

На правах рукописи



Соколов Сергей Владиславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИЗЪЮНКТИВНЫХ
НАРУШЕНИЙ В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ НА ОСНОВЕ
НЕЙРОСЕТЕВОГО АНАЛИЗА СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ДАННЫХ**

Специальность 25.00.16 – «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология,
геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Кемерово 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук», Институт угля СО РАН (ИУ ФИЦ УУХ СО РАН)

Научный
руководитель

Тайлаков Олег Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ресурсов и технологий извлечения угольного метана Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук», Институт угля СО РАН (ИУ ФИЦ УУХ СО РАН)

Официальные
оппоненты

Степанов Юрий Александрович

доктор технических наук, профессор кафедры ЮНЕСКО по информационным вычислительным технологиям федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет» (КемГУ)

Хмелинин Алексей Павлович

кандидат технических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН)

Ведущая
организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ)

Защита состоится 16 июня 2022 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.102.02 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28; тел./факс: (3842) 58-33-80, e-mail: rector@kuzstu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте организации по адресу:

<https://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2022/sok/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



М.А. Тюленев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Ресурсы угля в Кузбассе распределены по площади около 27 тыс. км², в пределах которой степень дизъюнктивной нарушенности шахтных полей варьируется от 0 до 30 км/км², что зачастую предполагает добычу полезного ископаемого в условиях II–III группы сложности. При ведении геологической разведки на угольных месторождениях значительные области межскважинного пространства, в которых могут находиться сместители мелкоамплитудных разрывных нарушений от 3 до 10 м, остаются недостаточно изученными ввиду принимаемой плотности разведочной сети в несколько сотен метров.

Наличие дизъюнктивных нарушений ведет к изменению геомеханического состояния массива горных пород, которое может выражаться: перераспределением горного давления в пределах выемочного столба, снижением устойчивости кровли, присутствием включений в угольном пласте, аккумуляцией метана, повышением водопритока. Перечисленные факторы, как по отдельности, так и в комплексе, существенным образом влияют на производительность горношахтного оборудования и способны привести к длительным остановкам очистного забоя, характеризующимся значительными финансовыми потерями.

Снижение времени на обнаружение разрывных нарушений позволяет формировать рациональные технологические решения, обеспечивающие устойчивое функционирование очистных и проходческих комплексов и повышение безопасности угледобычи. Для эксплуатационной разведки разрабатываемых участков месторождений угля расширяющееся применение находят сейсмические методы исследования, обеспечивающие повышение детальности геологических данных, вследствие оценки физико-механических параметров горных пород между разведочными линиями.

Шахтное поле, как объект сейсмических измерений, характеризуется влиянием технологических особенностей процесса выемки угля, ограничивающих возможности сейсморазведки. Наличие сторонних природных и техногенных объектов на дневной поверхности сокращает вариативность размещения и транспортировки элементов применяемых полевых схем возбуждения и регистрации сигнала. Непосредственно процесс добычи угля вызывает интенсивные помехи. Эти факторы снижают качество регистрируемой информации и, как следствие, достоверность результатов структурной интерпретации сейсморазведочных данных.

Таким образом, актуальным является разработка метода сейсмической разведки, позволяющего оперативно определять наличие и параметры дизъюнктивных нарушений в углепородном массиве. При этом необходимо обеспечить возможность достоверной интерпретации данных, регистрируемых в сложных горно-геологических, горнотехнических и ландшафтных условиях функционирования угледобывающих предприятий, на основе применения комплекса специализированных технологических и методических решений.

Работа выполнена в соответствии с Проектом «132. Комплексное освоение и сохранение недр Земли, инновационные процессы разработки месторождений полезных ископаемых и глубокой переработки минерального сырья» Программы ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 годы РФ и проектом Российского

научного фонда № 17-17-01143 «Прогнозирование и управление геомеханическим состоянием горного массива в период формирования и проявления динамических осадок основной кровли и его профилактической гидрообработки с целью недопущения динамических и газодинамических явлений».

Цель работы: разработка метода прогнозирования дизъюнктивных нарушений в углепородном массиве на основе нейросетевого анализа сейсморазведочных данных, обеспечивающего повышение достоверности оценки геомеханического состояния горных пород в сложных природных и технологических условиях действующих угледобывающих предприятий.

Объект исследований: углепородный массив, включающий дизъюнктивное нарушение, осложненный текущими горно-геологическими, горнотехническими и ландшафтными условиями.

Предмет исследования: геомеханическое состояние углепородного массива на основе сейсмического профилирования и интерпретации геофизической информации.

Идея работы заключается в использовании нейросетевого анализа динамических характеристик сейсмического сигнала с применением быстрого преобразования Фурье для выявления разрывных нарушений в углепородном массиве.

Задачи исследования:

- развить подход к регистрации отраженных волн, характеризующих структурные дефекты массива горных пород, в пределах ограниченных участков поверхности горного отвода угольной шахты, путем выделения динамических параметров сейсмических данных с низкой кратностью;
- определить архитектуру нейронной сети и разработать ее структуру и параметры для описания разрывного нарушения углепородного массива;
- обосновать метод идентификации дизъюнктивных нарушений на основе совместного применения быстрого преобразования Фурье и нейросетевого анализа сейсмических данных в условиях воздействия интенсивных помех от работы горношахтного оборудования угледобывающего предприятия.

Методы исследований: аналитический обзор и обобщение научно-информационных источников, математическое моделирование на основе каскадной нейронной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки; математический анализ сейсморазведочных данных с использованием быстрого преобразования Фурье; полевые сейсмические исследования участков угольного месторождения, включающие регистрацию сейсмического сигнала и анализ изменения его динамических параметров; опытно-промышленная проверка разработанного метода.

Научные положения, защищаемые в диссертации:

- применение оригинального подхода к регистрации отраженных волн, основанного на компенсации недостатка кратности сигнала (< 24) его накоплением в условиях ограниченных участков поверхности горного отвода угольной шахты обеспечивает обнаружение дефектов структуры массива горных пород на основе регистрации изменений видимой частоты, максимального значения амплитуды и отношения сигнал/шум в диапазоне от 24 до 89 %;

- использование каскадной нейронной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки позволяет определить положение разрывного нарушения в угольном пласте и оценить его амплитуду в точке подсечения с погрешностью относительно результатов структурной интерпретации не более 8 %;

- применение разработанного метода прогноза дизъюнктивных нарушений угольного пласта обеспечивает сокращение на 69 % ресурса времени на обработку сейсмических данных на основе применения процедур нейросетевого анализа и быстрого преобразования Фурье.

Научная новизна работы заключается в:

- выявлении дефектов структуры углепородного массива в пределах ограниченных участков поверхности горного отвода угольной шахты с использованием динамических параметров сейсмического сигнала с низкой номинальной кратностью;

- применении каскадной нейронной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки в интерпретации данных сейсморазведки ОГТ для прогноза дизъюнктивных нарушений угольного пласта;

- обосновании применения метода прогноза разрывных геологических нарушений для оперативного определения их параметров при эксплуатационной разведке действующих выемочных участков.

Обоснованность и достоверность научных результатов подтверждается:

- корректным применением геофизических методов исследования и основ геомеханики при оценке параметров дизъюнктивных нарушений;

- представительным объемом полевых измерений, проведенных в различных геолого-экономических районах Кузнецкого, Раздольненского и Буреинского угольных бассейнов (более 3000 физических наблюдений);

- положительными результатами опытно-промышленной апробации подхода к выполнению малоглубинной сейсморазведки шахтных полей с использованием нейросетевого анализа геофизических данных при сложных условиях на дневной поверхности.

Личный вклад автора заключается:

- анализе и обобщении результатов известных теоретических и экспериментальных исследований в области сейсмической разведки полезных ископаемых, постановке и выполнении задач данного исследования, в обосновании, разработке и формулировке положений диссертационной работы;

- развитию подхода к выполнению сейсмической разведки в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях действующих угледобывающих предприятий на основе регистрации динамических параметров сейсмических данных с низкой номинальной кратностью;

- разработке и реализации способа интерпретации сейсморазведочных данных на основе применения нейросетевого анализа для выявления дизъюнктивных нарушений в углепородном массиве;

- разработке метода прогнозирования дизъюнктивных нарушений в углепородном массиве на основе нейросетевого анализа данных и быстрого преобразования Фурье;

– проведении полевых сейсмических исследований шахтных полей и обработке экспериментальных данных.

Научное значение работы состоит в развитии методов оценки геомеханического состояния горных пород, установлении зависимостей между изменением спектральной плотности динамических характеристик сейсмического сигнала и наличием дефектов структуры углепородного массива, обосновании структуры и параметров нейросетевой модели для регистрации дизъюнктивных нарушений.

Отличие от ранее выполненных работ состоит в использовании при интерпретации исходной сейсмической информации быстрого преобразования Фурье для оценки наличия дизъюнктивного нарушения исследуемых угольных пластов и нейросетевого анализа для определения его положения и амплитуды.

Практическая ценность работы заключается:

– в обеспечении возможности получения массива сейсмической информации для оценки параметров дизъюнктивных нарушений в сложных природных и технологических условиях поверхности шахтного поля на различных стадиях их разработки;

– в снижении затрат ресурсов и времени на обработку полевых данных для определения параметров разрывных нарушений угольного пласта.

Реализация работы. Данные, полученные по результатам выполненных исследований, на основе разработанного автором метода регистрации дизъюнктивных нарушений в углепородном массиве на основе нейросетевого анализа сейсморазведочной информации использованы в процессе разработки и корректировки планов горных работ на предприятиях: АО «СУЭК-Кузбасс» Шахтоуправление Комсомolec ПЕ «Шахта Комсомolec», АО «СУЭК-Кузбасс» ПЕ «Шахтоуправление им. А.Д. Рубана», ООО Шахта «Усковская», АО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь» филиал «Моховский угольный разрез».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы рассматривались и обсуждались на следующих конференциях: 2 молодежных чинакаловских чтениях в Кузбассе (Кемерово, 2011 г.), международном семинаре «Эффективные методы извлечения и переработки угольного метана» (Кемерово, 2011 г.), обучающем семинаре для сотрудников Ростехнадзора «Эксплуатация производств и объектов угольной промышленности» (г. Кемерово, 3 ноября 2011 г.), внутриинститутских семинарах ФИЦ УУХ СО РАН (г. Кемерово, 2010–2012 гг.), международных научно-практических конференциях «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимых в рамках международной специализированной выставки технологий горных разработок «УГОЛЬ РОССИИ И МАЙНИНГ» (г. Новокузнецк, 2012 г., 2018 г.), международной научно-практической конференции «ПОДЗЕМНАЯ УГЛЕДОБЫЧА XXI ВЕК» (г. Ленинск-Кузнецкий, 2018 г.), IV научно-практической конференции ПМХ (г. Кемерово, 2019 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, из них — 5 в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, изложена на 193 страницах машинописного текста, содержит

58 рисунков, 9 таблиц, список литературных источников из 176 наименований и 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнена оценка состояния и направлений развития современной сейсмической разведки полезных ископаемых.

Упомянуто, что современная сейсморазведка на основе метода отраженных волн является широко распространенным инструментом геофизических исследований массива горных пород с системно разработанной и регулярно дополняемой, в том числе отечественными учеными, научной базой, что позволяет рассматривать сейсморазведку как достоверный и достаточно оперативный способ локального прогноза состава, свойств и геомеханического состояния горных пород. Отмечено, что задача прогнозирования влияния горно-геологических условий на процесс угледобычи имеет принципиальное значение для угольной промышленности. Ее решением занимаются ведущие отечественные и зарубежные специалисты. Значительный вклад внесли такие ученые, как: А.В. Анциферов, А.С. Батугин, В.Н. Захаров, В.С. Зыков, О.И. Казанин, В.И. Клишин, К.С. Коликов, М.В. Курленя, А.Е. Майоров, О.Н. Малинникова, В.Н. Опарин, С.М. Простов, А.А. Ренев, А.Д. Рубан, А.С. Сальников, С.В. Сердюков, В.Н. Фрянов, М.П. Хайдина, В.А. Хмяляйнен, Н.В. Черданцев, С.В. Черданцев, А.В. Шадрин, Д.В. Яковлев, L.M. Gochioco, S.A. Cotten.

Выделены основные факторы, осложняющие применение сейсморазведки с поверхности в условиях действующих угледобывающих предприятий. Сделан вывод, что устранение эксплуатационных ограничений обусловлено рациональным подбором оборудования, схем измерений и решений из совокупности существующих методов и технических средств выполнения сейсморазведочных работ. Повышение оперативности сейсморазведки угольных пластов, в свою очередь, возможно на основе унификации исследовательских процессов полевого этапа и автоматизации процесса камеральной обработки.

Оценены особенности основных направлений современной сейсмической разведки с поверхности: нефтегазовой и инженерной сейсморазведки. Сделан вывод о том, что для проведения полевых сейсмических измерений на угольных месторождениях по своим особенностям более актуальными являются подходы, применяемые в инженерной сейсморазведке по методу общей глубинной точки (ОГТ). Определено, что с учетом значительного разброса глубин залегания исследуемых пластов угля и ограниченных параметров инженерной сейсморазведочной аппаратуры для формирования системы возбуждения/регистрации сейсмических волн допустимо использовать оборудование, применяемое в нефтегазовой сейсморазведке.

Проведен анализ современных тенденций совершенствования методов сейсморазведки с поверхности для определения путей повышения эффективности сейсмического картирования угольных пластов. Установлено, что при определении геологических характеристик изучаемых сред используются в основном методы сейсмической разведки, предполагающие стандартные методики регистрации данных и оценку кинематических параметров сигнала. Оценка динамических характеристик

выполняется, как правило, в качестве вспомогательного инструмента. При этом для решения отдельных задач успешно применяются средства цифрового анализа данных, в том числе нейронные сети. Тем не менее, представленные подходы, применяемые для разведки угольных месторождений, не подтверждают эффективность их применения в условиях изменяющегося комплекса естественных и технологических условий поверхности шахтного поля, ограничивающих возможности использования стандартных методик регистрации и камеральной обработки сейсмических данных.

По результатам оценки состояния и направления развития современной сейсмической разведки полезных ископаемых сформулированы цель работы и задачи исследований.

Вторая глава описывает совершенствование подхода к регистрации сигнала в сейсмических исследованиях шахтного поля с осложненными условиями его дневной поверхности.

Отмечено, что на дневной поверхности, осложненной текущими горно-геологическими, горнотехническими и ландшафтными условиями, протяженность выбранного участка сейсмических измерений составит:

$$X = X_H + X_{OG}, \quad (1)$$

где X_H — протяженность области поверхности с нормальными эксплуатационными условиями, м; X_{OG} — протяженность области поверхности, содержащей объекты, которые осложняют выполнение измерений, м.

Следовательно, поверхность, отведенная под возбуждение колебаний, будет ограничена областью X_H . Для регистрации колебаний может быть доступна поверхность в пределах всего участка исследований. При оценке параметров размещения линейно распределенной системы сейсмических наблюдений на поверхности горного отвода, ограниченной совокупностью факторов естественного либо техногенного характера, возможны три основных комплекса условий.

Первый комплекс — регистрация целевого сигнала, когда протяженность участка поверхности с нормальными эксплуатационными условиями обеспечивает требуемую кратность без каких-либо дополнительных действий и, соответственно, возможность структурной интерпретации. В этом случае для обеспечения требуемой кратности участок поверхности с нормальными эксплуатационными условиями должен соответствовать следующему условию:

$$X_H \geq X_{Per} + N\Delta X_{ПВ}, \quad (2)$$

где X_{Per} — размер целевой области регистрации по горизонтали, м; N — кратность профилирования; $\Delta X_{ПВ}$ — шаг возбуждения колебаний, м.

Выделение искомого горизонта обеспечивается в случае:

$$\Delta X_{ПК_1} \geq X_{ПВ_1} + X_{Per} + r, \quad (3)$$

где $X_{ПВ_1}$ — координата первого пикета возбуждения колебаний, м; $X_{ПК_1}$ — координата первого пикета приема колебаний, м; r — расчетное значение выноса для устранения помех, м.

Второй комплекс эксплуатационных условий характеризует возможность регистрации данных в пределах выбранного участка горного отвода, при этом для фиксирования целевой информации непосредственно регистрацию частично или полностью необходимо проводить на участке поверхности, содержащей объект, осложняющий проведение измерений (рис. 1).

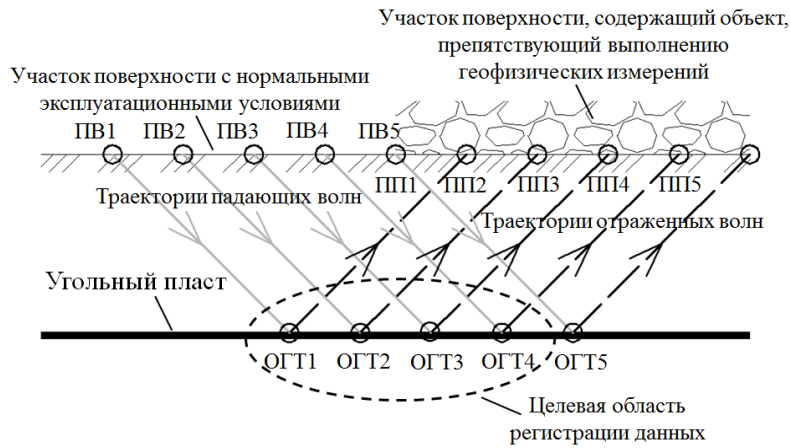


Рисунок 1 — Сочетание факторов, обеспечивающих возможность регистрации данных в пределах выбранного участка горного отвода

В этом случае протяженность участка поверхности с нормальными эксплуатационными условиями должна асимптотически приближаться к значению:

$$X_H = X_{\text{рег}} + N\Delta X_{\text{ПВ}}. \quad (4)$$

Тогда регистрация целевых данных должна быть выполнена с учетом условий:

$$X_{\text{ПК}_1} = X_{\text{ПВ}_1} + r. \quad (5)$$

Соответственно значение длины базы приема должно асимптотически приближаться к:

$$L = X_{\text{рег}} + N\Delta X_{\text{ПВ}}, \quad (6)$$

при $L_{\text{мин}} \geq X_{\text{рег}}$.

Кратность наблюдения при этом может быть существенно ниже заданной. Тогда недостаток кратности возможно компенсировать изменениями других технологических параметров линейной системы сейсмических наблюдений. Сохранение целевого значения обеспечивается из условия:

$$\mathcal{E} = n_{\text{п.г.}} c^2 g^2 \frac{N}{b} n_{\text{р.из.}}, \quad (7)$$

где \mathcal{E} — коэффициент накопления; $n_{\text{п.г.}}$ — число сейсмоприемников в группе; g — количество накоплений; $n_{\text{р.из.}}$ — количество работающих излучателей, b — параметр, определяющий, во сколько раз снижена кратность наблюдений, c — параметр, определяющий, во сколько раз возросло количество накоплений. Причем, $c = b$, $b = 1, 2, 3 \dots$

Третий комплекс эксплуатационных условий — невозможность прямой регистрации данных в пределах выбранного участка горного отвода. Такая ситуация вызвана сочетанием значительной глубины залегания угольного пласта по сравнению с протяженностью участка поверхности с нормальными эксплуатационными условиями. В этом случае измерения на выбранном участке с применением сейсмической разведки по методу ОГТ невозможны, либо с учетом совокупности имеющихся эксплуатационных условий можно обеспечить получение совокупности данных с более низкими качественными характеристиками из целевой области.

Таким образом, при выполнении сейсморазведочных измерений с дневной поверхности угольных шахт, осложненной текущими горно-геологическими, горнотехническими и ландшафтными условиями, необходимо следовать следующим принципам при регистрации упругих колебаний:

– расстановку регистраторов, положение источников и шаг приема и возбуждения колебаний определять из расчета максимально возможного в данных условиях количества физических наблюдений, характеризующих горизонт залегания угольных пластов;

– использовать, в зависимости от особенностей изучаемого объекта, различные источники возбуждения упругих волн;

– руководствоваться составом и характеристиками регулярных и нерегулярных помех, особенностями полевого сезона, погодными условиями;

– недостаточную кратность регистрируемых данных по ОГТ компенсировать многократным накоплением сигнала.

В рамках обеспечения требуемых технологических параметров полевых систем регистрации данных при исследовании угольных месторождений выполнен анализ рынка доступной к приобретению геофизической аппаратуры для выполнения сейсмической разведки. Определено, что наиболее рациональным решением является использование в качестве основного комплекта оборудования сейсморазведочной станции «Лакколит Х-М3» / «Лакколит Х-М4» (ООО «Логические Системы», Россия) и электромагнитного источника колебаний Геотон-12 (холдинг «ГЕОСЕЙС», Россия) (рис. 2).



Рисунок 2 — Комплект сейсморазведочного оборудования исследования угольных месторождений: сейсморазведочная станции «Лакколит Х-М3» (а), электромагнитный источник колебаний Геотон-12 (б)

При этом допустимо при изменении эксплуатационных условий на дневной поверхности угледобывающего предприятия использование сейсмоисточника типа «сейсморужье» и ручного молота, ориентированного на возбуждение поперечных колебаний.

Известно, что область влияния дизъюнктивного нарушения в углепородном массиве, выраженная зоной повышенной трещиноватости, определяется выражением:

$$Q_{\text{тр}} = 6R_{\text{И}}, \quad (8)$$

где $R_{\text{И}}$ – истинная амплитуда смещения блоков.

При этом:

$$R_{\text{И}} = 2R_{\text{Н}}, \quad (9)$$

где $R_{\text{Н}}$ – нормальная амплитуда смещения блоков.

Указано, что влияние зоны дробления дизъюнктивного нарушения на характер регистрируемых сейсмоакустических данных выражается изменениями динамических параметров сигнала. Проведена оценка изменения различных динамических характеристик сигнала в пределах 4 отдельных геофизических профилей. Выполненный анализ сейсмических характеристик (максимальная абсолютная амплитуда, видимая частота сигнала, отношение сигнал/шум) свидетельствует об их изменениях в области влияния дизъюнктивных нарушений. Максимум амплитуды в пределах дизъюнктивного нарушения изменяется в широком диапазоне 40–89 % относительно среднего уровня, при этом влияние дизъюнктива в пределах линейного профиля определяется его минимальными значениями. Наличие дизъюнктива выражается также снижением значений отношения сигнал/шум в области влияния нарушения на 45–67 %. Видимая частота отраженной волны, формирующей ось синфазности, характеризующую отражение от угольного пласта в зоне дизъюнктивного нарушения, показывает снижение в пределах 24–45 % (рис. 3). Таким образом, видимая частота, значения максимальной абсолютной амплитуды, отношение сигнал/шум — совокупность сейсмических параметров, достаточная для описания дизъюнктивного нарушения в углепородном массиве.

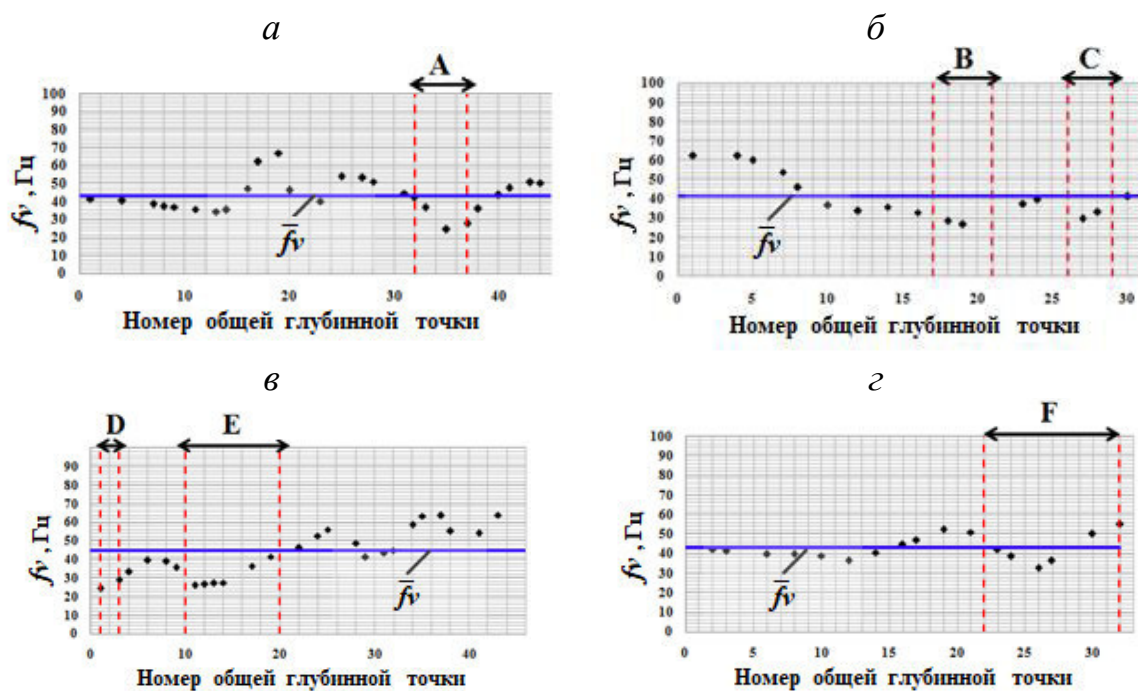


Рисунок 3 — Характер изменений видимой частоты в пределах геофизических профилей 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (з), содержащих разрывные нарушения

Полученные результаты позволили сформулировать первое научное положение.

Третья глава посвящена разработке метода интерпретации данных сейсморазведки шахтных полей на основе нейросетевого анализа.

Отмечено, что необходимость оперирования большими массивами данных при динамическом анализе сейсморазведочной информации ведет к увеличению объемов камеральных работ и, как следствие, снижению производительности. Это обуславливает поиск подходов, обеспечивающих наиболее рациональные варианты

анализа информации с минимальными временными затратами, наиболее полно отвечающими условиям поставленной задачи.

На основе изучения опыта применения нейронных сетей в различных областях, предполагающих исследование значительных упорядоченных и неупорядоченных массивов данных, принято решение об использовании для определения положения дизъюнктивного нарушения угольного пласта нейросетевого анализа сейсморазведочных данных.

Задача определения дизъюнктивного нарушения как процесса оценки геомеханических характеристик массива относится к категории разработки функциональных моделей. Поэтому выбран метод обучения «с учителем», включающий представление исходных данных (входных сигналов) и требуемых результатов интерпретации (выходных сигналов), подготовленных обработчиком.

Для обучения сети была использована сейсмическая информация, полученная в ходе ранее выполненных исследований, по результатам которой отобраны данные с качеством, достаточным для структурной интерпретации. При обучении использованы два возможных значения выхода нейронной сети — Φ : «1» — наличие нарушения, «0» — отсутствие дизъюнктивного нарушения.

В ходе экспериментальных работ по применению математической модели обнаружения дизъюнктивного нарушения на основе каскадной нейронной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки установлено, что значительными временными затратами выделяются этапы анализа характеристик, нормирования, объединения данных в выборку для подачи на вход нейронной сети. Для этого был рассмотрен специализированный подход, используемый специалистами Института угля ФИЦ УУХ СО РАН в рамках разработки модели, описывающей образцы каменного угля, вмещающего систему трещин. Ее основной особенностью является изменение формы сигналов, для которых определяется спектральный состав в зависимости от характера трещиноватости. Адаптируемая модель использует алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). В связи с этим рассмотрена возможность верификации признаков наличия дизъюнктивных нарушений на суммарных сейсмических разрезах по различным профилям с последующим сокращением анализируемой выборки данных на основе рассмотренного подхода.

Суммарный временной сейсмический разрез, характеризующий исследуемую область углепородного массива, можно представить как двумерную плоскость, в которой распространение угольного пласта и возможного дизъюнктивного нарушения определяется координатами (x, y) . В этом случае распределенные в пределах массива значения динамических характеристик сигнала обрабатываются по правилу:

$$\forall u(x, y) \in U: s(x) = \sum_y u(x, y), s(y) = \sum_x u(x, y). \quad (10)$$

При этом:

$$u(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } (x, y) \text{ – координаты точки, принадлежащей нарушению;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Функции $s(x)$ и $s(y)$ могут быть интерпретированы как сигналы, форма которых зависит от структуры исследуемого массива, а плотности спектров

определяют их спектральный состав. С учетом различного порядка регистрируемых значений видимой частоты, максимального значения амплитуды и отношения сигнал/шум для верификации наличия дизъюнктивных нарушений в углеродном массив принято их произведение. При решении задачи относительно горизонта залегания исследуемого пласта и регистрации динамических характеристик в симметричном относительно него временном окне для оценки наличия нарушения допустимо использование плотности спектра:

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(x)e^{-ifx} dx. \quad (11)$$

С учетом вышеперечисленного, наличие разрывного нарушения в массиве должно выражаться характерными изменениями спектральной плотности $S_x(f)$. По результатам анализа сейсмической информации по отрезкам двух исследовательских профилей с дизъюнктивным нарушением и без него определено, что присутствие на сейсмограмме изменений, связанных с наличием дизъюнктивного нарушения после быстрого преобразования Фурье, выражается визуально различимым локальным максимумом спектральной плотности в интервале 10–70 Гц (рис. 4а). Если разрывное нарушение отсутствует, то локальный максимум не фиксируется либо выражен незначительно (рис. 4б).

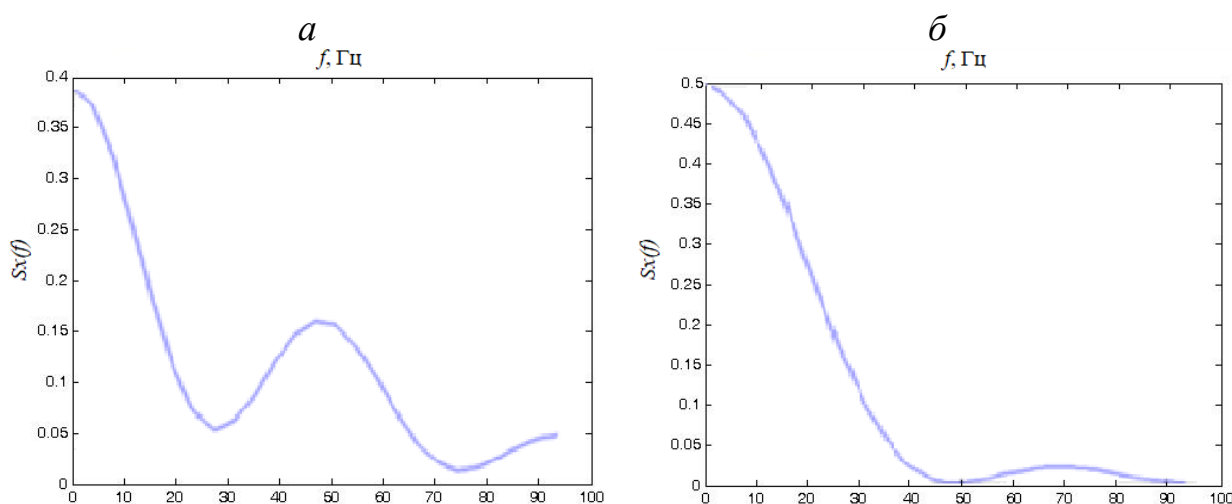


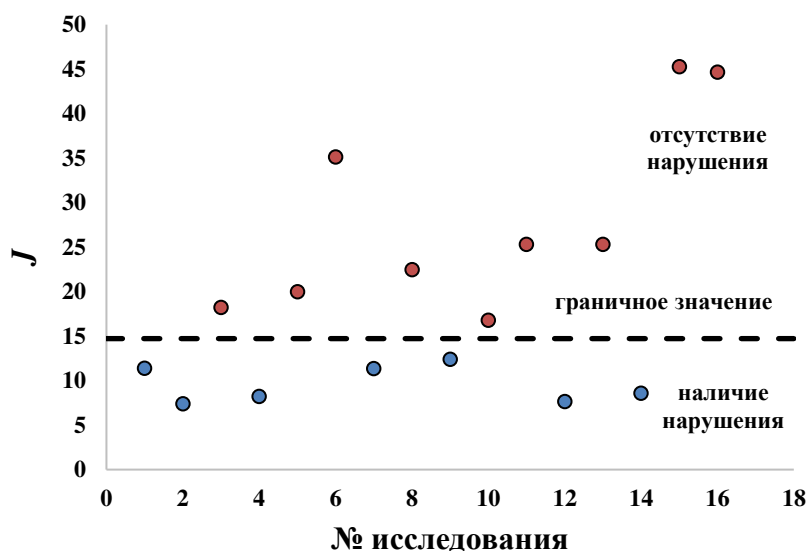
Рисунок 4 — Графический результат применения алгоритма на основе быстрого преобразования Фурье при наличии (а) и отсутствии (б) дизъюнктивного нарушения

Исходя из того, что данная зависимость визуально определяется исключительно уровнем значений спектральной плотности, в качестве критерия для определения наличия или отсутствия дизъюнктивного нарушения в массиве сейсмических данных, составляющих область суммарного временного сейсмического разреза, описывающую горизонт залегания угольного пласта, принято отношение максимального значения спектральной плотности на графике к значению локального максимума спектральной плотности, проявляющегося в интервале 10–70 Гц. Данному отношению было присвоено обозначение J . Для анализа изменения параметра J были оценены результаты исследований по определению гипсометрии угольных пластов методом сейсмической разведки ОГТ с поверхности горных отводов различных угледобывающих предприятий (табл. 1).

Таблица 1 — Идентификация дизъюнктивного нарушения на основе изменения параметра J

№ исследования	Значение параметра J	Наличие нарушения
1	11,40	+
2	7,43	+
3	18,25	-
4	8,25	+
5	20,00	-
6	35,14	-
7	11,36	+
8	22,50	-
9	12,43	+
10	16,79	-
11	25,32	-
12	7,65	+
13	25,32	-
14	8,60	+
15	45,28	-
16	44,67	-

С целью численной оценки граничного уровня параметра J , определяющего наличие либо отсутствие дизъюнктивного нарушения, из общего массива использованной информации принята выборка наиболее близких его значений, полученных на основе использования данных сейсмических измерений с противоположными результатами, составившая 25 %. Для сформированной выборки определено среднее значение параметра J — 14,72. Соответственно, если параметр $J < 14,72$, то нарушение в массиве присутствует, если $J > 14,72$ — отсутствует (рис. 5).

Рисунок 5 — Изменение параметра J при наличии и отсутствии разрывного нарушения

В рамках разработки нейросетевой модели, характеризующей углепородный массив, вмещающий дизъюнктивное нарушение, выполнено эмпирическое тестирование работы следующих нейронных сетей: персептрон, обучаемая сеть с линейным слоем, нейронная сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки, каскадная сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки. Для реализации процедуры нейросетевого анализа сейсмических данных применен инструмент NNtools из набора ToolBox среды MatLab. По результатам тестирования разработана модель, характеризующая углепородный массив, вмещающий дизъюнктивное нарушение на основе двухслойной каскадной нейронной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки с функцией активации — логистическая сигмоида, обученной с использованием алгоритма Левенберга – Марквардта.

Функционирование каскадной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки исследовано на основе подачи на ее вход массива данных, зарегистрированных в пределах горного отвода действующей угольной шахты, расположенной на территории Липовецкого месторождения каменного угля. Результаты расчетов, выполненных с применением каскадной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки, показывают наличие на каждом графике локальных максимумов, приближающихся по значениям к уровню, отвечающему значению выхода нейронной сети «1» — наличие структурного нарушения. Сопоставление расчетных данных с результатами визуального анализа сейсмической информации свидетельствует, что максимумы значений для событий, зарегистрированных по профилям 1-4 в результате работы нейронной сети, попадают в ранее определенные интервалы влияния дизъюнктивных нарушений А-Г.

С целью опробования разработанной модели для определения горно-геологических условий залегания угольных пластов был сформирован массив исходных данных, не вошедших в обучающую выборку. На интерпретированном методами структурной интерпретации суммарном временном разрезе по общей глубинной точке, зарегистрированном в рамках исследовательских работ, выделены структурные нарушения: α (225 м по исследовательской линии), β (360 м). Расчетная амплитуда, определенная по результатам стандартной интерпретации, составила для α — 4 м, для β — 9 м.

После применения каскадной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки получен график распределения расчетных значений в пределах интервала значений выхода нейронной сети: «1» — наличие дизъюнктивного нарушения и «0» — отсутствие дизъюнктивного нарушения (рис. 6). Для рассматриваемого профиля зафиксированы два события с максимальным уровнем значений близким к «1». Максимальное значение выхода нейронной сети для события, характеризующего структурное нарушение α , определен в пределах точки с координатой 210 м по профилю и составил 0,82. Для события, характеризующего структурное нарушение β — 355 м и 0,97, соответственно. С учетом протяженности областей возрастания выхода нейронной сети в пределах объектов α и β , на основе зависимостей (8, 9), рассчитана амплитуда смещения блоков, зарегистрированных дизъюнктивов: $R_{N\alpha} = 3,75$ м, $R_{N\beta} = 8,33$ м.

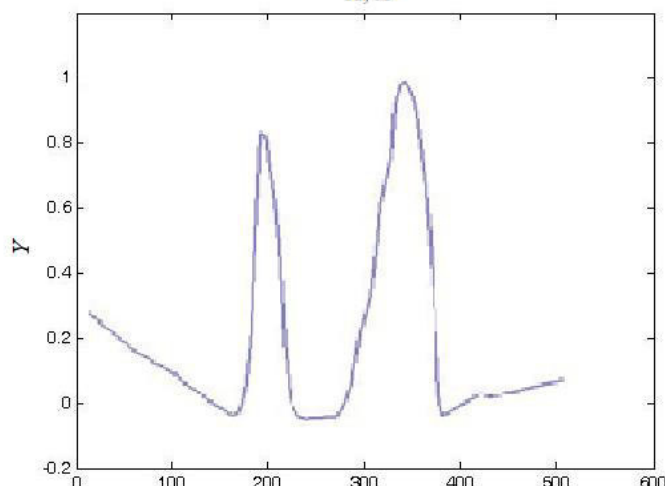


Рисунок 6 — Результат расчета нейронной сети по геофизическому профилю, представленный в рабочем окне программного комплекса MatLab

Выполнен сопоставительный анализ данных, полученных в результате выполненного расчета и на основе применения структурной интерпретации. Показано, что расхождение координат зарегистрированного нарушения α , определенных с использованием нейросетевого анализа и структурной интерпретации, составляет 15 м, для β — 5 м. При этом расхождение значений амплитуд, зарегистрированных с использованием этих подходов, для α не превышает 0,25 м (7 %), для β — 0,67 м (8 %).

На основе представленных в работе решений разработан метод прогноза дизъюнктивных нарушений. Разработанный метод заключается в применении сейсмической разведки ОГТ с поверхности, в пределах которой условия не обеспечивают требуемую кратность наблюдений, для определения положения и амплитуды дизъюнктивов на основе нейросетевого анализа данных и быстрого преобразования Фурье качественных характеристик регистрируемого сигнала.

На основании полученных результатов сформулировано второе научное положение.

В четвертой главе описано применение метода регистрации дизъюнктивных нарушений в углепородном массиве на основе нейросетевого анализа в сложных природных и технологических условиях действующего угледобывающего предприятия.

Разработанный метод был опробован в ходе геофизических исследований углепородного массива в пределах выемочного столба действующей угольной шахты, расположенной на территории Егозово-Красноярского каменноугольного месторождения. Основной задачей выполненного исследования являлась оценка наличия горно-геологических нарушений разрабатываемого угольного пласта в районе планируемого выемочного столба. В геофизическом исследовании использован ранее принятый комплект полевого сейсмического оборудования.

Протяженность поверхности с нормальными эксплуатационными условиями между этими объектами составила 640 м. По итогам анализа предоставленной исходной геологической информации предполагаемые отметки залегания угольного пласта определены в интервале 200–240 м. С учетом средней скорости ожидаемого

полезного и угла распространения отраженного сигнала требуемый для устранения помех вынос составил 113,69 м.

Приоритетной задачей сейсмических измерений являлась оценка условий на юго-западе участка поверхности с необходимостью картирования породных слоев, залегающих над исследуемым угольным пластом. Минимальная требуемая протяженность разведанного участка — 470 м. Таким образом, регистрирующая система была размещена так, чтобы ее 48 пикет располагался на заключительном 640 метре поверхности с нормальными эксплуатационными условиями: интервал размещения сейсмоприемников регистрирующей системы — 170–640 м.

Планируемое минимальное значение кратности — 24 при 3 сейсмических воздействиях. С учетом расчетного выноса по большинству общих глубинных точек кратность не достигнет требуемого показателя. Для получения сигнала требуемого качества на каждом пикете возбуждения колебаний, с учетом отношения (7), необходимо выполнить не менее 15 воздействий:

В соответствии с техническими характеристиками использованного в исследовании регистрирующего оборудования длина приемной линии сейсмического профиля составила 470 м от пикета ПК1 (170 м) до ПК48 (640 м). По профилю в северо-западном направлении определен вынос на удаление 170 м (0–170 м). Регистрация массива исходных полевых данных выполнена со следующими параметрами регистрирующей системы: шаг между пунктами приема — 10 м; шаг между пикетами возбуждения колебаний — 10 м; количество накоплений — 15. Общие параметры измерения, настраиваемые для измерительной аппаратуры, определены со следующими значениями: шаг дискретизации — 0,5 мс; срез встроенного фильтра — 1 000 Гц; реальный интервал приема — 1 536 мс.

В области, исследованной посредством геофизического профиля, в пределах соответствующего расчетным данным временного горизонта выполнена регистрация динамических параметров сейсмического сигнала: видимая частота сигнала — f_v ; максимальное значение амплитуды — A_m ; отношение сигнал/шум — s/n .

С целью верификации наличия структурного нарушения в исследованной методом сейсморазведки ОГТ области для совокупности нормированных динамических параметров сейсмического сигнала, определяемых изменением координаты по оси, заданной вдоль окна расчета симметричного линии залегания угольного пласта, выполнено быстрое преобразование Фурье. Из графика, полученного на основе применения БПФ, очевидно наличие характерного пика в интервале частот 10–30 Гц со значением спектральной плотности 1,178. С учетом максимальной спектральной плотности — 5,77 отношение максимального значения спектральной плотности на графике к значению локального максимума спектральной плотности в исследуемом интервале частот, соответствующем протяженности профиля, составляет $4,90 < 14,72$, что свидетельствует о наличии в области угольного пласта в исследуемом массиве как минимум одного дизъюнктивного нарушения.

По результатам применения нейронной сети получен график распределения ее выходов по отношению к глубинным точкам по профилю измерений (рис. 7). В пределах исследованного геофизического профиля зафиксировано событие с уровнем значений близким к «1» в интервале общих глубинных точек 29–44 или 280–430 м (или ПК12–ПК27 по геофизическому профилю) с центром, соответственно, в глубинной точке 20 (или 360 м).

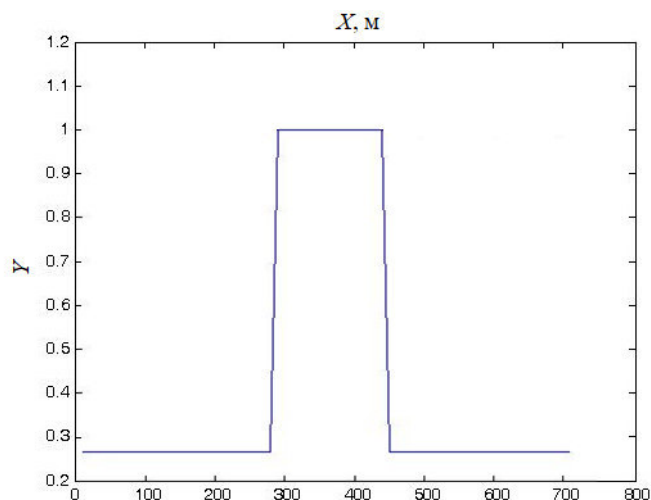


Рисунок 7 — Результат расчета нейронной сети для исследованного геофизического профиля

Данная область интерпретирована как дизъюнктивное нарушение γ . Исходя из общей протяженности области возрастания значений выхода нейронной сети — 150 м — расчетная нормальная амплитуда смещения блоков, с учетом зависимостей (8, 9), составила 12,5 м. После определения области наличия структурного нарушения с использованием нейронной сети для подтверждения полученных результатов дополнительно выполнена структурная интерпретация зарегистрированной сейсмической информации (рис. 8).

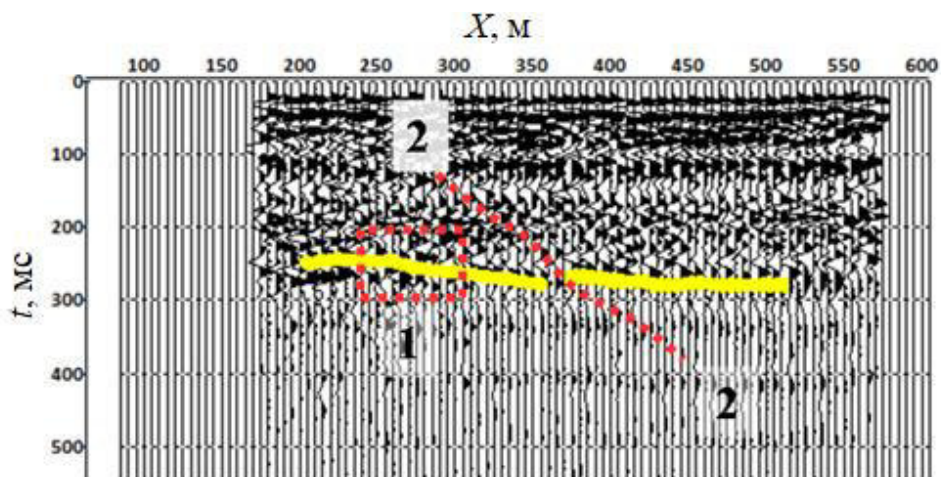


Рисунок 8 — Временной сейсмический разрез по линии профиля с нанесением участков структурной неоднородности углепородного массива: 1 — область повышенной трещиноватости; 2 — дизъюнктивное нарушение γ

Для зарегистрированного нарушения было рассчитано вертикальное сейсмическое смещение, характеризующее его амплитуду по вертикали, составившее приблизительно 11–13 м. Для определения параметров дизъюнктива на основе структурной интерпретации данных потребовался 71 час (около 9 рабочих дней), а с использованием нейросетевого анализа было затрачено 22 часа (около 3 рабочих дней), или 31 % от исходного времени. Для сравнения полученные расчетные данные были сведены в таблицу (табл. 2).

Таблица 2 — Сопоставление результатов структурной интерпретации и нейросетевого анализа данных

Параметр	Результаты структурной интерпретации	Результаты нейросетевого анализа сейсмического сигнала
Положение структурного нарушения по профилю, м	340–380	355
Амплитуда нарушения, м	11–13	12,5
Время, затраченное на камеральные работы, ч	71	22

После окончания сейсморазведочных работ вблизи участка исследования, на удалении порядка 90 м в восточном направлении от геофизического профиля, по угольному пласту пройдена сбойка. По результатам ее проведения установлено наличие структурного нарушения. В целом, информацией, полученной в ходе проходческих работ, были подтверждены результаты геофизических измерений: зарегистрированное нарушение характеризуется разрывом сплошности угольного пласта, протяженной зоной дробления, разность отметок лежащего и висячего крыла достигает 10 м. Таким образом, определенные параметры вскрытого нарушения соответствуют расчетным с учетом геологического прогноза, ограниченности сбойки, а также разницы в координатах расположения геофизического профиля и пройденной выработки. По итогам выполненного исследования был составлен акт внедрения результатов диссертационной работы и методические рекомендации по осуществлению прогноза дизъюнктивных нарушений в углепородном массиве на основе нейросетевого анализа сейсморазведочных данных.

Полученные результаты позволили сформулировать третье научное положение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи разработки метода прогнозирования дизъюнктивных нарушений в углепородном массиве на основе нейросетевого анализа сейсморазведочных данных, обеспечивающего повышение достоверности оценки геомеханического состояния горных пород в сложных природных и технологических условиях действующих угледобывающих предприятий, что имеет существенное значение для изучения горно-геологических и горнотехнических условий освоения месторождений твердых, жидких и газообразных полезных ископаемых.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Усовершенствован подход к регистрации отраженных упругих волн, обеспечивающий получение в сложных горно-геологических, горнотехнических и ландшафтных условиях действующих угледобывающих предприятий динамических параметров сейсмического сигнала, характеризующих структурные дефекты породного массива.

2. Аналитически установлено, что наличие дефектов структуры углепородного массива описывается изменением динамических характеристик сейсмического сигнала: видимой частоты в интервале 24–45 %, максимального значения амплитуды (40–89 %), отношения сигнал/шум (45–67 %).

3. Установлено, что применение математической модели на основе предварительно обученной каскадной нейронной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки позволяет выделить разрывное нарушение в массиве горных пород, определить положение его сместителя в пределах угольного пласта, а также рассчитать амплитуду смещения его блоков в точке подсечения с погрешностью до 8 %.

4. Разработан метод идентификации дизъюнктивов в углепородном массиве на основе каскадной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки, обеспечивающий прогноз наличия разрывных нарушений в сложных горнотехнических условиях действующих угледобывающих предприятий.

5. Установлено, что метод идентификации дизъюнктивных дислокаций на основе быстрого преобразования Фурье и нейросетевого анализа сейсмических данных обеспечивает снижение до 69 % временных затрат на выполнение камеральных работ при регистрации геологических нарушений с дневной поверхности угледобывающих предприятий.

6. Показана эффективность применения разработанного подхода для выявления разрывных нарушений в углепородном массиве действующих угледобывающих предприятий Кузбасса, позволяющего осуществлять интерпретацию сейсмических данных с кратностью по общей глубинной точке от 3 до 23, характеризующих наличие и положение структурного нарушения.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

В изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

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

2. **Соколов, С.В.** Комплексные геофизические исследования состояния углепородного массива в условиях Кузбасса / **С.В. Соколов**, Е.А. Салтымаков, А.Н. Кормин // Вестник Кузбасского Государственного Технического Университета. – 2017. – № 2 (120). – С. 66–70.

3. 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** // Горная промышленность. – 2017. – № 6 (136). – С. 72–74.

4. Тайлаков, О.В. Определение аномальных тектонических зон, характеристик устойчивости и управляемости кровли методом сейсмического просвечивания на проходящих волнах / О.В. Тайлаков, **С.В. Соколов**,

А.В. Герасимов, А.А. Колмакова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S49. – С. 275–282.

5. Тайлаков, О.В. Обоснование критериев регистрации коллекторов угольного метана на основе нейросетевого анализа сейсморазведочных данных / О.В. Тайлаков, М.П. Макеев, **С.В. Соколов**, Е.А. Салтымаков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S49. – С. 300–312.

В изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science, Scopus:

6. Tailakov, O.V. Seismological survey of the coal fields based on the applying of the low-power sources of oscillation / O.V. Tailakov, **S.V. Sokolov**, M.P. Makeev, A.N. Kormin // 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018. – Article No. 01029.

7. Zastrelov, D.N. Determination of geological conditions of gassy coal seams on the basis of seismic acoustic profiling in underground mine workings / D.N. Zastrelov, A.N. Kormin, E.A. Saltymakov, **S.V. Sokolov**, O.V. Taylakov // International Scientific Conference «Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources». – 2018. – Vol. 206. – Article No. 012046.

8. Klishin, V.I. Assessment of elastic seismoacoustic vibration propagation through coal and rock mass within the extraction column during directional hydraulic fracturing (DHF) implementation / V.I. Klishin, O.V. Taylakov, G.Yu. Opruk, **S.V. Sokolov**, A.V. Nikolaev // International Scientific Conference «Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources». – 2018. – Vol. 206. – Article No. 012024.

9. Klishin, V.I. Seismic monitoring of hydrodynamic impact on coal seam at interval hydraulic fracturing / V.I. Klishin, O.V. Taylakov, G.Yu. Opruk, M.P. Makeev, **S.V. Sokolov**, A.S. Teleguz, A.L. Tatsienko // International Scientific Conference «Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources». – 2019. – Vol. 377. – Article No. 012034.

10. Klishin, V.I. Geophysical and geomechanical analysis of coal mass condition during directional hydraulic fracturing (DHF) / V.I. Klishin, O.V. Taylakov, G.Yu. Opruk, **S.V. Sokolov**, A.V. Galkin // International Scientific Conference «Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources». – 2019. – Vol. 377. – Article No. 012035.

В прочих изданиях:

11. Тайлаков, О.В. Применение малоуглубинной сейсморазведки для уточнения условий залегания угольных пластов и локализации изменений их газоносности / О.В. Тайлаков, В.И. Овчинников, **С.В. Соколов** // Геотехническая механика: Межвед. сб. научных трудов, ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2010. – № 17. – С. 22–26.

12. Тайлаков, О.В. Применение сейсмического профилирования для уточнения условий залегания угольных пластов / О.В. Тайлаков, М.П. Макеев, **С.В. Соколов**, Е.А. Уткаев // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – Новокузнецк. – 2012. – С. 266–267.

13. **Соколов, С.В.** Применение сейсмической разведки для уточнения горно-геологических условий разработки угольных месторождений / **С.В. Соколов** //

Горняцкая смена. Сб. трудов Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена – 2013». – 2013. – Т. 3. – С. 153–155.

14. **Соколов, С.В.** Опыт применения сейсмической разведки с поверхности для уточнения параметров залегания угольных пластов / **С.В. Соколов, О.В. Тайлаков** // Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации»: материалы Инновационного конвента. – 2014. – С. 47–48.

15. Клишин, В.И. Оценка распространения упругих сейсмоакустических колебаний в углепородном массиве в границах выемочного столба при проведении работ по направленному гидроразрыву / В.И. Клишин, О.В. Тайлаков, Г.Ю. Опрук, **С.В. Соколов, А.В. Николаев** // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – № 4. – С. 211–218.

16. Тайлаков, О.В. Определение свойств кровли в пределах выемочного столба на основе применения автономных сейсмических регистраторов в шахтных геофизических измерениях / О.В. Тайлаков, **С.В. Соколов, Е.А. Салтымаков** // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – № 4. – С. 437–441.

17. Тайлаков, О.В. Применение нейросетевого анализа для интерпретации данных сейсморазведки / О.В. Тайлаков, **С.В. Соколов, М.П. Макеев, А.А. Колмакова** // Сборник статей по итогам IV Научно-практической конференции ПМХ. – 2019. – С. 299–303.

18. Клишин, В.И. Экспериментальные исследования процесса разрушения угольного пласта при поинтервальном гидроразрыве / В.И. Клишин, О.В. Тайлаков, Г.Ю. Опрук, М.П. Макеев, **С.В. Соколов, Е.А. Уткаев, А.С. Телегуз** // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6. – № 2. – С. 113–117.

19. Тайлаков, О.В. Повышение эффективности гидродинамического воздействия на углепородный массив на основе контроля его параметров методом сейсмической томографии / О.В. Тайлаков, М.П. Макеев, **С.В. Соколов** // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – Новокузнецк. – 2020. – № 6. – С. 38–42.

Подписано в печать 08.04.2022 г. Формат 60×84 1/16

Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Уч. -изд. Л. 1,1

Тираж 100 экз. Заказ № В406

Издательский центр Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева
650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.