

На правах рукописи



Пашичев Борис Николаевич

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЯ
НА СКЛОННОСТЬ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ
К ВЫБРОСОПАСНОСТИ, САМОВОЗГОРАНИЮ И
К УДЕРЖАНИЮ МЕТАНА В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ ПЛАСТА**

Специальность 2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН)

Научный руководитель: **Малинникова Ольга Николаевна**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией № 2.1 «Многофазных процессов в массивах горных пород при разработке месторождений», ИПКОН РАН, г. Москва

Официальные оппоненты: **Коликов Константин Сергеевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Безопасности и экологии горного производства» Горного института «Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (НИТУ МИСИС), г. Москва

Василенко Татьяна Анатольевна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории «Геодинамической безопасности» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Акционерное общество «**Научный центр ВостНИИ** по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», г. Кемерово

Защита диссертации состоится «20» мая 2026 г. в 11⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.1.096.02 при ФГБУН Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН по адресу: Крюковский тупик, 4, Москва, 111020; тел.: +7 (495) 360-89-60.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН и на сайте www.ипконран.рф/?page_id=843.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять в адрес совета.

И.о. учёного секретаря
диссертационного совета,
доктор технических наук



И.М. Загоршменный

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Добыча угля является одной из главных отраслей в топливно-энергетическом комплексе России, её развитие имеет существенное значение для экономики страны и закреплено в принятой Правительством РФ «Программе развития угольной промышленности России на период до 2035 года».

В настоящее время с учётом увеличения объёмов извлечения, роста доли и нарастанием глубины подземной добычи угля, осуществляемых в сложных горно-геологических условиях, всё большее значение приобретают проблемы безопасности ведения горных работ. Большинство разрабатываемых в России угольных пластов характеризуются высокой газоносностью и являются опасными в отношении угроз возникновения газодинамических явлений (ГДЯ), таких как загазованность горных выработок, внезапные выбросы и др., а также склонность к самовозгоранию. Опасность происходящих на шахтах ГДЯ состоит в быстропротекающим лавинообразно развивающимся разрушении углепородного массива с выносом угля, породы, оборудования, пыли и выбросом большого объёма метана, что приводит к разрушению выработок шахты и, иногда к гибели шахтёров. В соответствии с правилами, в результате прогноза, категория опасности «склонный к внезапным выбросам угля и газа», присваивается пласту угля в целом. Однако исследования показывают, что выбросоопасность угольного пласта носит зональный характер, несмотря на одну геологическую среду формирования и текущие условия залегания в массиве. Это является основанием для изучения структуры и свойств угля, влияние которых необходимо учитывать, помимо горного и газового давления и температуры, при определении потенциальной выбросоопасности угольных пластов.

Единой концепции, описывающей взаимовлияние различий свойств угля не только между разными месторождениями, но даже на протяжении одного пласта, приводящих к формированию ГДЯ в пласте и самовозгоранию, до сих пор не выработано, и этот вопрос является предметом дискуссий в научной среде. Несмотря на постоянное совершенствование, современные прогнозные мероприятия, призванные выявлять склонность пласта к ГДЯ и самовозгоранию, не учитывают микроструктурные особенности угля. Поэтому изучение влияния особенностей микроструктуры угля на склонность пластов к опасным явлениям в шахтах и разработка методики количественной оценки неоднородности микроструктуры угля являются актуальной научно-технической задачей для обеспечения безопасности ведения горных работ, решение которой позволит повысить достоверность прогноза участков угольных пластов, склонных к опасным явлениям в шахтах.

Целью работы является оценка влияния структурных особенностей угля на микронном уровне на склонность угольных пластов к выбросоопасности и самовозгоранию и удержанию метана в призабойной зоне пласта.

Идея работы состоит в использовании количественных мер оценки неоднородности структуры угля на микронном уровне для установления влияния фактора структурной организации угля на склонность угольных пластов к удержанию метана, внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих **основных задач исследования:**

- анализ методов описания неоднородности структуры природных систем и определение их применимости к исследованиям особенностей микроструктуры каменных углей;

- исследование распределения парамагнитных центров в углях с различной газоносностью призабойной зоны угольных пластов;

- установление связи неоднородности микроструктуры угля с его склонностью к удержанию метана в угле и опасным явлениям в шахтах;

- разработка или адаптация метода количественной оценки структурной неоднородности природных объектов, пригодного для анализа угля;

- определение количественных критериев, позволяющих провести разделение углей по склонности к опасным явлениям в шахтах, по структурному фактору;

- разработка методики определения неоднородности строения микроструктуры угля, основанная на обработке цифровых изображений поверхности углей и расчёта распределений значений пространственных информационной энтропии и статистической сложности (диаграммы «энтропия-сложность»), для дифференцирования углей по склонности к опасным явлениям в шахтах.

Научная новизна исследования:

1. Показано, что метан в угле удерживается на парамагнитных центрах (оборванных связях), расположенных в алифатической составляющей угля.

2. Установлено, что угли с большей неоднородностью микроструктуры склонны к выбросоопасности, самовозгоранию в шахтах, а также к удержанию большего количества метана в призабойной зоне угольного пласта.

3. Разработан и обоснован новый критерий отнесения участков (зон) угольных пластов к склонным к выбросам угля и газа и самовозгоранию по фактору микроструктуры.

4. Разработана методика количественной оценки неоднородности микроструктуры углей, включающая расчёт информационной энтропии и статистической сложности, определённых с помощью шпиралет-преобразований цифровых изображений естественной поверхности угля.

Объект исследований – склонность угольных пластов к удержанию метана в призабойной зоне пласта, газодинамическим явлениям (выбросоопасности) и самовозгоранию в угольных шахтах.

Предмет исследований – микроструктура каменных углей Кузнецкого, Печорского и Донецкого угольных бассейнов.

Методология и методы исследований и фактические данные

В работе применён комплексный подход к методам исследований. Изучение структуры углей на микроуровне проводилось по цифровым изображениям поверхности углей, полученным методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Jeol JSM-6610 LV с разрешением 10 нм в режиме SEI. С помощью программы «Shearlexity» по снимкам рассчитывались пространственные информационные энтропия и сложность. Определение сорбционной поверхности проб углей осуществлялось на AUTOSORB-1 фирмы Quantachrome Instruments. Использовался термогравиметрический анализатор Leco TGA-701 для определения термодинамических характеристик угля. Исследования структурной организации угольного вещества на молекулярном уровне и её связи со склонностью к ГДЯ в шахтах, методом электронного-парамагнитного резонанса, были проведены на спектрометре BRUKER EMX 6/1.

Положения, выносимые на защиту:

I. Метан в угле удерживается преимущественно парамагнитными центрами алифатической части угольного вещества, представленными свободными радикалами, то есть угли с большей газоносностью призабойной зоны пласта ($Q_{cp} > 5 \text{ м}^3/\text{т}$) имеют больше разорванных связей в алифатической составляющей и, соответственно, более неоднородную (неупорядоченную) микроструктуру.

II. Способность угля к удержанию метана определяется неоднородностью его микроструктуры, что отражается на диаграммах «энтропия-сложность», рассчитанных по цифровым изображениям поверхности витринитовой составляющей угля, полученным сканирующим электронным микроскопом.

III. Угли, несклонные к опасным явлениям в шахтах, и угли, характеризующиеся низкой газоносностью призабойной зоны ($Q_{cp} < 5 \text{ м}^3/\text{т}$), обладают более упорядоченной микроструктурой, с диапазоном разброса значений энтропии 0,2 отн. ед. Микроструктура углей, склонных к опасным явлениям, и углей с высокой газоносностью призабойной зоны ($Q_{cp} > 5 \text{ м}^3/\text{т}$), более хаотична, на что указывает диапазон разброса соответствующих им значений энтропии 0,4 отн. ед.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научное значение работы заключается в обосновании количественной оценки неоднородности микроструктуры каменных углей и обосновании критерия дифференцирования угля по склонности к удержанию метана, выбросоопасности и самовозгоранию, в результате чего была разработана и апробирована «Методика количественной оценки склонности углей к опасным проявлениям в пластах на основе анализа их микроструктуры».

Практическая значимость работы состоит в том, что использование данной методики дифференцирования углей в зависимости от их структуры на микроуровне даёт возможность выделения участков пласта с микроструктурой, склонной к опасным явлениям – внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию. Применение методики позволит избежать необходимости проводить другие, длительные по времени и затратные исследования, а также локализовать участки пласта, где следует сосредоточить внимание на проведении мероприятий по предотвращению опасных явлений, что позволит повысить безопасность ведения горных работ и снизит риски разработки угольных месторождений.

Степень достоверности научных положений и выводов

Обоснованность выносимых положений подтверждается представительностью набора проб исследованных углей из разных месторождений; достаточного для статистической обработки массива снимков поверхности углей, полученных в процессе экспериментальных исследований; применением поверенного лабораторного оборудования; использованием для анализа апробированных методик; удовлетворительной сходимостью и воспроизводимостью полученных результатов (погрешность не более 10 %).

Апробация результатов

Основные научные и практические результаты работы представлены на российских и международных конференциях: Международный научный симпозиум Неделя горняка (2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025 гг. НИТУ МИСИС); Международная конференция Плаксинские чтения (2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 гг.); Международная научная школа академика РАН К.Н. Трубецкого (5-я в 2022, 6-я в 2024 гг. ИПКОН РАН), Международная научная школа молодых учёных и специалистов Проблемы освоения недр в XXI веке –

глазами молодых (15-я в 2021 г., 16-я в 2023 г. ИПКОН РАН); Семинар РГУ нефти и газа Добыча метана из угольных отложений. Проблемы и перспективы (2021, 2022, 2023, 2024, 2025 гг. РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина); Международный Российско-казахстанский симпозиум Углекислота и экология Кузбасса (2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 гг. ФИЦ УУХ СО РАН); Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов Цифровые технологии в горном деле – 2021 (ФИЦ КНЦ РАН); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных Ломоносов-2021 (МГУ им. М.В. Ломоносова); Международная молодёжная научная конференция Нефть и газ – 2022 (РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина).

Предполагаемое внедрение: шахты РФ, разрабатывающие склонные к внезапным выбросам угля и газа и склонные к самовозгоранию угольные пласты.

Личный вклад автора состоит в постановке и формулировании цели и задач исследования; сборе, изучении и анализе существующих материалов по теме диссертации; в организации и проведении лабораторных исследований; анализе, систематизации и обобщении результатов исследований; определении критерия дифференцирования углей по склонности к опасным явлениям в шахте.

Публикации. Основные положения и результаты работы представлены в 15 печатных и электронных публикациях, из них 6 в журналах – из рекомендованного ВАК при Минобрнауки РФ перечня изданий.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы из 136 наименований, изложенная на 147 страницах машинописного текста, содержит 41 иллюстрацию и 12 таблиц.

Область исследования. Работа выполнена в соответствии с паспортом научной специальности ВАК при Минобрнауки РФ 2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность и признательность за ценные консультации и поддержку: своему научному руководителю д.т.н. Малинниковой Ольге Николаевне, д.т.н. Ульяновой Екатерине Васильевне, вед. инж. Долговой Марии Олеговне и другим сотрудникам отдела № 2 «Центра проблем метана и газодинамических явлений угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН, а также к.б.н. Браже Алексею Рудольфовичу (МГУ им. М.В. Ломоносова).

Основное содержание работы

Статистика произошедших случаев внезапных выбросов угля и газа на шахтах показывает, что они могут произойти и в процессе выполнения проходческих и очистных работ в забое, и во время выполнения различных локальных мероприятий в выработках. С целью обеспечения безопасности ведения работ на угольных пластах, имеющих склонные к ГДЯ зоны, следует обладать достоверными сведениями о местоположении таких областей и вести прогнозные мероприятия при выполнении подготовительных работ.

В первой главе приведён анализ научно-методических и практических подходов к изучению свойств угля, определяющих его склонность к опасным явлениям в пластах. Описана важность исследования структурного фактора и выделен современный подход к описанию особенностей структуры угля, основанный на теории фракталов, применительно к области природных систем и материалов.

Значимый вклад в решение проблемы предотвращения опасных явлений в угольных шахтах внесли учёные: А.Т. Айруни, А.Д. Алексеев, А.А. Скочинский, Г.Н. Фейт, Г.Д. Фролков, В.В. Ходот, Л.И. Эттингер и многие другие, а также современные исследователи: В.Н. Захаров, О.Н. Малинникова, Е.В. Ульянова, В.А. Трофимов, В.Н. Одинцев, И.Ж. Бунин и другие, а также иностранные учёные.

Согласно современной теории, основы которой заложены в трудах А.А. Скочинского и В.В. Ходота, опасность возникновения ГДЯ в шахтах определяют три основных природных фактора: горное давление, газоносность и давление газа в угольном пласте и свойства самого массива. Горное и газовое давление (или связанные с ними величины) обычно учитываются при прогнозе ГДЯ, а таким свойствам угольного массива, как строение и нарушенность углей, уделяется значительно меньше внимания. Сейчас считается, что выбросы происходят на газоносных угольных пластах вследствие резкого изменения напряженного состояния пласта при подвигании забоя выработки в зонах влияния мелкоамплитудной тектонической нарушенности, но это не объясняет того, что большинство мелкоамплитудных нарушений никогда не дают выбросов.

В XX веке изучение строения угля велось на макроуровне, не затрагивая микроструктуру угля. Метод оптической микроскопии, активно применяющийся в петрографии углей, позволил перейти к представлению об угле как веществе,

состоящем из различных компонентов: мацералов угля и минеральных примесей. Были предложены качественные методы оценки структуры, основанные на определении тектонической нарушенности углей, по анализу распределения системы трещин и их зияния. В работах О.Н. Малинниковой, В.Н. Одинцева и др., авторы, обратились к концепции иерархической нарушенности геоматериалов, показана связь мультифрактальных параметров структуры каменных углей с их предрасположенностью к выбросоопасности. Авторы, используя цифровые изображения, проследили изменение характеристик описания структуры на различных масштабных уровнях. В результате было показано, что наиболее информативными являются изображения углей микронного масштаба. Данный масштаб даёт информацию о распределении отдельных зёрен угля, внутри которых уже не может быть пор и трещин, достаточно широких для фильтрации метана, что непосредственно связано со склонностью углей к опасным явлениям.

В последнее время в связи с развитием цифровых технологий, в разных областях науки находят применение различные методы «цифрового распознавания образов». Они позволяют проводить обработку массивов многомерных данных и разделение изображения на морфологические составляющие по определённым признакам. Предложены различные методы описания и выделения различных объектов, среди них: метод Фурье-преобразования, направленные и комплексные вейвлеты, контурлеты, кёрвлеты, шиарлет-преобразование данных и другие.

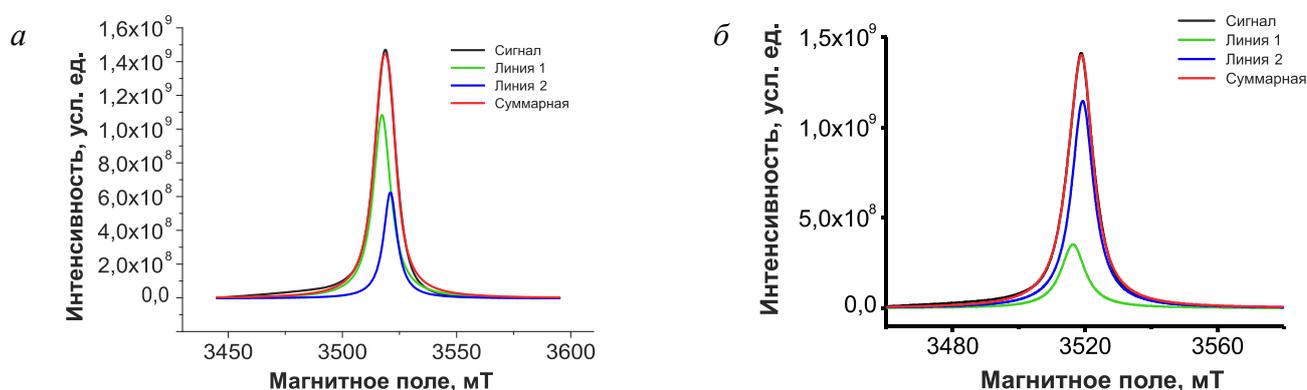
Шиарлет-преобразование – метод подходящий для анализа сложных сигналов различных физических сред и моделей. В отличие от вейвлетов или кёрвлетов, шиарлеты обладают возможностью анализа масштаба, формы и направленности элементов структуры, благодаря параметру сдвига, для учёта анизотропных свойств исследуемого объекта.

В работе Ribeiro H.V. и др. предложен практический метод оценки пространственной сложности двумерных паттернов цифровых изображений, основанный на энтропии и на величине статистической сложности, определяемой как произведение относительного расхождения Йенсена-Шеннона и относительной энтропии, подхода, разработанного в работе Bandt C. and Pompe B. В 2016 г. А.Р. Браже предложил переработанный метод обработки изображений и расчёта пространственных информационных энтропии H и сложности C , что позволяет оценить неоднородность элементов структуры природных систем.

Во второй главе приводятся исследования молекулярной структуры углей методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР-спектроскопии)¹, и анализ её связи с газоносностью призабойной зоны угольных пластов.

Опасные явления в угольных пластах имеют зональный характер проявления. Такие зоны часто характеризуются высокой газоносностью. В связи с чем проводилось изучение электронной структуры угольного вещества и общей сорбционной поверхности проб углей.

В сигнал ЭПР поглощения углей основной вклад вносят два типа парамагнитных центров (ПМЦ), формируемых разными молекулярными связями угольного вещества: 1) обменное взаимодействие неспаренных электронов от сопряженных систем в ароматической и алифатической частях угля и 2) неспаренные электроны локализованные в участках разрыва связей, а также ненасыщенные эфирные и метиленовые мостиковые межзатомные связи в алифатической части угля. Поэтому спектры ЭПР (рисунок 1) каменных углей раскладываются на две составляющие: линия 1 – от алифатической части угля, линия 2 – от систем сопряжения.



— сигнал от разорванных и деформированных связей в алифатике, — сигнал от систем сопряжения, — суммарный сигнал, — исходный сигнал;

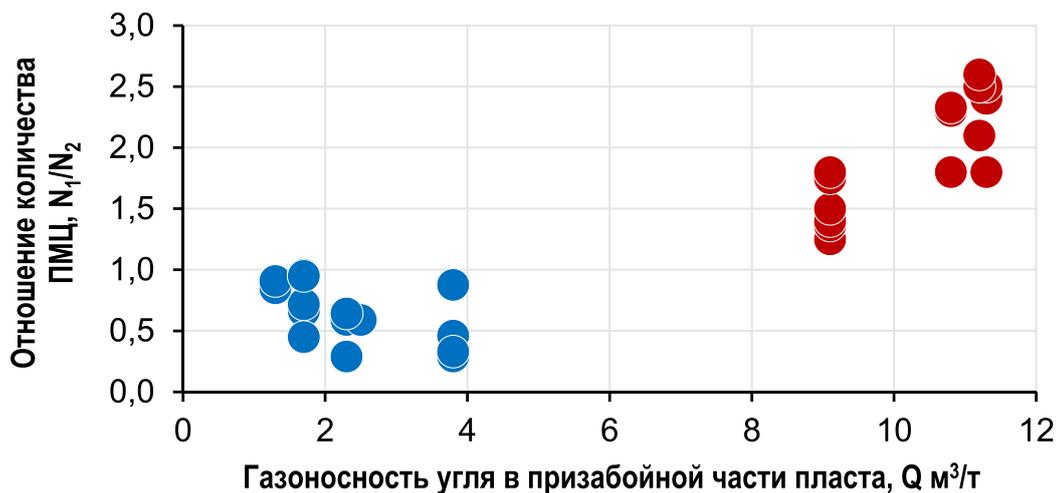
a – спектр угля склонного к опасным явлениям; *б* – то же для несклонного.

Рисунок 1 – Пример разложения спектра ЭПР на две составляющие сигнала

Исследования показали (рисунок 1), что в ЭПР-спектрах угля, содержащего большее количество метана, линия 1 от алифатической части угля по площади и по интенсивности (высота линии) преобладает над линией 2 образующейся от систем сопряжения. В углях с низкой газоносностью ЭПР-спектры раскладываются так, что интенсивность линии 2 больше, а интенсивность линии 1 меньше, чем в спектрах углей с большим содержанием метана.

¹ Исследования ЭПР были проведены на спектрометре BRUKER EMX 6/1 с использованием экспериментальной базы ЦКП “Нанохимия и наноматериалы” МГУ в рамках Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова в кооперации с к.ф.-м.н. А.Н. Ульяновым.

Интегральная интенсивность сигнала (линии) определяется площадью S под кривой ЭПР-спектра поглощения и пропорциональна числу ПМЦ, формирующих этот сигнал. На рисунке 2 показано N_1/N_2 – отношение количества ПМЦ в алифатике к количеству ПМЦ в сопряженных связях (ароматике и алифатике) в зависимости от газоносности угля.



- уголь с низкой ($Q < 5$ м³/т) газоносностью, ● уголь с высокой ($Q > 5$ м³/т) газоносностью.

Рисунок 2 – Отношение количества ПМЦ в алифатике к количеству ПМЦ в сопряженных связях в зависимости от газоносности

Количество ПМЦ в алифатической части значительно меньше у проб угля с небольшой газоносностью пласта, а более высокой газоносности призабойной зоны пласта соответствует структура углей с большим количеством оборванных связей (ПМЦ) в алифатической части. Рисунок 2 показывает, что метана больше там, где больше содержание ПМЦ, представленных разорванными и деформированными межатомными связями в алифатике. То есть метан удерживается ПМЦ, находящимися в алифатической составляющей угля.

Аналогичные исследования, проведенные на углях из выбросоопасной и невыбросоопасной зон пласта (таблица 1), показали, что количество ПМЦ в алифатической части невыбросоопасной зоны значительно меньше, чем в выбросоопасной, то есть уголь имеет значительно более упорядоченную микроструктуру. Аналогично и суммарное значение ПМЦ (графа N_{1+2}) углей из выбросоопасной области имеет большее значение, то есть уголь обладает более нарушенной микроструктурой, с большим количеством разорванных связей, преимущественно в алифатике, чем из невыбросоопасной зоны пласта.

Таблица 1 – Параметры ЭПР спектров углей разных по склонности к выбросам

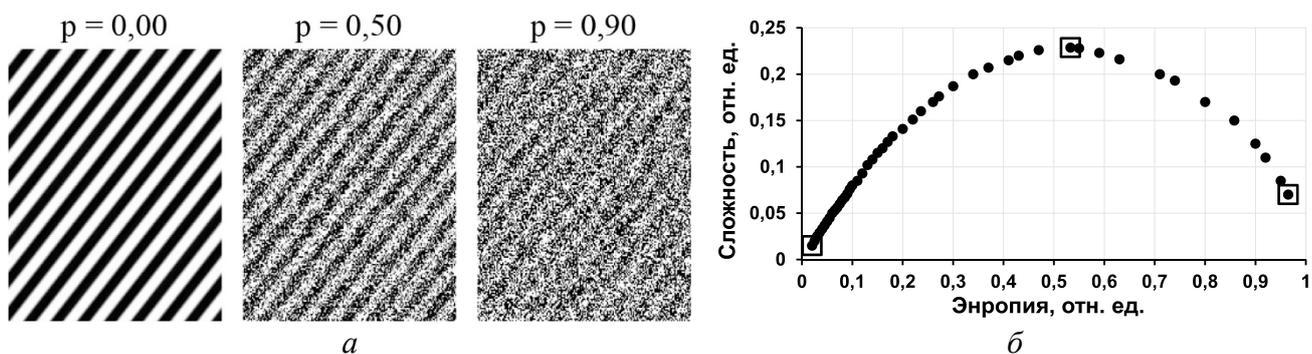
Группа образцов	N_1 (10^{18} (спин/г))	N_2 (10^{18} (спин/г))	N_{1+2} (10^{18} (спин/г))
невыбросоопасные	8,6	5,2	13,8
выбросоопасные	10,6	6,0	16,6

Исследование показало большую реакционную способность электронной структуры углей из зон, склонных к опасным явлениям, то есть способной сорбировать такие газы, как метан и кислород, что и приводит к формированию опасных зон. Что доказывает **I защищаемое положение**.

Третья глава посвящена исследованию влияния неоднородности микроструктуры угля на склонность угольных пластов к удержанию метана.

Для количественного описания структурной неоднородности применялся метод расчёта информационных энтропии и сложности, предложенный в работе А.Р. Браже, основанный на распределениях коэффициентов шиарлет-разложения обрабатываемых цифровых изображений природных систем. Достоинством шиарлетов является то, что они учитывают форму (анизотропию) и ориентацию в пространстве элементов изображения при различных масштабах, в отличие от мультифракталов, где определяется только форма. Метод позволяет оценивать энтропию и сложность локально, в отличие от алгоритмов в двумерном пространстве, требующих чрезвычайно большие выборки. Под энтропией H принимается мера хаотичности системы: чем меньше паттерны (элементы) системы подчинены какому-либо порядку, тем выше энтропия. Понятие статистической сложности S вводится, как произведение энтропии на расхождение между наблюдаемым и равновероятным распределением шиарлет-признаков. Обе величины измеряются в относительных единицах. Расчёты проводились с использованием программного обеспечения «Shearlexity», разработанного на языке Python. Из введенного выше определения видно, что любой повторяющийся элемент структуры поверхности природного объекта описывается как точка на плоскости в координатах «энтропия-сложность», где нулевые энтропия и сложность соответствуют полностью регулярной структуре, а высокая энтропия и нулевая сложность – полностью случайному пространственно независимому шуму (рисунок 3).

В работе метод адаптирован для количественного описания неоднородности строения микроструктуры угля, с помощью анализа цифровых изображений рельефа естественной поверхности проб угля при 1000-кратном увеличении.

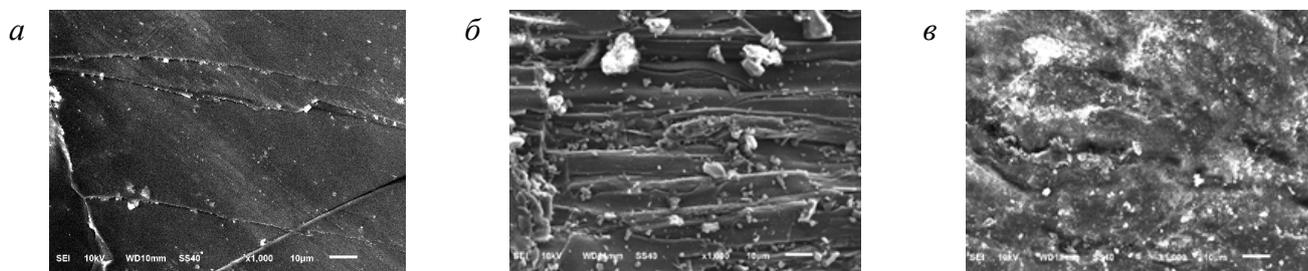


a – паттерн с различной вероятностью распределения пикселей (от структурированного до шума);
б – график функции изменения энтропии и сложности при “разрушении” паттерна.

Рисунок 3 – Постепенное изменение паттерна – узора полос

Так как нулевой сложности соответствуют и максимально упорядоченные структуры, и полностью хаотичные, а структура угля не бывает абсолютно упорядоченной, экспериментальных точек, лежащих в левой нижней части графика диаграмм «энтропия-сложность» (низкая энтропия, низкая сложность), быть не должно, но можно получить точки, соответствующие максимально хаотичному распределению структур в образце, в правой нижней части диаграмм, то есть при низкой сложности, но высокой энтропии и на средних участках диаграмм.

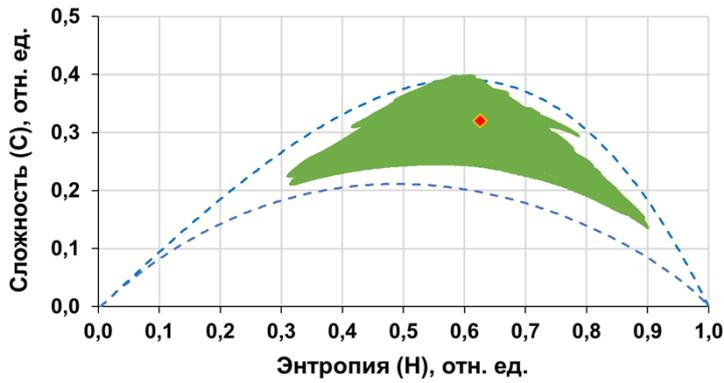
Примеры цифровых изображений естественной поверхности угольных проб представлены на рисунке 4.



a – угли из неопасной области пласта; *б* – угли из выбросоопасной области; *в* – из выброшенного угля.

Рисунок 4 – Цифровые изображения естественной поверхности проб углей $\times 1000$ масштаба

Для количественного описания неоднородности структуры углей были проведены расчёты и построены зависимости «энтропия-сложность». Разброс полученных значений H и C по всей поверхности цифрового изображения достаточно велик: в среднем от 0,3 до 0,9 для энтропии и от 0,1 до 0,4 для сложности. Поэтому, для дальнейшего анализа рассчитывается среднее значение энтропии и сложности для каждого изображения, показанное красной точкой (рисунок 5). Далее построены зависимости этих значений для серий снимков проб исследованных углей.

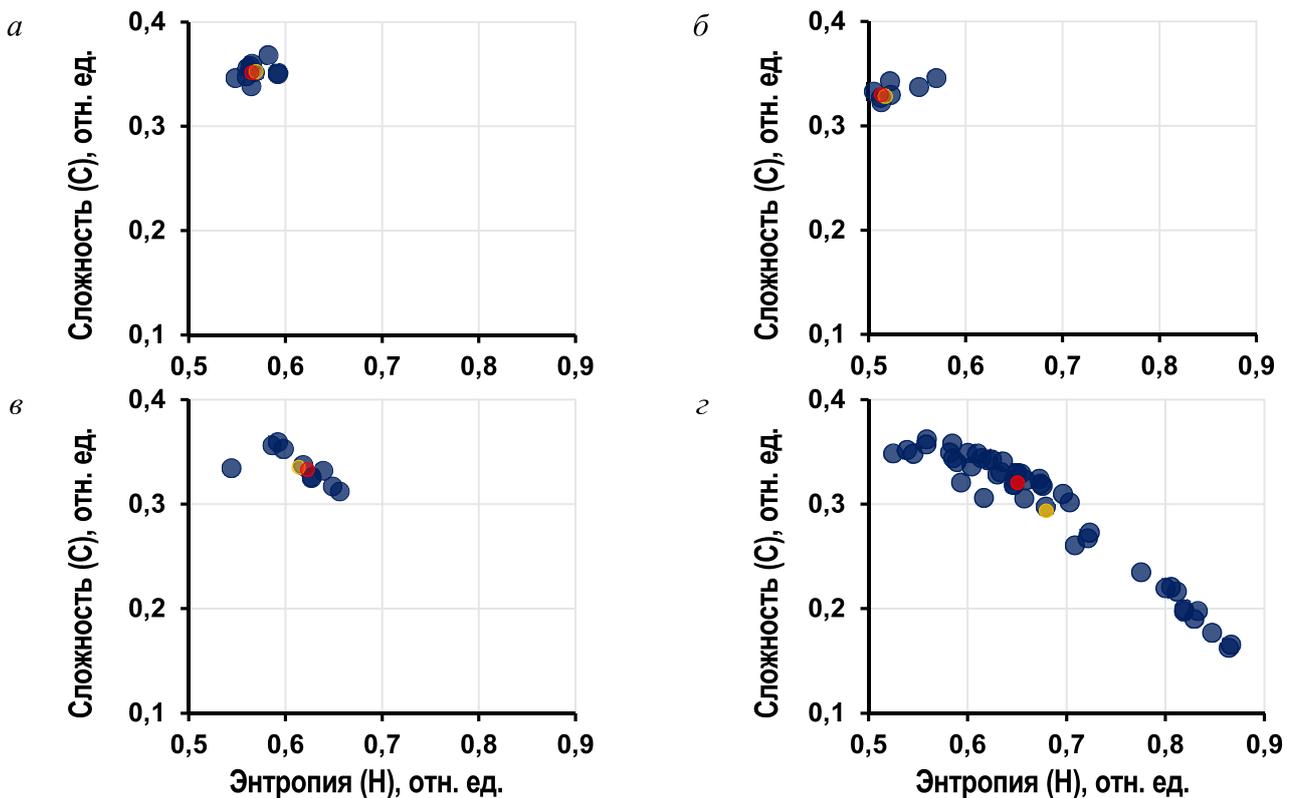


● среднее значение энтропии и сложности для цифрового изображения поверхности угля

Рисунок 5 – Облако точек в системе координат «энтропия-сложность» по одной микрофотографии, характеризующее неоднородность микроструктуры угля

Анализ связи структурных особенностей с литотипом углей

Сравнение микроструктурных особенностей двух основных петрографических составляющих угольного вещества – витринита и инертинита – показало, что распределение значений для инертинитового мацерала угля (пробы с матовой поверхностью), практически одинаково для всех углей – как склонных к опасным явлениям, так и несклонных; как с высокой, так и низкой газоносностью призабойной зоны пласта (рисунок 6).



а, б – угли с матовой поверхностью; *в, г* – угли с блестящей поверхностью;

а, в – угли несклонные к опасным явлениям и с низкой газоносностью $Q < 5 \text{ м}^3/\text{т}$;

б, г – угли склонные к опасным явлениям и с высокой газоносностью $Q > 5 \text{ м}^3/\text{т}$.

Рисунок 6 – Диаграммы значений «энтропия-сложность» по цифровым изображениям углей

Для витринитовой составляющей углей (с блестящей поверхностью) склонных к опасным явлениям, а также углей с высокой газоносностью разброс

значений энтропии и сложности существенно отличается от значений для углей несклонных, а также с низкой газоносностью (рисунок 6). То есть, угли с высокой газоносностью призабойной зоны пласта и склонные к опасным явлениям, отличаются неоднородной (более хаотичной) микроструктурой витринитовой составляющей. На рисунке 7 приведены области значений «энтропия-сложность», рассчитанных по цифровым изображениям поверхности исследуемых проб угля, демонстрирующие их значимое разделение.

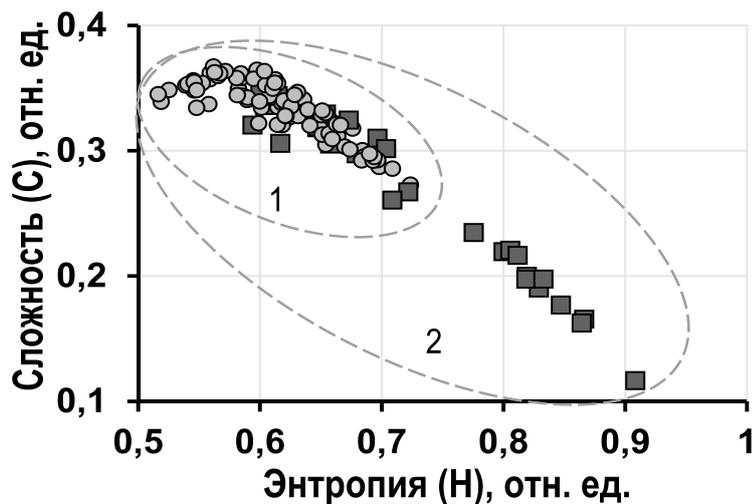


Рисунок 7 – Оценка степени упорядоченности элементов в системе координат «энтропия-сложность» по сериям микрофотографий

- 1 – область концентрации точек, относящихся к несклонным к опасным проявлениям углей,
 2 – область концентрации точек, относящихся к склонным к опасным проявлениям углей

Предложенная методика расчёта и построения диаграмм «энтропия-сложность» позволяет количественно оценивать особенности микроструктуры углей. Что доказывает **II защищаемое положение**.

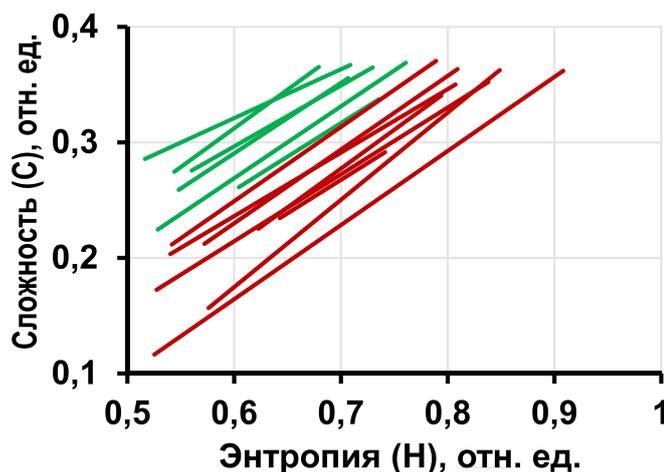
В четвёртой главе показано применение методики определения неоднородности микроструктуры угля.

Анализ связи структурных особенностей углей с их выбросоопасностью

Расчёт энтропии и сложности и построение диаграмм было сделано для углей, полученных из несклонных и склонных к опасным явлениям зон выбросоопасного пласта, а также из выброшенного угля (рисунки 8, 9).

Из полученных диаграмм «энтропия-сложность» (рисунок 9) видно, что разброс значений энтропии для углей из несклонной к выбросам зоны – 0,55-0,70, и сложности – 0,25-0,30. То есть структура угля неопасной области угольного пласта является более упорядоченной. Для углей из склонного к опасным явлениям участка значения «энтропия-сложность» разделились на две группы точек.

Одна группа имеет значения аналогичные значениям для углей из несклонной области, вторая – максимальную энтропию 0,80-0,95 и минимальную сложность 0,10-0,25, то есть степень упорядоченности этих структурных элементов приближается к полному хаосу. Сочетание высокоупорядоченных элементов с наиболее хаотичными структурами, приводит к тому, что в таких зонах создаются условия для повышения вероятности развязывания внезапных выбросов.



— угли несклонные к опасным явлениям и с низкой газоносностью,
 — угли склонные к опасным явлениям и с высокой газоносностью
 (примечание: на данном графике линии развёрнуты в целях наглядности)

Рисунок 8 – Диапазоны изменения энтропии и сложности исследованных углей

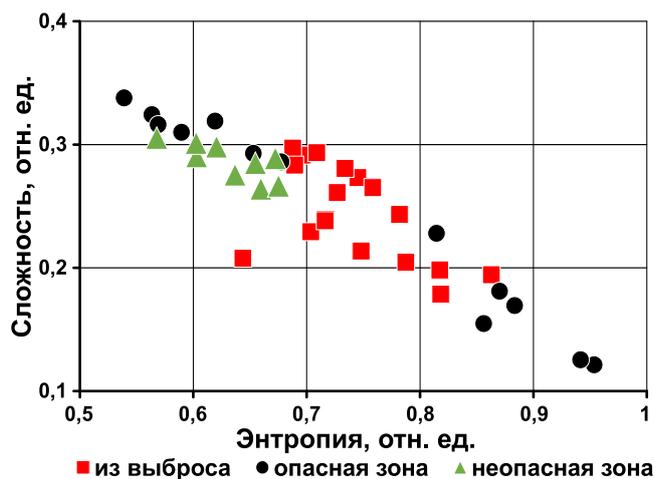


Рисунок 9 – Значения энтропии и сложности цифровых изображений поверхности углей: из выброса и из опасной и неопасной по выбросам зон пласта

В выброшенном угле наиболее хаотично ориентированные элементы (неоднородные структуры в угле) со значениями энтропии 0,85-0,95, присутствующие в выбросоопасной зоне, исчезают, видимо, они подвержены наибольшему разрушению с образованием «бешеной муки» и уносятся газом при выбросе. Оставшаяся часть угля из выброса показывает несколько более упорядоченную структуру с энтропией 0,65-0,85 и сложностью 0,18-0,30, но более хаотичную, чем уголь из зоны несклонной к выбросам. Наиболее упорядоченных структур с минимальными значениями энтропии в выброшенном угле нет, они просто не участвуют в выбросе. Таким образом, были выявлены диапазоны распределения значений, характеризующие области в угольных пластах по склонности к опасным явлениям.

Анализ связи структурных особенностей углей со склонностью к самовозгоранию

Исследовались каменные угли, отобранные из шахты «Комсомольская», пласт Четвертый и шахты «Воргашорская», пласт Мощный. Получено, что диапазон значений энтропии ΔH углей несклонных к самовозгоранию небольшой $\approx 0,2$, для склонных к самовозгоранию углей диапазон значений $\approx 0,4$ (рисунок 10). Структура склонных к самовозгоранию углей представляет собой сочетание участков как с упорядоченными элементами структуры ($\Delta H 0,55 \div 0,75$), так и значительно более хаотично организованными структурными элементами ($\Delta H 0,55 \div 0,95$). При хаотичной организации микроструктуры угля повышается его удельная поверхность, контакт угля с кислородом происходит на большей площади и улучшается доступность к разупорядоченным элементам угля вблизи поверхности. Большое количество оборванных связей, характерное для углей с неоднородной микроструктурой, активно сорбирует кислород. Эти факторы способствуют развитию процесса самовозгорания угля. Несклонные к самовозгоранию угли обладают заметно более однородной микроструктурой.

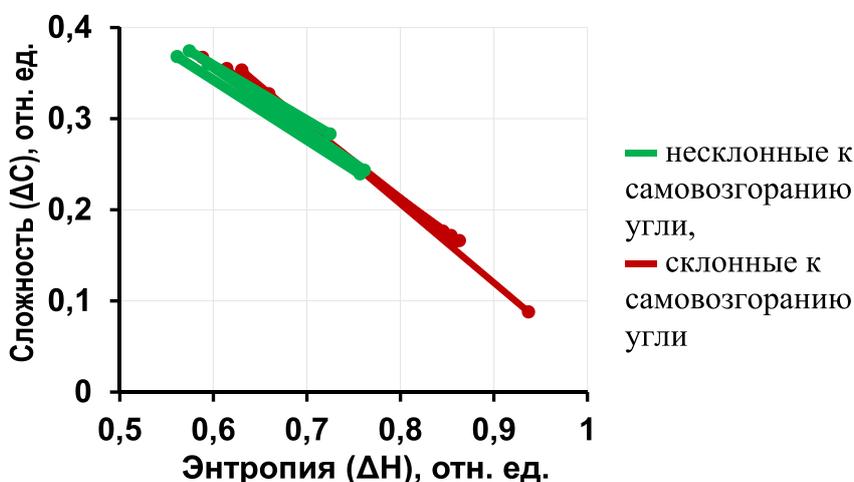


Рисунок 10 – Диапазоны изменения значений энтропии и сложности исследованных углей, разных по склонности к самовозгоранию

Выше приведённое доказывает **III защищаемое положение.**

Заключение

В диссертации в результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика количественной оценки неоднородности микроструктуры углей, на основе которой решена актуальная научно-практическая задача определения влияния неоднородности микроструктуры угля на склонность пласта к выбросоопасности, самовозгоранию

и к удержанию метана в призабойной зоне пласта, которая имеет существенное значение для прогноза высокогазоносных зон в угольном пласте, а также зон пласта, склонных к выбросоопасности и к самовозгоранию по фактору микроструктуры, для обеспечения безопасности ведения горных работ.

Основные научные и практические результаты и выводы по работе состоят в следующем:

1. Установлено, что структурный фактор является важным при определении склонности углей к опасным явлениям в шахтах и при прогнозировании газовыделений в горную выработку.

2. Показана возможность количественной оценки упорядоченности микроструктурных элементов с построением диаграмм «энтропия-сложность», рассчитанным по цифровым изображениям естественной поверхности углей, полученных сканирующим электронным микроскопом при тысячекратном увеличении.

3. В результате исследований углей методом ЭПР-спектроскопии установлено, что угли с более хаотичной (менее упорядоченной) организацией микроструктуры содержат больше разорванных связей (ПМЦ – парамагнитных центров) в алифатической составляющей, что позволяет им удерживать больше метана в призабойной зоне угольного пласта. Угли с меньшей газоносностью призабойной зоны пласта обладают более упорядоченной микроструктурой и меньшим количеством ПМЦ соответственно. То есть метан в угле удерживается преимущественно ПМЦ (свободными радикалами), находящимися в алифатической составляющей угольного вещества.

4. Установлено, что газоносность призабойной зоны пласта во многом определяется неоднородностью микроструктуры витринитовой (блестящей) составляющей угля. Газоносность призабойной зоны выше у углей с более хаотичной микроструктурой, именно витринитовой составляющей угольного вещества. Для инертинитовой (матовой) составляющей угля характерны близкие значения неоднородности микроструктуры как для углей с высокой, так и низкой газоносностью призабойной зоны пласта.

5. Установлена взаимосвязь между склонностью углей к выбросоопасности и величиной неоднородности микроструктуры угля. Угли из выбросоопасной зоны пласта показывают сочетание областей как

с упорядоченной, так и с хаотично организованной микроструктурой, диапазон разброса соответствующих им значений энтропии составляет 0,4 отн. ед. Угли из невыбросоопасной зоны обладают более упорядоченной микроструктурой и характеризуются диапазоном разброса значений энтропии около 0,2 отн. ед. В выброшенной массе не обнаружено углей с наиболее хаотично организованной структурой, характерной для выбросоопасной зоны, то есть в процессе выброса в первую очередь разрушаются наиболее структурно неорганизованные области в алифатической составляющей угля. Углей с хорошо упорядоченной микроструктурой, свойственной зонам пласта, неопасным по внезапным выбросам, в выброшенном угле также не обнаружено, они, видимо, не участвуют в процессе выброса.

6. Показано, что для углей, склонных к самовозгоранию, характерна более нарушенная микроструктура с диапазоном изменения энтропии 0,4 отн. ед. Для несклонных к самовозгоранию углей этот диапазон составляет около 0,2 отн. ед. Неоднородность микроструктуры может быть весьма важным фактором в прогнозе самовозгорания, так как хаотичная организация микроструктуры предопределяет более активное проникновение в уголь кислорода, а большое количество разорванных связей в алифатической составляющей способствует активной сорбции кислорода в местах разрыва связей.

7. На основе проведенных исследований разработана методика определения неоднородности строения микроструктуры угля, основанная на обработке цифровых изображений поверхности углей и расчёте распределений значений информационной энтропии и статистической сложности (диаграммы «энтропия-сложность») для дифференциации углей по склонности к опасным явлениям в шахтах.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Основное содержание диссертации опубликовано,

в научных журналах, рецензируемых ВАК при Минобрнауки России:

1. Ульянова Е.В. Микроструктура ископаемых углей до и после газодинамических явлений / Е.В. Ульянова, О.Н. Малинникова, Б.Н. Пашичев, Е.В. Малинникова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2019. – № 5. – С. 10–17. – DOI 10.15372/FTPRPI20190502.

2. Малинникова О.Н. Влияние микроструктуры угля на газонасыщенность призабойной зоны / О.Н. Малинникова, Е.В. Ульянова, А.В. Харченко, Б.Н. Пашичев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 3 – С. 25–33. – DOI 10.15372/FTPRPI20200303.
3. Ульянова Е.В. Влияние неоднородности структуры угля на особенности его термического разложения / Е.В. Ульянова, О.Н. Малинникова, Б.Н. Пашичев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 2. – С. 71–81. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-2-0-71-81.
4. Захаров В.Н. Влияние петрографического состава угля на его способность к удержанию метана / В.Н. Захаров, Е.В. Ульянова, О.Н. Малинникова, Б.Н. Пашичев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12. – С. 88–98. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_12_0_88.
5. Ульянова Е.В. Микроструктура метановых угольных пластов / Е.В. Ульянова, О.Н. Малинникова, А.В. Харченко, Б.Н. Пашичев // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – Москва. – 2021. – № 3. – С. 66–70. – DOI 10.33285/1999-6934-2021-3(123)-66-70.
6. Ulyanova E.V. Specific Features of the Structure of Various Coal Ranks at the Nano Level / E.V. Ulyanova, O.N. Malinnikova, A.V. Shlyapin, B.N. Pashichev // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences. – 2020. – № 6(93). – С. 80–92. – DOI 10.18698/1812-3368-2020-6-80-92.

в научных журналах, других изданиях и материалах конференций:

7. Ульянова Е.В. Влияние неоднородности структуры угольного вещества на склонность угля к самовозгоранию / Е.В. Ульянова, О.Н. Малинникова, А.И. Докучаева, Б.Н. Пашичев // Химия твердого топлива. – 2022. – № 6. – С. 18–24. – DOI 10.31857/S0023117722060093.
8. Пашичев Б.Н. Влияния особенностей структуры и вещественного состава углей на их склонность к газодинамическим явлениям / Б.Н. Пашичев, Е.В. Ульянова, О.Н. Малинникова // Углекимия и экология Кузбасса : сборник тезисов докладов VIII Международного Российско-Казахстанского Симпозиума : [06–10 октября 2019 г.]. – Кемерово : ФИЦ УУХ СО РАН, 2019. – С. 47. – EDN GYFLBO.
9. Малинникова Е.В. Исследование нарушенности ископаемых углей методом энтропии-сложности / Е.В. Малинникова, Б.Н. Пашичев // Проблемы освоения

недр в XXI веке глазами молодых : материалы 14 Международной научной школы молодых ученых и специалистов : [28 октября – 01 ноября 2019 г.]. – Москва : ИПКОН РАН, 2019. – С. 47–51. – EDN IMWZEN.

10. Пашичев Б.Н. Исследование связи неоднородности микроструктуры угля с его выбросоопасностью / Б.Н. Пашичев // материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021» ; отв. ред. И.А. Алешковский и др. : [12–23 апреля 2021 г.]. – [электронный ресурс]. – Москва : МАКС Пресс, 2021.
11. Пашичев Б.Н. Связь количества парамагнитных центров в угле со склонностью пластов к опасным явлениям / Б.Н. Пашичев, Е.В. Ульянова, А.Н. Ульянов, О.Н. Малинникова // Углехимия и экология Кузбасса : сборник тезисов докладов X Международного Российско-Казахстанского Симпозиума : [12–13 июля 2021 г.]. – Кемерово : ФИЦ УУХ СО РАН, 2021. – С. 70. – DOI 10.53650/9785902305637_70.
12. Пашичев Б.Н. Исследование ископаемых углей с использованием цифровой оценки их микроструктуры по методу «энтропия-сложность» / Б.Н. Пашичев // Цифровые технологии в горном деле : сборник тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов ; отв. редактор С. В. Лукичев : [16–18 июня 2021 г.]. – Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2021. – С. 53–55. – DOI 10.37614/978.5.91137.450.1.
13. Пашичев Б.Н. Влияние на свойства угольного пласта микроструктуры петрографических составляющих / Б.Н. Пашичев, Е.В. Ульянова, О.Н. Малинникова // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья : материалы Международной конференции «Плаксинские чтения – 2021» : [04-08 октября 2021 г.]. – Владикавказ : Изд-во СКГМИ (ГТУ), 2021. – С. 215–218.
14. Ульянова Е.В. Связь неоднородности микроструктуры угольного вещества с опасными проявлениями в шахтопластах / Е.В. Ульянова, О.Н. Малинникова, Б.Н. Пашичев, А.И. Докучаева // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр : материалы 5 Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого ; под редакцией академика РАН К.Н. Трубецкого : [14–18 ноября 2022 г.]. – Москва : ИПКОН РАН, 2022. – С. 284–287.

15. Ульянова Е.В. Угольный метан и железосодержащие минералы / Е.В. Ульянова, О.Н. Малинникова, Б.Н. Пашичев, И.Н. Горшенков // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья : сборник тезисов докладов Международной конференции «Плаксинские чтения – 2023» : [02–05 октября 2023 г.]. – Москва : НИТУ «МИСИС», 2023. – С. 176–179.