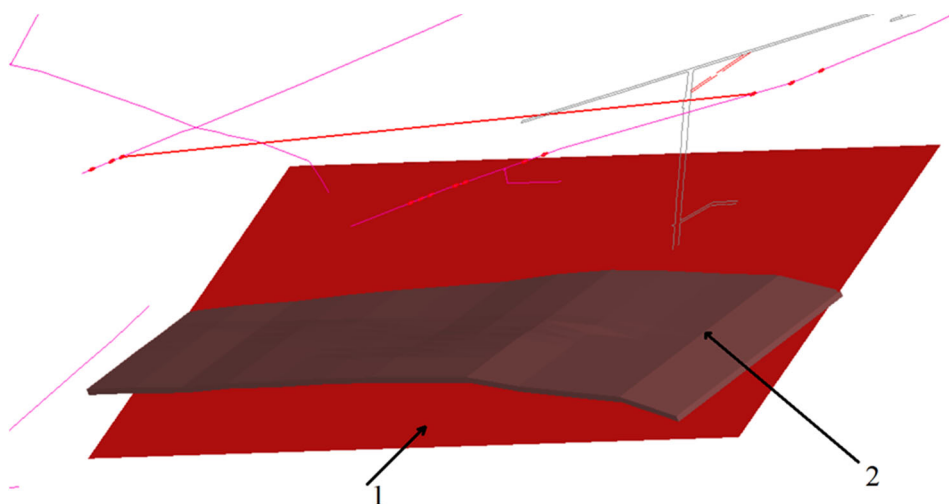
На последующих рисунках 55–57 представлены различные виды, на которых в фокусе визуализации находятся исключительно плоскость сместителя и дефор-

мированная область, в то время как сам угольный пласт не отображается. Это позволяет сосредоточить внимание на ключевых элементах, связанных с дизъюнктивным нарушением, и более детально изучить их характеристики.



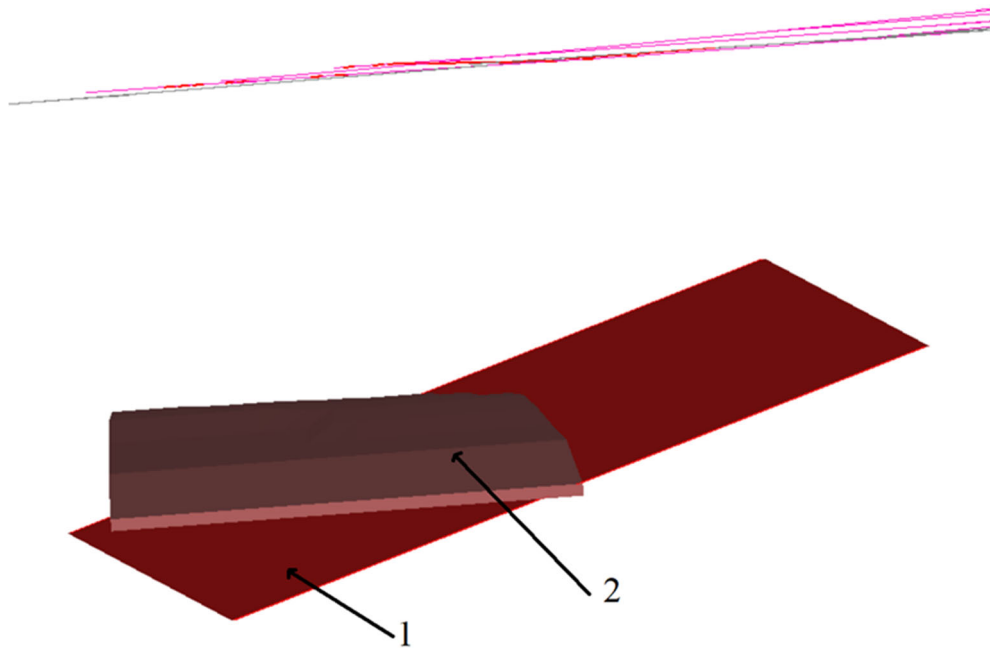
1 – плоскость сместителя; 2 – точки начала и конца разлома, отмеченные на сеймопрофилях; 3 – деформированная область

Рисунок 55 – Деформированная область, отображённая сверху



1 – плоскость сместителя; 2 – деформированная область

Рисунок 56 – Деформированная область, отображённая отображённая поперёк плоскости сместителя



1 – плоскость сместителя; 2 – деформированная область

Рисунок 57 – Деформированная область, отоброаженна влоль плоскости сместителя со стороны профиля Д

На виле сверху особое внимание уделается линиям сейсмопрофиля, на которых четко обозначены точки начала и конца разлома. Эти маркеры предоставляют важную информацию о геометрии и протяженности разлома, а также о его точном расположении в контексте горного отвода. Такая визуализация позволяет точно определить, в какой части горного отвода произошло нарушение и как оно распространяется в пространстве.

Таким образом, изображение способствует глубокому пониманию структурных изменений, вызванных дизъюнктивным нарушением, и их влияния на геологическую среду. Визуализация плоскости сместителя и деформированной области без угольного пласта обеспечивает более четкое и концентрированное представление о характере и масштабах разлома, что является ключевым для планирования дальнейших исследований и мер по обеспечению безопасности в горнодобывающей отрасли.

Следовательно, модуль визуализации представляет собой мощный инструмент, который обеспечивает многоперспективный анализ и оценку геологических

и горнотехнических условий на исследуемом участке углепородного массива. Этот инструмент позволяет рассматривать ситуацию с различных точек зрения и под разными углами, что способствует всестороннему пониманию сложившихся условий и особенностей геологической среды. Визуализация трехмерных моделей обеспечивает более наглядную визуализацию результатов исследования, что повышает эффективность коллективного принятия решений.

Благодаря возможности детальной визуализации угольного пласта, разломов и других ключевых элементов геологической структуры, модуль визуализации становится неоценимым ресурсом для глубокого анализа геологических данных. Это, в свою очередь, позволяет специалистам в области горнодобывающей индустрии принимать обоснованные и эффективные решения по проектированию и планированию горнодобывающих работ.

Использование модуля визуализации для оценки ситуации на углепородном массиве обеспечивает более точное представление о масштабах и характере геологических нарушений, а также о потенциальных рисках и возможностях, связанных с добычей угля. Это способствует повышению безопасности, эффективности и экономической целесообразности горнодобывающих операций.

4.4 Интерпретация и анализ геопространственных данных

В результате завершения полного рабочего цикла описываемой геоинформационной системы, на выходе формируется специализированная директория, включающая в себя три файла различных форматов. Эти файлы разработаны с целью предоставления ответственному инженеру по горнодобывающим работам комплексной информации, необходимой для осуществления обоснованных управленческих решений относительно необходимости внесения корректировок в процесс добычи угля, а также определения характера и объема потенциальных изменений, поскольку сформированные файлы представляют собой интегральную часть процесса принятия решений в области горнодобывающей индустрии, обеспечивая ин-

женеров необходимыми данными для оценки геологических условий и планирования эффективных и безопасных методов добычи угля.

Первый из генерируемых системой файлов – это графический файл в формате DXF, содержащий трехмерную модель угольного пласта и выявленных в ходе исследования нарушений. Создание этого файла было описано в предыдущем разделе. Файл позволяет ответственному инженеру детально оценить геометрические и структурные характеристики разломов, включая угол их залегания, точное местоположение разрывов и взаимное расположение различных частей угольного пласта. Эта информация имеет критическое значение для принятия решений о возможных модификациях в конфигурации и стратегии горнодобывающего оборудования. Пример файла, открытого с использованием стороннего программного обеспечения AVViewer, демонстрируется на рисунке 58.

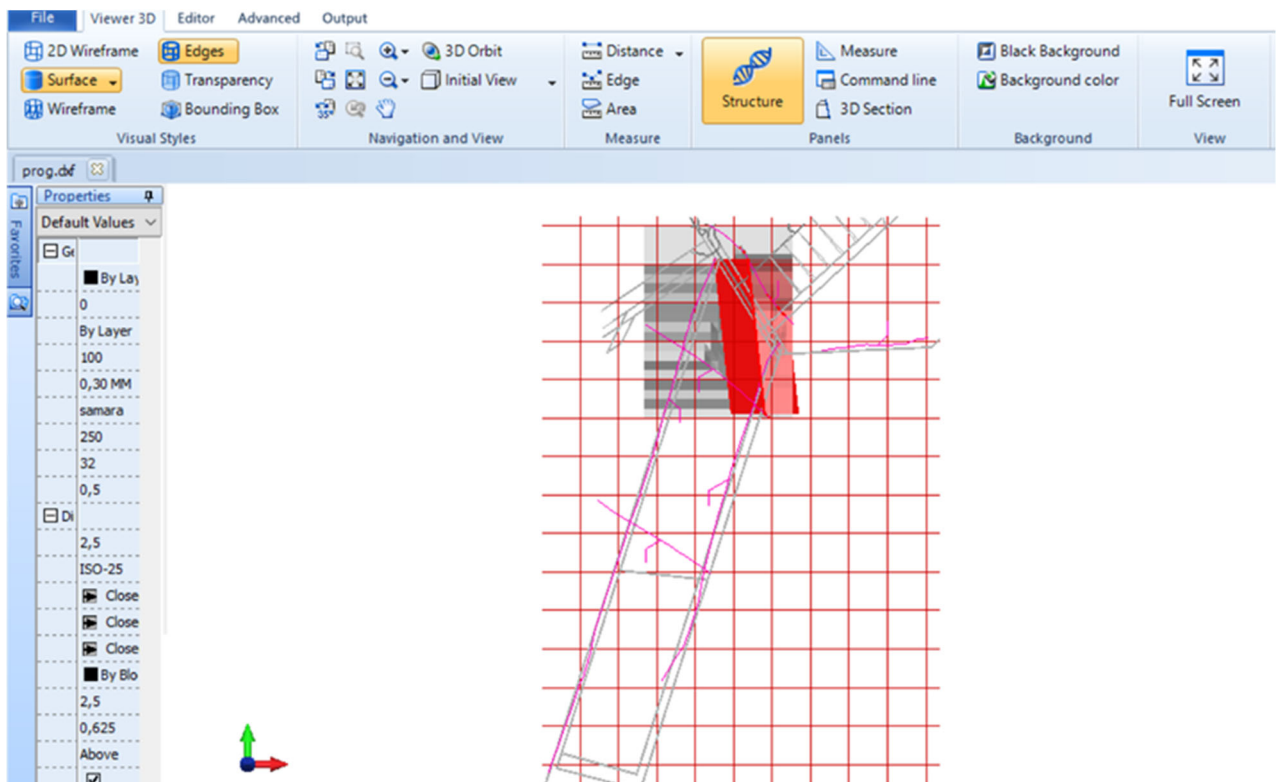


Рисунок 58 – Графический файл, генерируемый системой, открытый в стороннем ПО AVViewer

Вторым элементом, создаваемым в рамках работы геоинформационной системы, является текстовый файл, который содержит обширную информацию, полученную в результате анализа сейсмических данных. Этот документ включает в себя детальные данные о времени и дате проведения аналитических процедур, номерах исследуемых сейсмопрофилей, а также идентификационных номерах датчиков, в зоне действия которых были обнаружены структурные нарушения. Кроме того, в отчете указываются геопространственные координаты точек, где были выявлены разломы. Эта информация предоставляет ценные данные для глубокого анализа текущего состояния исследуемой территории горного отвода, что способствует повышению точности и обоснованности принимаемых решений относительно планирования и проведения горнодобывающих работ.

Отчет также включает в себя иллюстрации, на которых представлена схема горного отвода, наложенная на карту. Эти иллюстрации демонстрируют расположение линий сейсмопрофилей и датчиков, в районе которых были обнаружены потенциальные нарушения, а также проекцию плоскости сместителя на плоскость горного отвода. Дополнительно представлено трехмерное изображение угольного пласта в области разлома, что позволяет визуализировать и оценить масштабы и характеристики деформации. Примеры этих иллюстраций, а также общий вид отчета представлены на рисунках 59–61.

Отчет о проведении анализа сейсмических данных от 2023.11.09 22-26-02

Был проведен анализ загруженных сейсмических данных

Использование нейросетевой модели дало следующие результаты:

4 профиль: Нарушения выявлены в районе датчиков под номерами 1, 3, 4.

5 профиль: Нарушения выявлены в районе датчиков под номерами 6, 7, 8, 9, 10, 16, 18, 39, 43, 46.

Точки разломов имеют следующие геопространственные координаты: [87.22157819209203, 54.187921494078], [87.2229197035292, 54.180685921176725]

По итогам анализа была предложена следующая схема горного отвода (фиолетовыми линиями изображены линии профиля, красными линиями - разломы)

Рисунок 59 – Пример информации, содержащейся в текстовом отчете

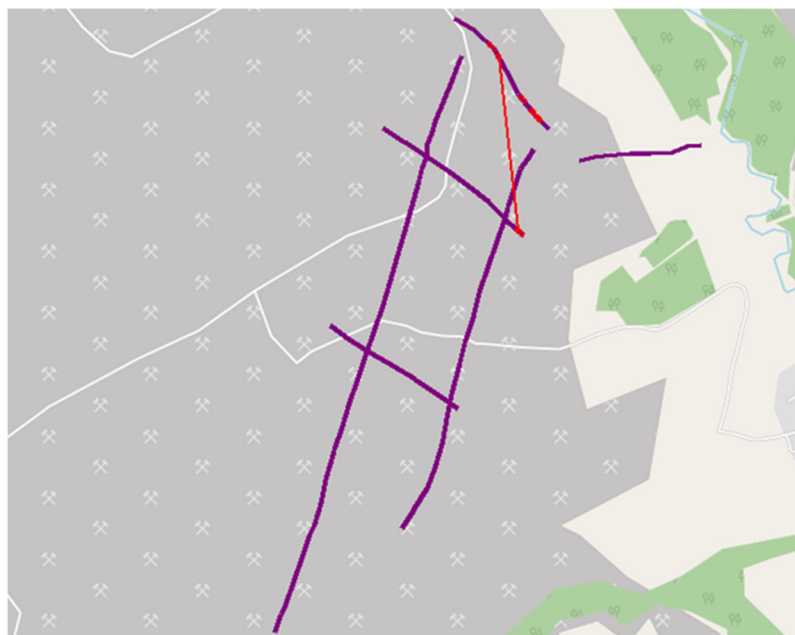


Рисунок 60 – Пример схемы горного отвода, представленной в отчёте

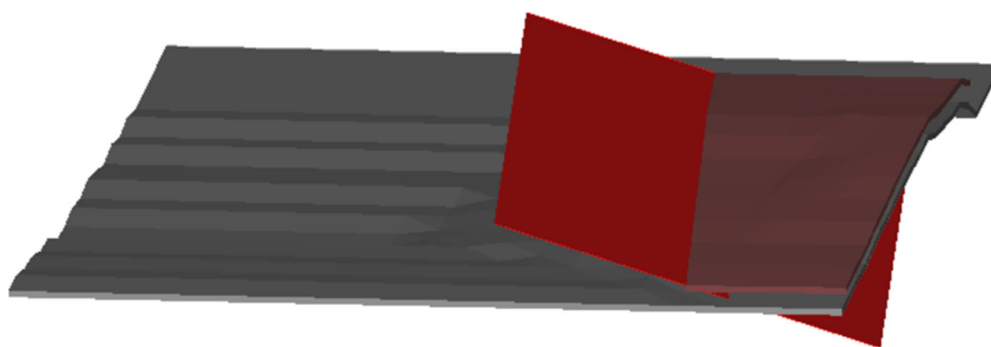


Рисунок 61 – Пример трехмерного изображения пласта с нарушениями, представленного в отчёте

Третьим элементом, создаваемым в рамках работы геоинформационной системы, является файл в формате HTML, который включает в себя интерактивную картографическую визуализацию. Эта карта обладает функциональностью интерактивности и предоставляет детализированное представление географического расположения ключевых элементов исследуемой территории. На карте четко обозначены линии сейсмопрофилей, а также линия, представляющая проекцию плоскости разлома на поверхность Земли. Эти объекты снабжены точной геопространственной привязкой, что делает карту неоценимым источником информации

о геопространственном расположении и характеристиках исследуемого горного отвода.

Благодаря геопространственной привязке, представленной на интерактивной карте, пользователи могут точно оценить положение разломов относительно других объектов на местности, что является критически важным для понимания геологической структуры и планирования горнодобывающих работ. Кроме того, формат HTML обеспечивает удобство и доступность использования карты, так как она может быть открыта в любом веб-браузере без необходимости установки специализированного программного обеспечения. Это делает карту легкодоступной для широкого круга пользователей, включая инженеров, геологов и других специалистов, занимающихся исследованием и разработкой горных отводов.

Пример такой интерактивной карты, открытой через веб-браузер, представлен на рисунке 62. Этот пример демонстрирует визуальное представление и функциональность карты, позволяя пользователям наглядно оценить расположение и характеристики различных геологических объектов в контексте исследуемой территории.

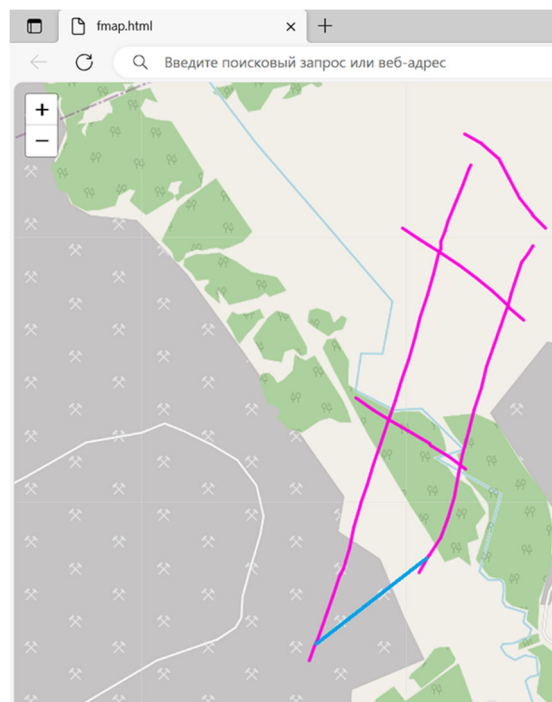


Рисунок 62 – Интерактивная карта, открытая через браузер

На представленной карте для визуализации и демонстрации расположения сейсмических профилей используются линии, окрашенные в розовый цвет. Эти розовые линии предназначены для наглядного отображения траекторий сейсмических профилей, что позволяет пользователям четко идентифицировать их географическое положение в рамках исследуемой территории. Каждая розовая линия на карте соответствует определенному сейсмопрофилю, обеспечивая точное представление о расположении и протяженности сейсмических исследований.

В то же время, для обозначения проекции плоскости разлома на поверхность Земли используется синяя линия. Эта синяя линия служит для визуализации геометрии и ориентации разлома в контексте горного отвода. Она предоставляет ключевую информацию о местоположении и направлении разлома, что является важным для понимания геологической структуры участка и планирования соответствующих горнодобывающих работ.

Комплекс файлов, создаваемых геоинформационной системой в качестве итогового отчета, представляет собой ценный источник информации для ответственного инженера, занимающегося планированием и управлением горнодобывающими работами. Эти файлы обеспечивают всестороннее и детализированное представление о текущем состоянии исследуемой территории, которая была объектом сейсморазведочных исследований. В частности, они содержат обширные данные о геопространственном расположении ключевых объектов в рамках горного отвода, включая выявленные нарушения и разломы.

Важной частью этих файлов является визуализация разломов, которая включает в себя подробное представление их геометрических характеристик, таких как протяженность, направление и угол наклона. Эта информация имеет критическое значение для понимания геологических условий исследуемой области и может оказать значительное влияние на процесс принятия решений в области горнодобывающей деятельности.

Основываясь на предоставленных данных, ответственный инженер может принять обоснованные решения относительно настройки конфигурации горнодо-

бывающего оборудования, что позволит повысить эффективность и безопасность его работы. Таким образом, предоставленные файлы становятся ключевым инструментом в процессе планирования и оптимизации горнодобывающих операций, обеспечивая необходимую информационную поддержку для реализации эффективных и безопасных методов добычи угля.

Тематические карты, отображающие дизъюнктивные нарушения в угольных пластах, представляют собой фундаментальный инструмент для геологов и специалистов в области горнодобывающей промышленности, требующий тщательной интерпретации и аналитического подхода. Эти карты обеспечивают глубокое понимание геологических характеристик угольных месторождений, а также их влияния на процессы и технологии добычи угля. Они позволяют горнякам и инженерам-технологам определять наиболее безопасные и эффективные стратегии для добычи угля, а также планировать мероприятия по укреплению шахтных выработок и предотвращению возможных дислокаций и разломов.

Процессы прогнозирования параметров дизъюнктивных нарушений и создания тематических карт являются ключевыми этапами в анализе геопространственных данных в горнодобывающей отрасли. Эти карты предоставляют ценную информацию о структурных особенностях и геологических условиях в районе месторождения, что способствует более объективному и информированному принятию решений. Использование тематических карт дизъюнктивных нарушений угольных пластов помогает снизить риски производственных аварий, оптимизировать планирование и расположение горных выработок, а также выбирать наиболее безопасные места для размещения новых шахт и горных выработок.

4.5 Выводы по четвертому разделу

На основе разработанной методики построения тематических карт дизъюнктивных нарушений угольных пластов Кузбасса, а также методики интерпретации и анализа полученных геопространственных данных было проведено сравнение расположений нарушений в углепородных массивах под каждым датчиком сейсмотрассы.

Так, к примеру, на рисунке 63 показана схема углепородного массива профиля Д, выделенного черной линией, и два графика, показывающих результат найденных нарушений. Значения графиков по оси ординат принимают 0 либо 1, где 0 – нарушения нет, 1 – есть. Синий график отражает значения нарушений, которые мы получили после обработки атрибутов пласта алгоритмом машинного обучения, оранжевый график – реальное наличие нарушений. Процент совпадений графиков составляет 81,25 %. Другими словами, алгоритм нашел нарушения там, где они были, и не обнаружил нарушений там, где их нет, с точностью 81,25 % (в 39 случаях из 48). В девяти оставшихся случаях алгоритм допустил ошибки: в двух случаях он не нашел нарушения там, где они были (4,17 %), а в семи случаях нашел нарушения там, где их не было (14,58 %).

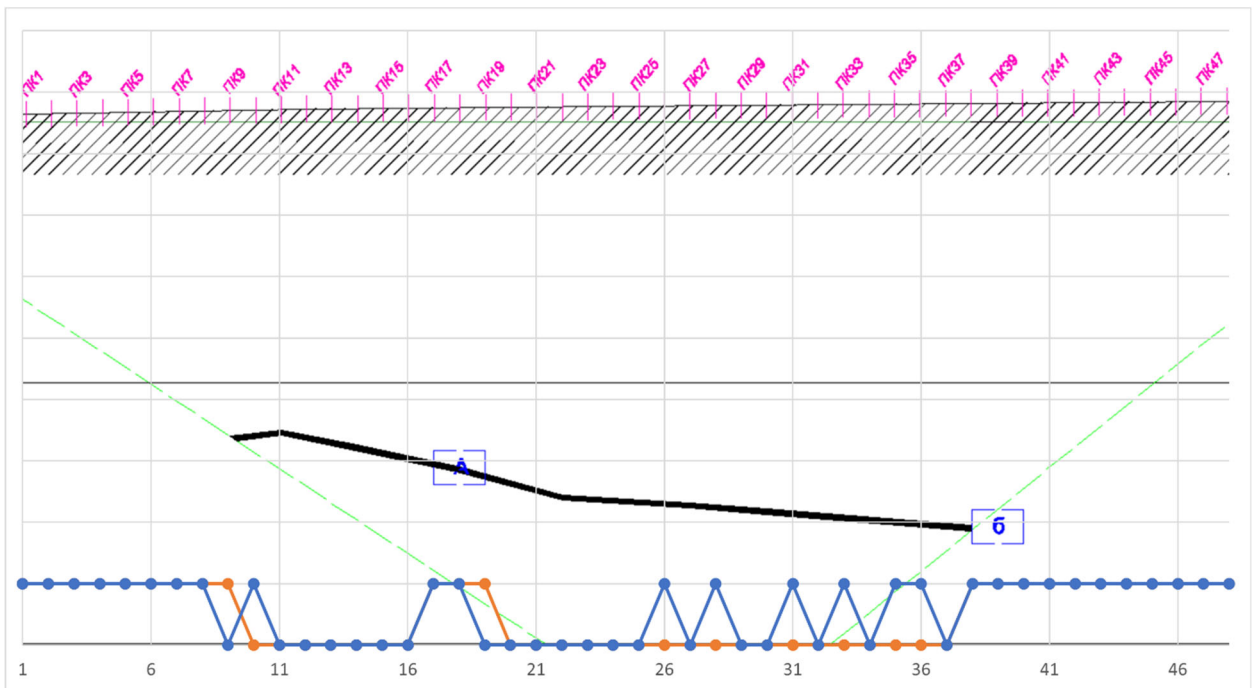


Рисунок 63 – Сравнение нарушений профиля Д

Похожая ситуация наблюдается при сравнении результатов алгоритма машинного обучения с другими трассами. Результаты сравнения представлены на рисунках 64, 65.

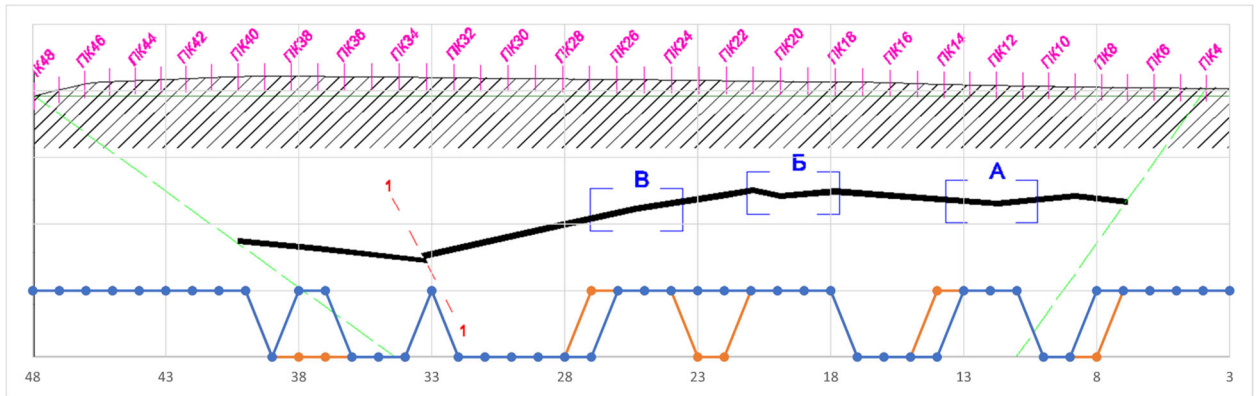


Рисунок 64 – Сравнение нарушений профиля Е

Процент совпадений графиков составляет 85,42 % (41 случай из 48). В семи оставшихся случаях алгоритм допустил ошибки: в двух случаях он не нашел нарушения там, где они были (4,17 %), а в пяти случаях нашел нарушения там, где их не было (10,42 %).

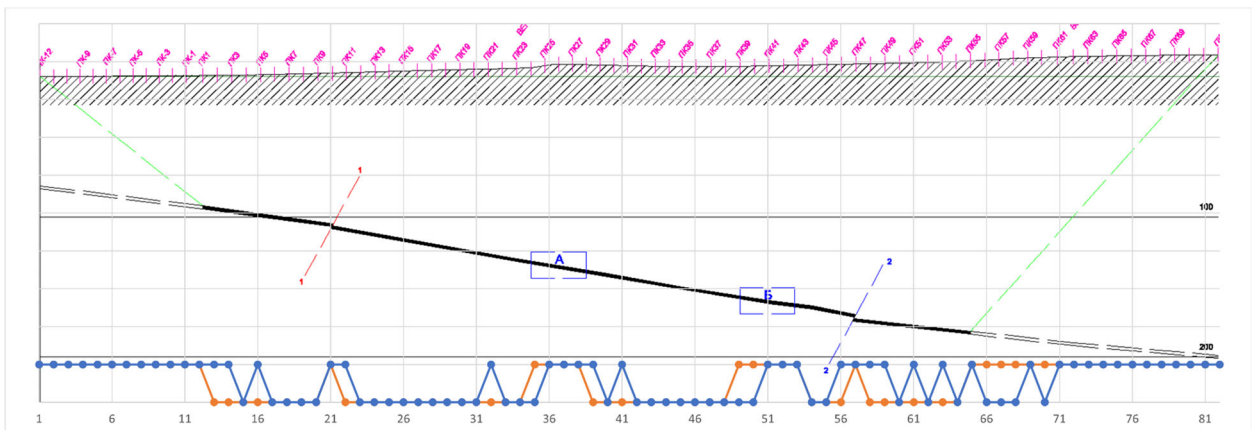


Рисунок 65 – Сравнение нарушений профиля Г

Процент совпадений графиков составляет 77,34 % (65 случаев из 84). В 19 оставшихся случаях алгоритм допустил ошибки: в семи случаях он не нашел нарушения там, где они были (8,33 %), а в 12 случаях нашел нарушения там, где их не было (14,29 %).

Важно отметить, что прогнозирование параметров дизъюнктивных нарушений и создание тематических карт требуют комплексного подхода и использования современных геоинформационных технологий и методов машинного обучения.

Правильная подготовка геопространственных данных, выбор оптимальных алгоритмов прогнозирования и последующая интерпретация результатов позволяют получить полезную и информативную картографическую информацию для горняков и технологов горного дела. Такой подход помогает повысить эффективность и безопасность горнодобывающих работ, способствуя устойчивому развитию угольной промышленности.

Таким образом, в работе доказано четвертое научное положение: *Создание информационно-аналитического обеспечения и методов системного проектирования горно-технологических систем возможно на основе компьютерного моделирования подземной части горного предприятия с использованием средств электронного трёхмерного картографирования горно-геологического строения угленосного массива, горных выработок и элементов технологических процессов.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи создания информационно-аналитического обеспечения геоинформационной системы выявления дизъюнктивных нарушений в углепородном массиве на основе нейросетевого анализа сейсморазведочных данных и компьютерного моделирования геометрии сплошности породного массива, обеспечивающего повышение достоверности обоснования технологии выемки угля при составлении паспорта выемочного участка для обеспечения стабильной и безопасной работы угольного предприятия при ведении горных работ.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1 Разработан метод идентификации дизъюнктивных нарушений в углепородном массиве на основе анализа сейсмических данных с использованием искусственных нейронных сетей архитектурного семейства автоэнкодеров, обеспечивающий прогноз наличия разрывных нарушений в сложных горнотехнических условиях действующих угледобывающих предприятий.

2 Установлено, что эффективность применения архитектуры вариационного автоэнкодера позволяет идентифицировать дизъюнктивное нарушение с точностью от 77 % до 85 %, что позволяет упростить процедуру выработки управленческих решений.

3 Предложена архитектура информационно-аналитического обеспечения ГИС, отличающаяся наличием компьютерных средств моделирования геометрии сплошности углепородного массива на основе алгоритмов машинного обучения, что повышает полноту обработки информации по сравнению с типовыми ГИС и улучшает условия для принятия управленческих решений.

4 Установлено, что применение подхода конструирования ГИС-приложений на основе открытой архитектуры расширяет перечень решаемых задач при проектировании горно-технических систем угольных предприятий за счет взаимозаменяемости компонентов и интеграции с существующими цифровыми продуктами.

5 Обосновано использование подхода витрин данных в поиске дизъюнктивных нарушений, применение которого способно оказать влияние на повышение скорости обработки данных на 38 % за счет применения средств навигации, фильтрации и регулярной реиндексации.

6 Доказано, что информационно-аналитическое обеспечение ГГИС должно включать средства электронного картографирования с использованием программ трехмерного моделирования горно-геологического строения углепородного массива, так как визуализация трехмерных моделей обеспечивает более наглядную визуализацию результатов исследования, что повышает эффективность коллективного принятия решений.

7 Разработана методика пошаговой реализации геоинформационных моделей с использованием объектно-ориентированного подхода, позволяющая создавать программные системы и базы данных, применимые в других областях геологии, требующих анализа геологических структур и моделирования геометрии пластов.

8 Показана эффективность применения разработанного подхода для выявления разрывных нарушений в углепородном массиве действующих угледобывающих предприятий Кузбасса, позволяющего осуществлять интерпретацию сейсмических данных с возможностью построения пространственных компьютерных геоизображений новых видов.

Результаты диссертационного исследования могут использоваться при проектировании и реализации специализированных ГИС, а также могут быть применены и в других областях знаний, требующих анализа геологических структур и моделирования геометрии пластов для расширения возможностей и получения более качественного представления о структуре горных пород.

Перспективы дальнейших исследований по данной тематике заключаются в применении искусственных нейронных сетей с использованием архитектурного семейства автоэнкодеров, в основе которых заложен принцип перехода к сжатому представлению и восстановления из него. Такая способность позволяет проводить выявление дизъюнктивного нарушения непосредственно на сейсмограммах, не

прошедших дополнительную предобработку, что позволит оперативно анализировать и обрабатывать большие объемы данных сейсморазведки. Это приведет к существенному улучшению методов и техник, используемых технологами, инженерами горного дела и специалистами, занимающимися планированием горных работ, за счёт возможности классификации существующих тектонических аномалий, выявления среди них дизъюнктивных нарушений и структурирования в информационные единицы, интегрированные с геопространственными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Абдрахманов, М. И. Применение алгоритмов кластеризации для экспресс-анализа сейсмических данных / М. И. Абдрахманов, С. Э. Лапин, И. В. Шнайдер. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 6. – С. 27–44.

2 Автоматизированная система наблюдения, оповещения и поиска персонала при авариях в шахтах / А. И. Благодарный, О. З. Гусев, С. С. Журавлев и др. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – 2009. – № 1. – С. 34–40.

3 Автоэнкодер: подход к понижению размерности векторного пространства с контролируемой потерей информации / Н. В. Акинина, М. В. Акинин, А. В. Соколова, М. Б. Никифоров, А. И. Таганов. – Текст : непосредственный // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. – № 9. – С. 3–12.

4 Адушкин, В. В. Физика и геомеханика формирования и развития очаговых зон разрушения горных пород в природных и горнотехнических системах: современное состояние, перспективные направления фундаментальных исследований и прикладных разработок / В. В. Адушкин, В. Н. Опарин. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S56. – С. 24–44.

5 Азимов, А. Т. Концепция создания технологической схемы обработки-дешифрирования-интерпретации данных дистанционного зондирования Земли на основе геоинформационных технологий для решения геологических задач / А. Т. Азимов. – Текст : непосредственный // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Серия «География». – 2010. – Том 23 (62), № 2. – С. 22–29.

6 Ахмедов, А. А. Применение алгоритмов машинного обучения для разработки геофизической модели месторождений / А. А. Ахмедов, Д. У. Адамов. – Текст : непосредственный // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – Т. 4, № 5. – С. 792–796

7 Ахмедов, Т. Р. Об искажении отображения реального геологического строения в сейсмических временных разрезах при несогласном залегании сейсмических комплексах / Т. Р. Ахмедов, Р. Д. Мамедов, А. М. Мамедова. – Текст : непосредственный // Вектор ГеоНаук. – 2022. – Т. 5, № 2. – С. 5–13. – DOI 10.24412/2619-0761-2022-2-5-13.

8 Бабина, Л. А. Применение методов машинного обучения для обработки геофизических данных / Л. А. Бабина, В. М. Кочетков. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геология и разведка. – 2014. – № 4. – С. 42–48.

9 Беляева, Л. И. Основы геофизики : учебное пособие / Л. И. Беляева. – Текст : непосредственный. – Ухта : УГТУ, 2016. – С. 75–82.

10 Бурмин, Л. Н. Информационная модель геоинформационной системы для исследования геометрии породного массива на основе данных сейсморазведки / Л. Н. Бурмин, И. Ю. Степанов, Ю. А. Степанов. – Текст : непосредственный // Геоинформатика. – 2023. – № 3. – С. 24–32. – DOI 10.47148/1609-364X-2023-3-24-32.

11 Вязовкина, А. О. О корректности прогноза толщин и пористости пластов-коллекторов, определяемых по материалам сейсморазведки / А. О. Вязовкина. – Текст : непосредственный // Проблемы недропользования. – 2017. – № 1 (12). – С. 26–63.

12 Гайнанов, В. Г. Практикум по обработке данных сейсморазведки МОВ-ОГТ. Руководство к практическим занятиям по курсу «Сейсморазведка». Издание второе, переработанное : учебное пособие, электронное издание сетевого распространения / В. Г. Гайнанов. – Москва : КДУ ; Добросвет, 2018. – Текст : электронный.

13 Геологическое строение и нефтегазоносность Оренбургской области / В. К. Баранов, А. Г. Галимов, И. А. Донцевич, В. С. Дубинин, И. М. Жуков, М. К. Кирсанов, В. С. Коврижкин, Н. Ф. Козлов, В. И. Кузнецов, Ю. М. Кутеев, Г. В. Леонов, И. Н. Ляпустина, С. П. Макарова, И. Н. Малиновский, А. С. Пантелеев, А. С. Пелешенко, П. И. Постоевко, В. Д. Терентьев, Г. В. Фомина, О. А. Хо-

ментовская ; под ред. А. С. Пантелеева, Н. Ф. Козлова. – Текст : непосредственный. – Оренбург : Оренбургское книжное издательство, 1997. – 272 с.

14 Геология, геоэкология, эволюционная география : коллективная монография / под редакцией Е. М. Нестерова, В. А. Снытко. – Санкт-Петербург : РГПУ им. А. И. Герцена, 2018. – 392 с. – ISBN 978-5-8064-2639-1. – Текст : непосредственный.

15 Геофизика : учебное пособие / Авторы-составители С. Е. Коркин, Г. К. Ходжаева. – Нижневартовск : Издательство Нижневартовского государственного университета, 2016. – 128 с. – Текст : непосредственный

16 Геофизика : учебное пособие / под редакцией В. К. Хмелевского. – Москва : КДУ ; Добросвет, 2018. – 324 с. – Текст : непосредственный.

17 Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых : учебное пособие / А. Г. Соколов, Н. В. Черных. – Оренбург : ОГУ, 2015. – 143 с. – Текст : непосредственный.

18 Геоэлектрические исследования процессов подготовки провалов грунта / Е. Н. Волкова, П. А. Казначеев, А. Н. Камшилин, В. В. Попов. – Текст : непосредственный // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14, № 3. – С. 64–79.

19 Гоглев, Н. Н. Подход к идентификации новых типов рисков с применением искусственного интеллекта и анализа больших данных / Н. Н. Гоглев, С. А. Мигалин, Е. В. Касаткина. – Текст : непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. – 2022. – № 10. – С. 111–119.

20 Гончарова, Н. В. Использование информационной базы данных ГИС ARCGIS для обоснования качества угольной продукции / Н. В. Гончарова, А. Н. Дворникова. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 40–45.

21 Горовой, С. В. Исследование сигналов акустической эмиссии, наблюдаемых при растрескивании и дроблении каменного угля / С. В. Горовой. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № S12-3. – С. 14–23.

22 Григоренко, Л. А. Организация хранения данных в базе распределенного реестра. – Текст : непосредственный / Л. А. Григоренко, Д. А. Романовская // Нацразвитие. Наука и образование. – 2023. – № 3(15). – С. 49–51.

23 Грищенко, Н. Н. Пространственное моделирование сдвижений и деформаций земной поверхности при подземной добыче угля / Н. Н. Грищенко, В. Б. Скаженик, И. В. Чернышенко. – Текст : непосредственный // Проблемы горного давления. – 2022. – № 1-2 (42-43). – С. 95–106.

24 Дулесов, А. С. Обзор основанных на техниках машинного обучения методов обнаружения выбросов в данных / А. С. Дулесов, А. В. Байшев. – Текст : электронный // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6 (102). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-osnovannyh-na-tehnikah-mashinnogo-obucheniya-metodov-obnaruzheniya-vybrosov-v-dannyh>.

25 Журавлев, Е. И. Применение нейросетевых технологий при прогнозировании состояния опасности возникновения геодинамических явлений на шахтах / Е. И. Журавлев. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 2. – С. 361–368.

26 Завьялова, М. В. Основы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых : учебное пособие / М. В. Завьялова, Ю. И. Кузнецов. — Дубна : Государственный университет «Дубна», 2023. – 128 с. – ISBN 978-5-89847-684-7. – Текст : непосредственный.

27 Исследование нелинейной цифровой фильтрации сигналов с использованием генеративно-состязательной нейронной сети / Д. Э. Цибулис, А. Н. Рагозин, С. Н. Даровских, А. З. Кулганатов. – Текст : непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2022. – № 2. – С. 158–167.

28 Кадыркулова, Н. К. Визуализация картографических данных в среде ГИС / Н. К. Кадыркулова, Э. О. Гапырова. – Текст : непосредственный // Современные научные знания : сборник статей Международной научно-практической конференции, Пенза, 17 апреля 2023 года. – Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. – С. 52–55.

29 Кайралапов, А. М. Поддержание целостности баз данных / А. М. Кайралапов. – Текст : непосредственный // Матрица научного познания. – 2023. – № 2-2. – С. 32–37.

30 Канониров, А. П. Сравнительный анализ применения 2D/3D сегментационных моделей в задаче выделения сейсмических горизонтов. – Текст : непосредственный // Экспозиция Нефть Газ. – 2022. – № 8. – С. 36–39.

31 Карпик, А. П. Электронное геопространство – сущность и концептуальные основы / А. П. Карпик, Д. В. Лисицкий. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2009. – № 5. – С. 41–44.

32 Картирование тектонических нарушений на основе машинного обучения и нейронных сетей / Р. Ф. Мифтахов, П. А. Авдеев, Г. Н. Гогоненков, А. К. Базанов, И. И. Ефремов. – Текст : непосредственный // Геология нефти и газа. – 2021. – № 3. – С. 123–136. – DOI 10.31087/0016-7894-2021-3-123-136.

33 Кирсанов, А. С. Проектирование базы данных и модулей расчёта / А. С. Кирсанов, И. Ю. Степанов. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные исследования в физике, математике и информатике : материалы симпозиума в рамках XVII (XLIX) Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Кемерово, 21 апреля 2022 года / Сост. Ю. А. Степанов, С. Ю. Завозкин, В. В. Илькевич. Выпуск 23. – Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2022. – С. 243–245.

34 Кисляков, А. Н. Иерархические методы кластеризации в задаче поиска аномальных наблюдений на основе групп с нарушенной симметрией / А. Н. Кисляков, С. В. Поляков. – Текст : непосредственный // Управленческое консультирование. – 2020. – № 5 (137). – С. 116–127.

35 Кобелев, С. Л. Актуальные методики хранения сейсмической информации / С. Л. Кобелев, С. И. Сиразиев. – Текст : непосредственный // Сейсморазведка в Сибири и за её пределами : материалы научно-практической конференции, Красноярск, 08–11 ноября 2022 года / Отв. за выпуск: Н. В. Ковальчук, Н. С. Епифанцева. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 140–144.

- 36 Короновский, М. Общая геология : учебное пособие / М. Короновский. – Москва : КДУ ; Добросвет, 2018. – 552 с. – Текст : непосредственный.
- 37 Костицын, В. И. Геофизика : учебник / В. И. Костицын, В. К Хмелевской. – Пермь, 2018. – 428 с. – Текст : непосредственный.
- 38 Краснов, В. И. Применение методов искусственного интеллекта для анализа геофизических данных / В. И. Краснов, В. И. Исаев. – Текст : непосредственный // Вестник РГГРУ. – 2018. – № 1 (86). – С. 98–105.
- 39 Краснов, Ф. В. Автоматизированное обнаружение геологических объектов в изображениях сейсмического поля с применением нейронных сетей глубокого обучения / Ф. В. Краснов, А. В. Буторин, А. Н. Ситников. – Текст : непосредственный // Бизнес-информатика. – 2018. – № 2 (44). – С. 7–16.
- 40 Кузовлев, В. И. Выявление аномалий при прогнозном анализе данных / В. И. Кузовлев, А. О. Орлов. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2016. – № 5 (110). – С. 75–85.
- 41 Куприянов, А. О. Цифровое моделирование при подземных геодезических работах / А. О. Куприянов. – Текст : непосредственный // Образовательные ресурсы и технологии. – 2015. – № 4 (12). – С. 57–65.
- 42 Кушнарев, И. П. Методы изучения разрывных нарушений / И. П. Кушнарев. – Москва : Недра, 1977. – 228 с. – Текст : непосредственный.
- 43 Лапин, С. Э. Выделение значимых факторов при моделировании горных объектов / С. Э. Лапин, Р. Е. Леонов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 140–145.
- 44 Лапин, С. Э. Методология и практика построения геоинформационной системы ГИС МИКОН прогноза динамики состояния горного массива в процессах подземной разработки угольного месторождения / С. Э. Лапин. – Текст : непосредственный // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 11 – С. 60–66.
- 45 Лапин, С. Э. Методология формирования сейсмического канала в геоинформационной системе ГИС МИКОН / С. Э. Лапин. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10 (специальный выпуск 35). – С. 27–42.

46 Лось, В. Л. Методология и пути развития научно-технологического обеспечения оценки недр на рудные полезные ископаемые / В. Л. Лось, Б. С. Ужкенов. – Текст : непосредственный // Отечественная геология. – 2021. – № 1. – С. 25–39.

47 Макарова, Н. В. О соотношении эрозионных и тектонических процессов в платформенных и горных условиях / Н. В. Макарова, В. И. Макаров, Т. В. Суханова. – Текст : непосредственный // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2008. – № 5. – С. 4–11.

48 Методика и технология высокоразрешающей сейсморазведки на основе использования оптимизированных источников (рекомендации) / И. А. Кобылкин и др. – Волгоград : Фонды ЗАОр «НП «Запприкаспийгеофизика», 1993. – Текст : непосредственный

49 Митрофанов, Г. М. Нелинейные преобразования сигналов с применением спектральных и факторных разложений (приложение к сейсморазведке) : монография / Г. М. Митрофанов. – Новосибирск : НГТУ, 2018. – 444 с. – ISBN 978-5-7782-3582-3. – Текст : непосредственный.

50 Моделирование выбросоопасного состояния массива с дизъюнктивным нарушением и горной выработкой методом конечных элементов / Т. К. Исабек, Н. Хуанган, А. Р. Айтпаева, Р. Т. Шаймерденова. – Текст : непосредственный // Уголь. – 2020. – № 6. – С. 55–61. – DOI 10.18796/0041-5790-2020-6-55-61.

51 Молев, М. Д. Методологические аспекты выбора комплекса геофизических методов исследования массива горных пород / М. Д. Молев. – Текст : электронный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1999. – № 6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-aspekty-vybora-kompleksa-geofizicheskikh-metodov-issledovaniya-massiva-gornyh-porod/viewer>.

52 Назарова, Г. Е. Разработка геоинформационной модели угольной промышленности Кемеровской области / Г. Е. Назарова, Л. К. Радченко. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 6 : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 2. – С. 193–201.

53 Намиот, Д. Е. Порождающие модели в машинном обучении / Д. Е. Намиот, Е. А. Ильюшин. – Текст : непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. – 2022. – № 7. – С. 101–118.

54 Новикова, Н. В. Планирование успешного жизненного цикла базы данных / Н. В. Новикова. – Текст : непосредственный // Перспективные научные исследования: опыт, проблемы и перспективы развития : сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции, Уфа, 04 апреля 2023 года. Часть 1. – Уфа : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023. – С. 181–186.

55 Обеспечение безопасности угледобычи на основе данных наземной сейсморазведки методом общей глубинной точки / О. В. Тайлаков, С. В. Соколов, Д. Н. Застрелов, А. С. Ярош. – Текст : непосредственный // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 4. – С. 34–37.

56 Обласов, А. А. Внедрение баз данных в искусственный интеллект / А. А. Обласов. – Текст : непосредственный // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 96-8. – С. 157–159. – DOI 10.18411/trnio-04-2023-437.

57 Общая геология : учебное пособие / И. Г. Ермолович, О. Ю. Мещерякова, Е. С. Ушакова, И. В. Щукова. – Пермь, 2018. – 133 с. – Текст : непосредственный.

58 Одабаи-Фард, В. В. Геодинамический мониторинг земной поверхности и объектов горнодобывающей промышленности при помощи метода радарной интерферометрии / В. В. Одабаи-Фард, М. Р. Пономаренко. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 11. – С. 59–67. – DOI 10.25018/0236-1493-2017-11-0-59-67.

59 Пасечник, И. А. Применение ГИС-систем при решении экологических проблем в районах угольных шахт / И. А. Пасечник. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S6. – С. 215–220.

60 Попова, И. А. Обнаружение аномалий в наборе данных с помощью алгоритмов машинного обучения без учителя isolation forest и local outlier factor /

И. А. Попова. – Текст : непосредственный // StudNet. – 2020. – № 12. – С. 1460–1470.

61 Применение открытых модульных систем автоматизации для предприятий подземной угледобычи / А. И. Благодарный, О. З. Гусев, Л. С. Каратышева и др. – Текст : непосредственный // Проблемы информатики. – 2009. – № 3. – С. 68–77.

62 Пример применения сверточных нейронных сетей в обработке реальных данных 3D-сейсморазведки / Г. Н. Логинов, А. А. Дучков, Д. А. Литвиченко, С. А. Алямкин. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 2 : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 3. – С. 147–153.

63 Принципы геоинформационного обеспечения задач дистанционного поиска полезных ископаемых / М. А. Попов, С. А. Станкевич, С. Ю. Марков, А. В. Зайцев, М. В. Топольницкий, О. В. Титаренко. – Текст : непосредственный // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. – 2012. – Т. 25 (64). – № 1. – С. 177–190.

64 Расулова, А. М. Идентификация уникальных озер различного происхождения методами машинного обучения / А. М. Расулова, А. В. Измайлова. – Текст : непосредственный // Бюллетень науки и практики. – 2022. – № 12. – С. 180–194.

65 Региональная кластеризация угольных месторождений Кузбасса по газодинамической активности. Часть II: влияние геотермических, геодинамических и физико-химических процессов / В. Н. Опарин, В. В. Адушкин, Т. А. Киряева, В. П. Потапов. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 10. – С. 5–29.

66 Рогова, Т. Б. Геометрия недр. Особенности геометризации угольных месторождений : учебное пособие / Т. Б. Рогова, С. В. Шаклеин. – Кемерово : КузГТУ имени Т. Ф. Горбачева, 2018. – 182 с. – ISBN 978-5-906969-92-7. – Текст : непосредственный.

67 Роль цифровых технологий в комплексном освоении месторождений твердых полезных ископаемых / Ю. Л. Жуковский, В. А. Ишейский, А. Д. Булдыско, Ю. Д. Гоцул. – Текст : непосредственный // Научные междисциплинарные исследования. – 2020. – № 7. – С. 14–19.

68 Романевич, К. В. Автоматизация классификации сейсмических событий при сейсмомониторинге угольной шахты с использованием машинного обучения / К. В. Романевич, С. Н. Мулёв. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – 2023. – № 5S. – С. 58–64. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-5S-58-64.

69 Сафронов, Д. А. Поиск аномалий с помощью автоэнкодеров / Д. А. Сафронов, Ю. Д. Кацер, К. С. Зайцев. – Текст : непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. – 2022. – № 8. – С. 39–45.

70 Сашурин, А. Д. Влияние земных разломов на прочностные характеристики зданий и сооружений / А. Д. Сашурин, Н. А. Панжина. – Текст : непосредственный // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2010. – № 1. – С. 69–72.

71 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2023663501 Российская Федерация. Программный модуль обработки исходных данных, полученных в результате сейсмической разведки / И. Ю. Степанов, Д. Е. Шабанов, Е. В. Дорн, Ю. А. Степанов, Л. Н. Бурмин ; заявители и правообладатели И. Ю. Степанов, Д. Е. Шабанов, Е. В. Дорн, Ю. А. Степанов, Л. Н. Бурмин. – 2023 г. – Текст : непосредственный.

72 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2023664242 Российская Федерация. Программный модуль визуализации данных, полученных в результате сейсмической разведки / И. Ю. Степанов, Д. Е. Шабанов, Е. В. Дорн, Ю. А. Степанов, Л. Н. Бурмин ; заявители и правообладатели И. Ю. Степанов, Д. Е. Шабанов, Е. В. Дорн, Ю. А. Степанов, Л. Н. Бурмин. – 2023 г. – Текст : непосредственный.

73 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2023663877 Российская Федерация. Программный модуль-детектор дизъ-

юнктивных нарушений породного массива на базе нейронных сетей архитектурного семейства автоэнкодеров / И. Ю. Степанов, Д. Е. Шабанов, Е. В. Дорн, Ю. А. Степанов, Л. Н. Бурмин ; заявители и правообладатели И. Ю. Степанов, Д. Е. Шабанов, Е. В. Дорн, Ю. А. Степанов, Л. Н. Бурмин. – 2023 г. – Текст : непосредственный.

74 Семерикова, И. И. Возможности методики распознавания зон трещиноватости по сейсмическим параметрам для изучения техногенных изменений состояния пород / И. И. Семерикова. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 2. – С. 330–337.

75 Сжатие данных / Дык Буй Минь, Хуи Нгуен Нгок, Линь Лай Тхи, Хю Нгуен Ба, Чыонг Нгуен Динь, Лам Нгуен Чонг. – Текст : непосредственный // Проблемы Науки. – 2017. – № 1 (83). – С. 55–56.

76 Сидоренко, П. Ф. Методика формирования рациональных геолого-геофизических комплексов прогноза горно-геологических факторов, осложняющих отработку угольных пластов / П. Ф. Сидоренко. – Текст : непосредственный // Геология угольных месторождений. – 2006. – Вып. 16. – С. 82–89.

77 Смирнов, А. В. Факторы, влияющие на безопасную и высокопроизводительную работу очистных забоев / А. В. Смирнов, А. В. Ремезов. – Текст : непосредственный // Вестник КузГТУ. – 2005. – № 4.1. – С. 36–40.

78 Смирнова, И. О. ГИС-технология обработки и интерпретации материалов дистанционного зондирования для изучения тектонических критериев размещения месторождений углеводородов / И. О. Смирнова, А. А. Русанова. – Текст : непосредственный // Отечественная геология. – 1999. – № 6. – С. 32–40.

79 Соколов, А. Г. Выделение и трассирование тектонических нарушений по данным сейсморазведки и прогнозирование приразломных ловушек в платформенном Оренбуржье / А. Г. Соколов. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2010. – 204 с. – Текст : непосредственный.

80 Соколов, А. Г. Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых : учебное пособие / А. Г. Соколов, Н. В. Черных. – Оренбург : ОГУ, 2015. – 143 с. – ISBN 978-5-7410-1277-2. – Текст : непосредственный.

81 Соколов, А. Г. Доминирующая роль обновленных на новейшем этапе тектонических нарушений при формировании и размещении зон сосредоточения подземных вод и рассолов / А. Г. Соколов, Е. Б. Савилова. – Текст : непосредственный // Отечественная геология. – 2018. – № 2. – С. 79–86.

82 Соколов, С. В. Комплексные геофизические исследования состояния углепородного массива в условиях Кузбасса / С. В. Соколов, Е. А. Салтымаков, А. Н. Кормин. – Текст : непосредственный // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 2 (120). – С. 66–70.

83 Соловицкий, А. Н. Дистанционные методы при геофизических исследованиях : учебное пособие / А. Н. Соловицкий. – Кемерово : КемГУ, 2020. – 84 с. – ISBN 978-5-8353-2738-6. – Текст : непосредственный.

84 Соловицкий, А. Н. О регистрации информации при проведении геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры при освоении угольных месторождений Кузбасса / А. Н. Соловицкий. – Текст : электронный // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 6-5 (48). – С. 152–155.

85 Состояние, перспективы воспроизводства и использования угольной сырьевой базы России / М. И. Логвинов, О. Е. Файдов, Г. И. Старокожева, В. А. Косинский, Г. Б. Андросова, В. И. Вялов. – Текст : непосредственный // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 9. – 2008. – С. 103–108.

86 Степанов, И. Ю. Использование методов машинного обучения в геоинформационных моделях при решении задач геофизической разведки / И. Ю. Степанов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 2. – С. 108–117. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-108-117.

87 Степанов, И. Ю. Компонентная архитектура ГИС исследования геометрии породного массива методом сейсморазведки / И. Ю. Степанов, Л. Н. Бурмин, Ю. А. Степанов. – Текст : непосредственный // Уголь. – 2023. – № 7(1169). – С. 75–80. – DOI 10.18796/0041-5790-2023-7-75-80.

88 Степанов, И. Ю. Построение модели области решения задачи переноса примесей в атмосфере на основе анализа космических снимков / И. Ю. Степанов,

Ю. А. Степанов. – Текст : непосредственный // Информационные технологии (ИТ) в контроле, управлении качеством и безопасности: Сборник научных трудов VIII Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», Томск, 07–12 октября 2019 года. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 290–297.

89 Степанов, И. Ю. Проектирование информационной системы определения деструктивных изменений углепородного массива / И. Ю. Степанов. – Текст : непосредственный // Уголь. – 2023. – № 11. – С. 113–119. – DOI 10.18796/0041-5790-2023-11-113-119.

90 Степанов, Ю. А. Информационная модель расчета параметров мульды для прогноза опасных участков оседания почвы / Ю. А. Степанов, Д. Е. Шабанов, И. Ю. Степанов. – Текст : непосредственный // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2022. – № 29. – С. 54–59. – DOI 10.26160/2474-5901-2022-29-54-59.

91 Степанов, Ю. А. Об одном из способов моделирования углепородного массива для ведения горных работ / Ю. А. Степанов, Л. Н. Бурмин, И. Ю. Степанов. – Текст : непосредственный // Перспективы инновационного развития угольных регионов России : сборник трудов VI Международной научно-практической конференции, Прокопьевск, 10–12 апреля 2018 года / Ответственные редакторы Е. Ю. Пудов, О. А. Клаус. – Прокопьевск : издательство филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2018. – С. 24–29.

92 Степанов, Ю. А. Развитие теоретических основ геоинформационных систем для прогнозирования состояния углепородного массива при ведении очистных работ : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : 25.00.35 Геоинформатика / Степанов Юрий Александрович. – Екатеринбург, 2016. – 32 с. – Текст : непосредственный.

93 Стохастическая инверсия для включения сейсмических данных в трехмерное моделирование / Е. Ф. Гайфулина, А. А. Решетников, В. С. Швыдкой, А. Р. До-

рохов. – Текст : непосредственный // Экспозиция Нефть Газ. – 2022. – № 8. – С. 16–21. – DOI 10.24412/2076-6785-2022-8-16-21.

94 Стратегические задачи технологического развития угольной отрасли / В. И. Клишин, Т. Б. Рогова, С. В. Шаклеин, М. В. Писаренко. – Текст : непосредственный // Уголь. – 2023. – № 3 (1165). – С. 52–59. – DOI 10.18796/0041-5790-2023-3-52-59.

95 Строение кристаллического фундамента в краевой юго-восточной зоне восточно-европейской платформы / А. Г. Соколов, И. А. Денцкевич, А. Г. Черепанов, Д. А. Леверенц. – Текст : непосредственный // Геология нефти и газа. – 2011. – № 4. – С. 39–46.

96 Структурный анализ потоков данных (Data Flow Diagrams – DFD) : методические указания / составители Д. Ю. Киселев, Ю. В. Киселев, В. Д. Макарьев. – Самара : Издательство СГАУ, 2014. – 12 с. – Текст : непосредственный.

97 Тайлаков, О. В. К вопросу повышения достоверности прогноза динамических явлений и контроля напряженного состояния в угольных шахтах с использованием сейсмоакустических методов / О. В. Тайлаков, С. В. Соколов. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – 2017. – № 6 (136). – С. 72–74.

98 Таразанов, И. И. Итоги работы угольной промышленности России за 2007 год / И. И. Таразанов. – Текст : непосредственный // Уголь – 2008 – № 3. – С. 39–46.

99 Темкин, И. О. Повышение безопасности ведения горных работ в метанообильных шахтах Вьетнама с использованием моделей прогнозной аналитики / И. О. Темкин, До Чи Тхань, А. Агабубаев. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 8. – С. 142–151.

100 Темникова, Е. Ю. Литологическая интерпретация данных в ГИС в интервалах Баженовской свиты с использованием искусственных нейронных сетей / Е. Ю. Темникова, С. И. Грубась, А. А. Федосеев. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф.

«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» (Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.) : сб. материалов в 8 т. – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – Т. 2, № 3. – С. 3–9. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-2-3-3-9.

101 Технология МСП – малоканальное сейсмическое профилирование на базе мовср / И. П. Башилов, Л. С. Загорский, Д. Л. Загорский, Ю. В. Рязанцев, В. И. Сачков, В. Л. Шкуратник, Г. Я. Шутов, С. Ю. Червинчук. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 9. – С. 128–139.

102 Филиппова, А. А. Автоматизированная система экологического мониторинга угольной шахты на базе ГИС технологии / А. А. Филиппова, В. М. Шек. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 12. – С. 141–143.

103 Ханова, Ю. А. Повышение точности поиска аномалий в данных на основе ансамбля моделей / Ю. А. Ханова, Н. В. Шевская. – Текст : электронный // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 6 (78). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-tochnosti-poiska-anomaliy-v-dannyh-na-osnove-ansamblya-modeley>.

104 Чен, П.П-Ш. Модель «сущность – связь» – шаг к единому представлению о данных / П.П-Ш. Чен ; пер. М. Р. Когаловской. – URL: <http://citforum.ru/database/classics/chen/>. – Текст : электронный.

105 Чинь, К. Ч. 77-30569/239757 Технология вычислительного эксперимента в исследованиях развития угольной промышленности / К. Ч. Чинь. – Текст : непосредственный // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2011. – № 10. – С. 26.

106 Шек, В. М. Использование объектно-ориентированной методологии при создании пространственно-временных моделей горнопромышленных систем / В. М. Шек. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2005. – № 9. – С. 191–194.

107 Эффективные технологии сейсморазведки для новых геологических открытий в Восточной Сибири / А. В. Гайдук, Д. Н. Твердохлебов, Е. А. Данько, Е. И. Долгова, А. Б. Клешнин, В. А. Гринченко, Е. И. Гогужева, А. С. Чиргун. – Текст : непосредственный // Геодинамика и тектонофизика. – 2021. – № 12(3S). – С. 683–702. – DOI 10.5800/GT-2021-12-3s-0547.

108 Яковлев, А. М. Практическое применение геоинформационных технологий для моделирования качественных показателей комплексных руд / А. М. Яковлев, Р. С. Титов, В. Д. Кантемиров. – Текст : непосредственный // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений : сборник докладов, Екатеринбург, 04–05 апреля 2019 года. – Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2019. – С. 229–234.

109 Яковлева, Э. В. Статистический анализ разномасштабных выборок параметров естественного электромагнитного излучения при поиске геодинамически активных разломов / Э. В. Яковлева, М. В. Белова. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 7. – С. 18–39. – DOI 10.25018/0236_1493_2022_7_0_18.

110 Abu-Abed, F. N. Development of Three-Dimensional Models of Mining Industry Objects / F. N. Abu-Abed. – Текст : непосредственный // E3s web of conferences : The Second Interregional Conference, Kemerovo, 21–23 сентября 2021 года. – Vol. 278. – P. 01002. – DOI 10.1051/e3sconf/202127801002.

111 Adler, A. Deep Recurrent Architectures for Seismic Tomography / A. Adler, M. Araya-Polo, T. Poggio. – Текст : электронный // 81st EAGE Conference & Exhibition. – 2019. – URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1908/1908.07824.pdf>.

112 Butorin, A. V. Approaches to the analysis of spectral decomposition for the purpose of detailed geological interpretation / A. V. Butorin, F. V. Krasnov. – Текст : непосредственный // Proceedings of SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia, 24–26 October – 2016. – Vol. 1. – P. 275–289.

113 Deep Isolation Forest for Anomaly Detection / Hongzuo Xu, Guansong Pang, Yijie Wang, Yongjun Wang. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2206.06602v2.pdf>. – Текст : электронный

114 dGB Earth Sciences – Software – OpendTect. – URL: <https://dgbes.com/software/opendtect>. – Текст : электронный.

115 Fisher, W. Anomaly Detection in Earth Dam and Levee Passive Seismic Data Using Support Vector Machines and Automatic Feature Selection / W. Fisher, T. Camp, V. Krzhizhanovskaya. – Текст : электронный // Journal of Computational Science. – 2016. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2016.11.016>.

116 Geophysics by SeisWare seismic interpretation software – URL: <https://seisware.com/products/geophysics/>. – Текст : электронный.

117 Kingdom Downloads – URL: <https://kingdom.ihs.com>. – Текст : электронный.

118 Machine learning in microseismic monitoring. – Текст : электронный // Earth-Science Reviews / D. Anikiev, C. Birnie, U. bin Waheed, T. Alkhalifah, C. Gu, D. J. Verschuur, L. Eisner. – 2023. – Vol. 239. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2023.104371>. – Текст : электронный.

119 Malhotra, R. A systematic review of machine learning techniques for software fault prediction / R. A. Malhotra. – Текст : непосредственный// Applied Soft Computing. – 2015. – Vol. 27. – P. 504–518.

120 Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications / A. G. Howard et al. – Текст : электронный // arXiv preprint arXiv:1704.04861. – 2017 – URL: <https://arxiv.org/pdf/1704.04861.pdf>.

121 Mohammad, Braei. Anomaly detection in univariate time-series: a survey on the state-of-the-art / Mohammad Braei, Dr.-Ing. Sebastian Wagner. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2004.00433.pdf>. – Текст : электронный.

122 Petrel geophysics – URL: <https://www.software.slb.com/products/petrel/petrel-geophysics>. – Текст : электронный.

123 Sequence Attribute Analysis. – URL: https://esd.halliburton.com/support/LSM/GGT/ProMAXSuite/ProMAX/5000/5000_8/Help/promax/ssaa.pdf. – Текст : электронный.

124 Stepanov, Yu. A. Application of OLAP technologies in mining processes / Yu. A. Stepanov, E. V. Dorn, I. Yu. Stepanov. – Текст : непосредственный // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration: Proceedings of the International Conference: Participants' reports in English, Beijing, 30 декабря 2021 года. – Beijing : Scientific publishing house Infinity, 2021. – P. 214–218.

125 Two-Step Method for Prediction of Fractured Tight Sandstone Reservoir in Northeast Sichuan Basin / K. A. Qian, D. Guo, X. Xiang, Y. Qiao. – Текст : электронный // 82nd EAGE Annual Conference Exhibition. – 2021. – URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202112900>.