

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кемеровский государственный университет».

Научный руководитель – кандидат технических наук Бурмин Леонид Николаевич.

Официальные оппоненты:

Лапин Сергей Эдуардович, доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», доцент кафедры автоматизируемых технологий;

Спиридонов Виктор Альбертович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт», заведующий сектором «Компьютерных технологий 3D моделирования геолого-геофизических объектов».

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург).

Защита диссертации состоится 15 октября 2024 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/stepanov-ivan-yurevich/>

Автореферат разослан 19 августа 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Дубровский Алексей Викторович

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 17.06.2024. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 74.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 Алексеева В. В., Ивакина Я. А., Шека В. М., Потресо́ва 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 де-

фектов 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 конфе-

ренции 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, установлены цель и задачи исследований; сформулированы научные положения, выносимые на защиту; описывается структура диссертации.

В первом разделе содержатся обзор и анализ информационных систем для поддержки принятия управленческих решений при ведении горных работ.

Возможность создания метода моделирования антропогенных изменений возникла на стыке нескольких наук и научных направлений: геологии, статистики, геоинформатики и др. Большой вклад в развитие теоретических и при-

кладных аспектов проектирования и разработки геоинформационных систем внесли Алексеев В. В., Ивакин Я. А., Шек В. М., Потресов Д. К. Степанов Ю. А. Карпик А. П., Лисицкий Д. В. и др., основ геоинформатики – Берлянт А. М., Бескид П. П., Биденко С. И., Тикунов В. С. и др., методов прогнозирования влияния горно-геологических условий на процесс угледобычи – Анциферов А. В., Батугин А. С., Захаров В. Н., Зыков В. С., Клишин В. И., Коликов К. С., Курленя М. В., Опарин В. Н., Лапин С. Э. и др.

Приведен обзор существующих программных решений, разработанных сторонними компаниями и активно используемых для обработки и анализа сейсмических данных в текущем времени на угольных шахтах. Описаны общие сравнительные характеристики, сформулированы достоинства и недостатки. Описаны возможные механизмы интеграции между системами, которые касаются как программных интерфейсов, так и перегрузок импортом и экспортом данных посредством файлового ввода / вывода. Приведено описание специализированных ГИС, уделено внимание существующим способам координирования пространства и привязки атрибутивных данных к пространственным для формирования соответствующего массива данных. Рассмотрены вопросы эргономики и эффективности использования существующих решений и потенциальных путей их улучшения для задачи поиска дизъюнктивных нарушений угольных пластов.

В работе описаны различные типы математических моделей, использующие характеристики сейсмических волн для выявления и локализации дизъюнктивных нарушений в угольном массиве. Произведен анализ параметров моделей, особенностей оптимизации и валидации моделей, а также их применимости к реальным сейсмическим данным. Описан многоэтапный процесс моделирования углепородного массива.

Приводится обзор существующих методов визуального анализа сейсмических данных, в рамках которого изучены различные подходы и инструменты, которые используются для визуализации и интерпретации сейсмических данных,

с дальнейшим анализом их преимуществ и ограничений, исследуются возможности их применения в контексте задачи обнаружения дизъюнктивных нарушений горных пород. Выявлены существующие проблемы и недостатки визуального анализа. Отмечается, что визуальный анализ сейсмотрасс может быть затруднен из-за скрытия дизъюнктивных нарушений за другими геологическими процессами и явлениями. Это затрудняет корректное определение разломов и может приводить к ошибочной интерпретации данных, в связи с чем для улучшения точности и надежности анализа сейсмических данных рационально использовать специальные программные средства и алгоритмы.

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.

Во втором разделе работы исследуются различные алгоритмы машинного обучения, которые могут быть применены для обнаружения дизъюнктивных нарушений данных углепородного массива с учетом геопространственных данных. Исследуются принципы работы алгоритмов, анализируются их возможности и ограничения. Проводится сравнительный анализ алгоритмов Isolation Forest, One-Class Support Vector Machines, Local Outlier Factor, алгоритмов семейства Autoencoder и их эффективности.

Вариационные автоэнкодеры (англ. variational autoencoders, VAE) используют 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 (рисунок 1).

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.

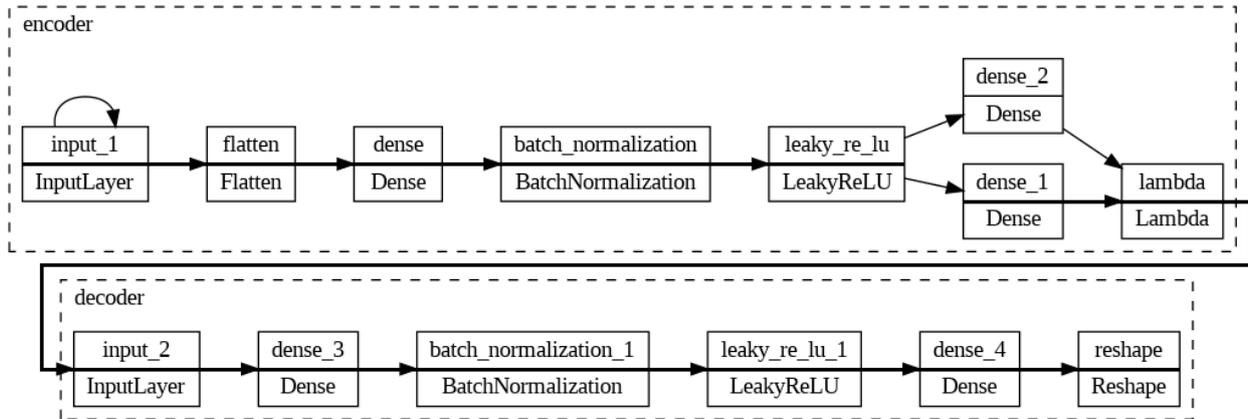


Рисунок 1 – Архитектура вариационного автоэнкодера

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 поиске правильных значений для скрытых переменных с учетом конкретного набора данных, который известен как апостериорное $p(z|x)$. Возможно 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 .

Семейство распределений может быть выражено как приближенное распределение $q_\lambda(z|x)$, которое стремится аппроксимировать неизвестное апостериорное распределение. При этом 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. Для оценки качества аппроксимации используется дивергенция Кульбака – Лейблера, которая измеряет разницу между приближенным и истинным апостериорными распределениями. Эта дивергенция представлена как

$$KL(q_\lambda(z|x) | p(z|x)) = E_q[\log q_\lambda(z|x)] - E_q[\log p(z|x)] + \log p(x). \quad (1)$$

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

$$ELBO(\lambda) = E_q[\log q_\lambda(z|x)] - E_q[\log p(z|x)]. \quad (2)$$

Комбинируя два предыдущих уравнения, получим

$$-\log p(x) = ELBO(\lambda) + KL(q_\lambda(z|x) | p(z|x)). \quad (3)$$

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:

$$ELBO_i(\lambda) = E_{q_\theta(z|x_i)}[\log p_\phi(x_i|z)] - KL(q_\theta(z|x_i) | p(z)). \quad (4)$$

В результате оценки эффективность нейросетевых методов, а также экспериментов их верификации, отмечается необходимость наличия достаточного количества данных о нарушениях, которые могут быть использованы для обучения классификационной модели.

На рисунке 2 представлены две сейсмограммы для визуального сравнения. Первая сейсмограмма является исходной сейсмограммой, которая подается на

вход вариационному автоэнкодеру. Такая сейсмограмма содержит информацию о геологической структуре без наличия дизъюнктивного нарушения. Вторая сейсмограмма представляет собой результат работы вариационного автоэнкодера.

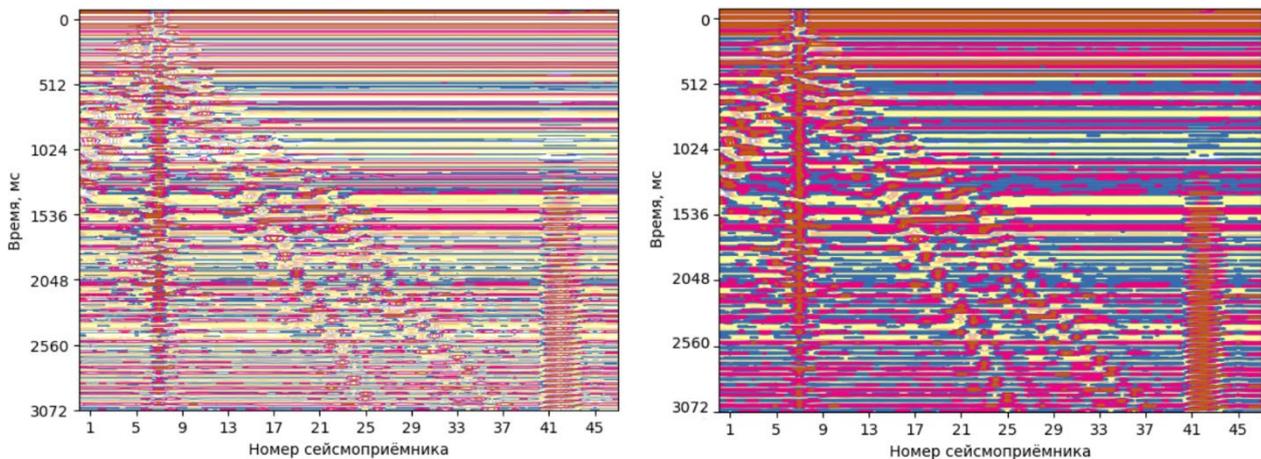


Рисунок 2 – Оригинальная сейсмограмма с участка без дизъюнктивного нарушения и результат работы VAE-модели

После прохождения через энкодер и декодер модели сейсмограмма восстанавливается, и она похожа на исходную сейсмограмму. Это свидетельствует о том, что вариационный автоэнкодер успешно выполнил задачу восстановления и сохранения информации о геологической структуре без дизъюнктивного нарушения. Для большей наглядности предлагается использование в качестве визуализации итогового результата трехмерного компьютерного изображения, совмещенного с тематическими картами на базе ГИС. Такой подход позволяет не только локализовать области тектонических аномалий, но и в перспективе, спроектировать систему поддержки принятия решений для специалистов горнодобывающего производства, что позволит сократить время на принятие решение и обеспечить дополнительную безопасность ведения горных работ.

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.

Третий раздел посвящен разработке и описанию общей архитектуры геоинформационной системы, которая предназначена для обработки и анализа геопространственных данных углепородных массивов. Рассмотрены различные аспекты технологий, процессов и хранилищ данных, а также методы визуализации результатов и создания картографических материалов. Подчеркивается важность правильной организации системы, эффективного хранения данных и надежной визуализации результатов. Описаны возможности дальнейшего совершенствования информационной системы и ее роли в обеспечении более эффективного анализа геопространственных данных за счет открытых программных интерфейсов. Предлагаемая концептуальная модель предлагаемой ГИС представляет собой набор программных модулей (рисунок 3).

1 Модуль сбора данных – отвечает за сбор сейсмических данных угольных пластов.

2 Модуль хранения пространственных и атрибутивных данных – обеспечивает их эффективное хранение и организацию.

3 Модуль обработки данных – выполняет алгоритмы обработки и фильтрации данных.

4 Модуль интеллектуальной обработки данных – применяет методы машинного обучения и искусственного интеллекта для анализа и классификации нарушений.

5 Модуль управления метаданными отвечает за организацию и управление метаданными сейсмических сигналов.

6 Модуль визуализации – предоставляет инструменты для создания тематических карт с полученными разломами угольных пластов, а также построения 2D- или 3D-моделей исследуемых объектов.

Предложенная модульная структура геоинформационной системы (ГИС) значительно улучшает эффективность и точность анализа угольных месторождений на предмет обнаружения дизъюнктивных нарушений.

Преимущество модульного подхода заключается в его гибкости и способности к расширению, что позволяет адаптировать систему к различным исследовательским требованиям путем добавления или изменения её компонентов. Благодаря этому, геологи и исследователи имеют в своем распоряжении мощный инструментарий для детального анализа и интерпретации геопространственных данных, что способствует более глубокому пониманию структурных особенностей угольных пластов.

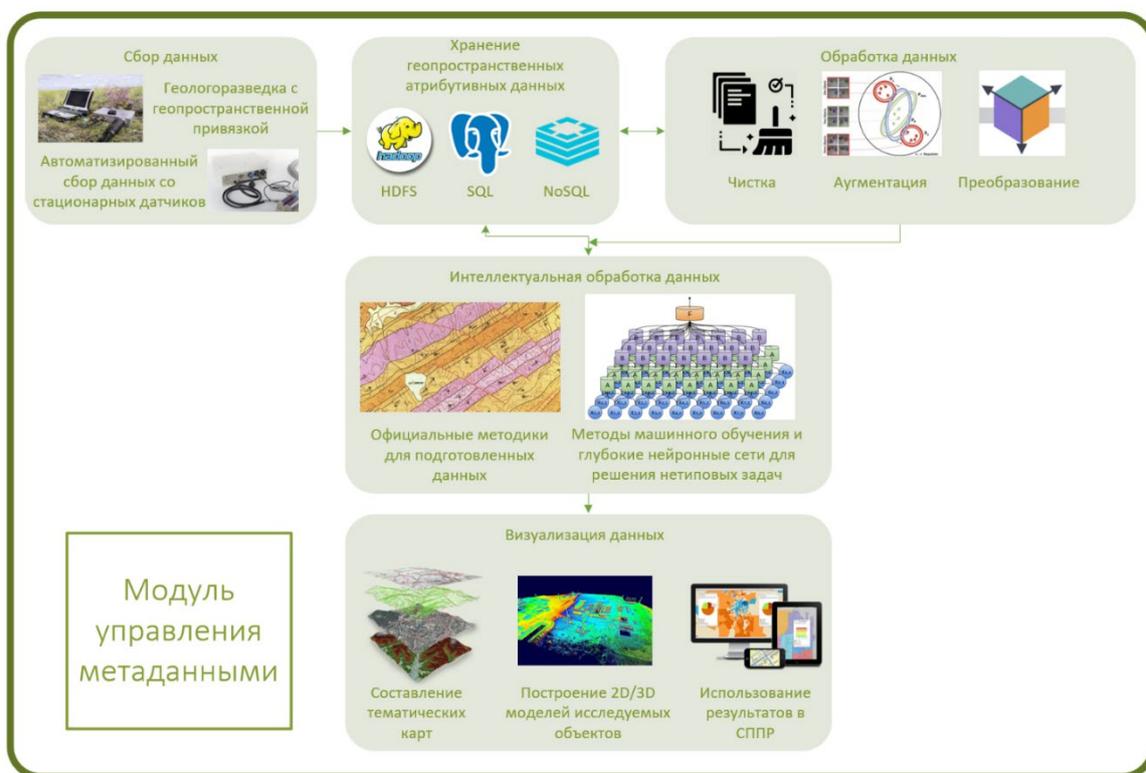


Рисунок 3 – Концептуальная модель специализированной ГИС

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, которая может 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 гео-данным. Для повышения эргономики это устойчивое отношение целесообразно стратифицировать – разбить на тематические слои, состоящие из конкретного набора объектов, закрепленных за своей тематикой. На уровне архитектуры информационной модели для этого применяется подход витрин данных. Идея витрин данных заключается в систематизации и структурировании данных по отдельным компонентам, в зависимости от решаемой в моменте задачи, с учетом особенностей хранения массивов данных и уровней и режимов доступа каждого пользователя. Предлагается программное обеспечение для доступа к витринам – набор инструментов и библиотек, которые облегчают доступ к данным из хранилища данных, включая запросы и анализ гео-данных, сопоставляемый с библиотеками графических пользовательских интерфейсов (рисунок 4).

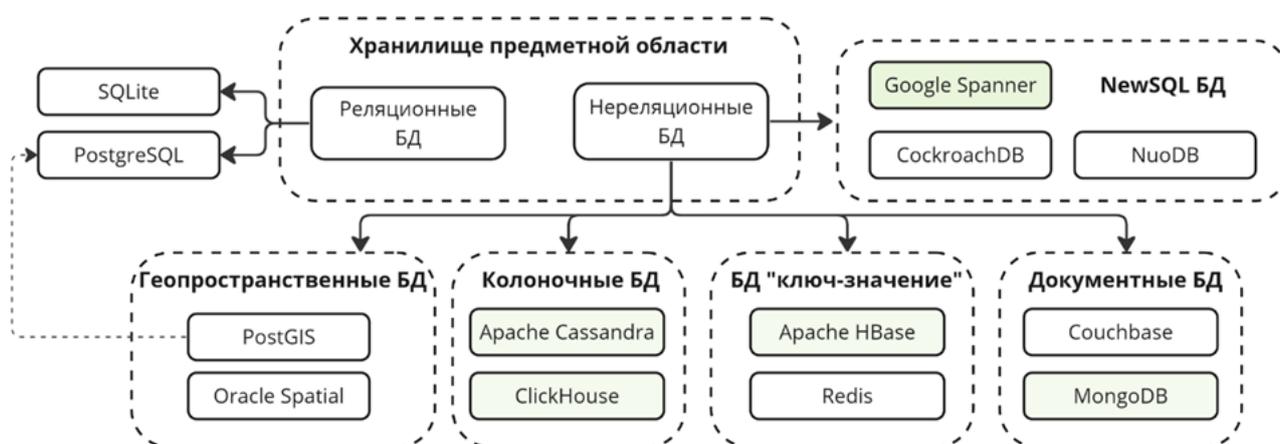


Рисунок 4 – Информационная модель хранилища данных с предлагаемыми решениями для хранения сущностей

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 от обработки данных до формирования отчета занимает 74 часа рабочего времени. После внедрения 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.

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

В четвертом разделе формулируются идеи и технологические решения применимости разработанной методики построения тематических карт дизъюнктивных нарушений угольных пластов. Рассмотрены преимущества подхода, описаны шаги и процессы, необходимые для создания картографических геоизображений, а также методы прогнозирования параметров и интерпретации и анализа геопространственных данных.

Визуализация геометрии вынимаемого пласта осуществляется с использованием метода триангуляции Делоне. Данный метод разбивает пласт на набор неперекрывающихся треугольников таким образом, что каждая точка контура является вершиной одного или нескольких треугольников.

При необходимости применяются корректировки и исправления данных для повышения их надежности и точности, а также стабилизации семантической и синтаксической части геоданных. 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 5 показана схема углепородного массива профиля, 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.

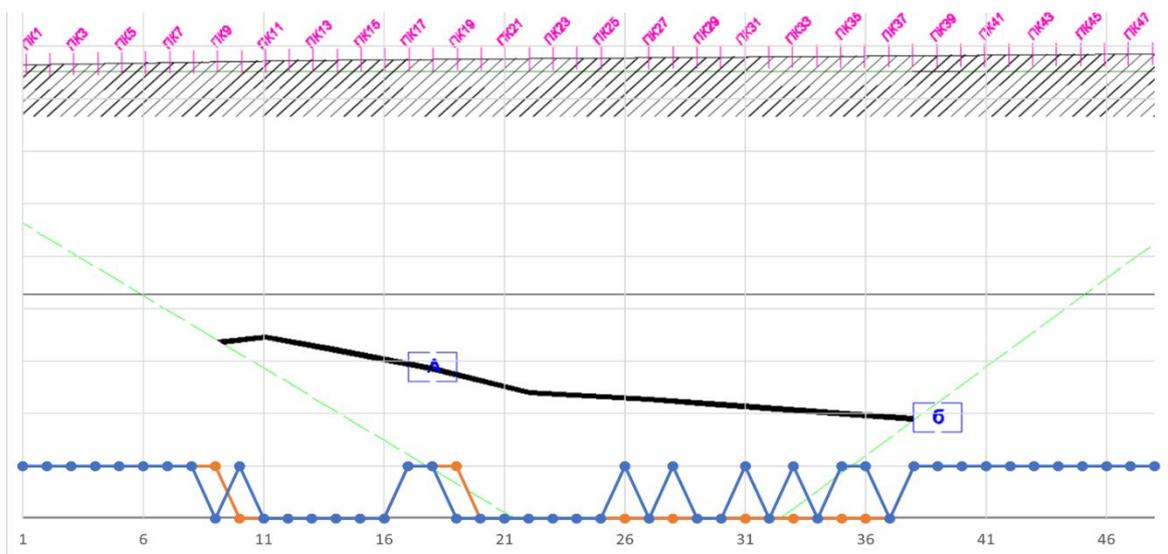


Рисунок 5 – Сравнение нарушений профиля

Синий график отражает значения нарушений, которые были получены после обработки атрибутов пласта алгоритмом машинного обучения, оранжевый график – реальное наличие нарушений. Процент совпадений графиков составляет 81,25 %.

Таким образом, 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 %). Похожая ситуация наблюдается при сравнении

результатов алгоритма машинного обучения с другими трассами. Средняя точность идентификации дизъюнктивного нарушения составляет от 77 % до 85 %.

Таким образом, обосновано следующее 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 углепородного 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 ГИС 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 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.

2 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.

3 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2023663501 Российская Федерация. Программный модуль обработки ис-

ходных 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.

4 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.

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

6 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.

7 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.

8 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-практи-

ческой 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.

9 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.

10 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.

11 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.

12 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.