

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 – 2025

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, заведующий кафедрой «Безопасности и экологии горного производства», Горный институт, «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС), г. Москва

Василенко Татьяна Анатольевна, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Геодинамической безопасности», «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (СПГУ), г. Санкт-Петербург

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

Защита диссертации состоится «11» марта 2026 г. в 14⁰⁰ 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 ФГБУН 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.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



В.С. Федотенко

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Добыча угля является одной из главных отраслей в топливно-энергетическом комплексе России, и 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 и роста доли подземной добычи угля и, как следствие, нарастанием глубины ведения очистных работ в шахтах, осуществляемых в сложных горно-геологических условиях, всё большее значение приобретают проблемы безопасности ведения горных работ. Большинство разрабатываемых в России угольных пластов являются опасными хотя бы по одному из факторов и характеризуются высокой газоносностью, что может создать угрозу возникновения газодинамических явлений (ГДЯ), таких как загазирование горных выработок, внезапные выбросы и другие, а также склонность к самовозгоранию.

Основная опасность происходящих на шахтах внезапных выбросов угля и газа заключается в том, что они являются быстропротекающими, сопровождаются лавинообразно развивающимися разрушениями углепородного массива, выносом в выработанное пространство породы и оборудования, тонкодисперсной угольной пыли, выбросом большого объёма метана, что приводит к разрушению выработок шахты и, в некоторых случаях, к гибели шахтёров.

В соответствии с принятыми нормативными документами, по результатам прогнозных мероприятий категория опасности «склонный к внезапным выбросам угля и газа», присваивается пласту угля в целом. Однако в исследованиях ряда учёных в результате анализа статистики произошедших явлений показано, что реально можно говорить о зональном характере выбросоопасности угольного пласта, несмотря на одну геологическую среду формирования и текущие условия залегания в массиве: горное и газовое давление, температуру. Это обстоятельство является основанием для более пристального внимания к структуре и свойствам угля, влияние которых необходимо учитывать, помимо горного и газового давления и температуры, при определении потенциальной выбросоопасности угольных пластов.

Единой концепции, описывающей взаимовлияние совокупности условий и различий в свойствах угля не только между разными месторождениями, но даже на протяжении одного пласта, приводящей к формированию газодинамических явлений в пласте, а также к склонности к самовозгоранию, до сих пор не выработано, и этот вопрос является предметом дискуссий среди учёных.

Несмотря на постоянное совершенствование современные прогнозные мероприятия, призванные выявлять склонность пласта к газодинамическим явлениям и самовозгоранию не учитывают микроструктурные особенности угля. Хотя при безусловной значимости геологических условий, влияние структурного фактора на склонность угля к возникновению опасных явлений в шахтах требует внимания. 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 и 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 шпатель-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 каменного угля Кузнецкого, Печорского и Донецкого угольных бассейнов.

Методология и методы исследований и фактические данные

В работе применён комплексный подход в методах исследований. Изучение структуры углей на микроуровне велось по снимкам поверхности углей, полученных с применением метода растровой сканирующей электронной микроскопии с помощью микроскопа Jeol JSM-6610 LV с разрешением (паспортным) – не хуже 10 нм в режиме вторичных электронов. Затем по полученным снимкам с использованием программы «Shearlexity» рассчитывались пространственные меры – информационная энтропия и статистическая сложность. Определение общей сорбционной поверхности образцов углей осуществлялось на приборе AUTOSORB-1 фирмы Quantachrome Instruments. Использовался термогравиметрический анализатор (ТГА) Leco TGA-701 для определения термодинамических характеристик угля. Исследования электронной структуры углей, с целью определения связи структурной организации угольного вещества на молекулярном уровне и его склонностью к опасным явлениям в шахтах, методом электронного-парамагнитного резонанса (ЭПР), были проведены на спектрометре BRUKER EMX 6/1 (ЦКП “Нанохимия и наноматериалы” МГУ имени М.В. Ломоносова).

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, полученных сканирующим электронным микроскопом.

III. Угли, не склонные 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 угля в зависимости от его 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 те участки пласта, где следует сосредоточить внимание на проведении мероприятий по предотвращению опасных явлений. Подход 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, достаточным для статистической обработки массива снимков поверхности углей,

полученным 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» (в 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025 гг. Москва, НИТУ МИСИС); Международная конференция «Плаксинские чтения» (в 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 гг.); Международная научная школа академика РАН К.Н. Трубецкого (5-я в 2022, 6-я в 2024 гг. Москва, 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. Москва, ИПКОН РАН); Семинар РГУ нефти и газа «Добыча метана из угольных отложений. Проблемы и перспективы» (в 2021, 2022, 2023, 2024, 2025 гг. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина); Международный Российско-казахстанский симпозиум «Углекислота и экология Кузбасса» (в 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 гг. Кемерово, ФИЦ УУХ СО РАН); Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов «Цифровые технологии в горном деле» – 2021 (Апатиты, ФИЦ КНЦ РАН); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2021» (Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова); Международная молодёжная научная конференция «Нефть и газ» – 2022 (Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина).

Предполагаемое внедрение: шахты РФ, разрабатывающие выбросоопасные угольные пласты и склонные к самовозгоранию.

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, изложенных на 147 страницах машинописного текста, содержит 40 иллюстраций 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 как в процессе выполнения проходческих и очистных работ в забое, так и во время выполнения различных локальных мероприятий в выработках. Такие происшествия представляют опасность для жизни и здоровья горнорабочих и могут нанести существенный ущерб горной технике. С целью обеспечения безопасности ведения работ на угольных пластах, имеющих склонные к газодинамическим явлениям зоны, следует обладать достоверными сведениями о месторасположении 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, геологии и геомеханики.

Значимый вклад в решение проблемы предотвращения опасных явлений в угольных шахтах внесли учёные: А.Т. Айруни, А.Д. Алексеев, Б.М. Иванов, С.В. Кузнецов, Г.Д. Лидин, А.М. Линьков, Н.Г. Матвиенко, В.И. Николин, И.М. Петухов, А.Г. Протосеня, И.В. Сергеев, А.А. Скочинский, Г.Н. Фейт, Г.Д. Фролков, В.В. Ходот, Л.И. Эттингер, М.Ф. Яновская, С.А. Ярунин 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, В.А. Бобин и другие; иностранные учёные: Ван Кревелен Д.В. (Нидерланды), Стопс М. (Англия), Скочиляс Н. (Польша), ряд китайских учёных: Ван Чжи-ань, Чжицян Чжан, Синьян Ван и другие.

Согласно современной теории, основы которой заложены в трудах А.А. Скочинского и В.В. Ходота, опасность возникновения газодинамических явлений в шахтах определяют три основных природных фактора: горное давление (напряжённое состояние массива горных пород), газоносность и давление газа в угольном пласте и свойства самого массива (геологическое строение, тектоническая нарушенность, физико-механические свойства). Горное и газовое давление (или связанные с ними величины) обычно учитываются при прогнозе газодинамических явлений, а таким свойствам угольного массива, как строение, нарушенность и минеральный состав углей, уделяется значительно меньше внимания. А между тем, именно их особенностями можно объяснить тот факт, что, как показал статистический анализ большого объёма данных, внезапные выбросы угля и газа более чем в 90 % случаев происходят в зоне влияния мелкоамплитудных тектонических нарушений, но при этом только 5 ÷ 7 % таких нарушений оказываются опасны по внезапным выбросам и горным ударам. Сейчас большинство исследователей считают, 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.

Анализ текущих нормативных методов определения склонности пластов к опасным явлениям показывает, что все они не учитывают влияние структурных особенностей локального строения угля на микроуровне.

В XX веке изучение строения угля велось методами «классических» химии и физики, на макроуровне, не затрагивая микроструктуру угля. Метод оптической микроскопии, активно применяющийся в петрографии углей, позволил перейти к уровню представления об угле как гетерогенном веществе, состоящем из различных компонентов: мацералов угля и минеральных примесей. Были предложены качественные методы оценки структурной неоднородности, 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 фрактальных и мультифрактальных параметров структуры каменных углей с их предрасположенностью к выбросоопасности. Авторы, используя цифровые изображения, проследили изменение характеристик описания структуры на различных масштабных уровнях, вплоть до микронного. Также в результате обработки серий снимков было показано, что наиболее информативными при исследовании структуры углей, являются цифровые изображения угольных проб, полученные с тысячекратным

увеличением. Это обусловлено тем, что данный масштаб даёт информацию о размерах отдельных зёрен угля с характерным размером около одного микрона. Внутри таких зёрен уже не может быть пор и трещин, достаточно широких для свободной фильтрации метана, что непосредственно связано со склонностью углей к опасным явлениям. Однако роль структурных особенностей углей в формировании опасных ситуаций в пласте до сих пор изучается.

Одним из самых популярных и действенных методов математической обработки цифровых изображений является – метод Фурье-преобразования, нашедший широкое применение в физике, оптике, статистике, комбинаторике, обработке сигналов, биологии, медицине, науках о Земле и других.

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

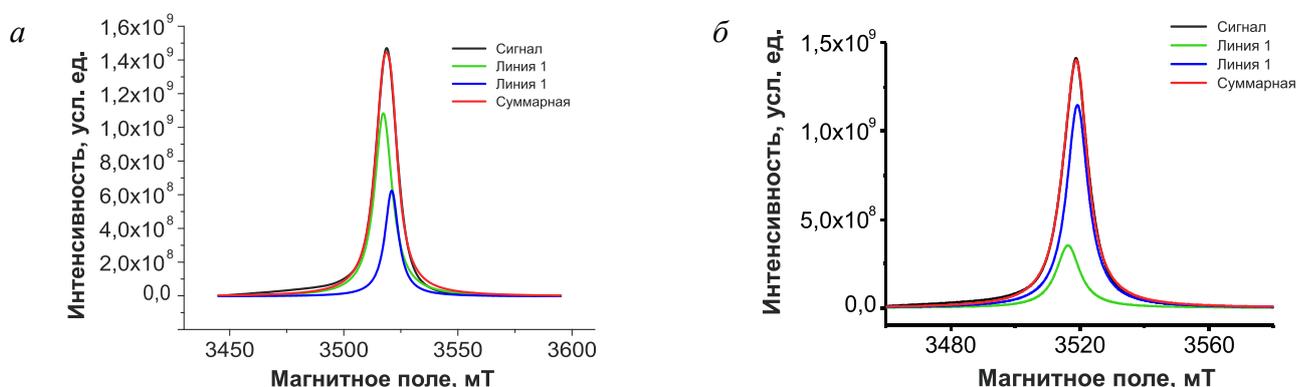
Шиарлет-преобразование (*shearlet*), математический аппарат которого хорошо подходит для анализа сложных сигналов различных физических сред и моделей, стало новым уровнем обработки изображений. В отличие от вейвлетов или кёрвлетов, система шиарлетов обладает возможностью анализа масштаба, пространства и определения направленности благодаря дополнительно введённому параметру сдвига, для учёта анизотропных свойств исследуемого объекта. Алгоритмические расчётные схемы шиарлет-преобразования опираются на хорошо разработанную теорию анализа данных предыдущих методов и являются её естественным расширением.

В работе автора Ribeiro H.V. и др. предложен практический метод оценки пространственной сложности двухмерных паттернов (неоднородностей) цифровых изображений, основанный на пермутационной энтропии, изначально введенной для 1D-сигналов, и на величине статистической сложности, определяемой как произведение относительного расхождения Йенсена-Шеннона и относительной энтропии, подхода, разработанного в работе Vandt S. and Pompe V. В 2016 году А.Р. Браже (МГУ им. М.В. Ломоносова) предложил переработанный математический аппарат с алгоритмической реализацией, расчёта пространственных информационных энтропии H и сложности S . Такой подход к обработке изображений позволяет оценить неоднородность элементов и отклонение их распределения от равновероятного (полностью хаотичного).

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

Исследования отталкиваются от того, что согласно статистическому анализу и исследованиям других учёных опасные явления в пласте имеют локальный характер, то есть проявляются в отдельных зонах. В частности, 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 межмолекулярными и внутримолекулярными связями угольного вещества: 1) слабое 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 межатомные связи в алифатической части угля. Поэтому спектры ЭПР (рисунок 1) каменных углей состоят, как минимум, из двух линий: более узкой (линия 2) от систем сопряжения и широкой (линия 1) от алифатической части угля.



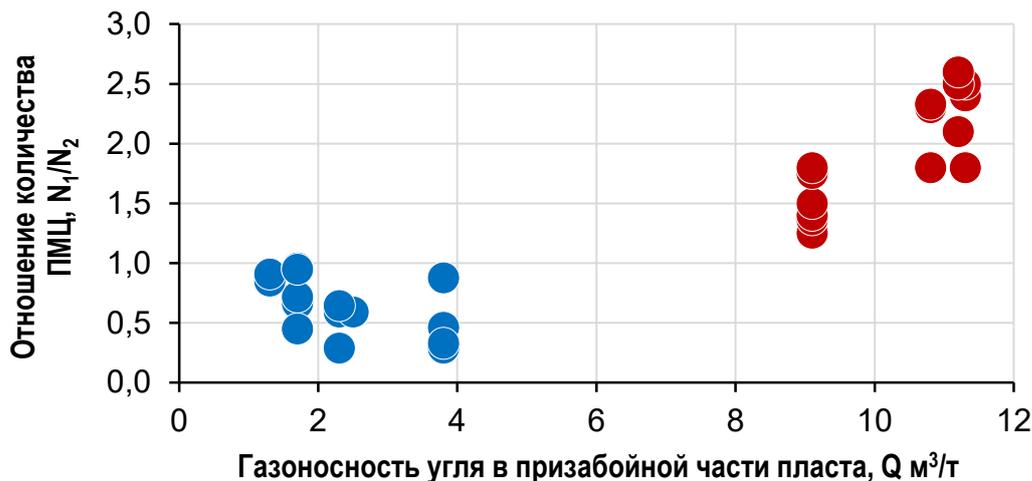
ЭПР спектр аппроксимирован двумя кривыми: *зеленая (линия 1)* – представленная разорванными и деформированными связями в алифатике, *синяя (линия 2)* – от систем сопряжения; *красная* – суммарный сигнал, совпадающий с исходным, *чёрным*;
а – пример спектра пробы угля склонного к опасным явлениям в пласте; *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, широкая линия (линия 1) от алифатической части угля по площади и по интенсивности (высота линии сигнала ЭПР) преобладает над узкой (линия 2), образующейся от систем сопряжения. В углях с низкой газоносностью ЭПР-спектры раскладываются так, что интенсивность узкой линии

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.

(линия 2) больше, а интенсивность широкой (линия 1) меньше, чем в спектрах проб с большим содержанием метана.

Интегральная интенсивность сигнала (линии) определяется площадью S под кривой ЭПР-спектра поглощения и пропорциональна числу парамагнитных центров, 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 тех призабойных зон, из которых были взяты образцы угля.



синие точки – уголь с низкой ($Q_{\text{ср}} < 5 \text{ м}^3/\text{т}$) газоносностью, красные точки – с высокой ($Q_{\text{ср}} > 5 \text{ м}^3/\text{т}$).
Рисунок 2 – N_1/N_2 – отношение количества ПМЦ в алифатике к количеству ПМЦ в сопряженных связях (ароматике и алифатике) в зависимости от газоносности

Рисунок 2 показывает, что метана больше там, где больше содержание ПМЦ, представленных разорванными и деформированными межатомными связями в алифатике. То есть количество парамагнитных центров в алифатической части значительно меньше у проб угля с небольшой газоносностью пласта. Учитывая это, можно говорить о том, что более высокой газоносности призабойной зоны пласта соответствует структура углей с большим количеством оборванных связей (ПМЦ) в алифатической части, то есть более рыхлая и менее упорядоченная. Следовательно, более высокая газоносность угольного пласта обусловлена тем, что метан удерживается парамагнитными центрами, находящимися в его алифатической части.

Аналогичные исследования, проведенные на образцах углей из выбросоопасной и невыбросоопасной зон пласта (таблица 1), показали, что количество ПМЦ в алифатической части невыбросоопасной зоны значительно меньше, чем в выбросоопасной зоне, то есть уголь имеет значительно более упорядоченную микроструктуру. Аналогично и суммарное значение ПМЦ (графа N_{1+2}) углей из выбросоопасной области имеют большее значение, то есть обладают более нарушенной микроструктурой, с большим количеством разорванных связей, преимущественно в алифатике, чем невыбросоопасные 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 на себя такие газы, как метан и кислород, что и приводит к формированию опасных зон. Что доказывает **I защищаемое положение**.

Третья глава посвящена методу определения и количественного описания неоднородности структуры угля на микронном уровне. При определении неоднородности микроструктуры угля предполагалось, что рельеф естественной поверхности проб угля при 1000-кратном увеличении отражает неоднородность строения микроструктуры угля.

Для количественного описания неоднородности микроструктуры угля применялся математический аппарат расчёта энтропии и сложности, предложенный в работе А.Р. Браже, основанный на распределениях коэффициентов шиарлет-разложения обрабатываемого цифрового изображения. Метод позволяет оценивать энтропию и сложность локально, в отличие, например, от алгоритма пермутационной энтропии, для которого в двумерном пространстве требуются чрезвычайно большие выборки. Расчёты проводились с использованием программного обеспечения «Shearlexity», разработанного на языке Python.

Оценка пространственной сложности и энтропии для двумерных изображений состоит из двух этапов. На первом этапе проводится разложение цифрового изображения на коэффициенты, характеризующие локальную анизотропию и ориентацию основных структур. Определяется распределение вероятности локальных шиарлет-признаков на изображении P_i , то есть вероятности нахождения структуры с индексом i в исследуемом паттерне, где $i = 1, \dots, N$ – разные масштабы и ориентации элементов структуры. Достоинством шиарлетов является то, что в этом подходе учитываются форма и ориентация в пространстве элементов изображения, в отличие от мультифракталов, где определяется только форма.

На следующем этапе определяется относительная $S[P]$ (формула 1) и нормализованная энтропия Шеннона $S^N[P]$. Под энтропией принимается мера хаотичности системы: чем меньше паттерны (элементы) системы подчинены какому-либо порядку, тем выше энтропия.

$$S[P] = -\sum P_i \log_2 P_i, \quad S^N[P] = \frac{S[P]}{S[P_e]}, \quad (1)$$

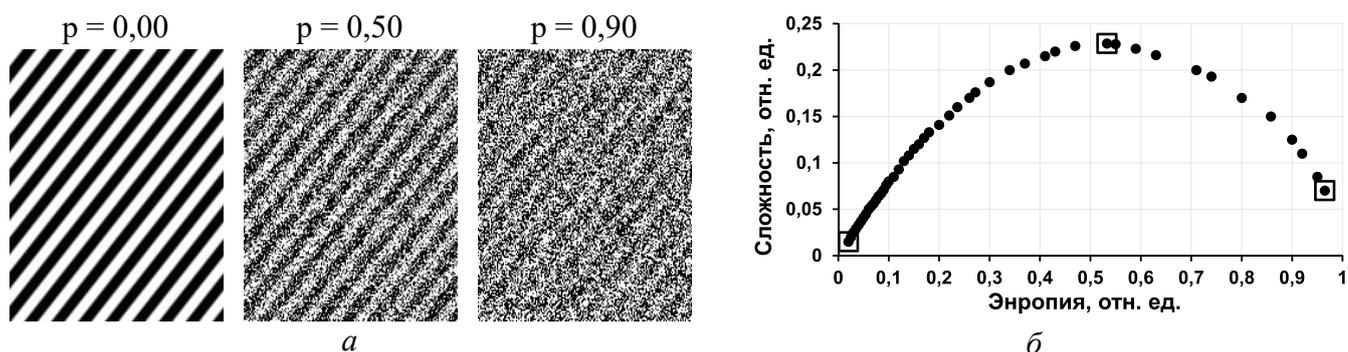
где P_i – вероятность i -го шпатель-признака, а $S[P_e] = \log_2 N$ – энтропия равномерного распределения P_e , в котором все шпатель-признаки представлены с равной вероятностью $P_i = 1/N$.

Понятие статистической сложности C вводится, как произведение энтропии на расхождение между наблюдаемым P и равномерным распределением P_e шпатель-признаков:

$$C = J[P, P_e] \cdot S[P] / S[P_e], \quad (2)$$

где $J[P, P_e]$ – расстояние между двумя распределениями, P – наблюдаемое и $P_e: \{P_i = 1/N \mid \forall i = 1, \dots, N\}$ – равномерное распределения.

Из введенного выше определения видно, что любой повторяющийся элемент структуры поверхности угля 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).



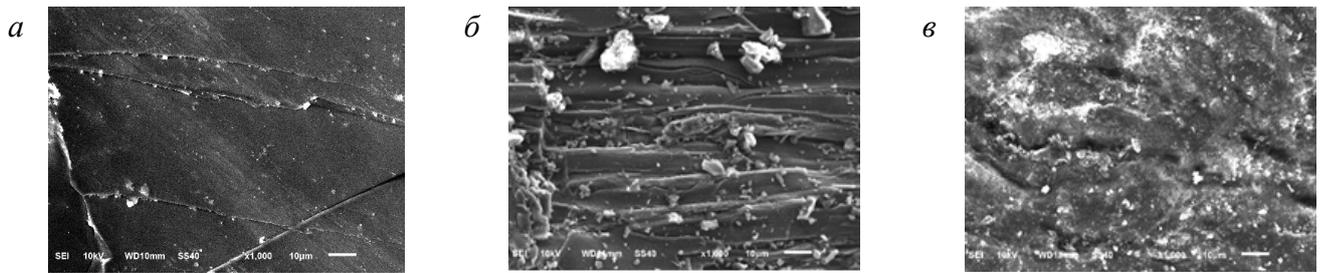
a – паттерн с различной вероятностью распределения пикселей (от структурированного до шума);

б – график функции изменения энтропии и сложности при “разрушении” паттерна.

Рисунок 3 – Постепенное изменение (“разрушение”) паттерна – узора полос

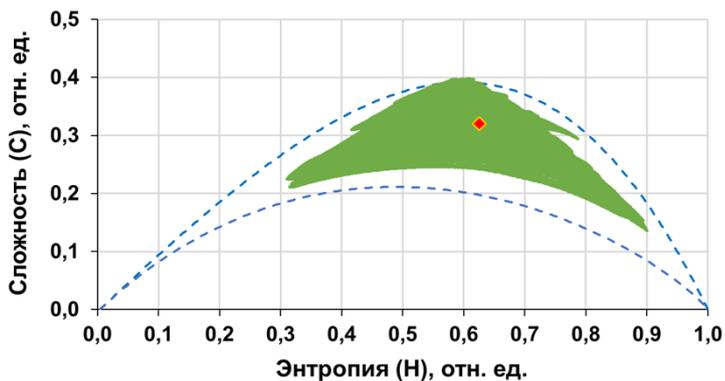
Так как нулевой сложности соответствуют и максимально упорядоченные структуры, и полностью хаотичные, а структура угля не бывает абсолютно упорядоченной, экспериментальных точек, лежащих в левой нижней части графиков «энтропия – сложность» (низкая энтропия, низкая сложность), быть не должно, но можно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

В работе исследовались пробы угля из областей, склонных к выбросоопасности, самовозгоранию, и из неопасных областей, а также из областей с известными значениями газоносности призабойной зоны пласта. 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 в системе координат «энтропия – сложность». Разброс полученных значений относительных энтропии и сложности, по всей поверхности одного цифрового изображения, достаточно велик: в среднем от 0,3 до 0,9 отн. ед. для энтропии и от 0,1 до 0,4 отн. ед. для сложности. Поэтому, для дальнейшего анализа рассчитывается среднее значение энтропии и сложности для каждого отдельного изображения, показанное красной точкой на рисунке 5.



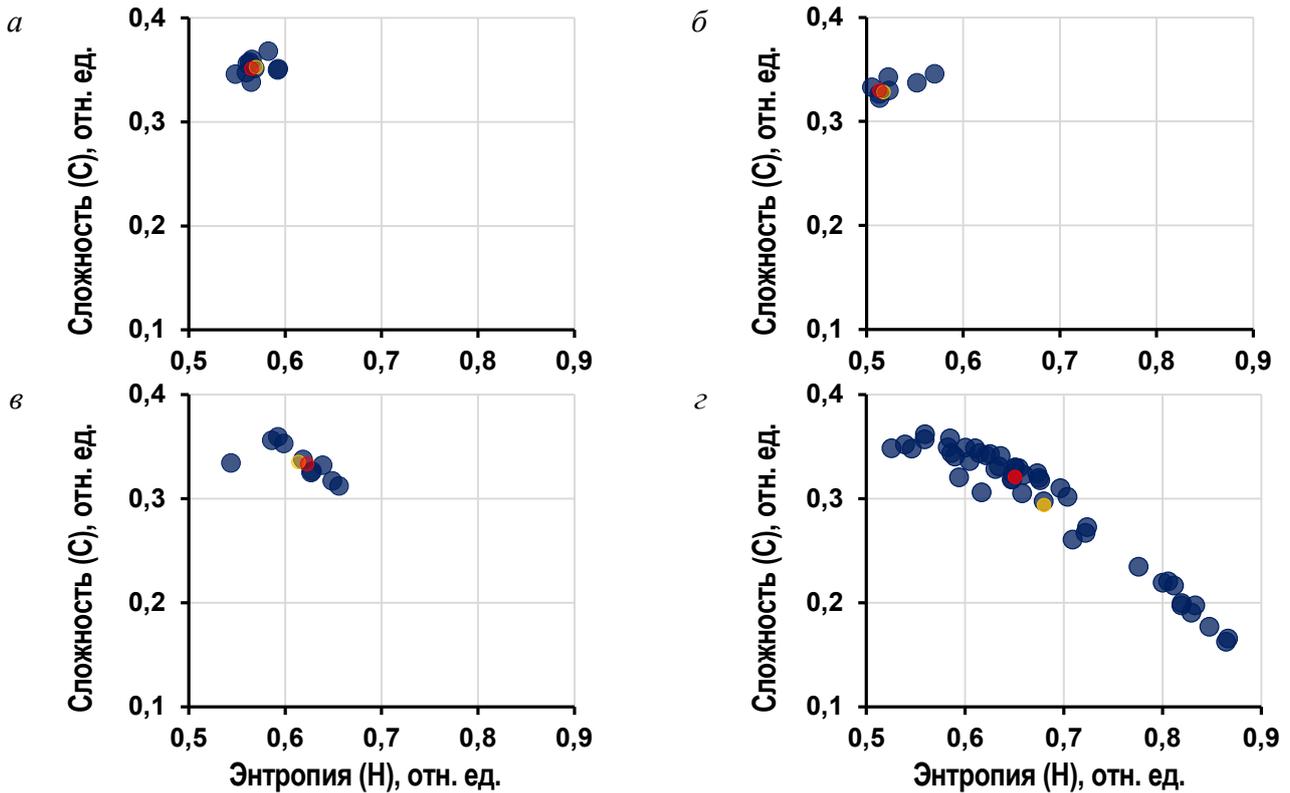
красная точка – среднее значение энтропии и сложности для конкретного цифрового изображения поверхности угля.

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

Определив таким образом средние значения «энтропия – сложность» для одного цифрового изображения, построены зависимости этих значений для серий снимков проб выбранных углей.

Анализ связи структурных особенностей с литотипом углей

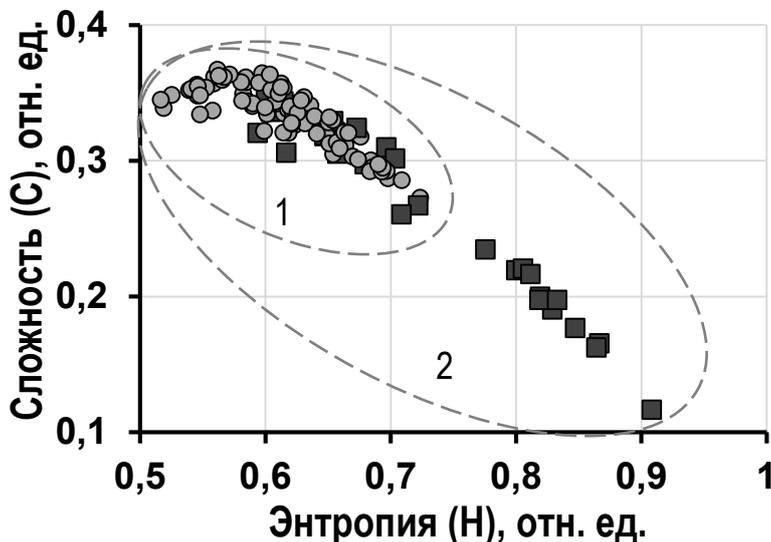
Сравнение микроструктурных особенностей двух основных петрографических составляющих угольного вещества – витринита и инертинита – показало, что распределение значений, характеризующих микроструктуру инертинитового мацерала угля (пробы угля с матовой поверхностью), практически одинаково для всех проб – как склонных к опасным явлениям, так и несклонных; как с высокой, так и низкой газоносностью призабойной зоны пласта (рисунок 6). Тогда как разброс значений «энтропия – сложность» для витринитовой составляющей углей (с блестящей поверхностью) – склонных к опасным явлениям, а также с высокой газоносностью существенно отличается от значений энтропии и сложности для углей несклонных, а также с низкой газоносностью (рисунок 6).



а, б – группа проб угля с матовой поверхностью; в, г – то же с блестящей поверхностью;
 а, в – группа проб углей несклонных к опасным явлениям и с низкой газоносностью $Q_{общ} < 5 \text{ м}^3/\text{т}$;
 б, г – группа проб углей склонных к опасным явлениям и с высокой газоносностью $Q_{общ} > 5 \text{ м}^3/\text{т}$.
 Рисунок 6 – Диаграммы значений «энтропия – сложность» цифровых изображений проб углей

Исходя из проведённых исследований, следует, что угли с высокой газоносностью призабойной зоны пласта и склонные к опасным явлениям, отличаются неоднородной (более хаотичной) микроструктурой витринитовой составляющей.

На рисунке 7 приведена диаграмма значений в системе координат «энтропия – сложность» по цифровым изображениям поверхности исследуемых проб угля. Оценка неоднородности (упорядоченности) пространственной ориентации элементов изображений разных групп демонстрирует их значимое разделение.



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

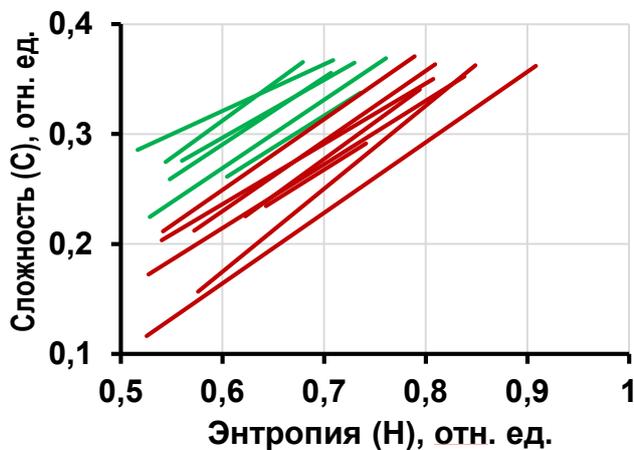
Рисунок 7 – Оценка степени упорядоченности пространственной ориентации элементов в системе координат «энтропия – сложность» по сериям микрофотографий

Таким образом, можно утверждать, что предложенная методика расчёта и построения диаграмм «энтропия – сложность» позволяет количественно оценивать особенности микроструктуры углей. Что доказывает **II защищаемое положение**.

В четвёртой главе показаны примеры применения методики определения неоднородности микроструктуры угля.

Анализ связи структурных особенностей углей с их выбросоопасностью

Расчёт информационных энтропии и сложности и построение диаграмм было сделано по цифровым изображениям естественной поверхности проб углей (рисунки 8, 9), полученных из несклонных и склонных к опасным явлениям зон выбросоопасного пласта, а также из выброшенного угля.



зелёные – угли несклонные к опасным явлениям и с низкой газоносностью, *красные* – угли склонные к опасным явлениям и с высокой газоносностью.

(примечание: на данном графике линии “развёрнуты” в целях наглядности)

Рисунок 8 – Группы диапазонов изменения энтропии и сложности исследованных проб углей

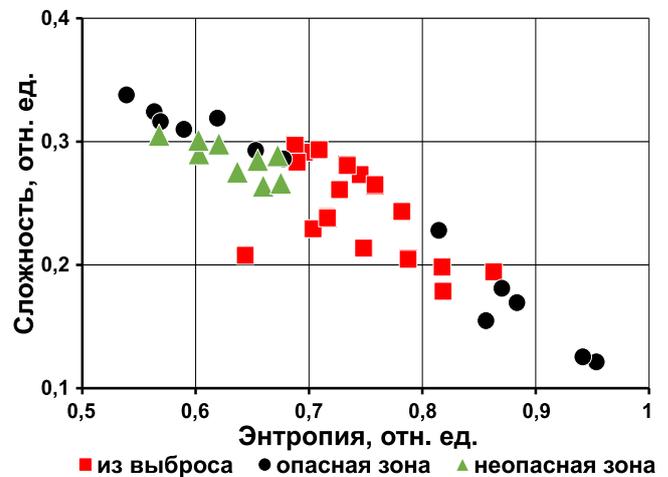


Рисунок 9 – Значения энтропии и сложности цифровых изображений поверхности углей: из выброса (*красный*) и из опасной (*черный*) и неопасной (*зелёный*) по выбросам зон пласта

Из полученных диаграмм зависимости «энтропия – сложность» (см. рисунок 9), отражающих особенности структуры проб углей из областей пласта разделяющихся по склонности к газодинамическим явлениям, видно, что разброс значений энтропии для проб из несклонной области находится в пределах значений 0,55 – 0,70 отн. ед., и значения сложности – 0,25 – 0,30 отн. ед. То есть структура угля неопасной области угольного пласта является более упорядоченной. Для проб из склонного к опасным явлениям участка значения «энтропия – сложность» разделились на две группы точек. Одна группа имеет значения «энтропия – сложность» аналогичные значениям для структуры проб из несклонной области, вторая – минимальные значения сложности 0,10 – 0,25 отн. ед. и максимальные значения энтропии 0,80 – 0,95 отн. ед., то есть степень упорядоченности этих

структурных элементов приближается к полному хаосу. Вероятно, именно сочетание высоко упорядоченных элементов с наиболее хаотичными структурами, приводит к тому, что в таких зонах создаются условия для повышения вероятности развязывания внезапных выбросов.

В выброшенном угле наиболее хаотично ориентированные элементы (неоднородные структуры в угле) со значениями энтропии 0,85 – 0,95 отн. ед., которые присутствуют в выбросоопасной зоне, исчезают, видимо, они подвержены наибольшему разрушению с образованием «бешеной муки» и уносятся газом при выбросе.

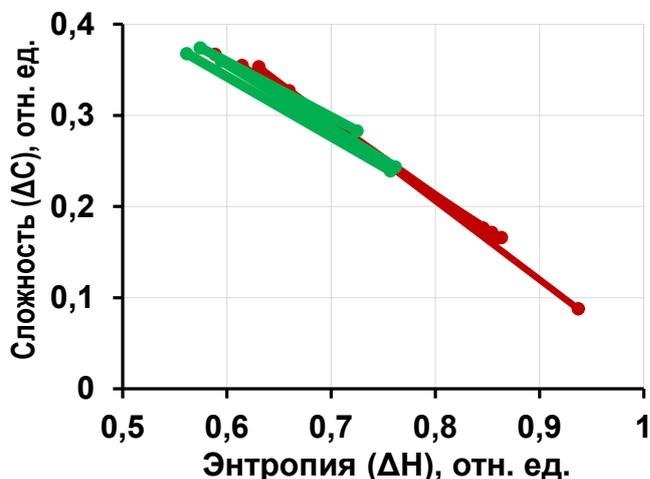
Оставшаяся часть угля из выброса в виде неразрушенных кусочков, позволивших провести их исследование, показывает несколько более упорядоченную структуру с энтропией 0,70 – 0,85 отн. ед. и сложностью – 0,18 – 0,30 отн. ед., но более хаотичную, чем уголь из зоны несклонной к выбросам, со значениями энтропии 0,50 – 0,70 отн. ед. Таким образом, были выявлены диапазоны распределения значений, характеризующих области в угольных пластах по склонности к опасным явлениям.

Наиболее упорядоченных структур с минимальными значениями энтропии в выброшенном угле также нет, вероятно, они просто не участвуют в выбросе. Минимальные значения энтропии, полученные для некоторых образцов угля из выбросоопасной зоны, могут быть также ошибкой первого рода, когда неопасные по выбросам ситуации ошибочно относят к опасным.

Анализ связи структурных особенностей углей со склонностью к самовозгоранию

Исследовались пробы каменных углей, отобранных из шахты «Комсомольская», пласт Четвертый и шахты «Воргашорская», пласт Мощный. Получено, что для углей несклонных к самовозгоранию диапазон значений энтропии H небольшой примерно 0,2 отн. ед., тогда как для углей склонных к самовозгоранию диапазон значений составляет примерно 0,4 отн. ед. (рисунок 10). Из полученных данных видно, что структура углей склонных к самовозгоранию представляет собой сочетание участков как со сравнительно упорядоченными элементами структуры (диапазон значений H от 0,5 до 0,7 отн. ед.), так и значительно более хаотично организованными структурными элементами (изменение значений H от 0,6 до 0,9 отн. ед.). При хаотичной организации микроструктуры угля, повышается его удельная поверхность, и контакт угля с кислородом происходит на большей площади, а также и лучшая доступность к разупорядоченным элементам угля вблизи поверхности, а большее

количество оборванных связей, являющихся сорбционными центрами, характерное для углей с неоднородной микроструктурой, способствует активной сорбции кислорода. Предположительно, эти факторы и способствуют развитию процесса самовозгорания угля. Угли несклонные к самовозгоранию обладают заметно более однородной микроструктурой.



зелёные отрезки – несклонные к самовозгоранию угли,
красные отрезки – склонные к самовозгоранию угли.
 Рисунок 10 – Группы диапазонов изменения значений энтропии и сложности исследованных проб углей, разделённых 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 зон в угольном пласте, плохо отдающих метан при естественной дегазации призабойной зоны пласта, а также зон пласта, склонных к выбросоопасности и к самовозгоранию по фактору микроструктуры.

Основные научные и практические результаты и выводы по данным работы 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, это 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 пласта 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 углей с наиболее хаотично организованной структурой, характерной для выбросоопасной зоны, не обнаружено, 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. Предположительно неоднородность микроструктуры может быть весьма важным фактором в прогнозе самовозгораемости, 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/FTRPI20190502.
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/FTRPI20200303.
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 // Углехимия 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, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов, Е. И. Зимакова : [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.

Пашичев Борис Николаевич

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать с оригинал-макета __.__.2026 г. Формат 60×84 1/16.
Бумага «Мега Сору Office». Печать офсетная. Набор компьютерный.
Объём 1,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № ____.

Издание Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук (ИПКОН РАН)
Крюковский тупик, 4, Москва, 111020
<https://ипконран.рф/>