

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР  
ИМ. АКАДЕМИКА Н.В. МЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПКОН РАН)

*На правах рукописи*



**Пашичев Борис Николаевич**

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

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

**Диссертация**  
на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Малинникова Ольга Николаевна,  
доктор технических наук

Москва – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Глава 1 Анализ состояния изученности вопроса склонности пластов каменного угля к газодинамическим явлениям и самовозгоранию в шахтах .....	12
1.1 Общие сведения о склонности угольных пластов к газодинамическим явлениям и самовозгоранию .....	13
1.1.1 Вопросы опасности возникновения внезапных выбросов угля и газа в угольных шахтах .....	14
1.1.2 Вопросы опасности метана в угольных шахтах .....	19
1.1.3 Вопросы опасности возникновения самовозгорания угля в угольных шахтах .....	20
1.2 Общие сведения о текущих нормативных методах прогноза опасности динамических явлений, применяемых в угольных шахтах .....	22
1.3 Анализ методов оценки склонности угольных пластов к газодинамическим явлениям и самовозгоранию .....	31
1.4 Цифровые методы определения микроструктурно-текстурных особенностей природных объектов .....	34
1.4.1 Фрактальный подход к информационной оценке сложности структуры природных объектов .....	34
1.4.2 Методы функциональных преобразований цифровых изображений ....	39
1.5 Выводы по главе 1 .....	42
Глава 2 Исследование связи нарушенности микроструктуры каменных углей с метаноносностью призабойной зоны угольного пласта .....	45
2.1 Описание объекта исследования .....	45
2.2 Определение газоносности призабойной зоны угольного пласта .....	49
2.3 Исследование молекулярной структуры угля методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР-метод) .....	52
2.4 ЭПР-исследования углей из неопасной области, выбросоопасного участка пласта и из зоны выброса угля и газа.....	64
2.5 Выводы по главе 2 .....	66

Глава 3 Исследование влияния неоднородности микроструктуры угля на склонность угольных пластов к удержанию метана .....	68
3.1 Основы метода сканирующей электронной микроскопии .....	68
3.2 Количественная оценка неоднородности структурных элементов природных объектов по изображениям их поверхности шиарлет-методом .....	70
3.3 Подготовка проб углей для лабораторных испытаний .....	75
3.3.1 Отбор пластовых проб углей из массива.....	75
3.3.2 Подготовка лабораторных проб углей для анализа .....	75
3.4 Исследование углей методом сканирующей электронной микроскопии ....	78
3.5 Исследование неоднородности микроструктуры каменных углей в результате обработки цифровых изображений их поверхности с помощью информационных энтропии и сложности .....	81
3.6 Исследование связи неоднородности структуры ископаемого каменного угля с его способностью к удержанию метана в призабойной зоне пласта.....	84
3.7 Анализ связи неоднородности микроструктуры угля с различными петрографическими литотипами каменных углей .....	89
3.8 Выводы по главе 3.....	94
Глава 4 Связь неоднородности микроструктуры каменных углей с их склонностью к внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию .....	96
4.1 Исследование связи микроструктурных особенностей каменных углей со склонностью пластов к внезапным выбросам угля и газа .....	96
4.2 Исследование связи микроструктурных особенностей каменных углей со склонностью пластов к самовозгоранию .....	103
4.3 Сравнение неоднородности микроструктур углей склонных с несклонными к самовозгоранию и к выбросоопасности .....	110
4.4 Расчёт статистических характеристик оценки массива данных .....	114
4.5 Выводы по главе 4.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	125
Приложение А .....	140
Приложение Б .....	147

## ВВЕДЕНИЕ

### **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 загазованность горных выработок, внезапные выбросы и других, 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 в научной среде.

Среди проводившихся ранее исследований можно выделить ряд направлений изучения особенностей свойств, структуры и состояния углеродного массива – от свойств самого массива: геологического строения, тектонической нарушенности, физико-механических свойств; в зависимости от литотипа угля и стадии углефикации; под влиянием изменений напряжённо-деформированного состояния углеродного массива; от газоносности призабойной зоны пласта и давления газа в углеродном массиве и других. В современный период всё чаще используются инструменты цифрового подхода, например, используя концепцию иерархической нарушенности геоматериалов, рядом авторов показана допустимость применения методов фрактальной и мультифрактальной геометрии к исследованию характеристик природных систем. В настоящее время распространение получили цифровые методы выделения анизотропных текстурных признаков природных объектов.

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, 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 шиарлет-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 снимкам поверхности углей, полученным 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 показатели – 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, 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 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, 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» (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 «Углехимия 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 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 аэrogазодинамика и горная теплофизика».

**Благодарности.** Выражаю искреннюю благодарность своему научному руководителю д.т.н. Малинниковой Ольге Николаевне, за ценные советы и наставления, которые были получены в период выполнения всей работы, а также за проявленные терпение и понимание. Также искренне благодарю ведущего научного сотрудника лаборатории № 2.1 д.т.н. Ульянову Екатерину Васильевну, за ценный обмен опытом при выполнении научно-исследовательских работ и подготовке публикаций, которым она делилась. Отдельно хочу поблагодарить ведущего инженера лаборатории № 2.1 Долгову Марию Олеговну и других коллег из отдела № 2 «Центра проблем метана и газодинамических явлений угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН за консультации по возникающим вопросам в ходе выполнения научно-исследовательской работы. Отдельную благодарность выражаю к.б.н. Браже Алексею Рудольдовичу, с.н.с. кафедры

биофизики МГУ им. М.В. Ломоносова, за познавательный доклад, сделанный в ИПКОН РАН и за демонстрацию математического аппарата шиарлет-преобразования в применении к анализу цифровых изображений, который в дальнейшем был применён мной при анализе своего исследуемого материала. Также благодарю всех, кто поддерживал меня в период выполнения научно-исследовательской работы и написания диссертации.

# Глава 1 Анализ состояния изученности вопроса склонности пластов каменного угля к газодинамическим явлениям и самовозгоранию в шахтах

*Проблема внезапных выбросов угля, пород и газов – одна из наиболее сложных проблем горной науки.*

*B.B. Ходом*

Данная глава носит вводный и обзорный характер. В первой части главы приводятся общие сведения о проблемах, связанных с метаноносностью пластов каменного угля и их склонностью к внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию в шахтах. Во второй части главы приводятся основные действующие федеральные нормы и правила (ФНиП), обязательные к исполнению на шахтах, и текущие нормативные методы прогноза опасности динамических явлений, применяемые в угольных шахтах, изложенные во ФНиП. В третьей части главы приводятся методы описания взаимосвязи параметров различных свойств углей с их склонностью к газодинамическим явлениям (ГДЯ) в шахтах, исследование проблемы склонности к выбросоопасности угольных пластов, исследование роли структурного фактора в проблеме прогноза опасности газодинамических явлений в шахтах. В четвёртой части главы приведено описание цифровых методов обработки данных, в частности, изложены основные положения теории фракталов и мультифракталов для естественных объектов, их применение для исследования пространственной структуры природных систем, и в том числе возможность их применения для исследования ископаемых каменных углей. Представлен обзор методов распознавания и преобразования пространственных данных и возможностей нового подхода – шиарлет-преобразования, для анализа геометрии изображений сложных природных объектов. В заключительной части главы формулируются выводы по главе и цель диссертационного исследования.

## 1.1 Общие сведения о склонности угольных пластов к газодинамическим явлениям и самовозгоранию

Уголь является важным источником энергии и основой производства ряда химических продуктов. Термохимические процессы преобразования угля сопровождаются молекулярной перестройкой его органического вещества и во многом зависят от его структуры, которая по-прежнему является объектом исследований из-за сложности строения и недостаточной информации о группировке основных элементов, входящих в состав органической массы угля [1]–[4], [5].

В долгосрочной программе развития угольной промышленности определено требование к снижению удельного показателя смертельного травматизма до уровня, не превышающего 0,05 чел./млн тонн угля. Для этого необходимо полностью исключить возникновение взрывов метана, вызванных загазованностью выработок при ведении подземных горных работ, которые приводят к большому числу жертв. Однако, как в России, так и за рубежом ещё недостаточно опыта работы современных высокопроизводительных шахт, отрабатывающих газоносные, тектонически нарушенные угольные пласти, разработка которых сопровождается высокой метанообильностью горных выработок, а иногда и их внезапной загазованностью. [6]

Проблема выявления и предупреждения газодинамических явлений (ГДЯ) в очистном забое и выработках угольного пласта до сих пор является актуальной научно-технической задачей. Несмотря на большое количество проводившихся исследований, связанных с этим вопросом, единой концепции, которая однозначно и достоверно могла бы увязывать определённые значения параметров свойств угля со склонностью или несклонностью участков угольного пласта к опасным явлениям, ещё не выработано.

### 1.1.1 Вопросы опасности возникновения внезапных выбросов угля и газа в угольных шахтах

Впервые случай внезапного выброса угля и газа был отмечен в 1834 году на шахте «Исаак», Лауровский бассейн во Франции. В последствии фиксацию таких происшествий стали вводить во всех угледобывающих странах, и к настоящему времени они зарегистрированы в Австралии, Болгарии, Бельгии, Германии, Великобритании, Венгрии, Франции, Канаде, КНР, Японии, Мексике, ЮАР, Турции, Чехии, Югославии, Польше, Болгарии, Румынии.

В России учёт таких событий начался с выброса угля и газа, который произошел на пласте «Смоляниковский» в 1906 году, шахта «Новая Смолка». В Советском Союзе фундаментальным и практическим изучением этой проблемы занялись отраслевые научно-исследовательские и проектно-конструкторские институты, многие лаборатории академических и кафедры учебных институтов.

В настоящее время ещё однозначно не выяснено, что является первопричиной внезапного выброса, однако большинство исследователей указывают на существенную роль газа при развязывании и протекании внезапного выброса. При типичном выбросе из угольного забоя в течение короткого времени может выделиться значительное количество газа, например, в Донбассе среднее количество выделившегося газа при выбросе составляет  $10'000\text{ м}^3$ , в Бельгии имели место выбросы с выделением  $500'000\text{ м}^3$ , в Британской Колумбии  $700'000\text{ м}^3$  метана. Скорость движения угля по выработке при выбросе превышает  $5\text{ м/с}$ , что говорит о существенном перепаде давления газа, поддерживающего это движение. Внезапные выбросы угля и газа проявляются с определённых глубин, которые тем не менее различны для не только для разных шахт, но даже для разных пластов одной шахты. Например, на пласте «Смоляниковском» внезапные выбросы происходят с глубины 575 м, пласте «Ливенский» шахты «Им. М.И. Калинина» с 365 м, на пластах «Андреевский» и «Дерезовка» шахты «Юнком» – с горизонта 181/256 м. Однако из приведённых выше сведений не следует, что если давление газа будет больше некоего «минимума», то там

обязательно произойдёт выброс. Состояние угольного массива зависит от множества горно-геологических факторов его формирования, поэтому и вероятность выброса обусловлена совместной работой ряда факторов.

Stassart S. и Lemaire E. в работе [7] обратили внимание на то, что внезапные выбросы угля и газа в пластах имеют приуроченность к малоамплитудным тектоническим геологическим нарушениям и повышенным остаточным напряжениям, под действием которых уголь в пластах был отработан.

Согласно современной общепринятой 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 (напряженное состояние массива горных пород), газоносность и давление газа в углепородном массиве и свойства самого массива (геологическое строение, тектоническая нарушенность, физико-механические и физико-химические свойства угля) [8]–[10]. Горное и газовое давление (или связанные с ними величины) обычно учитываются при прогнозе газодинамических явлений в шахтах, а таким свойствам угольного массива, как строение, нарушенность и минеральный состав углепородного массива уделяется значительно меньше внимания. А между тем, именно их особенностями можно объяснить тот факт, что, как показал статистический анализ большого объёма данных, явления внезапных выбросов угля и газа более чем в 90 % случаев происходят в забоях горных выработок в зоне влияния мелкоамплитудных пликативных и дизъюнктивных тектонических нарушений, но при этом отмечается, что только 5–8 % таких нарушений опасны по внезапным выбросам и горным ударам [11]–[13].

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 [14]–[19], но это не объясняет того, что большинство мелкоамплитудных нарушений никогда не дают выбросов.

Уголь обладает сложной блочно-трещиноватой, мелкопористой, сорбирующей структурой, поэтому исследование его вещества затруднительно, тем более исследование особенностей, приводящих к предрасположенности структуры угля к газодинамическим явлениям [20], [21]. Структурные и сорбционные свойства угля, способствующие формированию выбросоопасных участков в пласте, до сих пор являются предметом дискуссий среди учёных [14]–[17], [22]–[34]. Есть предположения, что выбросы связаны с такими факторами как литотип угля, в частности, с большим содержанием витрена и инертодетринита [15]. В работах [35], [36] авторы утверждают, что выбросоопасные зоны образуются за счёт содержания в них метана в форме кристаллогидратов.

В публикациях [29]–[33], [37] отмечается, что в результате ведения горных работ происходит превышение некоторого предельного уровня дефектности с инициацией деструкции связей по свободно-радикальному механизму (регистрируется по возрастанию количества парамагнитных центров (ПМЦ) в угле), названному механохимической деструкцией, что, по мнению авторов, и вызывает образование выбросоопасных зон. Начальный энергетический импульс, необходимый для инициирования механохимических превращений, система получает при изменении природного равновесного напряженного состояния [13]. Для подтверждения механохимической природы преобразования угольного вещества во время выбросов, в работе [38] серию угольных образцов подвергли механической обработке. Выход летучих веществ исследуемых углей до механической обработки были одинаковы, однако один из испытуемых образцов, в котором состав минеральных примесей и характер их распределения был аналогичен составу выброшенного угля, показал структурные изменения, близкие к наблюдаемым для углей из выброшенной массы. То есть авторы высказывают предположение об участии минеральных включений в образовании выбросоопасных участков в пласте за счёт их длительного воздействия на вещество угля. Процесс образования метана при механохимических реакциях,

происходящих в очаге подготовки внезапного выброса и продолжающихся при его развязывании, изложен в работе [39].

В работах [40]–[41] авторы, обратились к концепции иерархической нарушенности геоматериалов, исследовалась связь параметров структуры каменных углей с их склонностью к газодинамическим явлениям с помощью фрактальных и мультифрактальных характеристик. Важность учёта влияния структурных особенностей углей в формировании выбросоопасности пласта до сих пор изучается. Единой точки зрения на роль структуры угля в подготовке и развязывании газодинамических явлений всё ещё нет.

В 1991 г. совместным коллективом авторов из МакНИИ, ВНИМИ, ИГД им. А.А. Скочинского, ВостНИИ, Минуглепрома СССР, Госгортехназора СССР и Укркомгортехнадзора УССР изданы «Методические указания по классификации газодинамических явлений на угольных шахтах» [42]. В классификации изложены факторы, определяющие подготовку и развитие явления, характеристика и отличительные признаки, типичные условия возникновения, предупредительные признаки. Всего в издании приведено описание для 12 газодинамических явлений:

- суфляр,
- внезапный прорыв газа из зоны геологического нарушения,
- внезапное разрушение пород почвы с выносом метана и угля,
- внезапный выброс угля и газа,
- внезапный выброс породы и газа,
- а) внезапное обрушение (высыпание) угля с попутным газовыделением и б) обрушение нависающего массива угля,
- внезапное выдавливание (отжим) угля с попутным газовыделением,
- горный удар,
- толчок,
- стреляние,
- горно-тектонический удар,
- горный удар с разрушением пород (угля) почвы (кровли) выработки.

В ГОСТ Р 58150-2018 «Горное дело. Динамические явления в угольных шахтах. Термины и определения» редакция 2018 года, в частности приведено следующее определение:

*Внезапный выброс угля и газа – явление лавинно нарастающего смещения угля и газа под действием горного давления, заключенного в угле газа, сопровождающееся динамическим эффектом отброса угля на значительное расстояние и тонким его измельчением, необычно большим выделением газа в короткое время и образованием характерной полости [43].*

Согласно «Методическим указаниям ...» [42] явление характеризуется: быстрым протеканием по времени; разрушением (смещением) и отбросом горной массы и выделением газа в горную выработку на расстояние, превышающее протяженность размещения; образование в угольном пласте полости с устьем, меньше максимальной её ширины; наличием тонкодисперсной угольной пыли в разрушенном угле, повреждением крепи и оборудования, воздушными толчками, иногда опрокидывающими вентиляционную струю, звуковыми эффектами в массиве, повышенном газовыделении в выработку, при котором относительное газовыделение больше разности между средней природной газоносностью пласта и остаточной газоносностью выброшенного угля; связанное с поражением людей в результате выделившегося газа и механического воздействием выделившегося угля, нарушением технологического процесса в результате повреждения крепи и механизмов, а также разрушения забоя.

Стоит отметить, что в настоящее время подземная отработка угольных пластов ведется на больших глубинах, чем установленные глубины залегания, с которых угольные пласты относятся к категории «угрожаемый по внезапным выбросам угля и газа» ( $H_{выб}$ , м), указанных в таблице 3 приложения 3 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности [44]. Этот факт обязывает угледобывающие предприятия уделять особое внимание вопросам безопасности и, в частности, противовыбросным мероприятиям.

### 1.1.2 Вопросы опасности метана в угольных шахтах

Увеличение глубины ведения горных работ на шахтах Кузбасского, Печорского и Донецкого бассейнов влечёт за собой осуществление разработки угольных пластов в постоянно ухудшающихся горно-геологических условиях. Почти все действующие шахты Кузбасса, Печоры и Восточного Донбасса относятся к опасным по газу, увеличивается количество шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию угля, что предопределяет высокую угрозу аварийности работ на угледобывающих предприятиях.

Непрерывное выделение метана, происходящее при добыче угля, является причиной возникновения опасных ситуаций по фактору метана. Это может приводить к групповому летальному исходу. Только в XX веке от взрывов метановоздушных смесей погибли десятки тысяч шахтёров. Кроме того, выход большого объёма метана накладывает значительные ограничения на работу высокопроизводительных очистных комплексов.

Опасность угольного метана возникает особенно остро по мере углубления подземных горных работ. Так как горное давление и газоносность угольных пластов соответственно возрастают, то в результате этого метанообильность шахт также увеличивается. Так на глубинах  $500 \div 700$  м, в зависимости от степени метаморфизма, содержание метана в антрацитах и полуантрацитах составляет  $35 - 45$  м<sup>3</sup>/т, в тощих и жирных  $20 - 30$  м<sup>3</sup>/т, в газовых и длиннопламенных  $10 - 17$  м<sup>3</sup>/т, что пагубно сказывается на безопасности и эффективности ведения горных работ, а также ухудшает состояние окружающей среды [45].

После проведенных дегазационных мероприятий при разработке угольного пласта его метановыделение происходит после каждого шага заходки комбайна. Метан через свежеобнажённую поверхность выделяется в выработанное пространство, но часть его, иногда достаточно большая, остаётся в угле призабойной зоны пласта [46]–[48]. Этот метан может выделяться в выработки при разрушении угля комбайном, при транспортировке угля по выработкам, и должен учитываться при расчётах вентиляционных сетей. В том случае, когда уголь

призабойной зоны содержит большое остаточное количество метана, может быть спровоцировано газодинамическое явление [49].

Сам процесс выделения газа в призабойное пространство лавы определяется взаимовлиянием следующих факторов: природной газоносностью угольного пласта, различной способностью угля к удержанию и отдаче метана, обусловленной структурными особенностями и интенсивностью его добычи. Исследованием зависимости газонасыщенности угля от его сорбционных и фильтрационных характеристик занимаются давно [17], [33], [36], [50]–[52]. Несмотря на это, практика показывает, что наши знания о кинетике газоотдачи угольного пласта недостаточны для того, чтобы дать надёжный прогноз объёма и интенсивности выделений газа в горные выработки, из-за того, что взаимосвязи метана с углем, определяющие его сорбционные и газокинетические свойства ещё недостаточно изучены. Эти связи зависят от многих параметров. В исследовании ставится задача показать, что помимо объёма и распределения пустот (пор, микротрешин), газовыделение в ещё большей степени зависит от неоднородности структуры угля на микроуровне [53].

### **1.1.3 Вопросы опасности возникновения самовозгорания угля в угольных шахтах**

Самовозгорание углей создаёт серьёзные проблемы для угольной промышленности. Проблематичность явления состоит в том, что самонагрев угля вызывается его окислением при низких температурах и далее перерастает в самовозгорание угля. Необходимость нести затраты на проведение мероприятий по предотвращению самовозгорания угля является одной из основных проблем шахт, что приводит к повышению стоимости угля.

*Самовозгорание* – воспламенение горючего материала в результате его окисления кислородом воздуха независимо от притока тепла извне [54].

Из полезных ископаемых к склонным к самовозгоранию относятся все пласти бурого угля, пласти каменного угля, горючие сланцы, торф,

сульфидные руды, углистые аргиллиты, битуминозные породы и другие, на которых в любой части месторождения происходили эндогенные пожары. Критерием склонности является продолжительность инкубационного периода самовозгорания, по которому угли делятся на:

- весьма склонные – продолжительность менее 40 суток;
- склонные – продолжительность от 41 до 80 суток;
- несклонные – при продолжительности более 80 суток [55].

Изучением самовозгорания углей учёные занялись ещё с конца 19 века, но и по настоящее время не выдвинуто завершённой теории этого явления [56]–[79]. Несмотря на большое число исследований, существующие знания всё ещё не полностью удовлетворяют требованиям угольной промышленности [77]–[79]. Во второй половине XIX века имела признание пиритная теория самовозгорания углей и углистых пород. Предполагалось, что включения пирита в составе глинистых минералов угля и пород под действием кислорода воздуха и воды переходят в сульфат железа со значительным выделением тепла, под действием которого происходит разогрев угольного вещества. Однако с этих позиций не удавалось объяснить некоторые случаи самовозгорания, и пиритная теория была признана несостоятельной [62]. Утверждение, что самовозгорание угля обязано единственно присутствию пирита, отвергается многими авторами. С другой стороны, не отрицается тот факт, что присутствие пирита повышает склонность угля к самовозгоранию [80].

Явление самовозгорания угля возможно, как в шахтах, так и в отвалах и обеспечивается достаточный доступ воздушных масс к материалу. Самонагрев угля начинается, когда количество кислорода из воздуха оказывается достаточным для поддержания реакции между углем и кислородом. Влияние кислорода на уголь при низких температурах в целом экзотермично, и если тепло, получаемое при низкотемпературном окислении угля, недостаточно рассеивается в окружающую среду, то возникает повышение температуры внутри угольной массы [63]–[68], [80].

Тот факт, что самонагревание вызывается окислением угля и накоплением выделяющегося при этом тепла, является общепризнанным, однако конкретные условия и механизм этого процесса настолько изменчивы и ещё не ясны, что общехимические представления оказываются недостаточными, чтобы их определить. В этом причина того, что до сих пор невозможно с уверенностью прогнозировать и предотвращать самовозгорание углей. Промышленная практика показывает, что в большинстве случаев пожары в шахтах и на складах обнаружаются неожиданно [63], [80].

В ряде работ [67], [70]–[75] авторы анализируют известные и хорошо зарекомендовавшие себя методы определения и прогноза склонности угля к самовозгоранию. Сравнение методов ясно говорит о различии их в деталях, достоверности определения отнесения к категории опасности по самовозгоранию не только для разных угольных бассейнов, но и для разных месторождений. Отсутствие стандартного метода определения оставляет пространство для исследования этого опасного явления.

## **1.2 Общие сведения о текущих нормативных методах прогноза опасности динамических явлений, применяемых в угольных шахтах**

В данное время в России для обеспечения безопасности ведения горных работ на угольных шахтах приняты обязательные к использованию нормативные документы, касающиеся предотвращения и внезапных выбросов угля и газа, и самовозгорания:

- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах», приказ Ростехнадзора № 507 от 08.12.2020 г. [81],
- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений», приказ Ростехнадзора № 515 от 10.12.2020 г. [44],

- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по предупреждению экзогенной и эндогенной пожароопасности на объектах ведения горных работ угольной промышленности», приказ Ростехнадзора № 469 от 27.11.2020 г. [55].

Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» введены приказом № 507 от 08.12.2020 г., с поправками от 2022 г. [81]:

- устанавливают требования к промышленной безопасности и безопасности технологических процессов, а также локализации и ликвидации аварий;
- устанавливают работу Многофункциональных Систем Безопасности (МФСБ) шахт;
- условия безопасной подготовки и эксплуатации горных выработок;
- дополнительные требования к отработке пластов различными методами;
- допустимые концентрации газов, в том числе метана;
- дополнительные требования к разработке пластов, склонных к динамическим явлениям (ДЯ).

Также Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) приказом № 515 от 10.12.2020 г. введены Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» (далее – Инструкция) [44], устанавливающая:

- проведение на шахтах прогноза горных ударов, внезапных выбросов угля (породы) и газа, внезапных выдавливаний угля, внезапных динамических разрушений пород почвы;
- применение мер по предотвращению ДЯ;
- контроля эффективности применения мер по предотвращению ДЯ;
- проведение мониторинга массива горных пород при отработке угольных пластов, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа, и угольных пластов, опасных по горным ударам;
- расследование и учет ДЯ.

Пункт 3 оговаривает области применения Инструкции на четыре вида динамических явлений: горные удары; внезапные выбросы угля (породы) и газа; внезапные выдавливания угля; внезапные динамические разрушения пород почвы. Согласно пункту 7 Инструкции, для пластов угля устанавливаются следующие четыре категории опасности по динамическим явлениям, в частности, к выбросам угля и газа:

- склонные к выбросам угля и газа;
- угрожаемые по внезапным выбросам угля и газа;
- опасные по внезапным выбросам угля и газа (выбросоопасные);
- особо опасные по внезапным выбросам угля и газа (особовыбросоопасные).

К такой категории относят выбросоопасные угольные пласти в зонах: 1) активных по внезапным выбросам тектонических нарушений; 2) повышенного горного давления, осложнённого геологическими нарушениями; 3) перехода забоями подготовительных выработок линий, образованными проекциями вертикальных плоскостей краевых частей целиков или остановленных очистных забоев.

В практической работе предприятия пунктом 8 Инструкции установлены две категории склонности к ДЯ: «опасно» или «неопасно».

К категории «опасно» относят участки угольного пласта, на которых не исключена возможность проявления ДЯ.

К категории «неопасно» относят участки угольного пласта, на которых методами проведения прогноза, приведёнными в Инструкции, установлено, что на них исключена возможность проявления ДЯ.

При разработке проектной документации шахты, согласно пункту 10 Инструкции, должны учитываться результаты геодинамического районирования шахтного поля.

*Геодинамическое районирование участка недр* проводится в целях выявления блочной структуры массива горных пород, оценки его напряжённого и динамического состояний, выявление активных геодинамических зон [44].

Пункт 11 Инструкции устанавливает следующие виды прогноза:

- *региональный* прогноз – включает прогноз по данным, полученным при ведении геологоразведочных работ, и прогноз по непрерывным сейсмоакустическим наблюдениям;
- *прогноз перед вскрытием* угольных пластов горными выработками. При вскрытии: 1) пластов угля, склонных к внезапным выбросам угля и газа и (или) горным ударам; 2) горных пород, склонных к внезапным выбросам угля и газа и (или) горным ударам;
- *локальный* прогноз – проводится на склонных к горным ударам и на угрожаемых по внезапным выбросам угля и газа угольных пластах;
- *текущий* прогноз – проводится: 1) в опасных зонах на угрожаемых по внезапным выбросам угля и газа угольных пластах; 2) на участках угрожаемых угольных пластов, на которых установлены события, предшествующие ДЯ; 3) на опасных по внезапным выбросам угля и газа угольных пластах;

Инструкция предписывает выявлять для углей, склонных к проявлению газодинамических явлений, наиболее опасные области, в которых горные работы будут проведены в особо сложных условиях. Необходимо выделение таких зон:

- зоны угольных пластов, склонных к горным ударам;
- зоны повышенного горного давления;
- зоны влияния геологических нарушений;
- зоны расщепления угольного пласта;
- зоны, в которых горные работы проводятся в направлении на выработанное пространство;
- зоны, в которых горные работы проводятся в направлении на передовую выработку;
- участки отработки целиков;
- зоны на угольных участках, склонных к внезапным выбросам угля и газа;
- участки в пределах незащищённой нижней части горизонта.

Признаки динамических явлений и события, предшествующие внезапному выбросу угля и газа:

- быстропротекающее разрушение призабойной части угольного пласта;
- отброс угля от забоя на расстояние, превышающее протяженность его размещения под углом естественного откоса;
- образование в угольном пласте полости, ширина которой меньше её глубины;
- относительное газовыделение из разрушенного угля, превышающее его природную газоносность;
- воздушный толчок и звуковые эффекты;
- повреждение и (или) перемещение оборудования;
- наличие угольной пыли на откосе выброшенного угля и крепи горной выработки.

Предшествуют следующие события:

- удары, треск в массиве горных пород;
- выдавливание и высыпание угля из забоя, отслаивание кусков угля от забоя;
- вынос буровой мелочи и газа при бурении;
- выталкивание или втягивание бурового инструмента, его зажатие;
- уменьшение прочности угля, изменение его структуры;
- шелушение забоя.

**Метод текущего прогноза выбросоопасности угольных пластов по структуре угольного пласта.** Описание метода: выполняется поочередное выделение всех пачек пласта с измерением мощности с точностью до  $\pm 0,01$  м, и определяется среднее значение прочности угля ( $q_{\text{ср.уг}}$ ) прочностномером. Потенциально выбросоопасной считается угольная пачка или совокупность смежных пачек мощностью не менее 0,2 м, и средняя прочность угля которых  $q_{\text{ср.уг}} \leq 75$  у.е. В случае не выявления выбросоопасных пачек, участок угольного пласта на глубину 4 м считается неопасным.

**Метод текущего прогноза выбросоопасности угольных пластов по начальной скорости газовыделения из скважины.** Описание метода: осуществление текущего прогноза выбросоопасности угольных пластов

по начальной скорости газовыделения из скважины  $g_2$  проводится по результатам регулярных определений начальной скорости газовыделения  $g_2$ , л/мин. из скважин, пробуренных по углю. Участок угольного пласта относится к категории «опасно» при условии, что значение  $g_2$  на очередном интервале бурения превысило пороговое значение начальной скорости газовыделения  $g_{kp}$ , л/мин.

**Метод текущего прогноза выбросоопасности угольных пластов по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи из скважины.**

Описание метода: 1) определение начальной скорости газовыделения из скважины  $g_2$ , которое выполняется соответственно описанному ранее; 2) определение выхода буровой мелочи: скважины для определения выхода буровой мелочи бурятся по наиболее прочной пачке угольного пласта. Выход буровой мелочи определяется поинтервально с каждого метра бурения контрольной скважины. Выход буровой мелочи определяется мерным сосудом, шкала которого позволяет определять объём буровой мелочи с точностью не менее  $\pm 0,1$  л или её взвешиванием с точностью не менее  $\pm 0,1$  кг. После окончания бурения скважин по максимальной скорости газовыделения  $g_{max}$ , л/мин. и максимальному объёму буровой мелочи  $P_{max}^V$ , л/м определяется показатель выбросоопасности  $R$ , у.е.

**Метод текущего прогноза выбросоопасности угольных пластов по акустической эмиссии (АЭ) массива горных пород.** Описание метода: выполняется по числу импульсов АЭ, генерируемых при образовании трещин в массиве горных пород. Для текущего прогноза по АЭ используется аппаратура регистрации и передачи сейсмоакустического сигнала, состоящая из геофона и наземного технического устройства. Участок угольного пласта относится к категории «опасно», если относительное увеличение средней активности АЭ  $q_{AE}$ , % превышает пороговое значение относительного увеличения средней активности АЭ  $q_{AE\ por}$ , %.

**Метод текущего прогноза выбросоопасности угольных пластов по параметрам искусственного акустического сигнала.** Описание метода: искусственный акустический сигнал регистрируется геофонами, количество которых определяется в документации по проведению прогноза выбросоопасности. Прогноз выбросоопасности по параметрам искусственного акустического сигнала проводится с помощью программно-аппаратных средств, регистрирующих и автоматизированно обрабатывающих искусственный акустический сигнал, возникающий в массиве горных пород в процессе воздействия на забой горного оборудования. Искусственный акустический сигнал непрерывно обрабатывается в течение временных рядов, соответствующих циклам выемки угля в забое очистной выработки, и в забое подготовительной выработки. В случае отсутствия в нескольких последовательных циклах автоматизированной обработки искусственного акустического сигнала безопасным считается участок угольного пласта протяженностью не более 4 м от положения забоя, на котором была последний раз установлена категория «неопасно».

**Метод текущего прогноза выбросоопасности угольных пластов по данным, зарегистрированным системами аэрогазового контроля.** Описание метода: прогноз по данным, зарегистрированным системами АГК, проводится при проведении нисходящих подготовительных выработок буровзрывным способом на угольных пластах крутого залегания. Датчики, осуществляющие непрерывный контроль содержания метана и скорости (расхода) воздуха, устанавливаются на расстоянии от забоя выработки, при условии их работоспособности во время взрывных работ. Определение выбросоопасности происходит в зависимости от рассчитанного критерия – эффективной газоносности угольного пласта  $X_{\phi}$ , м<sup>3</sup>/т.

Для прогноза ДЯ допускается использовать не менее двух методов. Выбор метода осуществляется, исходя из присвоенной категории опасности.

Методы прогноза изложены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Методы прогноза динамических явлений в шахтах [43]

Угольные пласты	Участки	Вид прогноза	Методы прогноза
Склонные к внезапным выбросам	Забои подготовительных и вскрывающих горных выработок	Прогноз выбросоопасности	Прогноз по количеству выпукловогнутых дисков керна при бурении скважин.
Угрожаемые по внезапным выбросам	Вскрывающие горные выработки	Прогноз выбросоопасности	Прогноз выбросоопасности угольного пласта в месте вскрытия по: <ul style="list-style-type: none"> <li>• показателю выбросоопасности.</li> <li>• давлению газа в скважинах.</li> <li>• величине скорости газовыделения, одному показателю и коэффициенту крепости угля по Протодьяконову.</li> </ul>
	Забои очистных и подготовительных выработок	Локальный прогноз выбросоопасности	Прогноз по среднему показателю прочности угля.
Опасные по внезапным выбросам	Вскрывающие горные выработки	Прогноз выбросоопасности угольного пласта в месте вскрытия	В соответствии с главой IV Инструкции.
	Забои очистных и подготовительных выработок	Текущий прогноз выбросоопасности, в том числе с периодическим проведением разведочных наблюдений	Прогноз по структуре угольного пласта. Прогноз по начальной скорости газовыделения $g_2$ . Прогноз по начальной скорости газовыделения $g_2$ и выходу буровой мелочи. Прогноз по АЭ горного массива. Прогноз по параметрам искусственного акустического сигнала. Прогноз по данным, зарегистрированным системами АГК. Комплексный метод прогноза.
Особовыброс опасные	Забои очистных и подготовительных выработок	Горные работы проводятся с применением мер по предотвращению внезапных выбросов угля и газа.	

Также используется Руководство по безопасности «Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах», утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 7 декабря 2023 г. № 441.

Руководство содержит рекомендации по обеспечению требований промышленной безопасности при разработке подземным способом угольных пластов, склонных к динамическим явлениям. В частности, оно касается:

- организации работ по предотвращению динамических явлений;
- подготовки проектной документации по отработке угольных пластов, склонных к динамическим явлениям;
- ведения горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах;
- определения параметров мер по предотвращению динамических явлений;
- технологий работ, направленных на предотвращение динамических явлений;
- обеспечения безопасных условий труда работников при отработке склонных к динамическим явлениям угольных пластов;
- внедрения на шахтах новых методов прогноза и предотвращения динамических явлений;
- расследования и учета динамических явлений.

Статистика происходящих аварийных случаев на шахтах в результате действий опасных явлений говорит о снижении их числа. Это свидетельствует о положительном вкладе введённых методов прогноза и предотвращения в проблему безопасности ведения добывчных работ, однако пока не один из них, всё ещё не даёт стопроцентной гарантии прогноза опасного явления. Анализ текущих нормативных методов определения склонности пластов к опасным явлениям показывает, что все они не учитывают влияние структурных особенностей локального строения угля на микроуровне. Часть из них предполагает достаточно сложную процедуру интерпретации результатов, а некоторые носят весьма качественный характер определения выбросоопасности.

### 1.3 Анализ методов оценки склонности угольных пластов к газодинамическим явлениям и самовозгоранию

Интерес к исследованиям микроструктуры угля и определению её влияния на сорбционные [51], физико-механические [82], [83] и другие свойства продолжает расти. Особенности микроструктуры угля исследуются с использованием электронной микроскопии [84], компьютерной томографии [85], рамановской и инфракрасной спектроскопии [51], микроиндентирования [86]. Применение современных методов позволяет описать микроструктуру углей фрактальными моделями по распределению пор [84] и проницаемости [87] или моделью с частично перколяционными областями [88]. Однако ещё недостаточно изучено влияние микроструктуры угля на характер протекающих в нём процессов, а поскольку традиционные экспериментальные методы не могут непосредственно выявить микроструктуру угля [85], нужно искать новые методы исследования и описания особенностей строения угля на микроуровне и их связи со свойствами и состоянием углей на макроуровне [6].

Вопросами решения проблем предотвращения опасных явлений в угольных пластах занимались и продолжают изучать в таких научных центрах фундаментальных и прикладных исследований как: ИГД им. А.А. Скочинского, ИПКОН РАН, ВостНИИ, МакНИИ, МГГУ (НИТУ МИСИС), СПГУ, ЮРГПУ (НПИ), КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, ФИЦ УУХ СО РАН, ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН и др. Вопросами изучения причин возникновения опасных явлений на шахтах занимались многие учёные, среди которых значимый вклад внесли работы следующих учёных: 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. Отдельно стоит отметить современных исследователей: В.Н. Захаров, О.Н. Малинникова, Е.В. Ульянова, В.А. Трофимов, В.Н. Одинцев, И.Ж. Бунин, В.А. Бобин, К.С. Коликов, Т.А. Василенко. А также ряд иностранных учёных: Ван Кревелен Д.В. (Нидерланды), Стопс М. (Англия), Скочиляс Н. (Польша), ряд китайских учёных: Ван Чжи-ань, Чжицян Чжан, Синьян Ван и другие.

Учёными предлагались различные подходы к разработке физических основ прогноза и предупреждения опасных явлений в пластах угля. Например, одно из направлений основано на исследовании прочностных свойств угля, определяющихся распределением и частотой трещин, структурой и текстурой пласта, петрографическим составом и стадией метаморфизма. Чем однороднее угольный пласт, тем он прочнее.

В работе Г.Н. Фейта [89] используется методика исследования прочностных свойств углей, основанная на определении предела прочности проб (на разрыв, сдвиг, одноосное сжатие), и затем на построении огибающих предельных кругов напряжений (кругов Мора), с увязкой со степенью нарушенности углей по классификации Геологического института АН СССР. Были составлены «паспорта прочности» для углей Донецкого бассейна и Воркутского месторождения. В результате было установлено, что предел прочности на одноосное растяжение в 14–34 раза меньше предела прочности на сжатие для углей I–III степеней нарушенности, а для углей IV–V соответственно в 28–80 раза.

Угли I и II степени нарушенности – к этому типу углей относятся угли ненарушенного или слабонарушенного строения, блестящего или полублестящего вида. Обычно у этого класса углей имеются две системы трещин эндокливажа, перпендикулярных напластованию, с большими поверхностями стенок и одна параллельная напластованию, с полуматовыми поверхностями. Характер излома – неровный, ступенчатый или струйчатый. Уголь крепкий, раздавливается руками на кусочки [10], [21].

Угли III степени нарушенности – этот тип углей имеет сильно нарушенное строение. Уголь на вид тускло-свинцовый, имеет не менее трёх-четырёх систем трещин эндокливажа, поверхность струйчатая. Характер излома – по криволинейным плоскостям. Уголь довольно рыхлый, истирается пальцами в порошок [10], [21].

Угли IV и V степени нарушенности – к этому типу углей относятся угли весьма нарушенного строения, перетёртые. Они имеют блеск от полуматового,

реже тускло-свинцового, до матового с буроватым оттенком. Кливаж, ввиду сильно перемятоного строения, не различим. Характер излома мелкозернистый для углей IV степени и землистый для V степени нарушенности. Угли слабые, легко растираются пальцами до состояния пыли [10], [21].

В ИГД им. А.А. Скочинского был разработан экспресс-метод определения прочности углей по глубине внедрения стального конуса в пласт. Это позволило провести массовые замеры в натурных условиях на 75 шахтопластах 14 шахт Донецкого бассейна. Замеры прочности проводились на участках длиной  $20 \div 100$  м по простирианию и падению пласта, в пунктах наблюдений с отстоянием 1–2 м, по 5 определений, с усреднением для каждой пачки. При таком количестве измерений коэффициент вариации составил для крепких углей – 10 %, а для мягких – 20–30 %. Согласно полученным данным опасные по внезапным выбросам пласты имеют среднюю прочность  $32 \div 78$  единиц, средневзвешенная – 59 единиц, а неопасные  $52 \div 86$  единиц, средневзвешенная – 69 единиц. Кроме того, замечено, что большинство опасных по выбросам пластов имеют сложное строение и состоят из трёх и более пачек различной прочности, также у 83 % таких пластов присутствуют несколько мягких пачек угля или углистого сланца. Интересный результат показало определение среднего показателя изменчивости прочностных свойств пласта: у опасных пластов –  $1,7 \div 3,8$ , а у неопасных – не превышал 1,5. Использование такого показателя позволило наглядно выявить скачкообразную изменчивость свойств областей пластов, и оказалось полезно для оценки их выбросоопасности. Таким образом, в результате шахтных и лабораторных исследований прочностных свойств углей был сформулирован вывод о том, что пласты опасные по выбросам отличаются пониженнной прочностью, сложным строением, наличием мягких пачек, высокой изменчивостью прочностных свойств по падению и простирианию. Это было предложено использовать в качестве прогностических признаков научно обоснованной оценки выбросоопасности угольных пластов.

Авторами И.И. Аммосовым и И.В. Ереминым в труде [90] исследовалась связь характера трещиноватости со склонностью к опасным проявлениям

в угольном пласте. Отмечена важность преимущественного типа трещин, секущих уголь.

Основываясь на знаниях, полученных за последние десятилетия, вырисовалось новое представление о строении органической части угольного вещества. Исходя из этого, предполагается, что на микроуровне макромолекула угля представляет собой объединение групп атомов посредством химических связей в макромолекулярные образования, которые являются главными носителями химических свойств углей. Макромолекулярные образования силами физических связей объединяются в надмолекулярную структуру, в свою очередь, являющуюся носителем физических свойств углей [1], [36], [38], [91]–[93].

## **1.4 Цифровые методы определения микроструктурно-текстурных особенностей природных объектов**

Обзор современных подходов к геометрическому анализу визуальных данных показывает уверенный тренд в сторону применения компьютерных алгоритмов, основанных на различных математических аппаратах распознавания образов. Применительно к теме исследования представляют интерес те из них, которые позволяют проводить описание неоднородности материалов по цифровым снимкам их поверхности. Самыми известными являются методы, оперирующие понятиями фрактальной и мультифрактальной размерности и информационной энтропии. Оба эти понятия, пришедшие из разных разделов физики, описывают хаотичность, неоднородность поведения и состава системы.

### **1.4.1 Фрактальный подход к информационной оценке сложности структуры природных объектов**

В настоящее время теория фракталов и мультифракталов широко используется для описания формы природных объектов, в частности, анализа их структурных особенностей, и в том числе горных пород и массивов по изображениям их поверхностей.

Ранее зарекомендовавшие себя методы математического анализа природных объектов базируются на евклидовой геометрии и механике сплошной среды. Такие математические модели основаны на двух главных принципах: 1) породный массив – сплошная однородная среда; 2) функции, описывающие поведение среды – непрерывны и достаточно гладкие. Однако для корректного описания сложных объектов лучшим видится использование фрактальных множеств и детерминированного хаоса.

Понятие фрактала впервые введено франко-американским математиком Бенуа Мандельбротом (*Ph.D. Mathematical sciences Benoit B. Mandelbrot*) в книге «Фрактальная геометрия природы» [94] и ряде его работ, начиная с 1975 г. Принципиальной особенностью таких объектов является их изломанность, схожая с хаотической структурой и динамикой движения. Приобретшие популярность и обнаруживаемые в физических процессах и явлениях, геологических и геомеханических системах фрактальные структура и размерность являются единственными возможными и исчерпывающими характеристиками таких систем. Основы теории фракталов отражены в фундаментальных работах Б. Мандельброта, Е. Федера, М. Шредера и других.

Сам термин «фрактал» является несколько интуитивным понятием, и до сих пор нет его точного определения. Фрактал на латыни означает дробный, разбитый. Исследователь Мандельброт так назвал геометрические фигуры неправильной формы, где каждый фрагмент повторяется при уменьшении масштаба. Получается, что каждый фрагмент имеет своё повторение при уменьшении масштаба. Таким образом фигура обладает свойством масштабной инвариантности. Именно это свойство качественно отличает фракталы от диаграмм гладких функций. У таких функций, в случае уменьшения масштаба, фрагмент стремится к отрезку прямой или плоскости. Диаграммы гладких функций относятся к объектам с целочисленной размерностью, а размерность фракталов при использовании скейлинговой процедуры определяется как дробная. Фрактал – это ломанный или разбитый на фрагменты объект, имеющий дробную размерность.

Фракталы обладают перечисленными ниже свойствами:

- это множество с иррегулярной сложной структурой;
- это объекты с дробной пространственной размерностью;
- объекты обладающие самоподобием на разных ступенях иерархии.

*Фракталом* называется множество, размерность Хаусдорфа–Безиковича для которого строго больше его топологической размерности (формула 1.1) [94].

$$D > D_T, \quad (1.1)$$

где  $D$  – фрактальная размерность множества,

$D_T$  – топологическая размерность,  $D_T \in \mathbb{R}^E$ ,  $\mathbb{R}^E$  – множество вещественных чисел.

В разделах наук геологии и геомеханики фрактальность структур рассматривается как изменчивость строения, трещиноватости и блочности геологических материалов вследствие протекания тектонофизических и механических процессов в массивах горных пород, в которых возникают иерархии неоднородностей на различных масштабных уровнях.

Как отмечают авторы А.Ф. Булат и В.И. Дырда в работе [95] – неоднородность является одним из важных свойств геоматериалов, горные породы и в том числе уголь, сложены из пластов – блоков – отдельностей, на каждом уровне со своими различными свойствами. Конфигурация таких элементов кажется структурно-несвязной средой, разбитой системой стохастически или упорядоченно расположенных трещин и пор. Важной особенностью иерархичного дискретного и блочного строения геологических сред является их самоподобие, которое позволяет сопоставлять между собой разнородные свойства и процессы, находить методы их моделирования при переходе с одного масштабного уровня на другой. Прочность и разрушение твёрдых тел связаны со статистическим распределением неоднородностей, дефектов и трещин по масштабным уровням и характером перераспределения действующих на них напряжений [95]. Авторы указывают на то, что фрактальный подход в механике твёрдых тел, основанный на простых физических представлениях, без необходимости проведения множества дополнительных анализов о структуре материала,

позволяет решать различные научно-практические задачи. Для материалов с развитой дефектной структурой фрактальный подход позволяет учесть многоуровневый масштабный характер деформирования и разрушения элементарных связей. Наблюдаемые экспериментально поверхности излома или трещины весьма нерегулярны, процесс разрушения углепородного массива сопровождается каскадным переносом высвобожденной упругой энергии с больших масштабов на меньшие и, наконец, на микромасштаб, где происходит диссипация энергии и расходование её на образование разрыва химических связей.

В связи с вышеизложенным и работой [95] можно сказать, что прогнозирование разрушения угольного массива требует углубленного изучения особенностей неоднородности структуры угля на различных масштабных уровнях. Фрактальная геометрия – оптимальный инструмент для описания распределения трещин в процессе деформирования угля и выявления характерных масштабных блоков нарушенных элементов углей.

В работе [96] отмечается, что с увеличением степени нарушенности углей (от I к V степени) их поровая проницаемость и соответственно значение фрактальной размерности уменьшается, что говорит о более сложно протекающем процессе выделения метана, помимо фильтрации, идущей по отдельным макротрещинам. Авторы исследуют связь склонности углей к выбросоопасности по распределениям мультифрактальных спектров, рассчитываемых по микрофотографиям угольных образцов. В том числе используется критерий  $R_S$  – коэффициент асимметрии графиков мультифрактального спектра. Результаты исследований показали различия в асимметрии мультифрактальных спектров, рассчитанных по изображениям поверхности образцов углей. Симметричным по форме спектром фрактальных размерностей характеризуются ненарушенные угли, а нарушенные угли описываются спектром с асимметрией (рисунок 1.1). Авторы делают вывод о том, что структурная неоднородность углей из неопасных областей и зоны выброса находит своё отражение на спектрах распределения фрактальных размерностей, рассчитанных по изображениям угольных образцов из этих двух зон.

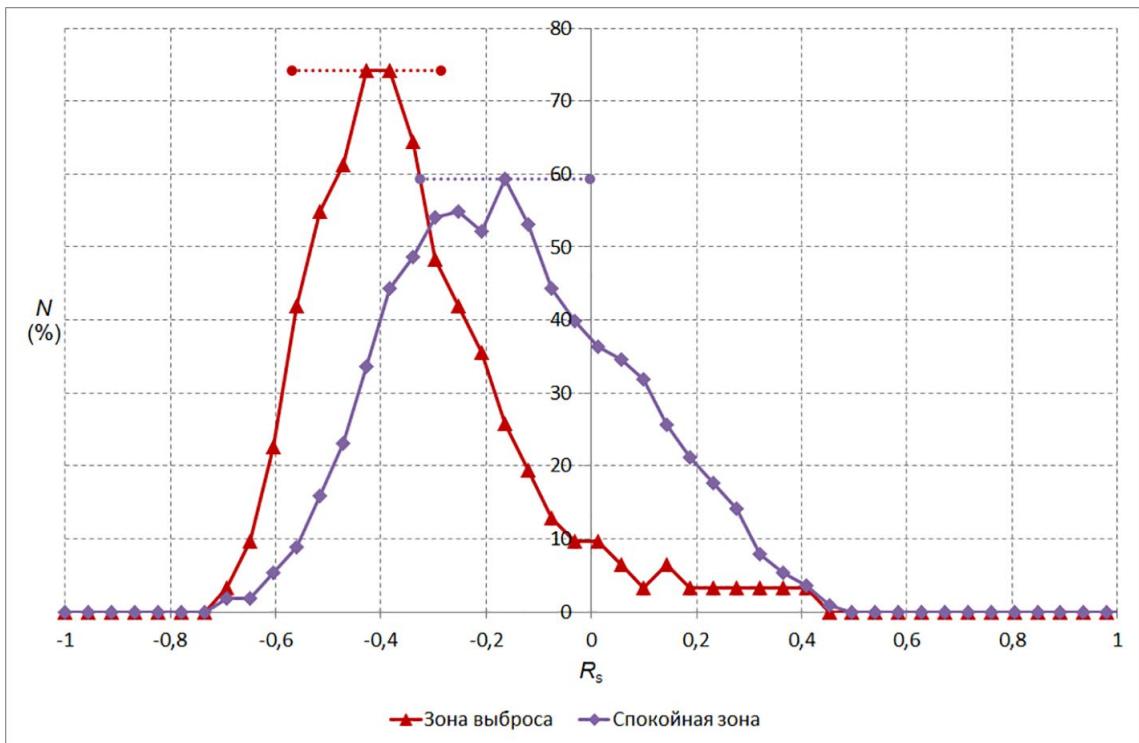


Рисунок 1.1 – Число  $N$  (в процентах) оценок  $R_S$ , рассчитанных для исследованных проб углей (более 140) методом ОЛГМФА [96]

Однако можно заметить, что фрактальный подход обладает некоторыми недостатками. Например, может иметь место случай, что угли с различной нарушенностью могут описываться близкими значениями фрактальной размерности их порового пространства. А также спектры значений мультифрактальных характеристик выбросоопасных и невыбросоопасных углей, представленных на рисунке 1.1 обладают большой зоной перекрытия. Также фрактальный подход не учитывает неоднородный характер пространственного распределения дефектов в углях, так как одни структурные блоки углей могут вносить большую информационную ценность, а другие не несут значимой нагрузки.

Структура углей изменчива, поэтому необходимо интенсивное использование вероятностно-статистических методов. Существуют фрактальные механические процессы особого рода, возникающие спонтанно – это горные удары, внезапные обрушения, выбросы угля, газа, породы. Для моделирования этих процессов требуется привлечение современных

вероятностных методов обнаружения и предвидения спонтанно возникающих и спонтанно затухающих эффектов.

С помощью теории детерминированного хаоса и фрактальных представлений появилась возможность попытаться оценить связь микроструктуры угля с его выбросоопасностью.

#### **1.4.2 Методы функциональных преобразований цифровых изображений**

Одним из самых популярных и действенных методов математической обработки цифровых изображений является гармонический (спектральный) анализ – метод Фурье-преобразования. Предложенный французским математиком Жаном Батистом Жозефом Фурье в его работе «Аналитическая теория тепла» (1822 г.) частотный метод обработки сигнала показал, что любая функция может быть представлена в виде суммы косинусов (синусов) различных частот, умноженных на некоторые коэффициенты. Периодическая функция может быть выражена в виде интеграла от произведения синусов (косинусов) на некоторую постоянную функцию. Важным достоинством этих преобразований является то, что исходная функция может быть восстановлена без потерь информации при помощи определенной процедуры обращения. Благодаря этому метод Фурье-преобразования применяется в самых разных областях науки: физике, оптике, статистике, комбинаторике, обработке сигналов, биологии, медицине, науках о Земле и других. С течением времени, у метода появились различные теоретические виды анализа и практические наборы реализаций обработки. Это стало как преимуществом, так и сложностью, ведь в таком случае метод нельзя назвать универсальным, перед исследователем стоит необходимость выбора конкретной вариации анализа и соответствующей алгоритмической реализации, с учётом особенностей самого изображения и морфологических признаков искомых объектов.

В течение последних двадцати лет, в связи с развитием цифровых технологий, в разных областях науки всё больше находят применение

различные методы «цифрового распознавания образов», превосходящие Фурье-преобразование. Такие методы позволяют проводить анализ и обработку массивов многомерных данных и последующее разделение изображения на морфологические составляющие по определённым признакам. В развитии подхода исследователи предлагали всё более усовершенствованные методы выделения анизотропных объектов, такие как: направленные вейвлеты, комплексные вейвлеты, контурлеты, кёрвлеты, а также шиарлет-преобразования данных.

Вейвлет-анализ явился дальнейшим шагом и расширением возможностей Фурье-преобразования. Метод получил широкое распространение в различных областях знаний от интерпретации сигналов до распространения волн в океане, поскольку обеспечивает оптимальное разложение для анализа изотропных сигналов, но выбор конкретного типа вейвлет-функции также зависит от анализируемого объекта и от выбора исследователя. Кроме того, для описания анизотропных структур вейвлет-анализ плохо пригоден, поскольку вейвлет-функция определяется двумя параметрами – масштабом и переносом, и для качественного анализа природных объектов необходимо использовать достаточно сложную вейвлет-функцию.

Использование кёрвлетов (следующий этап в развитии методов описания цифровых изображений) эффективно при изучении анизотропных свойств объектов и работе с краевыми эффектами цифровых изображений, поскольку определяется тремя параметрами – масштабом, переносом и углом ориентации в пространстве и обеспечивает оптимальное разложение криволинейных структур.

Новым уровнем обработки изображений стало шиарлет-преобразование (*shearlet*), математический аппарат которого хорошо подходит для анализа сложных сигналов различных физических сред и моделей. Шиарлет-преобразование эффективный инструмент, обеспечивающий единую систему обработки данных, как дискретного, так и непрерывных областей изучаемого изображения, анализирующую масштаб, пространство и направление для учёта анизотропных свойств исследуемого объекта. В отличие от вейвлетов

или кёрвлетов, система шиарлетов обладает возможностью определения направленности благодаря дополнительно введённому параметру сдвига (рисунок 1.2). Шиарлеты обладают набором характеристик, выгодно выделяющих их на фоне других функций, используемых для аналогичной обработки изображений: конечное число порождающих функций; оптимальное представление анизотропных характеристик анализируемых данных; быстрая алгоритмическая реализация; единый подход к разложению непрерывных и дискретных данных [97]. Указанные свойства повышают эффективность аппроксимации пространственно распределённых неоднородностей. Алгоритмические расчётные схемы шиарлет-преобразования опираются на хорошо разработанную теорию анализа данных предыдущих методов и являются её естественным расширением.

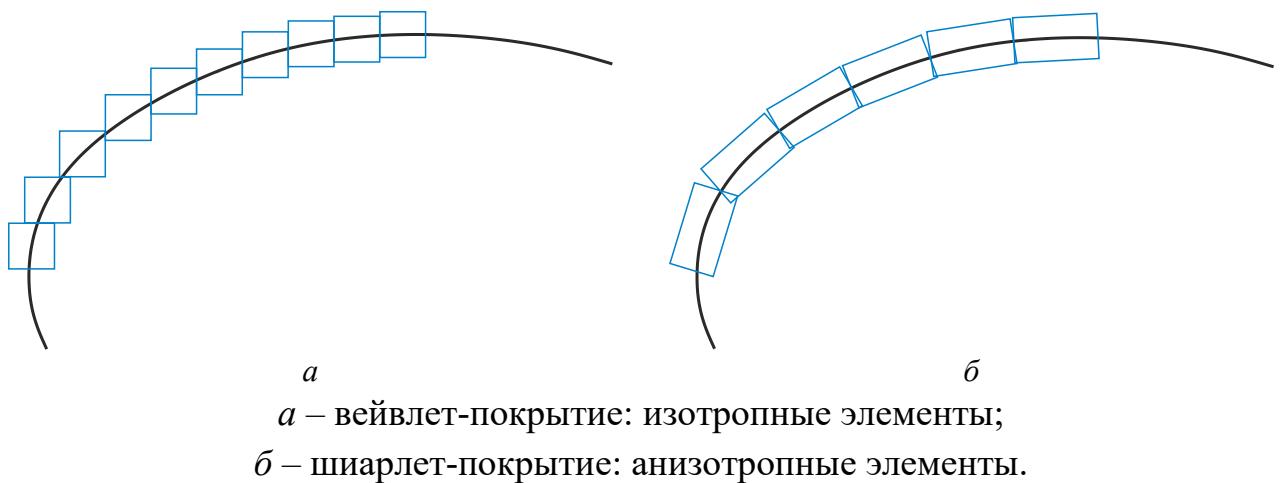


Рисунок 1.2 – Представление описания криволинейной функции методами вейвлет- и шиарлет-преобразования

Предложенный метод шиарлет-преобразований рассматривается как эффективный метод для описания пространственных индивидуальностей изображений, определяющий направления, такие как края, углы, текстуры и, в более общем смысле, структуры, характеризующие двумерные изображения.

В работе автора Ribeiro H.V. и др. [98] предложен практический метод оценки пространственной сложности двухмерных паттернов (элементов структуры) цифровых изображений, основанный на пермутационной энтропии (основанной

на сравнении соседних значений), изначально введенной для 1D-сигналов [99] и на величине статистической сложности, определяемой как произведение относительного расхождения Йенсена-Шеннона и относительной энтропии, подхода, разработанного в работе Bandt C. and Pompe B. [13], [100]. В 2018 г. А.Р. Браже (МГУ им. М.В. Ломоносова) в работе [101] предложил переработанный математический аппарат, построенный на статистическом анализе направленных многомасштабных коэффициентов шиарлет-преобразования с алгоритмической реализацией, расчёта величин пространственных информационной энтропии  $H$  и статистической сложности  $C$ .

Неоднородность, хаотичность структуры углей находит своё отражение в рельефе изломов естественной поверхности угольных образцов, что позволяет при исследовании их микроструктуры использовать информацию, полученную по цифровым изображениям их поверхности, сделанных сканирующим электронным микроскопом [6].

Получаемые в последний период экспериментальные результаты исследований в области биомедицины демонстрируют эффективность применения математического аппарата шиарлет-преобразования для анализа сложных биологических систем. Таким образом, анализ теории шиарлет-преобразования, свидетельствует о том, что с помощью этого метода может решаться задача геометрического разделения объектов разной формы с учётом анизотропных свойств исследуемой среды по цифровым изображениям.

## 1.5 Выводы по главе 1

В данной главе описано современное состояние исследований, посвящённых проблеме склонности пластов каменных углей к газодинамическим явлениям и самовозгоранию в шахтах. Эти вопросы уже давно занимают особое место в горной науке, поскольку возникновение опасных явлений зачастую носит внезапный и катастрофический характер. В связи с чем промышленным предприятиям требуются методы более качественного прогноза таких явлений.

Из проведённого литературного анализа можно сделать следующие выводы:

- существующие нормативные методы прогноза газодинамических явлений хотя и позволили снизить количество происходящих аварий, вызванных ГДЯ, но всё ещё не обеспечивают стопроцентной гарантии безопасности ведения горнопроходческих работ;
- фактор структуры, при безусловном влиянии текущих геологических условий (горное и газовое давление, температура, тектоника), оказывает существенное воздействие на формирование опасных участков в угольном пласте;
- в процессе изучения влияния структуры угля исследователи, предлагающие новые подходы, последовательно переходили от макроуровня (макротрешиноватость, блочное строение) на более глубокие уровни, и сейчас актуальные исследования ведутся на микронном и атомарном уровнях;
- в результате анализа выявлены плюсы и минусы различных подходов к исследованию микроструктурных особенностей природных объектов.

Одним из современных трендов научных исследований является анализ структуры вещества на микроуровне, в том числе заключающийся в выделении структурных особенностей методами обработки цифровых изображений. Путь решения поставленной задачи по выявлению особенностей микроструктуры угля, влияющих на склонность пласта к опасным явлениям, видится целесообразным вести, применяя методы оценки структурной нарушенности. Из обзора следует, что для анализа электронного изображения природного объекта хорошо подходят шиарлеты. Метод позволит описать пространственные структуру поверхности угля, используя два показателя – пространственные информационную энтропию и статистическую сложность.

Исходя из проведённого обзора, сформулированы цель, идея и задачи исследования:

Целью работы является оценка влияния структурных особенностей угля на микронном уровне на его склонность к выбросоопасности и самовозгоранию в угольных пластах, 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 неоднородности микроструктуры 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 информационной энтропии и статистической сложности (диаграммы «энтропия – сложность») для дифференцирования углей по склонности к опасным явлениям в шахтах.

## Глава 2 Исследование связи нарушенности микроструктуры каменных углей с метаноносностью призабойной зоны угольного пласта

Во второй главе исследуется связь склонности угля к опасным динамическим явлениям в присутствии газа со структурой надмолекулярного уровня. Для этого был применён метод ЭПР-спектроскопии, при помощи которого была рассчитана численность парамагнитных центров (ПМЦ), содержащихся в пробах углей, отобранных в пластах разной газоносности и разной склонностью к проявлениям опасных явлений. Выявленная связь количества ПМЦ, содержащегося в структуре угля, со свойствами пласта и газоносностью призабойной зоны пласта, позволила установить взаимосвязь между строением его молекулярной структуры и склонностью угля к опасным явлениям.

### 2.1 Описание объекта исследования

В работе исследовались пробы угля из основных разрабатываемых угольных бассейнов России: Донецкого, Печорского и Кузнецкого (таблица 2.1), представленных марками Д, Г, ДГ, Ж.

Считается, что уголь – это твёрдая горючая осадочная порода, которая образовалась при переработке отмерших растений вследствие биохимических, физико-химических и физических процессов [102].

Таблица 2.1 – Перечень использованных проб угля

Журнальный номер образца	Место отбора проб				Дата отбора
	Бассейн	Шахта	Пласт	Выработка	
114	Кузнецкий	Усковская	пласт 50	лава	12.03.2016
117	Кузнецкий	Осинниковская	К-5 Магистральный	лава	12.03.2016
118	Кузнецкий	Осинниковская	К-5 Магистральный	лава	12.03.2016

## Продолжение таблицы 2.1

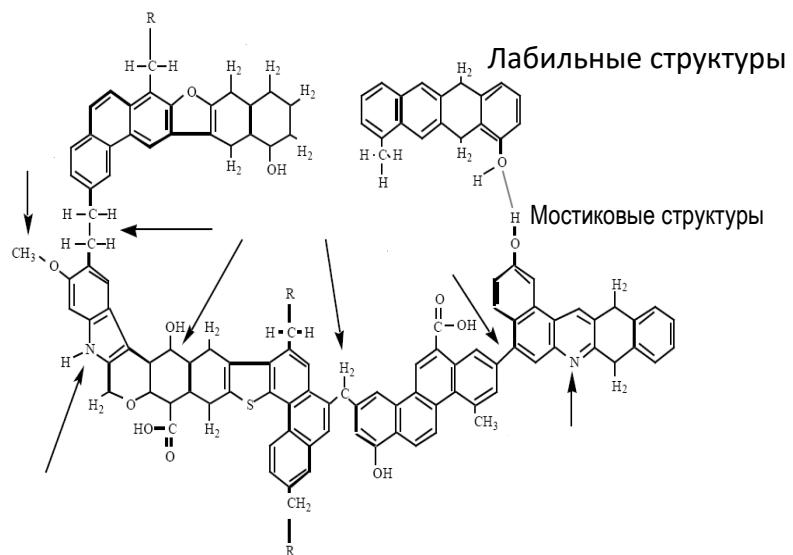
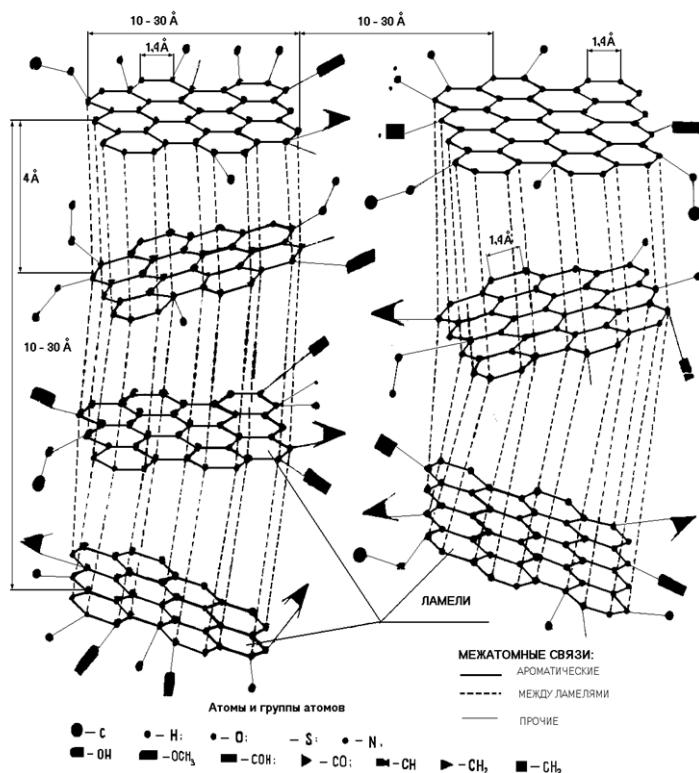
Журнальный номер образца	Место отбора проб				Дата отбора	
	Бассейн	Шахта	Пласт	Выработка		
124	<b>Кузнецкий</b> , Ерунаковский р-н, Талдинское м/р	Талдинская-Западная 2	разрез Заречный	лава	12.03.2016	
140	<b>Печорский</b> , Воркутинский р-н, Воркутское м/р	Заполярная	Тройной	лава	12.04.2017	
179	<b>Донбасс</b>	имени академика А.А. Скочинского	Смолянино вский	лава	22.02.2018	
180				лава	22.02.2018	
181				лава	22.02.2018	
182				лава	22.02.2018	
183	<b>Печорский</b> , Воркутинский р-н, Воркутское м/р	Комсомольская	Четвертый	лава	12.03.2018	
184				лава	12.03.2018	
185				лава	12.03.2018	
192				лава	12.03.2018	
193	<b>Печорский</b> , Воркутинский р-н, Воргашорское м/р	Воргашорская	Мощный	лава	29.05.2018	
195				лава	29.05.2018	
196				лава	29.05.2018	
197				лава	14.06.2018	
198				лава	14.06.2018	
213				проходка	22.03.2019	
220			Поленовский	выработка КП 25-97	03.04.2019	
222	<b>Кузнецкий</b> , Ленинский р-н, Ленинское м/р	имени С.М. Кирова		лава 25-97, секция 58/174,	29.05.2019	
233				лава 25-97	14.05.2020	
235				путевой штрек 25-04	28.05.2020	
236				ВП 25-98	28.05.2020	
237				ВП 25-98, люков. печь 15	28.05.2020	
228	<b>Кузнецкий</b> , Ленинский р-н, Ленинское м/р	имени С.М. Кирова	Болдыревский	лава	17.06.2020	
253				ЦМКШ, 24-03 МТ 1491	22.09.2020	
256				лава 24-63, ВШ 24-63	08.04.2021	
261				24-64 КП, МТ1530 + 100 м	24.06.2021	

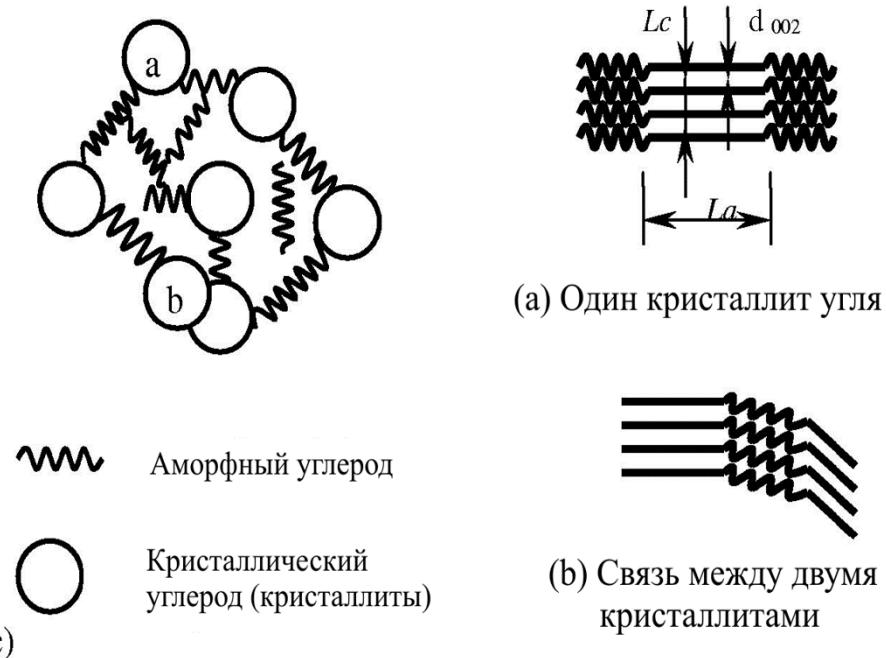
## Продолжение таблицы 2.1

Журнальный номер образца	Место отбора проб				Дата отбора
	Бассейн	Шахта	Пласт	Выработка	
234	<b>Кузнецкий, Ленинский р-н, Егозово-Красноярское м/р</b>	имени А.Д. Рубана	Полысаевский	лава	21.05.2020
248				ПШ 809, уч. Благодатный	23.12.2020
214	<b>Кузнецкий, Ленинский р-н, Егозово-Красноярское м/р</b>	имени А.Д. Рубана	Полысаевский-2	лава	22.03.2019
221				лава 814	15.05.2019
238				лава	17.06.2020
249	<b>Кузнецкий, Ленинский р-н, Егозово-Красноярское м/р</b>	имени 7 ноября – Новая	Сычевский	вент. штрек 26-8	13.11.2020

Исследование молекулярной структуры ископаемых углей представляет собой сложную задачу вследствие совокупности изменений, происходящих в них в результате непрерывного изменения на различных стадиях углеобразовательного процесса. Исследования природы углей не могут не охватывать вопросы их химического состава, которые также связаны с изучением геологической обстановки залегания угольного пласта.

Многие исследователи пытались выяснить, что из себя представляет микроструктура угля. В настоящее время считается, что в угле присутствуют графитоподобные структуры (кристаллиты), представленные бензольными кольцами, то есть сопряжённые (ненасыщенные) связи ( $-C=C-C=C-C-$ ) ароматической составляющей и аморфные составляющие. Дальнейшие исследования показали также наличие алифатической и алициклической насыщенных и ненасыщенных структур. На рисунке 2.1 показаны схематические модели угольной структуры, на рисунке 2.1 в, состоящая из графитоподобных образований и аморфных насыщенных или ненасыщенных структур.

*a – модель Deno N.C. (1981 г.)**б – модель Касаточкин (1952 г.)*



$\epsilon$  – схематическая модель, предложенная Curry K.W., Ли L. (2001 г.)  
Рисунок 2.1 – Модели структуры угля, предложенные как итог проведенных рентгеновских исследований в 20-ом веке [103]

## 2.2 Определение газоносности призабойной зоны угольного пласта

Выход метана из угольных пластов в призабойное пространство лавы определяется, в значительной степени, природной газоносностью массива угля, а также скоростью его разработки в очистном забое [104]–[106]. Газовыделение в выработке при разрушении и транспортировке угля зависит от газонасыщенности призабойной зоны разрабатываемого пласта. Это зависит от того, какое количество метана удерживает уголь вблизи обнажения. Несмотря на метановыделение, содержание метана в угле может быть значительным [107]. Содержание газа в призабойной зоне пласта влияет на загазованность выработок при ведении добывчих и проходческих работ, что, в свою очередь, влияет на режимы работы вентиляции и общий газовый баланс участка при разработке призабойной части массива угля и его транспортировке по выработкам [46], [108].

Угли Кузбасса, несмотря на тенденцию к повышению газоносности с увеличением глубины, различаются по способности к удержанию и отдаче метана. Причиной такого различия является разная связь метана с угольным веществом, что приводит как к различной природной газоносности, и,

как следствие, к различной газонасыщенности призабойной зоны пласта [33], [36], [50], [109], [110]. Хотя связью метана с углем занимались многие исследователи, этот вопрос ещё недостаточно изучен. Исследования в этой области сосредоточены на изучении сорбционных и газокинетических свойств угля и зависимости газонасыщенности от распределения пустот (пор, микротрешин), наполненных газом [17], [33], [51], [106]. При этом очень немногие работы исследуют влияние неоднородности структуры угля на микроуровне [52], [111].

Обычно газоносность пласта определяется не только на стадии геологоразведки, но также по мере разработки угольных пластов. Полученные данные газоносности месторождений ложатся в основу прогноза метанообильности горных выработок. Тем не менее распределение метана в угольных пластах имеет настолько сложный характер, связанное с природными особенностями месторождений, что эта особенность углей делает полученные представления о пространственном распределении метанообильности отрабатываемого блока угольного пласта приближенными и схематичными.

Поэтому достоверные сведения о природной газоносности угля в призабойной зоне пласта в прямой близости от его обнажения, учитывая его частичную дегазацию, можно получить только лишь при измерении этих параметров в разрабатываемых очистных и проходческих забоях (таблица 2.2.).

Для измерения таких параметров в ИПКОН РАН была разработана методика, позволяющая определить газоносность угля непосредственно в близости от обнажения разрабатываемого угольного пласта. Эта методика легла в основу Руководства по безопасности, утвержденного Ростехнадзором [112]. Для осуществления контроля за газоносностью проводится отбор угольных образцов в герметичные пластиковые контейнеры и (или) в керноотборники. По методике определение объёма полного газовыделения из угольного керна происходит в три этапа: первый этап – это измерение объёма газа, который выделился из угольного керна непосредственно в шахте (обязательно учитывается объём рассчитанного газа, «потерянного» при выбуривании керна) –  $V_1$ ; второй этап – объём газа, который выделился из контейнера непосредственно

в лаборатории при атмосферном давлении –  $V_2$ ; третьим этапом определяется газ, полученный при выделении его из угольной пробы посредством измельчения её в герметичной мельнице до крупности 0,05 мм –  $V_3$ .

Таблица 2.2 – Параметры значений газоносности призабойной зоны угольных пластов в 2019 г. на шахтах Кузбасса

Участок	№ п/п	$V$ , мл	$V$ , мл	$V$ , мл	$W^a$ , %	$A^d$ , %	B			
							$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_{oi}$
03.04.2019, шахта им. С. М. Кирова, Поленовский										
КП 25-97	1	818	1376	790	4,4	3,8	1,02	1,70	5,31	8,0
	2	186	1270	918	2,2	3,4	0,20	1,34	6,22	7,8
	3	804	2568	909	3,3	10,0	0,56	1,78	6,47	8,8
	4	2455	1160	855	4,4	3,8	5,23	2,47	5,75	13,5
	5	491	720	990	2,2	3,4	2,16	3,17	6,71	12,1
	6	269	110	980	3,2	10,0	0,52	0,21	6,98	7,7
	7	70	330	510	3,3	3,7	0,91	4,30	6,65	11,9
15.05.2019, шахта им. А. Д. Рубана, Полясаевский-2										
ДВШ 816	1	231	45	403	7,7	6,0	0,61	0,12	2,92	3,7
	2	290	71	470	7,7	6,0	0,51	0,13	3,40	4,0
Лава 814	1	138	53	456	7,1	1,5	0,24	0,09	3,12	3,5
	2	57	71	519	7,1	1,5	0,10	0,13	3,55	3,8

Примечание:  $V_1$ ,  $V_2$ , и  $V_3$  – объемы газа, полученные при его выделении и из угля;  $W^a$  и  $A^d$  – влажность и зольность угля, определённые для каждого извлеченных образцов соответственно. Общее значение газонасыщенности образцов рассчитывается как сумма рассчитанных значений  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ , определенных в шахте, лаборатории и при размоле угля:  $Q_{oi} = Q_1 + Q_2 + Q_3$

На практике действие этих трёх этапов происходит таким образом: объём газа образца и помещения его в контейнер, который соединен с переносной установкой для измерения объёма выделяющегося газа. Определение объёма газа  $V_2$  проводится на такой же установке в лаборатории уже после доставки туда контейнера, через 2–4 ч. Объём газа  $V_3$  также проводится в лаборатории при помещении части угольного образца в герметичную мельницу, которая подключена к системе измерения объёма выделяющегося газа, и измельчении его до крупности 0,05 мм. Для каждой отобранный пробы делается анализ зольности, влажности и плотности

угля для пересчёта полученного объёма газа в метаноносность на тонну угля сухой беззольной массы (т с. б. м.). Общее значение газонасыщенности призабойной зоны рассчитывается как сумма составляющих, определённых в шахте, в лаборатории и при размоле угля  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$  (таблица 2.2.).

В таблице 2.2 представлены значения рассчитанных величин  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  газоносности угля призабойной зоны для двух пластов шахт Кузбасса: шахты им. С.М. Кирова и шахты им. А.Д. Рубана. Полученные значения газоносности угля  $Q_{oi}$  показывают, что, несмотря на дегазацию призабойной зоны пласта, в угле фиксируется ещё довольно много метана, количество которого изменяется в пределах  $3,5 - 13,5 \text{ м}^3/\text{т с. б. м.}$

### **2.3 Исследование молекулярной структуры угля методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР-метод)**

Широкое применение в вопросах исследования структуры каменных углей имеет метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), основанный на измерении количества неспаренных электронов, обуславливающие свободные валентности в веществах.

Метод ЭПР основан на явлении резонансного поглощения электромагнитного излучения парамагнитными центрами вещества, помещённого в постоянное магнитное поле. Метод ЭПР изучает вещества, обладающие ненулевым электронным спиновым магнитным моментом. То есть вещество должно обладать одним или несколькими неспаренными электронами, свободными радикалами (оборванные связи) или точечными дефектами в твёрдых телах.

ЭПР-метод играет значимую роль в познании структуры веществ. Применение этого метода позволяет оценить количество парамагнитных центров (ПМЦ) в веществе, что характеризует состояние электронной структуры. Первые статьи о ЭПР-поглощении в природных углеродах вышли в 1954 году [113], [114]. С тех пор хорошо зарекомендовавший себя метод ЭПР используется при изучении угля [115]–[118].

Еще в 60 – 70-х годах 20 века Lyons с сотрудниками [119]–[122] обнаружили наличие двух типов парамагнитных центров в угле, коксе и саже. Тогда же начались исследования углей этим методом. Watanabe и др. [123] обнаружили, что концентрация ПМЦ коррелирует с физико-химическими свойствами веществ. Между тем, сделанные ранее работы прямо не отвечают на вопрос, с какими именно частями угольной структуры связаны появление ЭПР-сигнала. По мере проведения дальнейших исследований и накопления фактического материала появилось понимание, что возникновение парамагнетизма углей происходит в некоторых областях структуры без образования свободной валентности в обычном смысле этого слова. Так в работе Л. Блюменфельда [124], [125] разработана теория полярных состояний, согласно которой наличие парамагнетизма связывается с особенностями конденсированных ароматических систем, приводящих к образованию комплексов с переносом заряда. В результате чего образуются ион-радикалы, обуславливающие сигнал ЭПР.

Исследования ЭПР были выполнены на спектрометре BRUKER EMX 6/1 с применением приборной базы Центра коллективного пользования МГУ имени М.В. Ломоносова «Нанохимия и наноматериалы» Химического факультета в рамках Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

Измерения проводились при микроволновой мощности 0,635 мВт, амплитуде модуляции 1,0 Гс, частоте модуляции 100,00 кГц (X-band), постоянной времени 40,960 мс и усилении  $1,78 \times 10^3$ . Значения числа спинов (парамагнитных центров) ( $N$ ) в углях были получены при использовании в качестве стандартного образца раствор TEMPO (2,2,6,6-tetramethyl-1-piperidinyloxy) в толуоле с содержанием  $g_{st} = 2,0061 \pm 0,0002$  и  $N_{st} = 2,0792 \times 10^{16}$  спинов. Число спинов ( $N_i$ ) в образце ( $i$ ) получали, используя выражение (формула 2.1):

$$N_i = (DI_i \times N_{st}) / DI_{st}, \quad (2.1)$$

где  $DI_i$  и  $DI_{st}$  – двойной интеграл от исходной экспериментальной резонансной кривой образца  $i$  и стандартного образца, соответственно. В некоторых случаях, величину  $N_i$  можно определить, используя выражение (формула 2.2):

$$N_{pp} = \Delta H_{pp}^2 \times h_{pp}, \quad (2.2)$$

где  $h_{pp}$  – интенсивность пика,

$\Delta H_{pp}$  – ширина линии от пика до пика.

Определяется суммарное число парамагнитных центров в пробе.

Регистрирующее устройство ЭПР-спектрометра фиксирует поглощение электромагнитной энергии спиновой системой угля. Данное поглощение в итоге и представляет собой спектр ЭПР. При ЭПР исследованиях обычно регистрируется 1-я, иногда 2-я производные кривой поглощения. Это позволяет повысить чувствительность получаемой информации. Вычисление числа парамагнитных центров в исследуемом веществе получают, сравнивая интенсивности спектров, представленных образца и эталона. После регистрации 1-й производной кривой поглощения (рисунок 2.2) применяют процедуру двойного интегрирования (рисунок 2.3).

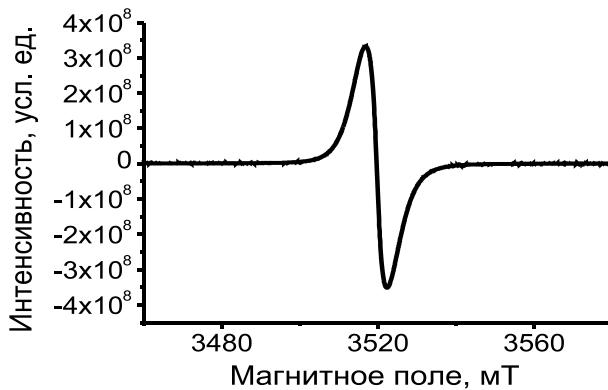


Рисунок 2.2 – Кривая ЭПР-спектра, производная от сигнала поглощения электронного парамагнитного резонанса

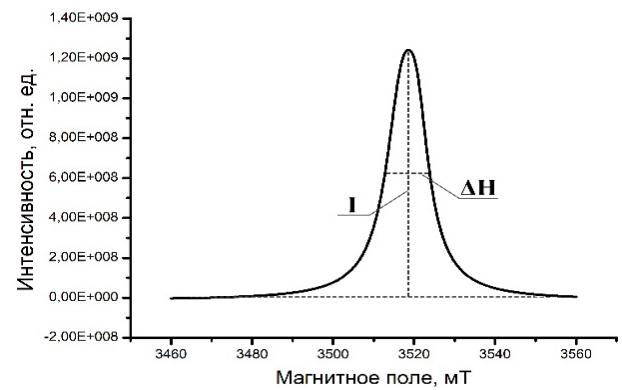


Рисунок 2.3 – Интегральная кривая от производной сигнала поглощения, нормированного на массу исследуемой пробы [49]

Полученные спектры ЭПР характеризуются двумя основными параметрами – интегральной интенсивностью и шириной резонансной линии. Интегральная интенсивность спектра пропорциональна количеству парамагнитных частиц

в пробе и рассчитывается как площадь  $S$  под кривой ЭПР спектра поглощения, например, пользуясь выражением (формула 2.3):

$$S = I (\Delta H)^2, \quad (2.3)$$

где  $I$  – интенсивность линии, отн. ед.,

$\Delta H$  – ширина линии на полувысоте, мТ.

Чтобы определить количество парамагнитных центров (ПМЦ) исследуемых образцов, проводится сравнение интегральных интенсивностей (аналог площадей под ЭПР-спектрами) с интегральной интенсивностью ЭПР-спектра эталона.

С момента начала применения метода и с течением развития идей о строении ископаемого угля, претерпевали изменения и знания в интерпретации получаемых результатов. Ранее количество парамагнитных центров связывали с неспаренными электронами только от ароматических систем. Со временем взгляд на структуру ПМЦ изменился.

Сейчас общепризнанным считается, что структурная и вещественная неоднородность каменных углей обусловливает существование парамагнитных центров (ПМЦ) двух типов, формируемых разными межмолекулярными и внутримолекулярными связями угольного вещества. В сигнал ЭПР-поглощения углей основной вклад вносят два типа ПМЦ: 1) слабое обменное взаимодействие неспаренных электронов от сопряженных систем в ароматической и алифатической частях угля и 2) неспаренные электроны, локализованные в участках разрыва связей и образующие свободные валентности. Исходя из этих определений, можно считать, что ЭПР-спектры (рисунок 2.4) каменных углей представляют собой, как минимум, сумму двух линий, где широкая (линия 1) получена от алифатической части угля, а более узкая (линия 2) от систем сопряжения [49].

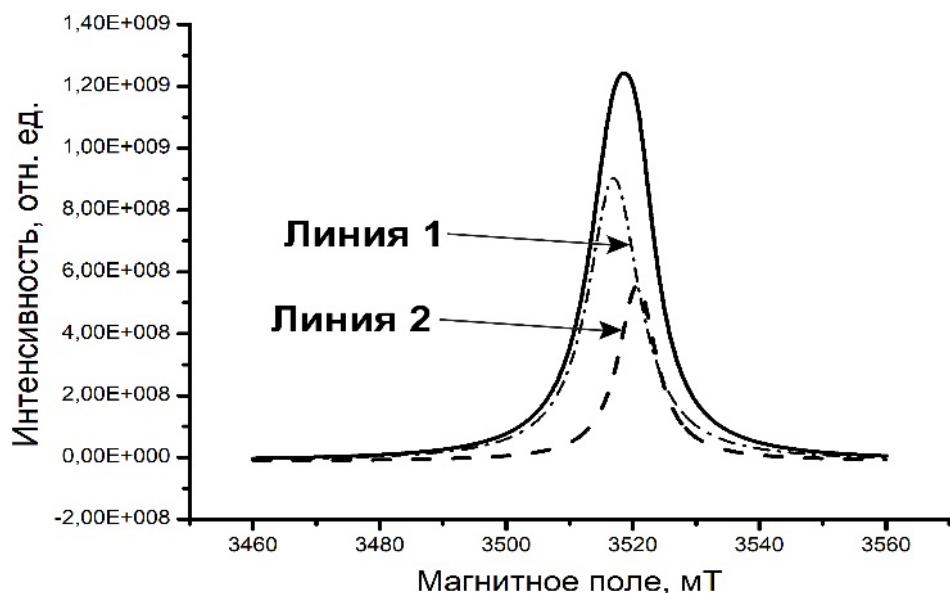
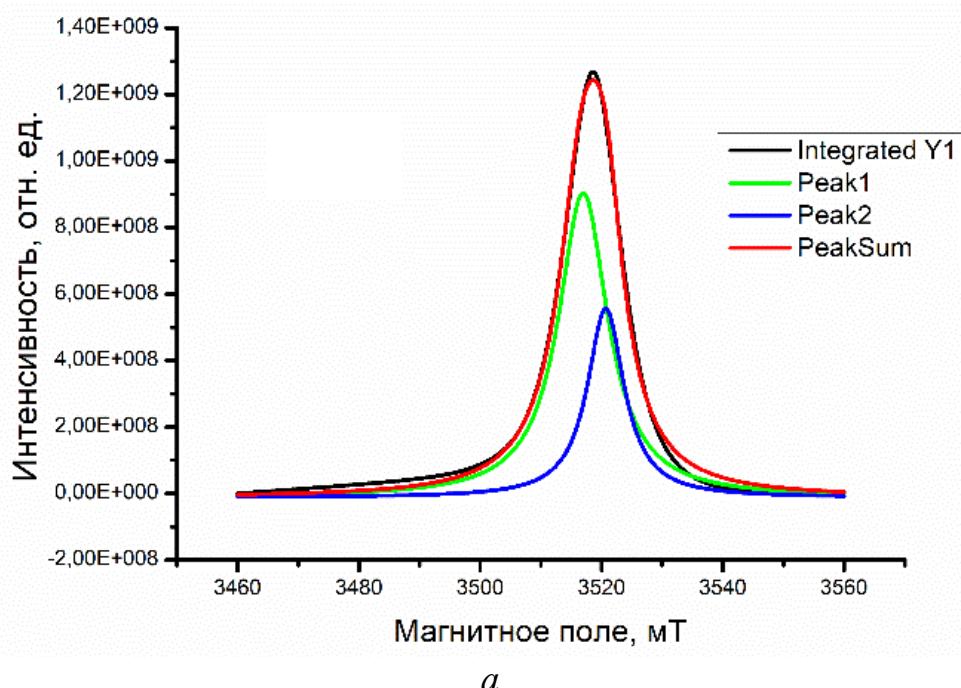
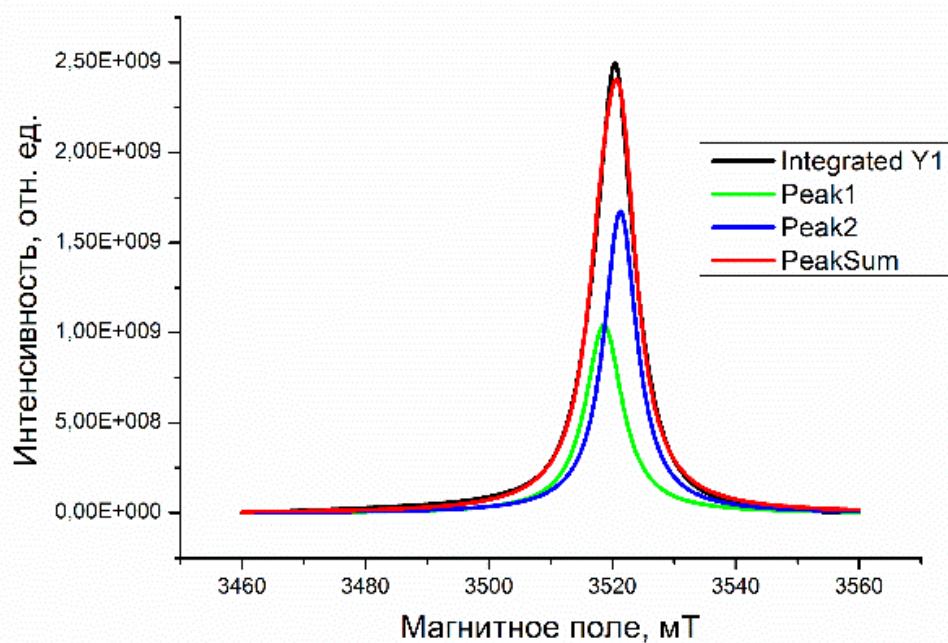


Рисунок 2.4 – Пример компьютерного разложения ЭПР-спектра на две кривые характеризующие вклад неспаренных электронов от сопряженных систем и от участков разрыва связей [49]

Исходя из вышеизложенного, были проведены исследования связи количества ПМЦ двух кривых спектров ЭПР с метаноносностью призабойной зоны пласта. Исследуемые угли относятся к одной стадии метаморфизма. Полученные результаты представлены на рисунке 2.5 и в таблице 2.3.



*a*

*б*

ЭПР спектр аппроксимирован двумя кривыми: зеленая (*линия 1*) – представленная разорванными и деформированными эфирными и метиленовыми мостиковыми межатомными связями; синяя (*линия 2*) – от систем сопряжения; красная – суммарный сигнал, полностью совпадающий с исходным;

*a* – пример спектра пробы угля склонного к опасным явлениям в пласте; *б* – то же для несклонного.

Рисунок 2.5 – Пример разложения спектра ЭПР на две составляющие сигнала

Анализируя спектры, представленные на рисунке 2.5 *а* и в таблице 2.3, можно сделать вывод, что в ЭПР-спектрах угля с большим содержанием метана (около  $10 - 13 \text{ м}^3/\text{т}$ ), широкая линия (*линия 1*, зеленая на рисунке 2.5) полученная от свободных радикалов, содержащихся в алифатической части угля по площади и по интенсивности (высота линии сигнала ЭПР) значительно преобладает над интенсивностью узкой (*линия 2*, синяя на рисунке 2.5), образующейся от систем сопряжения, входящих как в ароматическую компоненту угля, так и в алифатическую.

При исследовании спектров ЭПР, полученных от образцов углей с низкой газоносностью (около  $1,3 - 3,8 \text{ м}^3/\text{т}$ , см. рисунок 2.5 *б*), ситуация с соотношением двух интенсивностей, составляющих кривых ЭПР-спектров, обратная. Интенсивность сигнала от сопряженных составляющих вещества угля (*линия 2*, синяя) больше, а интенсивность сигнала от свободных радикалов (*линия 1*, зелёная) меньше, чем в ЭПР-спектрах проб углей с большим содержанием метана.

Таблица 2.3 – Параметры ЭПР спектров углей

№№	№ линий	$Q$ , м <sup>3</sup> /т	$S \times 10^{10}$ , м <sup>3</sup>	$N \times 10^{17}$	$N_1/N_2$	Центр, мТ	$\Delta H$ , мТ	$I \times 10^9$ , отн. ед.
234_6 (10_Гаусс)	1	2,3	0,59	3,7	0,6	3514,8	27,5	1,7
	2		1,00	6,2		3517,2	8,8	9,2
221_7 (10_Гаусс)	1	3,8	0,36	2,2	0,5	3509,8	32,9	0,9
	2		0,78	4,9		3516,2	8,5	7,3
249_8 (10_Гаусс)	1	1,7	0,61	3,8	0,7	3516,7	24,9	1,9
	2		0,85	5,3		3517,7	8,4	8,0
249_8 (10_микс)	1	1,7	0,80	5,0	1,0	3515,1	0,0	90,0
	2		0,83	5,2		3519,6	3,5	71,0
197_3 (10_Лоренц)	1	скл	1,30	8,1	1,2	3516,9	9,0	9,3
	2		0,80	5,0		3520,1	6,9	7,4
213_4 (10_Лоренц)	1	11,3	1,00	6,2	2,5	3517,4	9,2	7,1
	2		0,40	2,5		3521,0	6,8	3,8
220_5 (10_Лоренц)	1	11,2	1,00	6,2	2,6	3515,9	9,8	6,6
	2		0,38	2,4		3519,7	6,9	3,5
252_9 (10_Лоренц)	1	10,8	1,60	10,0	2,3	3517,3	9,4	11,0
	2		0,71	4,4		3521,0	7,2	6,3
253_10 (10_Лоренц)	1	9,1	1,80	11,2	1,1	3515,9	7,5	16,0
	2		1,70	10,6		3518,5	7,2	15,0
234_6 (12_Гаусс)	1	2,3	0,47	2,9	0,6	3515,5	24,1	1,6
	2		0,73	4,5		3517,5	8,1	7,2
221_7 (12_Лоренц)	1	3,8	0,49	3,1	0,3	3516,4	8,8	3,5
	2		1,50	9,3		3519,3	8,1	11,0
221_7 (12_Гаусс)	1	3,8	0,78	4,9	0,9	3517,8	20,2	3,1
	2		0,89	5,5		3518,8	6,8	10,0
249_8 (12_Гаусс)	1	1,7	0,53	3,3	0,7	3517,2	24,8	1,7
	2		0,80	4,9		3518,8	8,2	7,8
249_8 (12_Гаусс)	1	1,7	0,53	3,3	0,7	3517,2	24,8	1,7
	2		0,80	4,9		3518,8	8,2	7,8
249_8 (12_микс)	1	1,7	0,45	2,8	0,5	3515,7	0,0	98,0
	2		1,00	6,2		3519,8	4,4	69,0
253_10(1) (12_Гаусс)	1	9,1	1,50	9,3	1,3	3519,1	7,2	16,0
	2		1,20	7,5		3519,1	16,9	5,9
213_4 (12_Лоренц)	1	11,3	0,16	1,0	2,4	3517,1	9,2	1,1
	2		0,06	0,4		3520,8	6,7	0,6
220_5 (12_Лоренц)	1	11,2	1,14	7,1	2,5	3517,4	9,4	7,7
	2		0,45	2,8		3521,1	6,7	4,3
221_7 (12_Лоренц)	1	3,8	0,49	3,1	0,3	3516,4	8,8	3,5
	2		1,50	9,3		3519,3	8,1	11,0
252_9 (12_Лоренц)	1	10,8	1,70	10,6	2,3	3515,9	9,2	11,5
	2		0,73	4,5		3519,9	7,0	6,7
253_10(1) (12_Лоренц)	1	9,1	1,60	10,0	1,8	3517,1	8,4	12,0
	2		0,88	5,5		3520,3	6,9	8,1
253_10(2) (12_Лоренц)	1	9,1	2,10	13,1	1,8	3517,6	8,3	16,0
	2		1,20	7,5		3520,9	6,8	11,0

Примечание – Обозначение в графе 1: пример 253\_10+3\_2 (12\_Лоренц), 253 – номер пробы, 10 – номер образца по порядку исследования; 3\_2 – спектр раскладывался на 3 линии, второй вариант; (12\_Лоренц) – серия из 12 образцов, разложение на лоренцианы.

Рассчитаны значения площадей  $S$  и количества ПМЦ ( $N$ ). В углях с большим содержанием метана, на графике спектр обозначен зеленой линией 1 ( $S_1$ ,  $N_1$ ), площадь спектра ЭПР-сигнала больше площади ( $S_2$ ) и ПМЦ ( $N_2$ ) под второй линией (синей). Результаты расчётов приведены в таблице 2.3 площади  $S_1$ , ограниченные линиями спектра и отношения числа ПМЦ от зелёной и синей линий ( $N_1/N_2$ ) для углей с разным содержанием метана.

Проведенные ЭПР-исследования показали, что отношение количества парамагнитных центров (ПМЦ) в алифатической части углей  $N_1$  к их количеству в сопряженных связях, преимущественно в ароматической части углей  $N_2$  ( $N_1/N_2$ ), хорошо коррелирует с метаноносностью призабойной зоны пласта (рисунок 2.6), учитывая то что угли одной стадии метаморфизма.

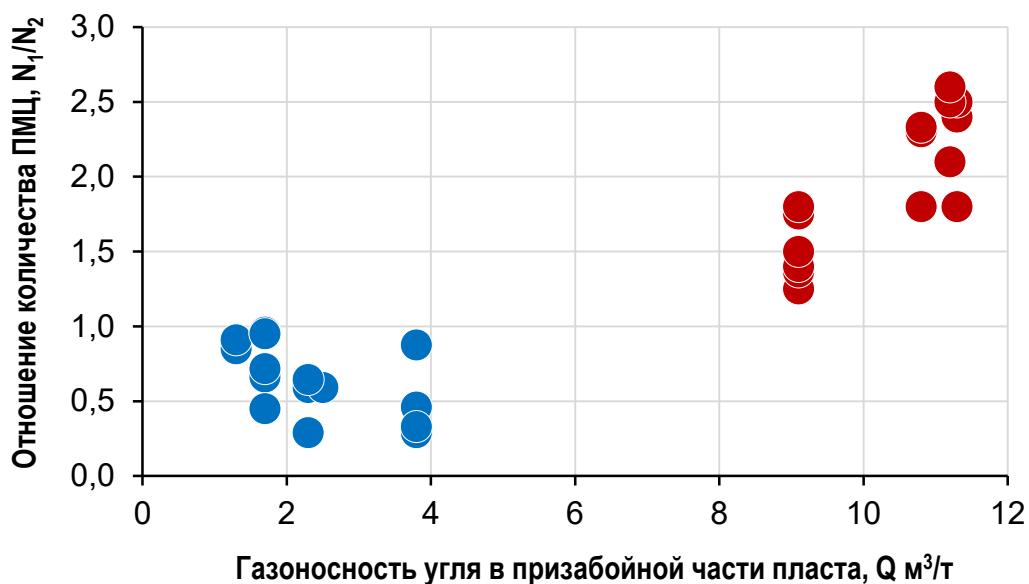


Рисунок 2.6 – Зависимость  $N_1/N_2$  – отношения количества парамагнитных центров (ПМЦ) от насыщенных связей ( $N_1$ ) к количеству ПМЦ сопряженных ненасыщенных связей ( $N_2$ ) от метаноносности углей

Полученная зависимость, показанная на рисунке 2.6, позволяет сделать вывод, что количество парамагнитных центров алифатической составляющей меньше в углях с небольшой газоносностью (значение  $N_1/N_2 \leq 1$ ), тогда как в углях с высокой газоносностью значение  $N_1/N_2$  значительно больше единицы. Исходя из полученных зависимостей, можно утверждать, что структура углей с большой

газоносностью обладает большей дефектностью в своей алифатической составляющей. В этом случае структура угля менее упорядоченная, обладающая большим количеством оборванных связей, являющимися сорбционными центрами. Этим и обусловлена более высокая остаточная газоносность угля, то есть метан удерживается парамагнитными центрами – оборванными связями.

Таким образом, метана удерживается больше там, где содержание ПМЦ, представленных разорванными и деформированными межатомными связями в алифатике, больше, что свидетельствует о более неоднородной микроструктуре таких углей.

Представлен, казалось бы, парадоксальный результат. Как правило считают, что уголь, с более высокой степенью неоднородности на макроуровне, после отработки пласта – при обнажении призабойной зоны, быстрее отдаёт газ и, казалось бы, должен показывать меньшие значения газонасыщенности.

Полученный результат подтверждается исследованиями, проведенными ранее с использованием КР- и ЭПР-спектрометров, для углей Донбасса [52] на углях марки Д (выход летучих веществ равный 42 %), примерно той же стадии метаморфизма, что и угли шахт им. А.Д. Рубана и им. С.М. Кирова (рисунок 2.7).

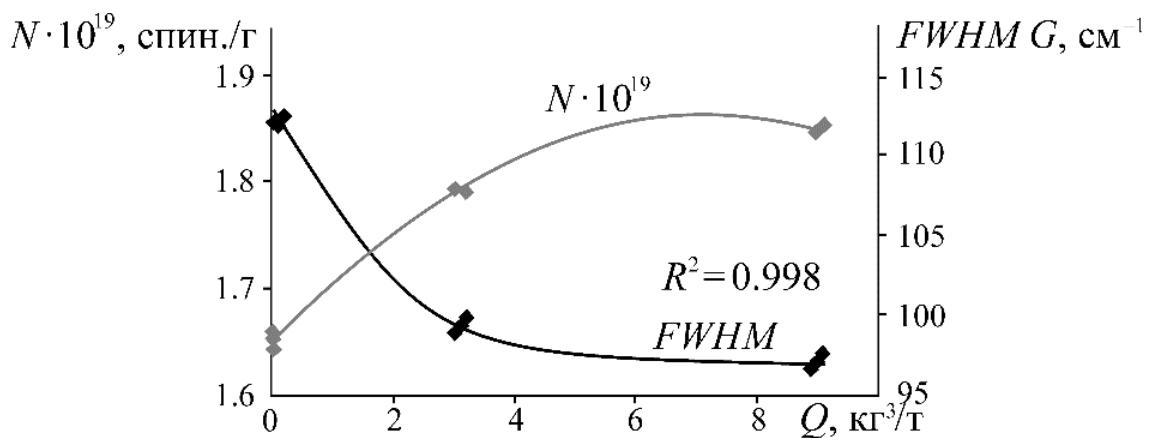


Рисунок 2.7 – Зависимость структурных параметров ЭПР- и КР-спектров углей от их газоносности  $Q$ , где:

$N \cdot 10^{19}$  спин/г – концентрация парамагнитных центров ЭПР-спектров;  
 $FWHM G$  – ширина  $G$ -полосы КР-спектров [6]

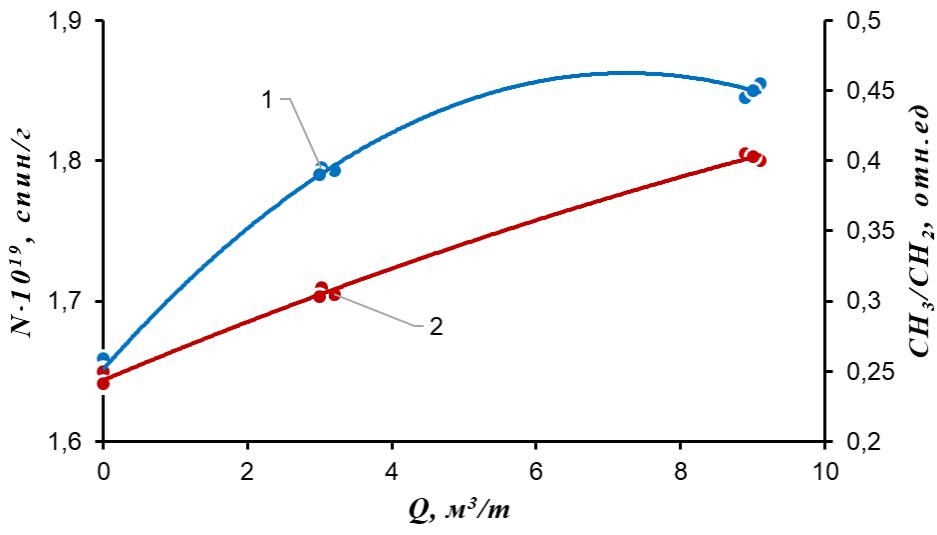
Рисунок 2.7 иллюстрирует зависимость между газоносностью углей и:

- концентрацией ( $N$ ) парамагнитных центров ЭПР-спектров, характеризующих количество свободных радикалов – оборванных связей в алифатической части угля;
- значениями ширины  $G$ -полосы КР-спектров этих же углей, которая зависит от длины сопряженных цепочек, а также размеров графитоподобных кластеров в исследуемом веществе.

Сочетание большей части ширины линии параметра FWHM G ( $114 \text{ см}^{-1}$ ) с низкой концентрацией ПМЦ ( $N = 1,65 \cdot 10^{19}$  спин/г) с уверенностью предполагает, что угольная структура содержит длинные цепочечно-сопряженных фрагменты, поэтому содержит меньшее количество оборванных связей – свободных радикалов. В этом случае структура угля представляет собой некоторый аналог полимеров, в которой содержится меньшее количество нескомпенсированных групп, способных удерживать метан [6].

В случае же больших значений ПМЦ ( $N = 1,87 \cdot 10^{19}$  спин/г) и малых значений FWHM G ( $96 \text{ см}^{-1}$ ) в структуре содержится большее количество неспаренных электронов, возникших в местах разрывов химических связей. Такой факт свидетельствует о более неоднородной структуре угля. Возрастание числа ПМЦ, то есть сорбционных центров, при сокращении длины цепочечно-сопряженных фрагментов, свидетельствует об увеличении содержания в угле метана. Отсюда следует вывод: неоднородная микроструктура угля, содержащая большое количество оборванных связей ПМЦ, позволяет углю содержать в себе большее количество метана.

Вышеописанные исследования подтверждают и результаты, полученные с использованием ИК- и ЭПР-спектрометров [52]. На рисунке 2.8 представлена зависимость концентрации ПМЦ, вычисленных из спектров ЭПР и соотношения метильной и метиленовой групп  $\text{CH}_3/\text{CH}_2$  в зависимости от метаноносности угля с выходом летучих  $V_{\text{daf}} \approx 42 \%$ .



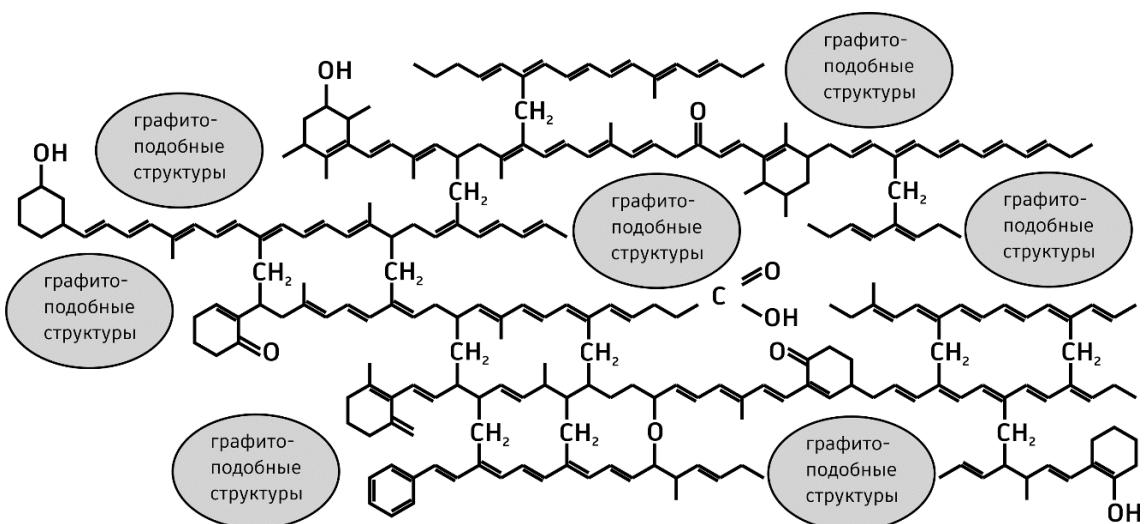
1 –  $N \times 10^{19}$  спин/г – число ПМЦ ЭПР-спектров;

2 –  $\text{CH}_3/\text{CH}_2$  – величина отношения метильной и метиленовой групп.

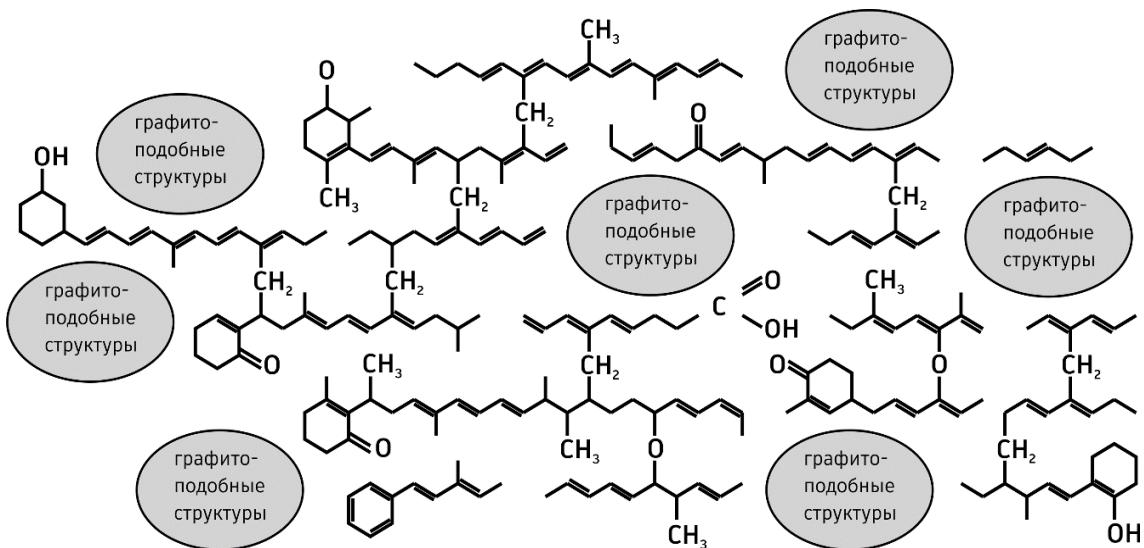
Рисунок 2.8 – Зависимость параметров ЭПР-, ИК -спектров образцов углей различной газоносности [52]

В результате отношения значений интенсивности линии поглощения метильных  $\text{CH}_3$  групп на количество метиленовых групп  $\text{CH}_2$  определяется параметр  $\text{CH}_3/\text{CH}_2$ . Величина этого параметра в совокупности со значениями FWHM G даёт возможность судить о вариациях длины цепочно-сопряжённой алифатической цепи. Чем больше величина  $\text{CH}_3/\text{CH}_2$ , меньше значения показателя FWHM G и больше число ПМЦ, тем короче алифатические цепочечно-сопряжённые фрагменты угля, тем большее количество оборванных связей в нём содержится. В свою очередь, увеличение оборванных связей (сорбционных центров) повышает способность угля удерживать метан.

Исходя из всего изложенного выше, были предложены две модели угольной структуры для углей одной стадии метаморфизма, с одними техническими характеристиками, марки ДГ (см. рисунок 2.9).



*a – более упорядоченная структура, вклад от сопряженных систем больше;*



*б – более нарушенная структура, больше вклад от оборванных связей.*

Рисунок 2.9 – Модель угольной структуры для углей  
одной стадии метаморфизма марки ДГ

На рисунке 2.9 *a* представлена модель угольной структуры с графитоподобными структурами и длинными цепочечно-сопряжёнными фрагментами, входящими в алифатическую часть угольного вещества. На рисунке возрастают число оборванных связей, а значит и число парамагнитных центров. Это приводит к увеличению неоднородности структуры и объясняет возрастание количества удержанного в угле метана. Более неоднородная структура угля с большим количеством оборванных связей позволяет ему удерживать большее количество метана.

## 2.4 ЭПР-исследования углей из неопасной области, выбросоопасного участка пласта и из зоны выброса угля и газа

Проведено исследование электронной структуры угольного вещества проб углей, отобранных из разных областей склонного к выбросам угольного пласта (см. рисунок 2.10):

- неопасной области,
- выбросоопасного участка,
- зоны выбросов.

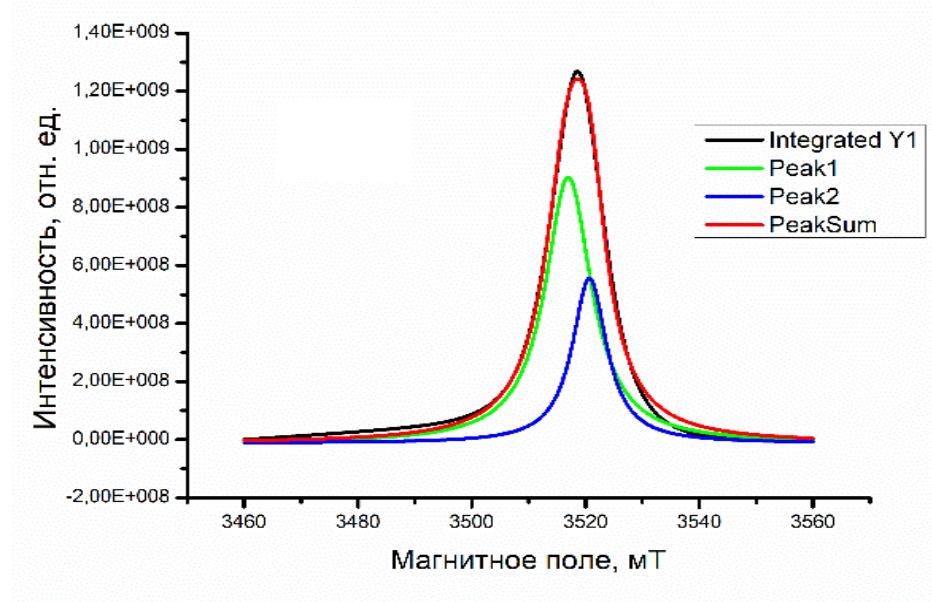
Исследование проб угля из невыбросоопасной области и зон произошедших выбросов методом ЭПР-спектроскопии предусматривает расчёт количества ПМЦ от алифатической  $N_1$  и ароматической (преимущественно)  $N_2$  составляющих угля для всех проб по экспериментально полученным величинам интегральных интенсивностей  $S_1$  и  $S_2$  для широкой и узкой составляющих ЭПР-спектров.

Результаты показали (таблица 2.4), что образцы из невыбросоопасной области (проба № 1) имеют минимальное суммарное значение количества ПМЦ  $N_{1+2} = 13,859 \times 10^{18}$  спин/г, а количество ПМЦ в алифатической части угля составляет  $N_1 = 8,625 \times 10^{18}$  спин/г. Образцы №№ 2, 3, 4, отобранные из зон выброса, имеют разную степень нарушенности, причём наиболее нарушенным является уголь № 4, содержащий наибольшее общее количество ПМЦ  $N_{1+2} = 18,2 \times 10^{18}$  спин/г.

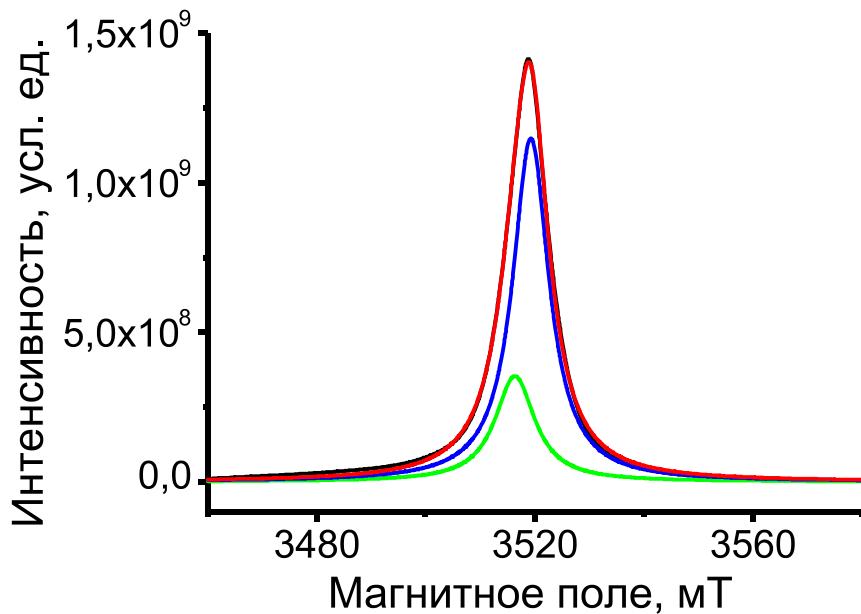
Таблица 2.4 – Спектральные ЭПР параметры углей из неопасной зоны и из выброса

№ пробы	$S_1$	$S_2$	$S_{1+2}$	$N_1 \times 10^{18}$ (spin/g)	$N_2 \times 10^{18}$ (spin/g)	$N_{1+2} \times 10^{18}$ (spin/g)
1 – невыбросоопасная область	13,931	8,454	22,386	8,625	5,234	13,859
2 – зона выброса	16,655	8,941	25,597	10,311	5,535	15,847
3 – зона выброса	15,142	10,168	25,310	9,374	6,295	15,669
4 – зона выброса	19,513	9,830	29,343	12,080	6,085	18,166

Количество ПМЦ в алифатической части невыбросоопасной области значительно меньше, то есть уголь в невыбросоопасной области пласта имеет значительно более упорядоченную микроструктуру.



*a* – проба из выбросоопасного участка пласта



*b* – проба из невыбросоопасной области пласта

Рисунок 2.10 – ЭПР-спектры исследованных проб угля

Образцы, отобранные из зоны выброса, с большим содержанием ПМЦ, обладают большим количеством разорванных связей, преимущественно в алифатике, и соответственно значительно более нарушенной микроструктурой.

Аналогичные исследования, проведенные на образцах углей из выбросоопасной и невыбросоопасной зонах пласта (таблица 2.4), показали, что количество ПМЦ в алифатической части невыбросоопасной зоны значительно меньше, чем в выбросоопасной зоне, то есть уголь имеет значительно более упорядоченную микроструктуру.

## 2.5 Выводы по главе 2

Проведены исследования молекулярной структуры проб угля с известной газоносностью в призабойной зоне угольного пласта с помощью метода ЭПР-спектроскопии. В результате было установлено, что структура углей с большой газоносностью обладает большей дефектностью в своей алифатической составляющей угольного вещества. В этом случае микроструктура угля менее упорядоченная, имеет большое количество оборванных связей, то есть вносит больший вклад в удержание метана сорбционными центрами. Можно утверждать, что метод спектроскопии, основанный на явлении электронного парамагнитного резонанса, позволяет косвенно оценить неоднородность микроструктуры угля.

Анализ данных значений показателя отношения количества парамагнитных центров ( $N_1/N_2$ ) в алифатической составляющей  $N_1$  к количеству ПМЦ в сопряжённых связях (преимущественно, в ароматической составляющей угля)  $N_2$  демонстрирует, что увеличение количества ПМЦ от оборванных связей в алифатической части угля совпадает с увеличением газоносности в призабойной зоне угольных пластов.

Основной результат приведенных в главе 2 исследований каменных углей, близкой стадии преобразованности вещества, говорит о существенной роли влияния структуры на способность угля удерживать метан, выражющейся в газоносности призабойной зоны угольных пластов, со стороны микроструктурных параметров угля. Метана больше там, где больше содержание ПМЦ, представленных разорванными и деформированными межатомными связями в алифатике.

Предложена модель угольной структуры с графитоподобными структурами ароматической части и цепочечно-сопряжёнными фрагментами, входящими в алифатическую часть угольного вещества. Вышеприведённое говорит в пользу предложенной модели угольной структуры с точки зрения влияния её нарушенности, неоднородности углей на микроуровне на склонность к опасным явлениям в пласте.

## Глава 3 Исследование влияния неоднородности микроструктуры угля на склонность угольных пластов к удержанию метана

В третьей главе приведено описание метода расчётов для оценки неоднородности микроструктуры угля и показано влияние этой неоднородности на склонность угля к удержанию метана в призабойной зоне пласта. Расчёт проводится с определением количественных показателей – пространственных информационной энтропии,  $H$  (отн. ед.) и статистической сложности,  $C$  (отн. ед.) по цифровым изображениям естественной поверхности углей, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа.

### 3.1 Основы метода сканирующей электронной микроскопии

Предполагается, что физико-механические свойства природных материалов, и в том числе ископаемых каменных углей, во многом определяются их микроструктурой, которая, в свою очередь, зависит от электронного строения, химического состава и природы преобразования угольного вещества.

При изучении микроструктуры вещества природных материалов часто необходимо правильно подобрать методы и методики исследований, тип прибора [126], [127]. В последнее время для решения задач материаловедения, включая естественные науки, всё больше применяется метод растровой сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Сканирующие электронные микроскопы позволяют исследовать нанометровый уровень вещества и даже атомный. СЭМ микроскопы нашли применение в исследовании неоднородностей структуры природных материалов по цифровым изображениям топографии их поверхности с высокой разрешающей способностью и глубиной резкости. Применение метода сканирующей электронной микроскопии позволяет исследовать размеры и форму отдельных элементов микроструктуры (зёрен), их распределение по размерам, определить состав фазы и распределение химических элементов по площади фазы

и по площади всего образца, химическую неоднородность по площади шлифа, получить изображение объекта в широком диапазоне увеличений в режимах съёмки – во вторичных и отраженных электронах.

Преимущество современного этапа развития СЭМ, в отличие от предыдущих, то, что стало допустимо исследовать образцы без предварительной специальной подготовки: неочищенные, влажные, газящие. Конструктивные особенности современных СЭМ микроскопов позволяют регулировать проникающую способность пучка электронов за счёт уменьшения их энергии и тока луча, что даёт возможность подстройки баланса между абсорбируемым и испускаемым зарядом в образце. С помощью метода микроскопии возможно определение межплоскостных расстояний, определение ориентировки зёрен и блоков, углов разориентации на границах, определение природы фаз. Это позволяет легко исследовать изломы поверхностей и другие рельефные объекты.

Электронно-микроскопические исследования поверхности проб углей проводились на растровом сканирующем электронном микроскопе JSM-6610 LV mode фирмы JEOL (Япония). Микроскоп со следующими паспортными характеристиками: разрешение микроскопа до 4 нм при ускоряющем 30 кВ, полный диапазон ускоряющего напряжения – от 0,3 до 30 кВ, уровни увеличения – от  $\times 5$  до  $\times 300\,000$ , размеры формируемых цифровых изображений – 640  $\times$  480, 1280  $\times$  960, 2560  $\times$  1920, 5120  $\times$  3340 пиксел, расширения фалов – bmp, tiff, jpeg. Микроскоп позволяет работать в двух режимах – стандартном, только высокий вакуум, и в низковакуумном режиме (LV).

Применяемые режимы работы, то есть используемые детекторы, сигналы от которых преобразуются в цифровое изображение:

- BEC – композиционное изображение с детектора отражённых электронов;
- BET – топографическое изображение с детектора отражённых электронов;
- BES – стереоскопическое изображение с детектора отражённых электронов;
- SEI – изображение с детектора вторичных электронов.

Важно отметить практическое преимущество микроскопа, так как он позволяет исследовать микроструктуру непроводящих образцов, благодаря

работе на низких ускоряющих напряжениях (от 500 В), без необходимости нанесения токопроводящего покрытия.

Цифровые изображения поверхности угольных проб естественной формы, были получены с использованием указанного сканирующего электронного микроскопа в режиме сканирования – вторичных электронов SEI.

### **3.2 Количественная оценка неоднородности структурных элементов природных объектов по изображениям их поверхности шиарлет-методом**

При исследовании и сопоставлении свойств различных каменных углей необходим метод количественного описания неоднородности их микроструктуры. Предположение, что микроизломы естественной поверхности образцов отражают неоднородность их структурной организации, позволяет делать некоторые заключения на основе изучения цифровых изображений поверхности угольных проб.

Исследования проводились на пробах каменного угля, отобранных из призабойной зоны угольных пластов. С помощью растрового сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6610 LV были получены цифровые изображения поверхности угольных проб естественной формы, с разрешением (паспортным) – не хуже 10 нм, что соответствует 1000-кратному увеличению, в режиме регистрации вторичных электронов. Такой масштаб позволяет исследовать пространственное распределение отдельных зёрен угля размерами порядка 0,5–1 микрон, то есть на уровне, где пропадает влияние достаточно крупных пор и трещин.

В соответствии с тем, что было описано в параграфе 1.4.2, для целей количественного описания микроструктурных особенностей угля хорошо подходит метод расчёта, разработанный и предложенный в работе [101]. Метод диаграмм «энтропии – сложности» был адаптирован в рамках данной работы для исследования каменных углей. Он позволяет исследовать неоднородности строения углей по цифровым изображениям их поверхности. Такой подход позволяет оценивать пространственные информационные энтропию

( $H$ ) и сложность ( $C$ ) локально, в отличие, например, от алгоритма пермутационной энтропии [99], для которого в двумерном пространстве требуются чрезвычайно большие выборки. Математическая основа метода состоит в получении распределения коэффициентов шиарлет-разложения обрабатываемого цифрового изображения поверхности угля и дальнейшем расчёте пространственных информационной энтропии и статистической сложности. Расчёты проводились с использованием предложенной в работе [101] алгоритмической реализации шиарлет-подхода – программного обеспечения «Shearlexity» (© А.Р. Браже). Указанная программа разработана на языке Python, включает использование стандартных библиотек языка Python для научных расчётов и визуализации (scipy, matplotlib) и библиотеки для шиарлет-разложения PyShearlets. В данной работе для проведения расчётов использовалась программная оболочка «Anaconda», содержащая библиотеки среды Python и встроенные программы, поддерживающие работу на языке Python.

Процедура расчёта показателей оценки пространственной неоднородности, пространственных информационной энтропии и статистической сложности для двумерных изображений, включает два этапа. Первый этап составляет процедура разложения цифрового изображения поверхности угля на коэффициенты, характеризующие локальную анизотропию и ориентацию основных структур. Для этого использовались стандартные программы, включающие расчёт матриц масштабирования и сдвига и параметров переноса для формирования исходной шиарлет-функции, позволяющей провести свёртку данного изображения с масштабируемыми, сдвинутыми и смешёнными копиями исходной шиарлет-функции. Дискретное шиарлет-преобразование определяется как отображение исходного изображения во множество шиарлет-коэффициентов, определяющих 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 в соответствии с разными коэффициентами шиарлет-преобразования. На следующем этапе для полученного распределения определяется относительная

$S[P]$  (формула 3.1) и нормализованная энтропия Шеннона  $S^N[P]$  (формула 3.2). Под **энтропией** принимается мера хаотичности системы: чем меньше паттерны (элементы) системы подчинены какому-либо порядку, тем выше энтропия:

$$S[P] = - \sum P_i \log_2 P_i$$

$$S^N[P] = \frac{S[P]}{S[P_e]}$$

где  $P_i$  – вероятность  $i$ -го шиарлет-признака,

$S[P_e] = \log_2 N$  – энтропия равновероятного распределения  $P_e$ , в котором все шиарлет-признаки представлены с равной вероятностью  $P_i = 1/N$  [13].

Понятие энтропии представлено в разных областях науки как мера организации системы или в информационном отношении – нашего незнания о её состоянии. В данной работе энтропия интересна как мера хаотичности системы, точнее структурной нарушенности углей. Логика предельных критериев меры энтропии состоит в следующем: от минимальной энтропии, соответствующей высокой упорядоченности системы, что можно ассоциировать с правильной кристаллической решёткой, к максимальной энтропии, соответствующей низшей степени её организованности, то есть наибольшей хаотичности, неупорядоченности, что в свою очередь можно ассоциировать с аморфным телом.

Наблюдаемое распределение сравнивается с равновероятным, на основании чего и вводится понятие статистической **сложности**  $C$ , как произведение энтропии на расхождение между наблюдаемым  $P$  и равновероятным распределением  $P_e$  шиарлет-признаков (формула 3.3):

$$C = J[P, P_e] \cdot S[P]/S[P_e]$$

где  $J[P, P_e]$  – расстояние между двумя распределениями,

$P$  – наблюдаемое распределение,

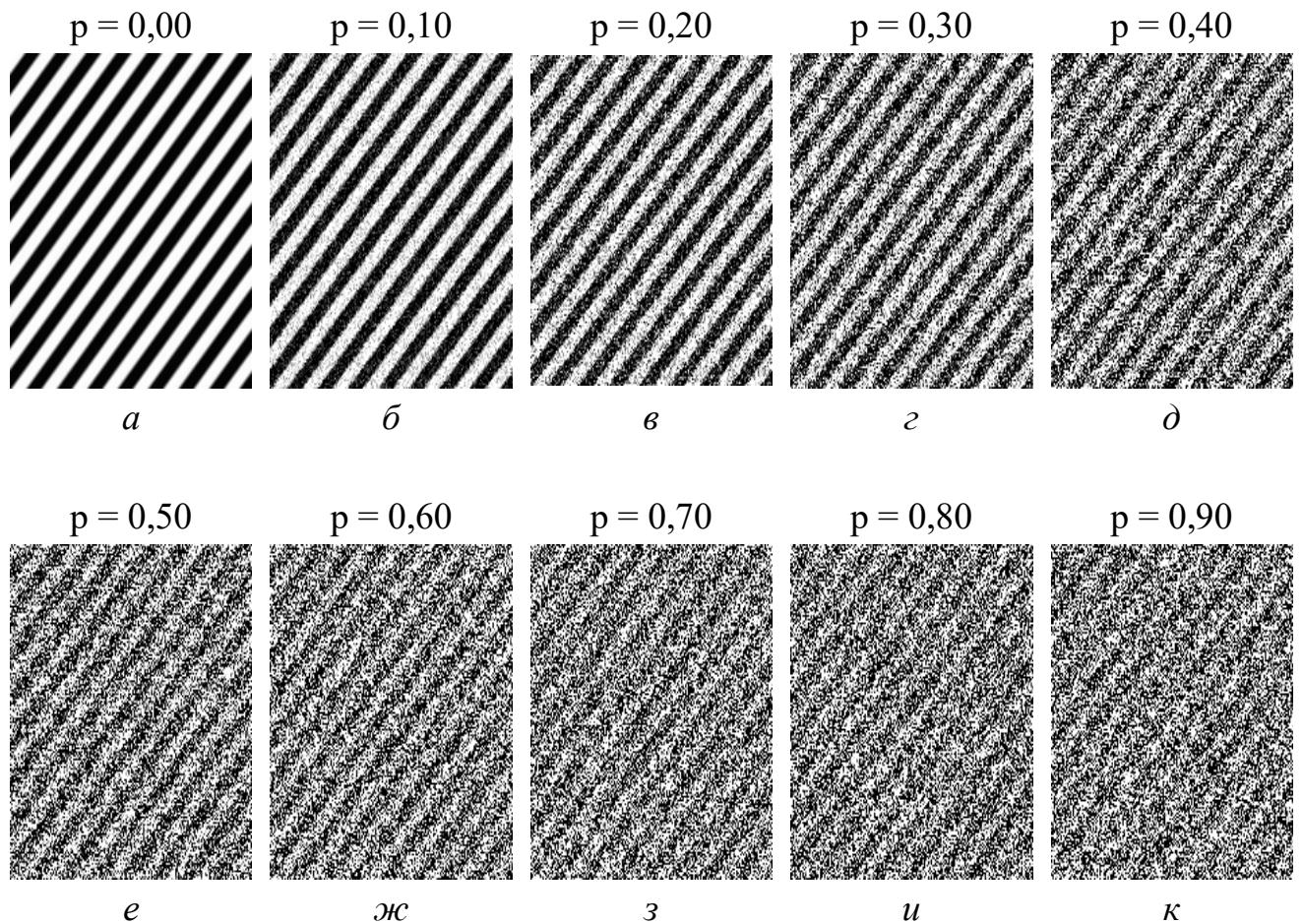
$P_e : \{P_i = 1/N \mid \forall i = 1, \dots, N\}$  – равновероятное распределения.

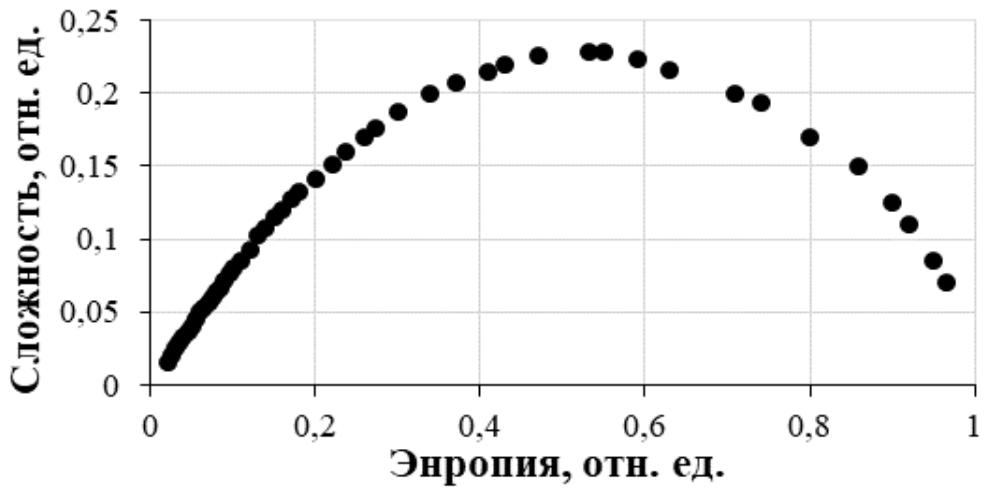
Возможны несколько формулировок для описания расстояния между двумя распределениями. В работе использовалось симметризованное расстояние Кульбака-Лейблера, известное также как расхождение Йенсена-Шеннона (формула 3.4) [127]:

$$J[P, P_e] = S\left[\frac{P+P_e}{2}\right] - \frac{1}{2}(S[P] + S[P_e])$$

Таким образом понятие статистической сложности соответствует отклонению в распределении структурных неоднородностей системы от равновероятного распределения. Сложность обращается в ноль, как при абсолютно упорядоченной, так и при абсолютно хаотичной структуре вещества.

Из введенного выше определения видно, что пространственный паттерн (повторяющийся элемент структуры) поверхности угля описывается как точка на плоскости в координатах «энтропия – сложность», где нулевая энтропия и сложность соответствуют полностью регулярной структуре, а высокая энтропия и нулевая сложность – полностью случайному пространственно независимому шуму в структуре угля (рисунок 3.1). Подробнее обоснование и порядок расчёта изложены в работах [5], [13], [101], [128], [129].





*a-к* – показаны изображения с различной вероятностью пикселей  $p$ ,  
значения  $p$  показано на верхней части изображения;

*л* – эволюция энтропии и сложности в зависимости от разрушения паттерна.

Рисунок 3.1 – Постепенное изменение («разрушение») паттерна – узора полос [13]

Рисунок 3.1 *a-к* показывает постепенное нарастание неупорядоченности системы, из которого видно, что чем больше нарушений, тем более неоднородна система. На рисунке 3.1 *л* приведён график зависимости в системе «энтропия – сложность», соответствующий изменению хаотичности (неоднородности) системы.

Таким образом нулевой сложности соответствуют и максимально упорядоченные структуры, и полностью хаотичные. Поскольку 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 ожидать получить точки, соответствующие полностью хаотическому распределению структур в образце, в правой нижней части диаграмм, то есть при низкой сложности, но высокой энтропии и на средних участках диаграмм [13].

### 3.3 Подготовка проб углей для лабораторных испытаний

#### 3.3.1 Отбор пластовых проб углей из массива

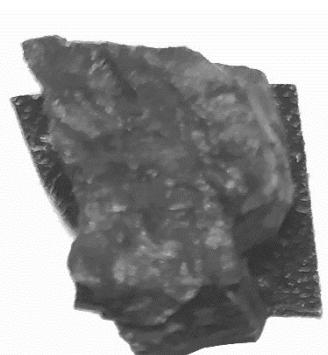
Отбор проб угля из пласта проводится по методике, указанной в ГОСТ Р 59248-2020 «Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и угольные брикеты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний» [130]. Пробы плотно упаковываются и доставляются в лабораторию. Для исследования неоднородности микроструктуры углей герметизация контейнера с углем не является обязательным условием.

#### 3.3.2 Подготовка лабораторных проб углей для анализа

Известно, что уголь имеет неоднородный петрографический состав. Выделяют шесть макрокомпонентов (литотипов) ископаемых углей (таблица 3.1), которые в свою очередь могут состоять в определённых пропорциях, из микрокомпонентов (мацералов): Витринит  $Vt$ , Семивитринит  $Svt$ , Инертинит  $I$ , Липтинит  $L$ , Минеральные включения  $M$ . Из перечисленных групп мацералов, слагающих петрографические литотипы каменных углей, двумя преобладающими являются: витринит – блестящая составляющая угля (рисунок 3.2 *a*), и инертинит (фюзенит) – матовая составляющая угля (рисунок 3.2 *б*).



*а* – витринит – блестящая  
составляющая угля



*б* – инертинит (фюзенит) – матовая  
составляющая угля

Рисунок 3.2 – Пример проб каменного угля двух основных мацералов [49]

Таблица 3.1 – Характеристика литотипов ископаемых углей [ГОСТ Р 55662-2013]

Макрокомпоненты (литотипы)	Текстурный признак	Содержание, %		Характерные признаки
		витринит	инертинит, липтинит и минеральные примеси	
Витрен ( <i>vitrum</i> )	блестящий	100	–	блестящий уголь чёрного цвета, однородной структуры с раковистым изломом, стеклообразный, твердый, плотный
Кларен ( <i>clarus</i> )	блестящий	> 75	< 25	блестящий уголь чёрного цвета, полосчатой структуры с раковистым изломом, твердый, плотный
Дюрен-Кларен ( <i>durus-clarus</i> )	полублестящий	60 – 75	25 – 40	С уменьшением содержания витринита ослабевает блеск, цвет от черного до серо-черного, остальные признаки имеют переходный характер
Кларен-Дюрен ( <i>clarus-durus</i> )	полуматовый	45 – 60	40 – 55	
Дюрен ( <i>durus</i> )	матовый	45	> 55	матовый уголь с маслянистым блеском, серого или серовато-чёрного цвета, однородной структуры, твердый, плотный
Фюзен ( <i>fusain</i> )	матовый	–	100 (I)	матовый уголь с шелковистым блеском, серовато-чёрного цвета, волокнистый, мягкий, сажистый

Мацералы угля – это условное разделение составляющих угля, различимых под микроскопом, с характерными структурными признаками, различающимися по цвету и показателям отражения. При петрографическом анализе мацералы углей объединяют по близким химико-технологическим свойствам в группы: группу витринита, группу липтинита, группу инертинита (фюзенита). Выход летучих в мацералах углей одной степени зрелости несколько отличается: наибольший для – липтинита, потом витринита, наименьший для инертинита. Инертинит представляет собой наиболее химически инертную составляющую угля, липтинит и витринит – наиболее реакционноспособные его компоненты. Витринит является одной из главнейших составляющих органической массы углей, он легко отличается от других компонент угля визуально по наиболее сильному блеску. Инертинит (фюзенит) имеет более однородное волокнистое строение, цвет чёрный или серо-чёрный. Характеризуется повышенным содержанием углерода

и пониженным выходом летучих веществ относительно средних значений по пробе, и полном отсутствии спекающих свойств.

Поэтому из-за сильной петрографической неоднородности состава углей, руководствуясь соблюдением условия достоверности информации о структуре углей при их исследовании под микроскопом, от каждой отобранный пластовой пробы ископаемого угля отбираются представительные лабораторные пробы, не менее 3–4 штук: с блестящей и матовой поверхностью (рисунок 3.3).

Линейные размеры проб ограничиваются размерами предметного столика и рабочей камеры используемого микроскопа. Например, в рамках данной работы использовался имеющийся в распоряжении Института микроскоп JEOL JSM–6610 LV, диаметр предметного столика которого – 30 мм, а предельный размер по высоте – 8 мм. На специальной съёмной предметной круглой пластинке можно размещать как одну, так и несколько проб одновременно. В случае размещения нескольких проб следует соблюдать их приблизительное равенство по высоте.



Рисунок 3.3 – Лабораторные пробы углей, подготовленные для исследования в сканирующим электронном микроскопе

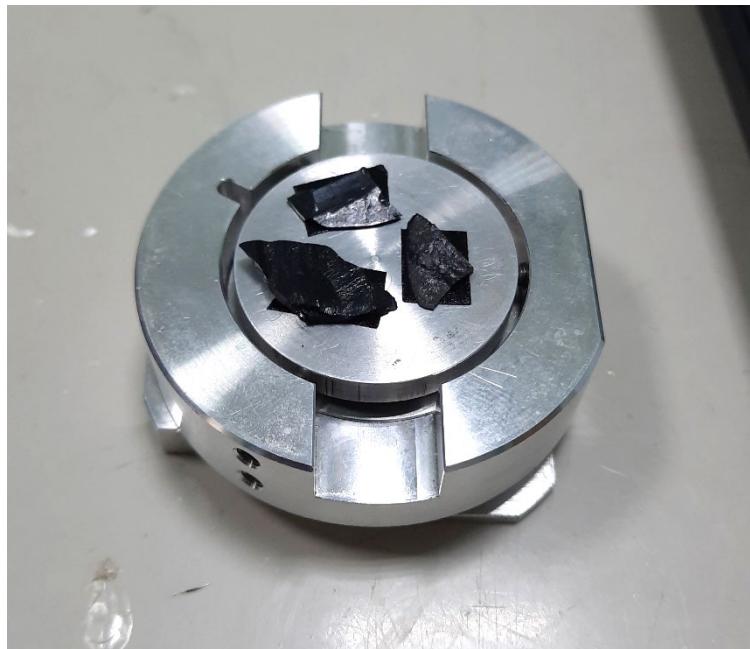


Рисунок 3.4 – Лабораторные пробы углей, расположенные на предметном столике микроскопа

Пробы для сканирующего микроскопа выбирают так, чтобы исследуемая поверхность имела естественную, близкую к плоской, форму вдоль поверхности слоя мацерала. Близкая к ровной поверхность требуется, так как в случае сильного перепада высот часть поверхности окажется не в фокусе. Противоположную сторону при необходимости шлифуют параллельно интересуемой поверхности. Удаляют излишнюю пыль со шлифованной поверхности пробы (обратной к интересуемой поверхности), например, скотчем, для последующего лучшего прилипания к проводящей ленте и исключения загрязнения микроскопа.

Подготовленные пробы устойчиво размещают на предметной круглой пластинке при помощи двустороннего проводящего скотча (рисунок 3.4).

### **3.4 Исследование углей методом сканирующей электронной микроскопии**

Рельеф естественных изломов поверхности угольных проб несёт информацию о неоднородности и степени хаотичности микроструктуры углей. Поэтому информация, полученная по цифровым снимкам поверхности угольных проб, сделанных сканирующим электронным микроскопом, позволяет судить об их микроструктуре. Для описания неоднородности микроструктуры углей

применялся метод, предложенный в [101] и адаптированный под исследование ископаемых каменных углей [13], [131]. Использовались значения пространственных информационной энтропии и статистической сложности, рассчитанные по цифровым снимкам поверхности углей [6].

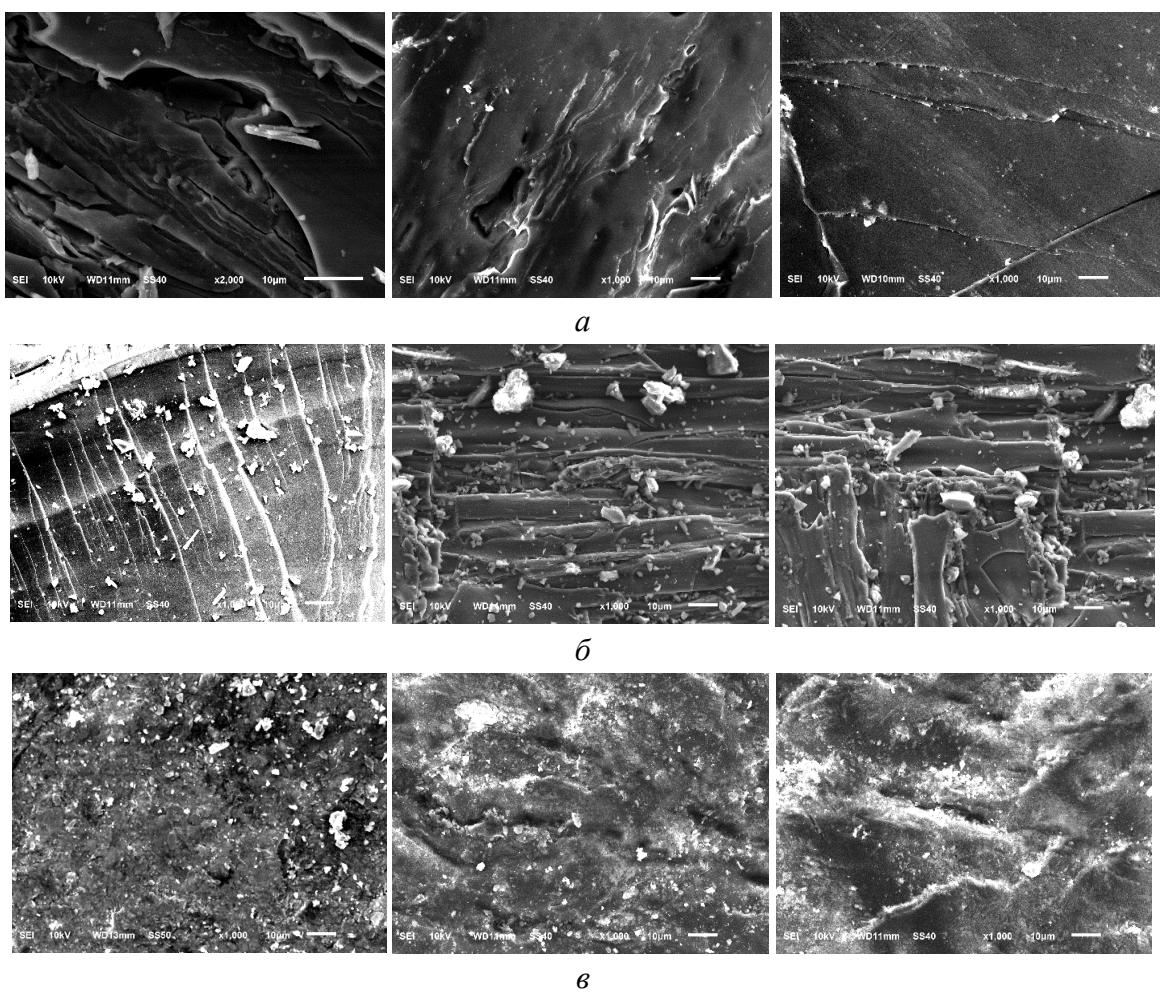
Информационная (статистическая) энтропия является мерой хаотичности системы, а её расчёт основан на определении распределения шиарлет-коэффициентов исходного изображения. Шиарлеты обладают расширенным набором характеристик, в том числе благодаря дополнительно введенному параметру сдвига, что выгодно выделяет их на фоне других функций, используемых при аналогичной обработке изображений, таких как синусоиды в Фурье-преобразовании, вейвлеты, кёрвлеты и другие. Поэтому при количественном описании неоднородности (хаотичности) строения микроструктуры угля расчёт энтропии и сложности проводился на основании шиарлет-преобразования цифровых снимков поверхности угольных проб [6].

Проведенные в лаборатории ранее исследования [40] показали, что наиболее информативными при выявлении различий в структуре углей, связанных с их склонностью к газодинамическим проявлениям, 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 макропор и трещин, достаточно широких для фильтрации метана, что непосредственно связано со склонностью углей к удержанию газа, самовозгоранию и газодинамическим явлениям [40]. Поэтому исследование структуры на этом уровне особенно важно для изучения особенностей углей при исследовании явлений, для которых фильтрация газа весьма существенна. Цифровые изображения поверхности угольных проб представлены на рисунке 3.5 [13].

Для каждой пробы проводилась съёмка серии снимков: определялись несколько характерных областей интереса на поверхности, а затем в окрестности каждой делалось не менее десятка фотографий, что позволило получить  $30 \div 40$  снимков для каждой выбранной пробы. На рисунке 3.5 приведены некоторые

примеры цифровых снимков, на которых видно разнообразие рельефов поверхности углей при тысячекратном увеличении различных участков угля из пласта «Полысаевский-2» шахты «Им. А.Д. Рубана», Кузнецкого бассейна. Похожая картина разнообразия наблюдается и для других углей [6].

Важно отметить, что при формировании серии снимков для каждой пробы угля, следует стремиться к равновесной съёмке всех характерных текстурных паттернов (образец, повторяющийся элемент – то, что повторяется неоднократно). Для исследований интерес представляют все области, отражающие характерные структурные особенности угля: сплошная плотная или нарушенная, зернистая структура, сколы слоёв, микропоры, нарушения в виде трещин, взаимное расположение отдельностей угля и так далее.



*a* – снимки с однородной структурой; *б* – снимки с зернистой структурой;  
*в* – снимки с пористой структурой.

Рисунок 3.5 – Цифровые изображения поверхности различных участков поверхности проб угля (пласт «Полысаевский-2» шахты «Им. А.Д. Рубана») [13]

Даже из рисунка 3.5 видно насколько разнообразна структура поверхности угольных проб, там присутствуют участки с большой численностью мелких образований, однородные области и с достаточно крупными и гладкими пластинками. Разобраться в этом, на первый взгляд, структурном хаосе и выявить некоторые закономерности позволяют специальные методы статистической обработки цифровых изображений. Полученные серии снимков поверхности углей использованы для количественной оценки степени упорядоченности микроструктуры угля в системе координат «энтропия – сложность».

### **3.5 Исследование неоднородности микроструктуры каменных углей в результате обработки цифровых изображений их поверхности с помощью информационных энтропии и сложности**

Структура углей, отобранных из разных областей пласта, на первый взгляд, хаотична, хотя поверхности углей из выбросоопасных участков и из зоны выброса иногда отличаются от неопасной области, даже на глаз, более рыхлой структурой. Количественное описание особенностей исследуемых объектов, таких как: их структурная неоднородность, пространственная упорядоченность, внутренняя организованность, периодичность, и были проведены расчёты пространственной ориентации элементов по описанной выше методике и построены зависимости в системе координат «энтропия – сложность» [13]. Расчёты значений энтропии и сложности проводились по методике, описанной в разделе 3.2, с помощью программного обеспечения «Shearlexity».

Полученные цифровые микроснимки по очереди подаются на вход программного алгоритма. К формату снимков предъявляются следующие требования:

- изображение панхроматическое-одноканальное;
- значение разрешения изображения могут быть различны по ширине и высоте, но одинаковы в отношении чётности / нечётности количества пиксел.

После выполнения процедур алгоритма создаются три файла:

"< название пробы >\_hc.txt" – файл значений энтропии и сложности в каждой точке снимка;

"< название пробы >\_hmcm.txt" – файл средних значений энтропии и сложности, рассчитанных по всему массиву точек снимка;

"< название пробы >\_limt.txt" – файл значений верхнего и нижнего пределов.

Анализ полученных на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6610 LV цифровых изображений поверхности проб угля позволил оценить неоднородность их структуры. Для наглядной визуализации на рисунке 3.6 показаны распределения энтропии и сложности по цифровому изображению поверхности угольной пробы, справа сбоку приведена цветовая шкала диапазона распределения величин.

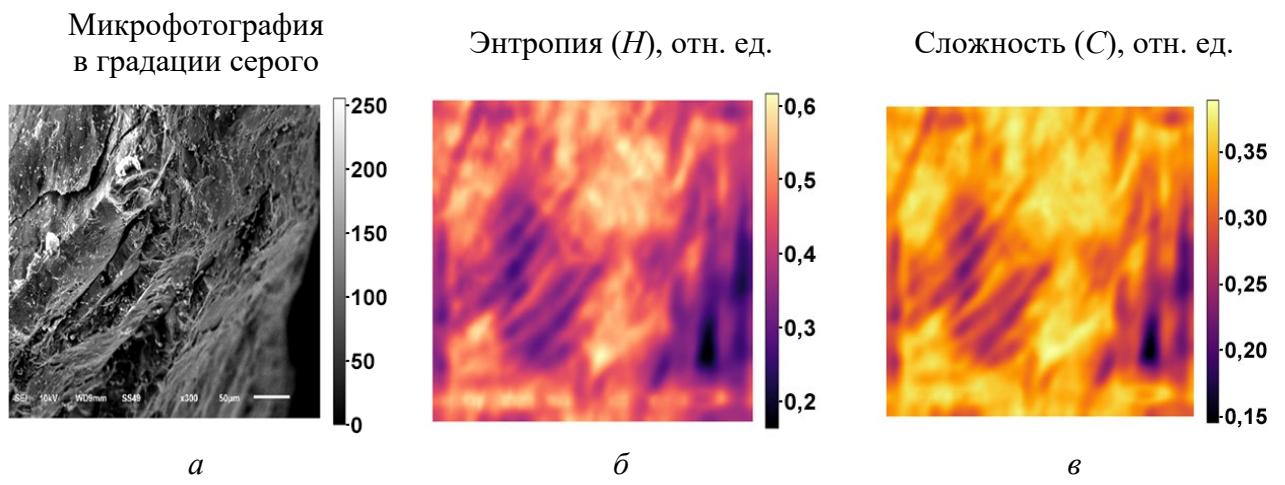
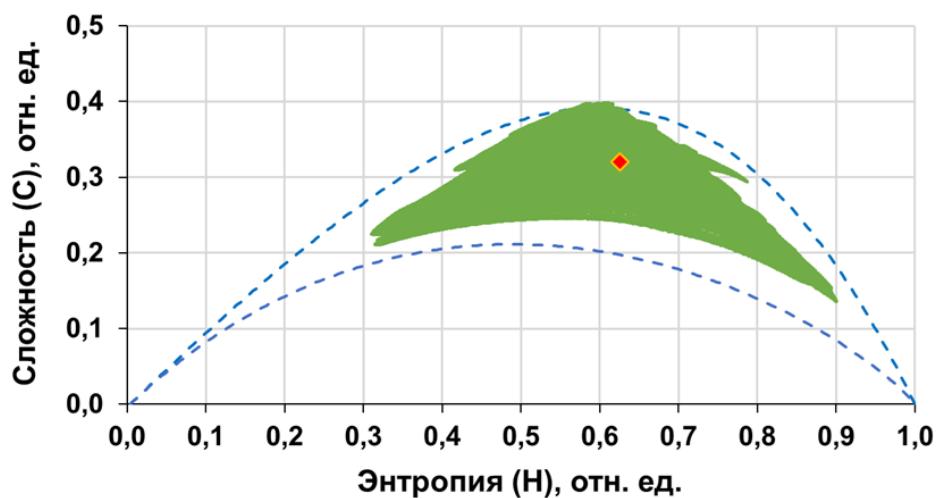


Рисунок 3.6 – Поля изменения значений энтропии и сложности, вычисленных по выбранному цифровому изображению поверхности угольной пробы (микрофотографии) [5]

Структура угля не бывает абсолютно упорядоченной, что хорошо видно на цифровом изображении поверхности угольной пробы, показанной на рисунке 3.6 а. Изображение получено с увеличением микронного уровня, ввиду того что данный масштаб позволяет получить информацию о распределении отдельных зёрен угля, микропор и трещин с характерным размером, недостаточным для свободной фильтрации метана [53].

Изменение значений энтропии и сложности вдоль поверхности одного цифрового изображения может показывать большой диапазон разброса: в среднем

от 0,3 до 0,9 отн. ед. для энтропии и от 0,1 до 0,4 отн. ед. для сложности (значения рассчитаны в относительных величинах, то есть безразмерные) (рисунок 3.6 б, в). Типичное распределение области разброса вычисленных значений показано зелёным цветом на рисунке 3.7 на представленной диаграмме «энтропия – сложность». Поэтому для получения достоверной информации определяется среднее значение энтропии и сложности, то есть наиболее вероятное состояние системы, в виде одной точки, ассоциированной для каждого изображения (показанной красной точкой на рисунке 3.7) [53]. Средние значения энтропии и сложности вычисляются программой и записываются в файл “<название пробы>\_hmcm.txt”, определив таким образом средние значения «энтропия – сложность» для каждого из приблизительно 40 цифровых изображений. Так как по каждой пробе снимается несколько цифровых изображений, то полученные точки, нанесённые на диаграмму «энтропия – сложность», характеризуют распределение структурных неоднородностей в этой пробе. Затем в программе обработки массивов чисел, например, Microsoft Excel, формируется массив данных и строится диаграмма в системе координат «энтропия – сложность» по всей серии снимков исследуемой пробы.



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

Рисунок 3.7 – Оценка неоднородности микроструктуры в системе координат «энтропия – сложность» по одной микрофотографии [13]

Далее на рисунках 3.8 – 3.10 для примера приведены диаграммы в системе координат пространственных «энтропии – сложности», являющиеся результатом оценки степени упорядоченности пространственной ориентации элементов по цифровым изображениям поверхности исследуемых проб угля из шахт «Имени С.М. Кирова» и «Имени А.Д. Рубана» и относящихся к разным группам по склонности к опасным явлениям.

### **3.6 Исследование связи неоднородности структуры ископаемого каменного угля с его способностью к удержанию метана в призабойной зоне пласта**

Для определения газоносности призабойной зоны угольных пластов было проведено исследование их газонасыщенности вблизи обнажения на шахтах «Имени С.М. Кирова» и «Имени А.Д. Рубана» АО «СУЭК-Кузбасс». Использовалась разработанная в ИПКОН РАН методика, описанная в главе 2 и в работе [6]. Результаты определения газоносности в призабойной зоне угольных пластов представлены в таблице 3.2. На рисунках 3.8 – 3.10 приведены рассчитанные значения энтропии и сложности для двух групп углей из таблиц 3.2, 3.3 и ещё серии проб, отобранных из тех же шахт на месяц раньше. Приведённые пробы углей выбраны потому, что угольные пласты шахты «Имени А.Д. Рубана» обладают наименьшей, а пласты шахты «Имени С.М. Кирова» – наибольшей газоносностью призабойной зоны из общего количества обследованных угольных пластов АО «СУЭК-Кузбасс».

Из приведенных диаграмм (рисунок 3.9) и таблицы 3.2 видно, что угли шахты «Имени А.Д. Рубана» с меньшими значениями газоносности призабойной зоны пласта (в среднем  $1,3 - 3,7 \text{ м}^3/\text{т}$ ) обладают более упорядоченной микроструктурой. Наибольшее значение энтропии не превышает 0,72 отн. ед. Среднее арифметическое значение и медиана совпадают и равны 0,62 отн. ед. Угли шахты «Имени С.М. Кирова» с высокой газоносностью (рисунок 3.10), в среднем  $11 - 12 \text{ м}^3/\text{т}$ , показывают более хаотичную структуру, с максимальными значениями энтропии 0,88 отн. ед. Среднее арифметическое значение равно 0,68 отн. ед. Разброс значений  $H$  и  $C$  для углей шахты «Имени А.Д. Рубана» также значительно

меньше, чем для углей шахты «Имени С.М. Кирова» (таблицы 3.2, 3.3). То есть в целом значения энтропии расположены в области более высоких значений, указывающей на более нарушенную (неоднородную) структуру этих углей. Это свидетельствует о том, что угли с меньшей газоносностью призабойной зоны структурно более упорядочены [6].

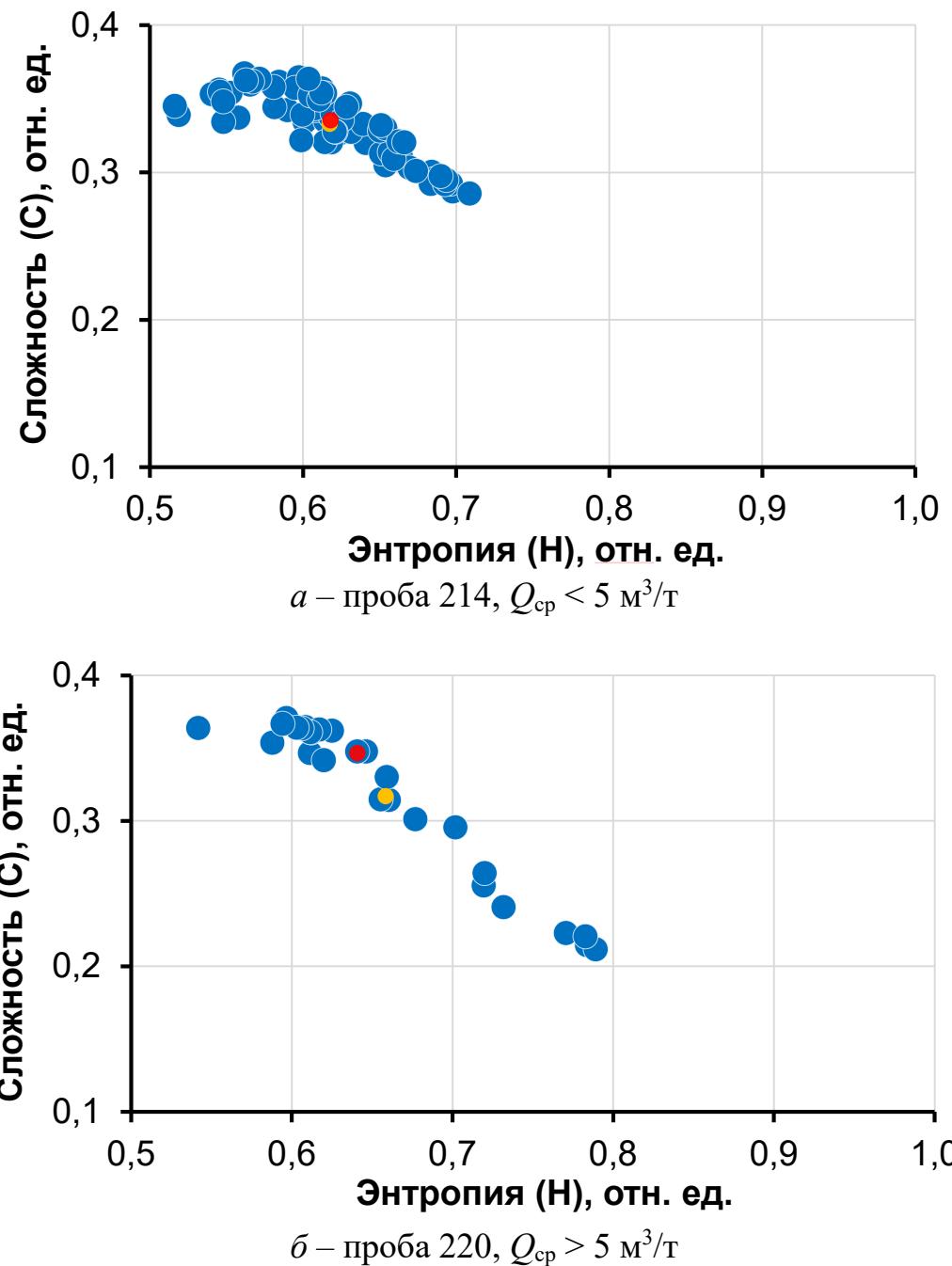


Рисунок 3.8 – Диаграммы значений «энтропия – сложность» цифровых изображений проб углей с низкой (а) и высокой (б) газоносностью призабойной зоны [6]

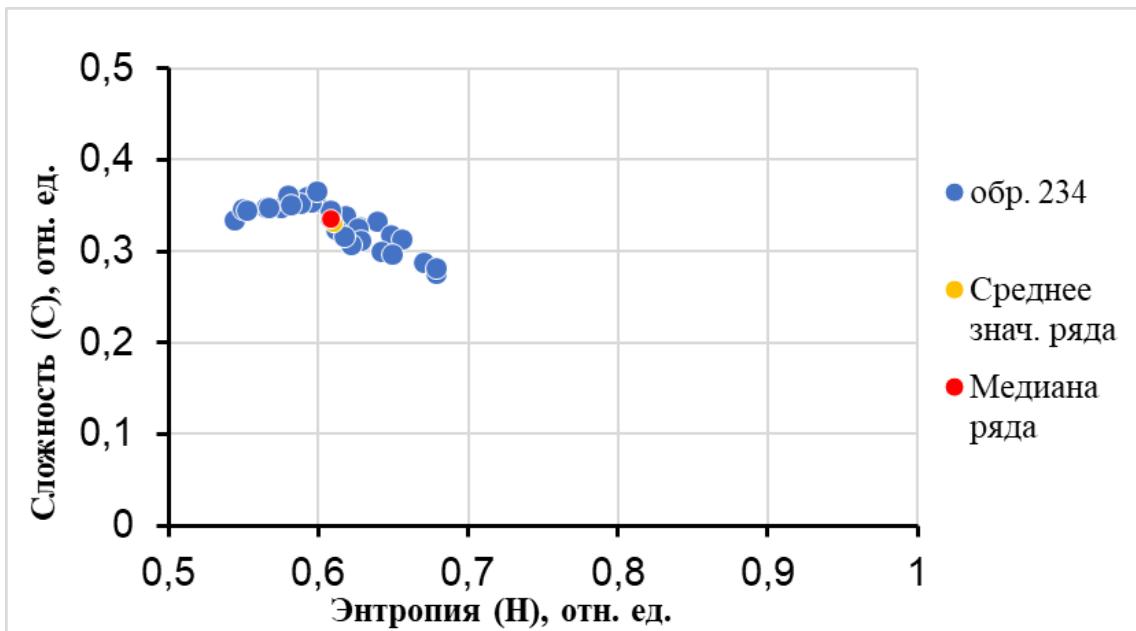


Рисунок 3.9 – Диаграммы распределения значений «энтропия – сложность» для серий снимков поверхности угля пробы 234, шахта им. А.Д. Рубана, пласт Полясаевский, лава 816, отобран 21.05.2020 [6]

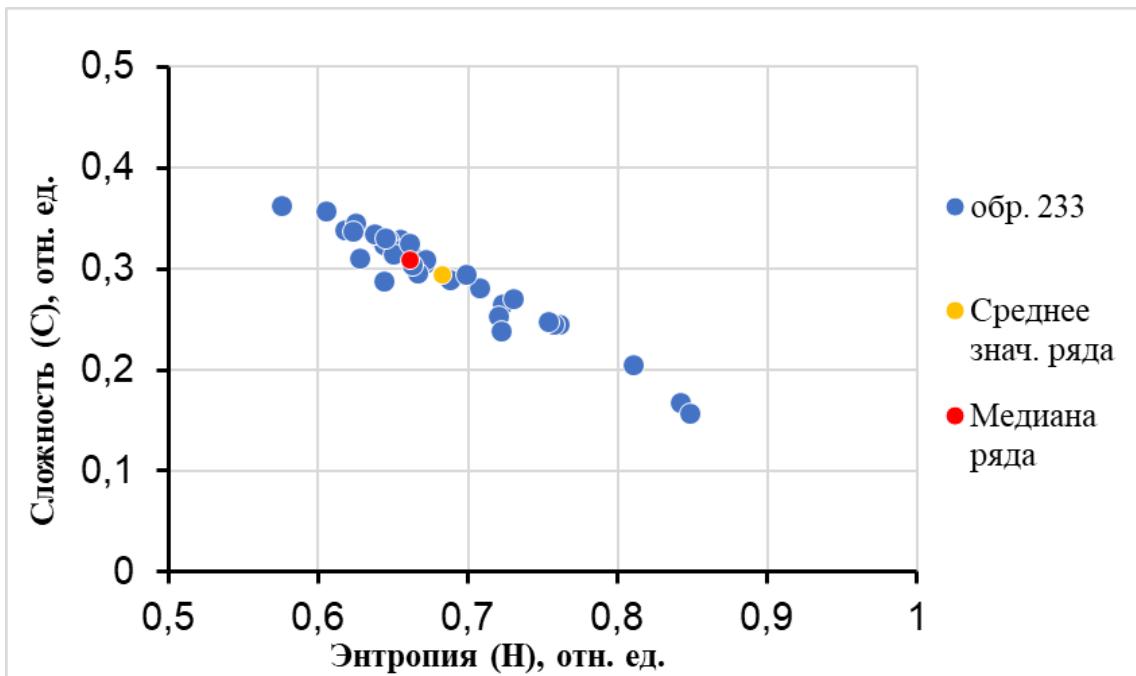


Рисунок 3.10 – Диаграммы распределения значений «энтропия – сложность» для серий снимков поверхности пробы угля 233, шахта «Имени С.М. Кирова», пласт Поленовский, лава 25-97, отобран 14.05.2020 [6]

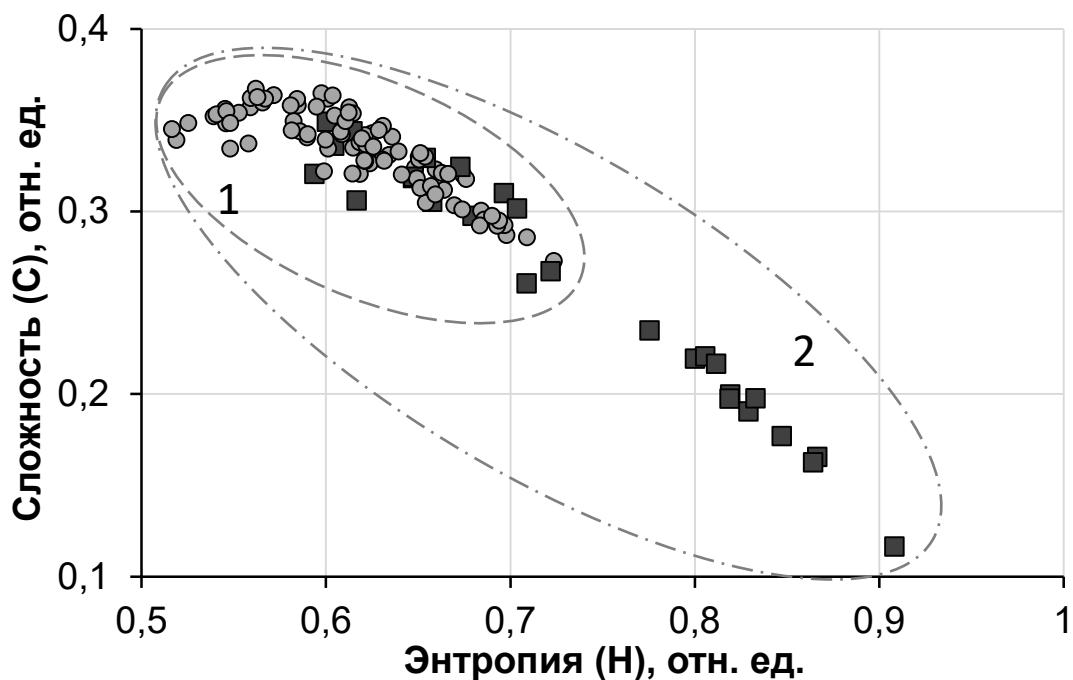
Таблица 3.2 – Сопоставление данных лабораторных исследований газоносности и статистических характеристик распределения значений «энтропия – сложность» угольных проб [6]

Дата	Шахта, пласт	Место отбора	Вычисленные значения $Q$ , $\text{м}^3/\text{т}$	Среднее значение $Q_{\text{ср}}$ , $\text{м}^3/\text{т}$	Разброс энтропии $H$ , отн. ед.	Разброс сложности $C$ , отн. ед.
15.05. 2019	им. А. Д. Рубана, Польсаевский-2	ДВШ 816	3,65	3,7	0,23	0,140
			4,04			
			3,45			
			3,78			
		Лава 814	1,32	1,3	0,19	0,08
			0,30			
			0,21			
		Проходка	2,79			
			1,89			
20.03. 2019	им. С. М. Кирова, Поленовский	Лава 25-97-1	11,48	11,26	0,38	0,250
			11,03			
			11,27			
		КП 2597	13,45	11,27	0,25	0,150
			12,05			
			7,71			
			11,86			

Таблица 3.3 – Газонасыщенность призабойной зоны  $Q$  и значения статистических энтропии  $H$  и сложности  $C$  (максимальные, минимальные и диапазон изменений)

№	Место отбора проб, шахта, пласт	,	$\text{м}^3/\text{т}$	$H_{\min}$	$H_{\max}$	$\Delta H$	$C_{\min}$	$C_{\max}$	$\Delta C$
213	ш. им. С.М. Кирова, пл. Поленовский	проходка	<b>11,3</b>	0,53	0,91	0,38	0,12	0,36	0,25
220		выработка КП 25-97	<b>11,2</b>	0,54	0,79	0,25	0,21	0,37	0,16
233		лава 25-97	<b>9,4</b>	0,58	0,85	0,27	0,16	0,36	0,21
235		путевой штрек 25-04	<b>10,6</b>	0,62	0,79	0,17	0,23	0,34	0,12
236		ВП 25-98	<b>7,6</b>	0,64	0,74	0,10	0,23	0,29	0,06
237		ВП 25-98, люков. печь 15	<b>7,6</b>	0,68	0,83	0,16	0,19	0,27	0,09
253	ш. им. С.М. Кирова, пл. Болдыревский	ЦМКШ, 24-03 МТ 1491	<b>9,1</b>	0,53	0,84	0,31	0,17	0,35	0,18
256		лава 24-63, ВШ 24-63	<b>9,4</b>	0,57	0,81	0,24	0,21	0,36	0,15
261		24-64 КП, МТ1530 +100 м	<b>10,3</b>	0,54	0,81	0,27	0,20	0,35	0,15
222	ш. им. С.М. Кирова, пл. Поленовский	лава 25-97, секция 58/174,	4,7	0,55	0,71	0,24	0,26	0,36	0,13
248	ш. А.Д. Рубана, пл. Польсаевский-2	ПШ 809, уч. Благодатный	3,2	0,60	0,74	0,25	0,26	0,34	0,16
214		лава	1,3	1,3	0,52	0,71	0,19	0,29	0,37
234			1,3	1,3	0,54	0,68	0,14	0,27	0,37
221		лава 814,	3,8	0,53	0,76	0,23	0,22	0,37	0,37
249	ш. 7 Ноября-Новая, пл. Сычевский	вент. штрек 26-8,	1,7	0,56	0,73	0,20	0,28	0,36	0,14

Таким образом, установлена взаимосвязь неоднородности микроструктуры ископаемого каменного угля с его способностью к удержанию метана в призабойной зоне пласта. Анализ цифровых снимков поверхности проб углей, относящихся к разным группам по газоносности, показал, что угли, отличающиеся большей неоднородностью микроструктуры, соответствуют угольным пластам, призабойные зоны которых обладают более высокой газоносностью, то есть лучше удерживают метан. На рисунке 3.11 показаны области значений «энтропии – сложности» для углей с низкой (область 1) способностью к удержанию метана (низкой газоносностью призабойной зоны) и углей с более высокой газоносностью (область 2 на рисунке 3.11).



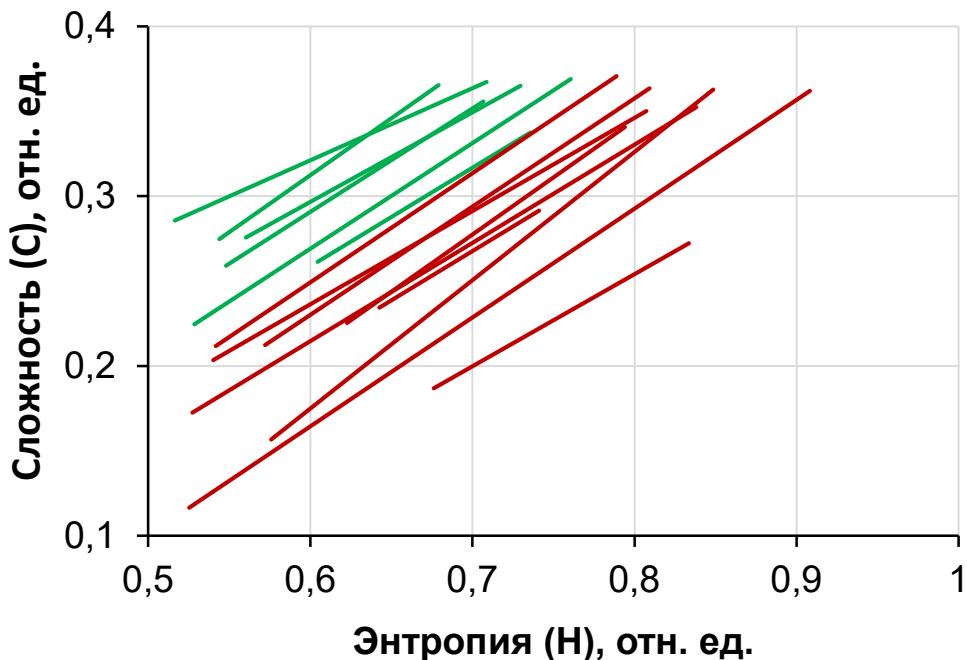
1 – угли из пласта Полясаевский-2, шахты им. А.Д. Рубана,  $Q = 1,3 \text{ м}^3/\text{т}$ ;

2 – угли из пласта Поленовский, шахты им. С.М. Кирова,  $Q = 11,26 \text{ м}^3/\text{т}$ .

Рисунок 3.11 – Диаграмма «энтропия – сложность» отражающая области разделения для углей с различной остаточной газоносностью  $Q$  по неоднородности их микроструктуры

На рисунке 3.12 приведены диапазоны изменения значений «энтропия – сложность» для проб, приведенных в таблице 3.3. Красными линиями показаны диапазоны значений для углей с высокой газоносностью,

зелёными – с низкой. Для наглядности графики, исходно располагающиеся от левого верхнего угла до правого нижнего и перекрывающие друг на друга, развернуты на 90 градусов.



Примечание: линии на данном графике зеркально отражены по оси абсцисс в целях наглядности.

Рисунок 3.12 – Диапазон изменения распределения энтропии и сложности для серии снимков поверхности проб углей, приведенных в таблице 3.3

Из рисунка 3.12 также видно, что диапазон изменения значений «энтропии – сложности» для проб углей с высокой газоносностью призабойной зоны больше, чем для углей с более низкой газоносностью (коррелирует с областями 2 и 1 на рисунке 3.11 соответственно).

### **3.7 Анализ связи неоднородности микроструктуры угля с различными петрографическими литотипами каменных углей**

Учитывая заметную петрографическую неоднородность состава углей, отмеченную в параграфе 3.3, для получения наиболее полной и достоверной информации о структуре углей при их исследовании под микроскопом из каждой пластовой пробы угля отбирались пробы с блестящей и матовой поверхностью (рисунок 3.2), наиболее полно представляющие уголь.

Исследуется взаимосвязь неоднородности микроструктуры углей с газоносностью призабойной зоны угольных пластов, раздельно для двух основных групп макералов: витринита и инертинита.

На всех полученных цифровых изображениях присутствуют участки с разным соотношением неоднородности, поэтому статистическая обработка снимков с использованием метода построения диаграммам «энтропия – сложность», позволит выявить присутствие закономерностей в этом структурном хаосе. Расчёт значений пространственных информационной энтропии ( $H$ ) и статистической сложности ( $C$ ), проводился этим методом по цифровым снимкам поверхности проб угля из шахт им. С. М. Кирова и им. А. Д. Рубана, Кузнецкого бассейна. На рисунке 3.13 показан пример распределения неоднородностей для углей с наименьшим ( $Q_{cp} = 1,3 \text{ м}^3/\text{т}$ ) и наибольшим ( $Q_{cp} = 11,3 \text{ м}^3/\text{т}$ ) содержанием метана в призабойной области [49].

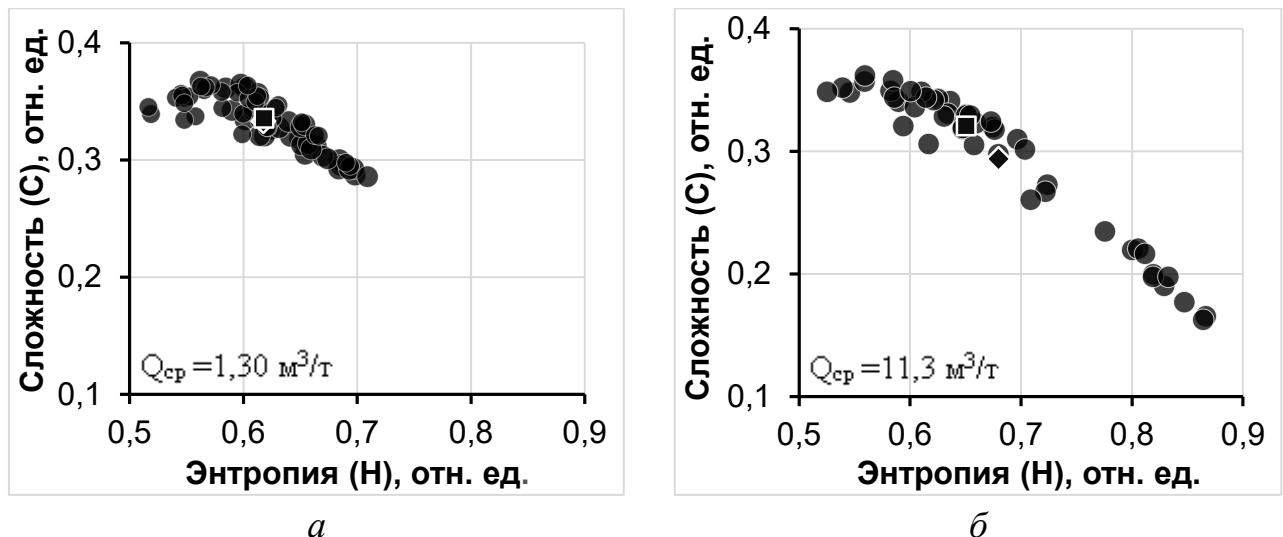
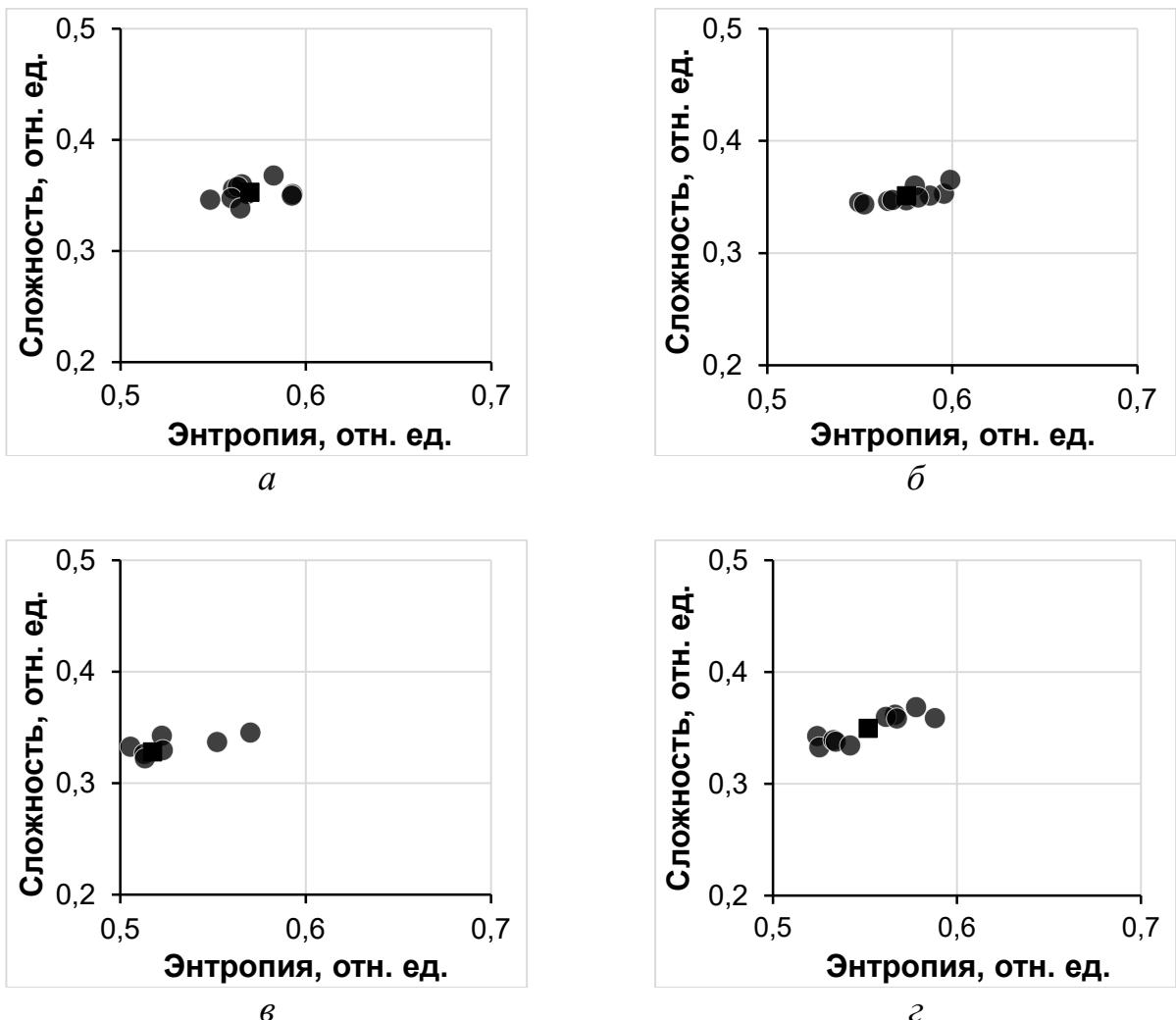


Рисунок 3.13 – Диаграммы распределения значений мер энтропии и сложности серий снимков проб угля с минимальной (а) и максимальной (б) газоносностью призабойной зоны угольных пластов из шахт им. С.М. Кирова и им. А.Д. Рубана, Кузнецкого бассейна [49]

Из диаграмм на рисунке 3.13 видно, что угли имеющие небольшую газоносность пласта вблизи обнажения, обладают более упорядоченной микроструктурой, характеризующейся наибольшим значением энтропии около 0,71 отн. ед. и наименьшей сложностью 0,28 отн. ед. В то время, как угли с газоносностью 11–12  $\text{м}^3/\text{т}$ , обладают значительно более хаотичной структурой,

с максимальными значениями энтропии 0,88 отн. ед. и сложности 0,16 отн. ед. Сравнение цифровых характеристик микроструктуры двух основных петрографических составляющих угольного вещества инертинита и витринита показало следующее: микроструктура инертинита, определенная по разбросу значений величин энтропии и сложности, практически одинакова для всех образцов углей с высокой и низкой остаточной газоносностью. На рисунке 3.14 приведены диаграммы «энтропия – сложность» для исследованных углей с минимальным и максимальным количеством метана в призабойной области пласта, снятых на матовых пробах угля [49].

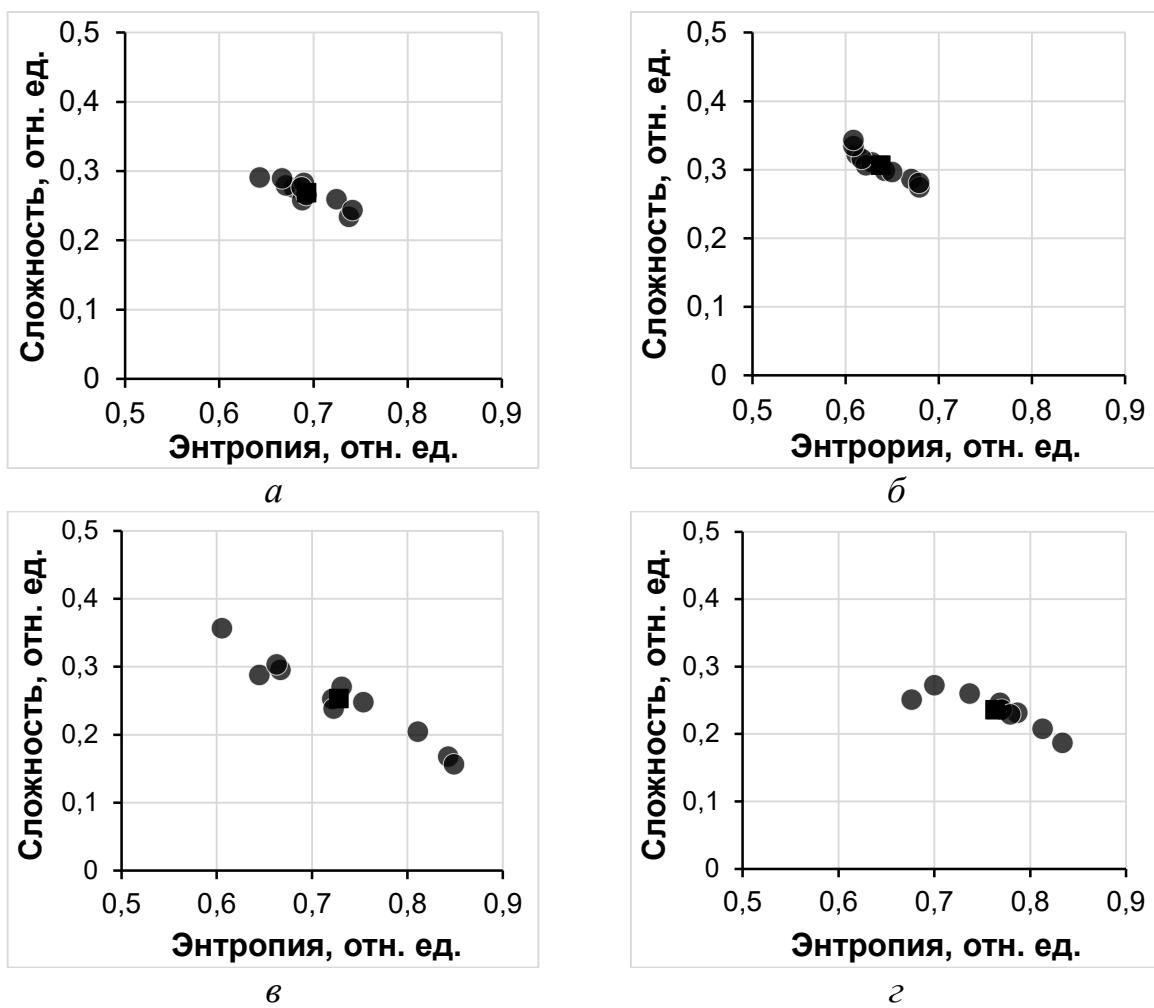


*a, б* – содержание газа в призабойной зоне угольных пластов около  $2 \text{ м}^3/\text{т}$ ;  
*в, г* – содержание газа в призабойной зоне угольных пластов  
 в интервале  $8 - 12 \text{ м}^3/\text{т}$ .

Рисунок 3.14 – Диаграммы значений «энтропия – сложность»,  
 определенных для матовых проб угля [49]

На всех диаграммах (рисунок 3.14) чёрным квадратом отмечено среднее значение величин энтропии и сложности для каждой пробы. На приведенных на рисунке 3.14 диаграммах разброс значений энтропии находится в пределах от 0,5 до 0,6 отн. ед., сложности от 0,3 до 0,4 отн. ед. для всех углей, хотя содержание газа в этих углях меняется в интервале от 2 до 12 м<sup>3</sup>/т [49].

Разброс значений энтропии и сложности для проб углей витринитовой составляющей (с блестящей поверхностью) с высокой газоносностью существенно отличается от значений энтропии и сложности для углей с низкой газоносностью, что хорошо видно на рисунок 3.15 [49].



*a, б – содержание газа в призабойной зоне угольных пластов около 2 м<sup>3</sup>/т;  
в, г – содержание газа в призабойной зоне угольных пластов 8 – 10 м<sup>3</sup>/т.*  
Рисунок 3.15 – Диаграммы значений «энтропия – сложность» цифровых изображений проб углей с блестящей поверхностью [49]

На рисунке 3.16 отдельно для наглядности вынесены средние значения энтропии и сложности для исследованных матовых проб углей с разным содержанием метана в призабойной области пласта.

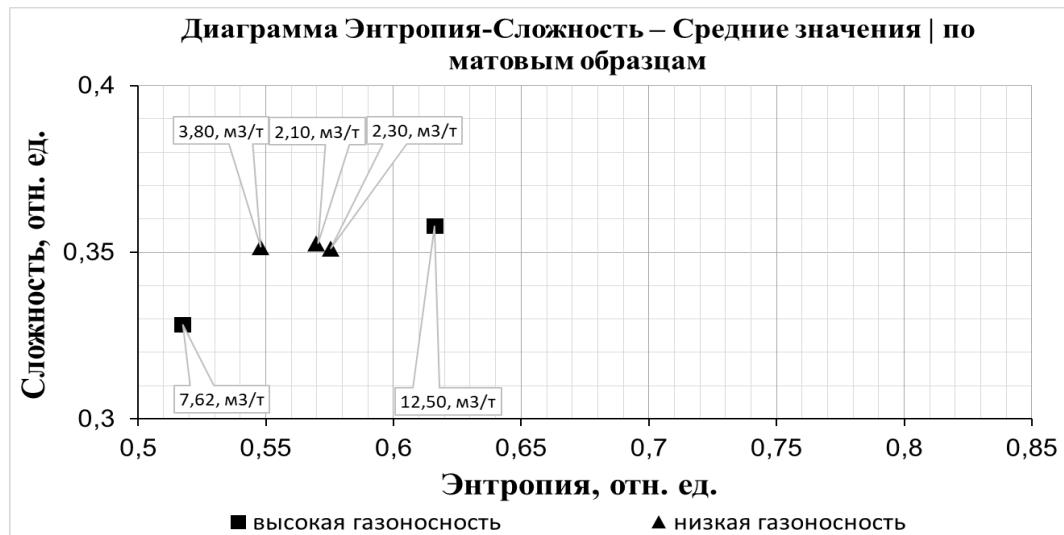


Рисунок 3.16 – Диаграмма средних значений «энтропия – сложность», рассчитанных по изображениям поверхности матовым образцам угля [49]

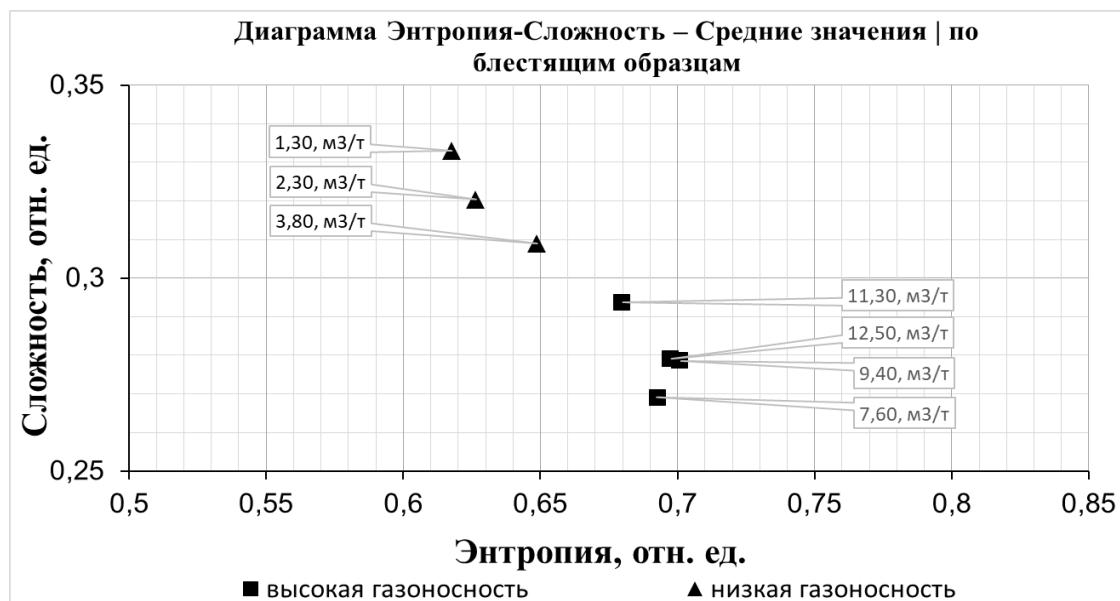


Рисунок 3.17 – Диаграмма значений «энтропия – сложность» цифровых изображений образцов углей с блестящей поверхностью [49]

Проведённое сравнение средних значений пространственных «энтропии – сложности», рассчитанных на пробах с блестящей поверхностью

(витринитовая составляющая) для углей разной метаносности в призабойной области пласта, показало их существенное отличие (рисунок 3.17) [49].

Исходя из проведённых исследований о связи неоднородности угольной микроструктуры и различными петрографическими литотипами каменных углей, а также ранее изложенных утверждений, следует, что сорбционные центры, удерживающие метан, располагаются преимущественно в алифатической части витринитовых составляющих углей, и для получения достоверной информации об остаточной газонасыщенности угля достаточно исследовать цифровые изображения поверхности образцов только с блестящей поверхностью.

### **3.8 Выводы по главе 3**

В главе приведено исследование взаимосвязи между способностью ископаемого каменного угля к удержанию метана и неоднородностью его микроструктуры методом построения и анализа диаграммам «энтропия – сложность» для углей с высокой и низкой газоносностью.

По составленной базе данных, содержащей сотни снимков поверхности угольных проб, были рассчитаны пространственные информационная энтропия  $H$  и статистическая сложность  $C$ , позволившие оценить пространственную неоднородность (упорядоченность) элементов структуры исследуемых проб. По сделанным расчётам значений энтропии и сложности построены диаграммы, характеризующие хаотичность неоднородности микроструктуры проб угля.

Определение газонасыщенности призабойной зоны угольных пластов, проведённое на ряде шахт АО «СУЭК-Кузбасс», показало, что уголь в зоне обнажения пласта содержит ещё довольно много метана, причём его количество в угле варьирует в широких пределах в зависимости от особенностей микроструктуры угля.

Определение газоносности углей в призабойной зоне разрабатываемых угольных пластов шахт им. А.Д. Рубана и им. С.М. Кирова по методике ИПКОН РАН, совместно с оценкой неоднородности (упорядоченности) микроструктуры этих углей по диаграммам «энтропия – сложность», рассчитанным

по цифровым снимкам их поверхности, позволило выявить значимое различие неоднородности микроструктуры для углей с высокой и низкой газоносностью, тем самым показало, что количество газа, остающегося в призабойной зоне пласта, связано со структурой угля на микронном уровне.

Исследование позволило установить, что угли пластов с меньшими значениями газоносности призабойной зоны (в среднем  $1,3 - 3,7 \text{ м}^3/\text{т}$ ) обладают более упорядоченной структурой на микроуровне с диапазоном разброса значений энтропии 0,2 отн. ед. и сложности 0,1 отн. ед., тогда как микроструктура углей с более высокой газоносностью (в среднем  $11 - 12 \text{ м}^3/\text{т}$ ), наряду с упорядоченными областями, содержит также и области с менее упорядоченной организацией структурных элементов (хаотичной), на что указывает диапазон разброса соответствующих им значений энтропии 0,4 отн. ед. и сложности 0,25 отн. ед. Это объясняется тем, что неоднородность микроструктуры угля связана с разрывом химических связей и образованием не скомпенсированных групп (свободных радикалов), увеличение которых, видимо, и позволяет удерживаться большему количеству метана в угле.

Сравнение микроструктурных особенностей двух основных петрографических составляющих угольного вещества, инертинита и витринита, показало, что витринитовая составляющая угля в большей степени отражает изменения микроструктуры, связанные со способностью угля к накоплению и удержанию метана, чем инертинитовая составляющая, для которой разброс значений энтропии и сложности практически одинаков для всех проб углей, как с высокой, так и низкой газоносностью. Поэтому для оценки возможной газоносности призабойной зоны угольного пласта по структурной неоднородности угля достаточно исследовать только его блестящую, витринитовую составляющую.

Уголь, отделенный от пласта, содержит около 80 % метана от газоносности угля в призабойной зоне, который в течение нескольких часов интенсивно выделяется из углей с более упорядоченной микроструктурой.

Величина газоносности призабойной зоны пласта и скорость выхода метана из отбитого угля связаны с его структурной упорядоченностью на микроуровне.

## **Глава 4 Связь неоднородности микроструктуры каменных углей с их склонностью к внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию**

В предыдущей главе было показано, что газонасыщенность призабойной зоны угольного пласта существенно зависит от неоднородности (нарушенности) микроструктуры угля. Уголь с более нарушенной, неоднородной микроструктурой, содержащий больше парамагнитных центров (ПМЦ) в алифатической составляющей, способен удерживать больше метана в призабойной зоне пласта, что может быть связано и со склонностью угольного пласта к опасным явлениям. Согласно этим выводам в данной главе приведены исследования углей, склонных к внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию. Связь склонности каменных углей к таким явлениям в шахтах с особенностями их микроструктуры исследовалась с помощью количественной оценки неоднородности микроструктуры углей, определенной по цифровым изображениям их поверхности и рассчитанным значениям информационных энтропии и сложности.

### **4.1 Исследование связи микроструктурных особенностей каменных углей со склонностью пластов к внезапным выбросам угля и газа**

Проведено исследование связи неоднородности микроструктуры со склонностью угля к выбросоопасности. В таблице 4.1 представлены характеристики шести проб каменного угля, отобранных из зоны выброса, из выбросоопасной и из неопасной по внезапным выбросам угля и газа зон шахт «Им. А.А. Скочинского», «Комсомольская» и «Осинниковская».

Исследовались цифровые изображения поверхности угольных проб, полученные при тысячекратном увеличении, так как это даёт информацию о неоднородности угольной структуры порядка одного микрона. Размеры и взаимное расположение отдельностей структуры на таком уровне уже не допускает трещин, в которых возможно движение флюида в режиме фильтрации. Поэтому именно такой уровень исследования структуры

представляет интерес для изучения структурных особенностей склонных к выбросоопасности и самовозгоранию углей, то есть явлений, для которых фильтрация газа весьма существенна.

Таблица 4.1 – Технические характеристики ископаемых углей

№№	Выбросоопасность	V <sup>daf</sup> , %	A <sup>d</sup> , %	W <sup>a</sup> , %
179	зона выброса	31,70	4,17	1,15
180	зона выброса	31,90	2,69	1,30
181	зона выброса	30,01	11,25	0,96
182	невыбросоопасная зона	30,19	12,99	1,19
192	невыбросоопасный пласт	26,56	20,93	0,75
117	выбросоопасный пласт	29,97	3,43	1,10
118	невыбросоопасный пласт	30,30	4,40	–

Для всех проб согласно описанной в главе 3 методики получены серии цифровых изображений их естественной поверхности, по которым рассчитывались значения величин информационных энтропии и сложности и строились соответствующие диаграммы, характеризующие неоднородность структуры углей на микроуровне. Полученные диаграммы распределения значений энтропии и сложности, характеризующие неоднородность микроструктуры, для углей, приведенных в таблице 4.1, показаны на рисунке 4.1.

Значения энтропии на рисунке 4.1 у углей из неопасных по выбросам мест заметно меньше (не превышают значение 0,71 отн. ед.), чем в двух других группах, что означает более упорядоченное строение микроструктуры углей из неопасных по выбросам угля и газа областей.

Для наглядности на рисунке 4.2 отдельно приведены диаграммы «энтропия – сложность» для углей одной марки шахты «Осинниковская»: проба 117, отобранная из выбросоопасного пласта Е-5 и проба 118 из невыбросоопасного пласта К-5.

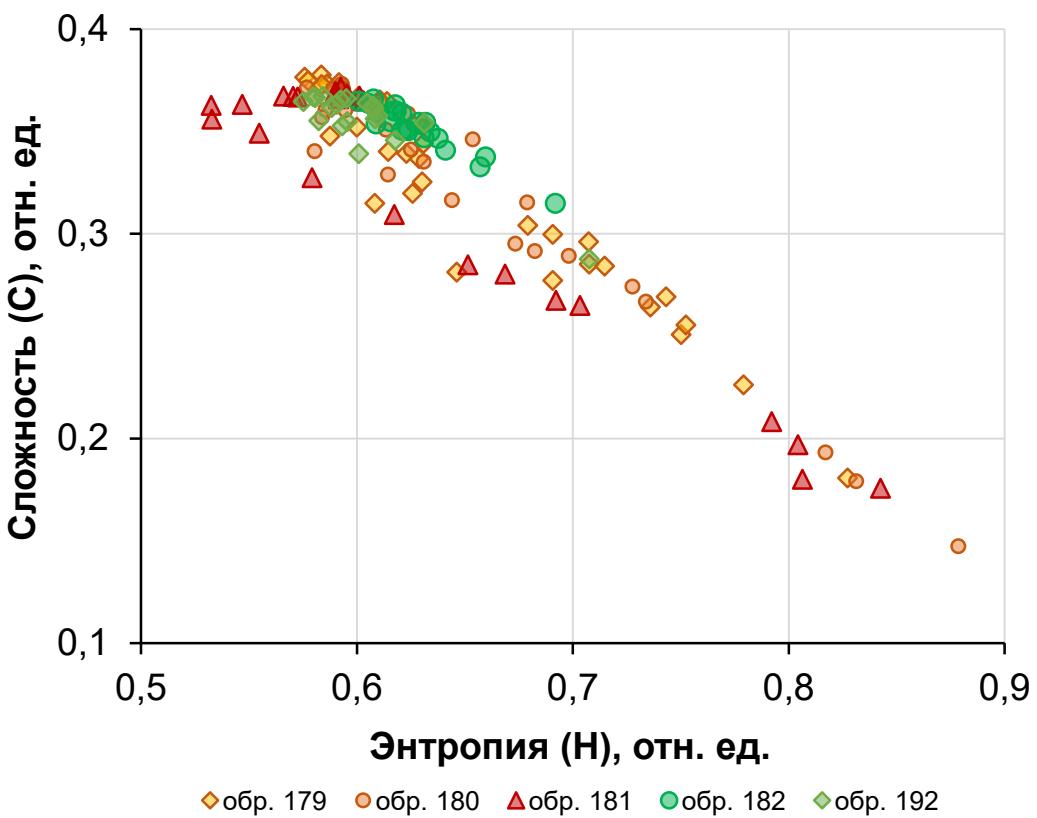
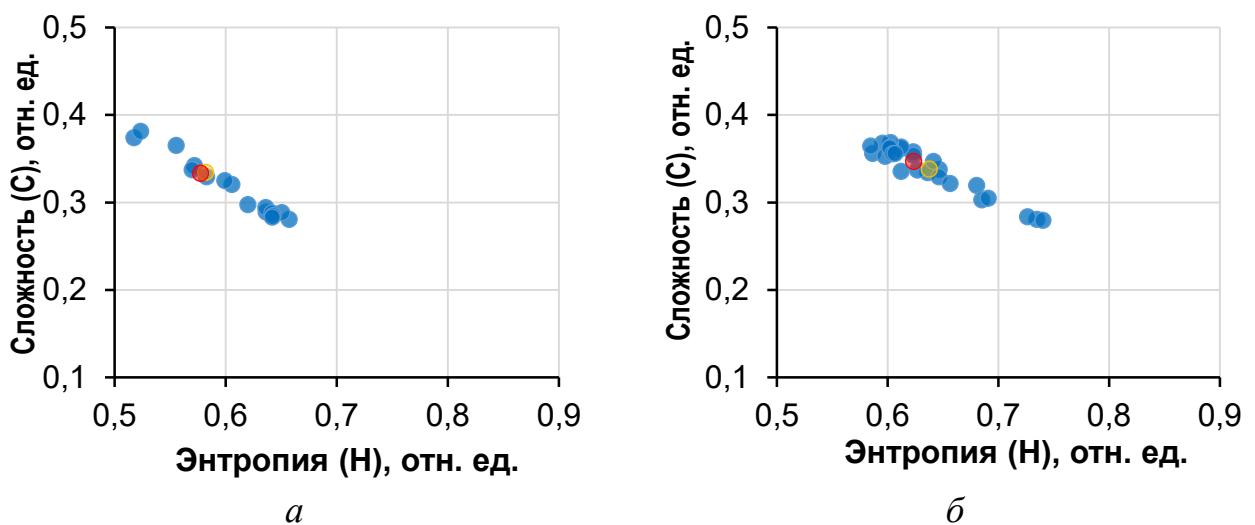


Рисунок 4.2 – Диаграмма значений информационных энтропии и сложности из неопасной по выбросам зон пласта (пробы 182 и 192) и из опасной и зоны выброса (пробы 179–181)



жёлтые точки – средние значения, красные точки – медиана  
*a* – невыбросоопасный пласт К-5 (проба 118);  
*б* – выбросоопасный пласт Е-5 (проба 117).

Рисунок 4.2 – Диаграммы «энтропия-сложность» для углей шахты «Осинниковская»

Результаты определения энтропии и сложности для угольных проб, приведенных на рисунке 4.2, показали, что проба 118, отобранная из невыбросоопасного пласта К-5 шахты «Осинниковская» со значениями энтропии в диапазоне 0,52 – 0,66 отн. ед., обладает менее нарушенной микроструктурой (с более упорядоченной системой элементов текстуры поверхности), чем проба 117 из выбросоопасного пласта Е-5 шахты «Осинниковская», с заметно большими значениями энтропии в диапазоне 0,59 – 0,74 отн. ед., что свидетельствует о заметно более нарушенной микроструктуре (более хаотичным расположением её элементов).

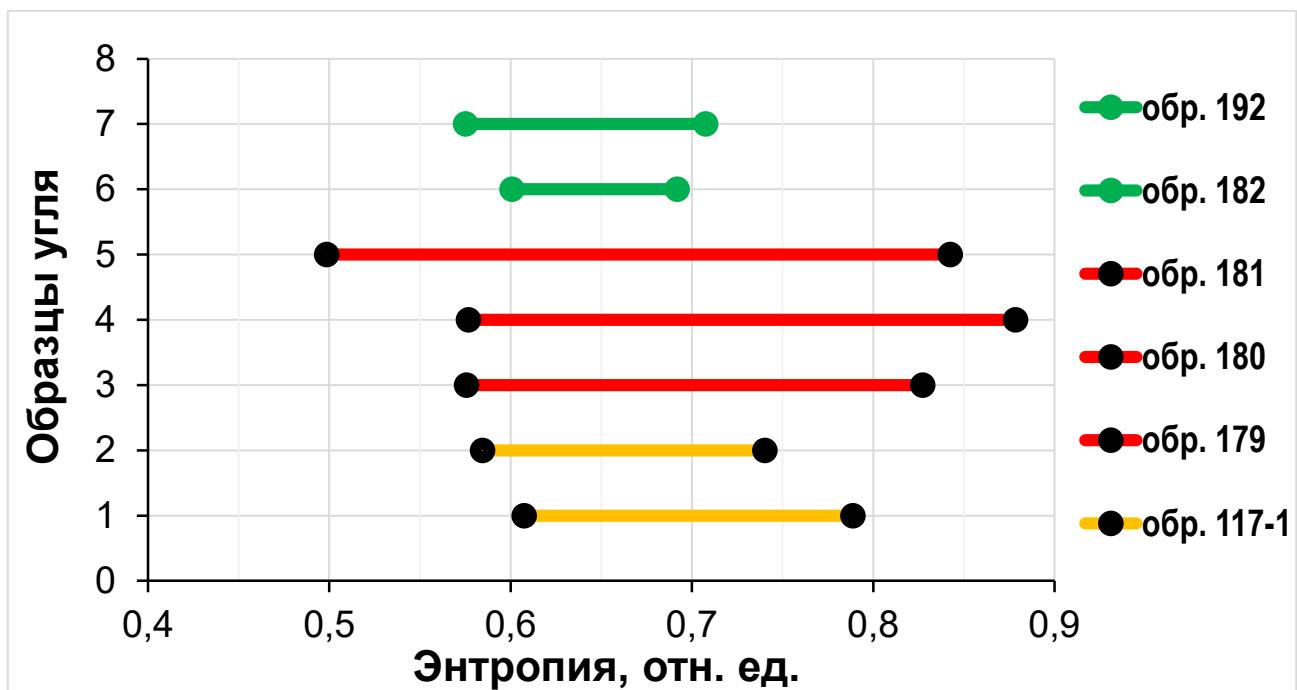
Разброс рассчитанных значений величин энтропии и сложности углей показал следующие зависимости:

- наибольший у углей из выбросоопасной зоны: энтропия от 0,53 до 0,88 отн. ед. и сложность от 0,15 до 0,38 отн. ед.;
- минимальный для углей из мест неопасных по выбросам: энтропия от 0,58 до 0,72 отн. ед. и сложность от 0,29 до 0,37 отн. ед.;

То есть в углях выбросоопасной области представлены все, присущие материалу – углю, области: присутствуют как наиболее нарушенные (неоднородные) участки, так и наиболее упорядоченные. В пробах из неопасной зоны пласта и из неопасного угольного пласта наблюдаются только более упорядоченные варианты микроструктуры.

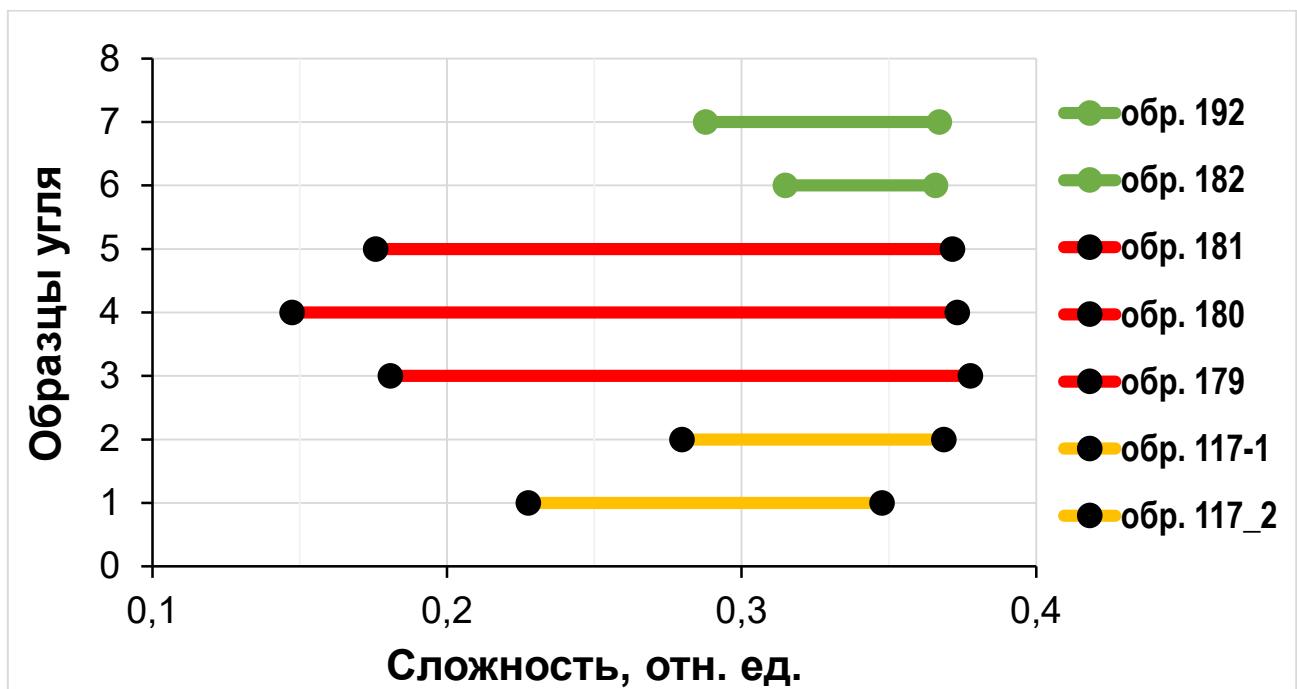
На рисунках 4.3 и 4.4 показаны разбросы значений энтропии (4.3) и сложности (4.4) исследованных проб углей.

Поскольку общий разброс значений достаточно велик: от 0,50 до 0,90 и от 0,20 до 0,35 относительных единиц (рисунки 4.1 – 4.4), для лучшей демонстрации полученных результатов ниже на рисунке 4.5 приведены значения энтропии и сложности, рассчитанные по углям одного пласта «Смоляниновский» шахты «Им. А.А. Скочинского» (Донбасс): из выброса и из зон опасной и неопасной по внезапным выбросам угля и газа пласта.



зеленая линия – из неопасных по выбросам пластов; красная линия – из выброса;  
желтая линия – из выбросоопасного пласта.

Рисунок 4.3 – Разброс значений информационной энтропии, полученные по цифровым изображениям поверхности углей



зеленая линия – из неопасных по выбросам пластов; красная линия – из выброса;  
желтая линия – из выбросоопасного пласта.

Рисунок 4.4 – Разброс значений статистической сложности, полученные по цифровым изображениям поверхности углей

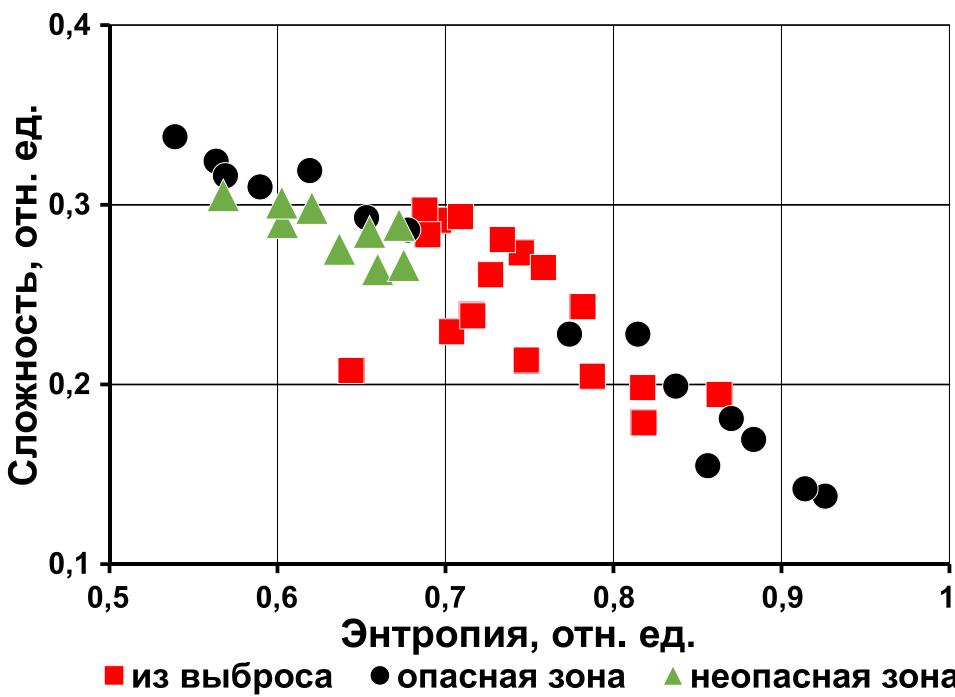


Рисунок 4.5 – Диаграмма значений информационных энтропии и сложности по цифровым изображениям поверхности углей из выброса и из опасной и неопасной по выбросам зон пласта [13]

На диаграмме «энтропия – сложность» для группы проб из неопасной области угольного пласта (зелёные треугольники на рисунке 4.5) видно, что разброс значений группируется в диапазоне 0,50 – 0,70 отн. ед. по оси энтропии и 0,25 – 0,35 отн. ед. по оси сложности. Исходя из наблюдаемой экспериментальной области распределения значений величин  $H$  и  $C$  и в соответствии с определениями, изложенными в главе 3, пробы угля из неопасной области пласта характеризуются более упорядоченной системой элементов микроструктуры угля.

Группа проб углей из выбросоопасной зоны, как видно из рисунка 4.5 (чёрные точки), обладает более неоднородным распределением структурных элементов. Разброс разделился на две группы значений «энтропия – сложность» и содержит как области с более упорядоченной структурой, так и со структурой близкой к полному хаосу. Одна часть значений энтропии и сложности характеризуется аналогично структуре проб из неопасной области: диапазон 0,50 – 0,70 отн. ед. по энтропии и 0,25 – 0,35 отн. ед. по сложности. Вторая часть характеризует значительно более неоднородное (разупорядоченное) строение –

со значениями энтропии  $0,75 - 0,95$  отн. ед. и минимальными значениями сложности  $0,10 - 0,25$  отн. ед. Тот факт, что неоднородность элементов структуры угля из зоны, склонной к внезапным выбросам, описывается большим разбросом – сочетанием высоко упорядоченных элементов с наиболее хаотичными структурами – говорит о том, что в таких зонах создаются условия для повышения вероятности развязывания газодинамических явлений.

Разброс значений, характеризующий пробы выброшенного угля (красные квадраты на рисунке 4.5) пласта Смоляниновского, демонстрирует любопытное распределение. Наиболее хаотично ориентированные элементы, которые присутствуют в выбросоопасном участке, практически исчезают – значение энтропии составляет  $0,65 - 0,85$  отн. ед. и значение сложности –  $0,15 - 0,3$  отн. ед. Такое распределение можно объяснить тем, что в процессе выброса наибольшему разрушению подвержена та часть угля, элементы которой имеют наиболее хаотичную организацию структуры, с большими значениями энтропии  $0,85 - 0,95$  отн. ед. Такой уголь в процессе выброса может разрушаться до фракции пыли с образованием «бешеной муки» и отрывом большого количества метильных групп  $-\text{CH}_3$ , что и приводит к образованию метана в процессе выброса [132], [133]. Это хорошо согласуется с тем, что, как показали проведенные исследования, выбросоопасный участок пласта характеризуется повышенным значением летучих веществ [133], а в выброшенном угле показатель летучих снижается, то есть при выбросе происходит «ускоренный метаморфизм» угля с разрывом наиболее слабых связей в его алифатической составляющей [134]. Сохранившиеся фрагменты угля в виде неразрушенных кусочков, показывают несколько более упорядоченную структуру с энтропией  $0,65 - 0,85$  отн. ед., но более хаотичную, чем неопасная область угольного пласта.

На примере проб угля из пласта «Смоляниновский» показано, что организация структуры на микронном уровне у углей из выбросоопасных зон сочетает области как с наиболее хаотичной, так и более упорядоченные области, характерные для углей неопасных областей. Пробы выброшенного угля демонстрируют достаточно упорядоченный характер структуры, но менее,

чем угли из неопасной области, и в тоже время отсутствие наиболее хаотичных структур.

## 4.2 Исследование связи микроструктурных особенностей каменных углей со склонностью пластов к самовозгоранию

При добыче угля подземным способом риск возникновения эндогенных пожаров, с одной стороны, обусловлен склонностью угля к самовозгоранию ввиду сложной природы угля и его способности сорбировать кислород с выделением тепла; с другой стороны, внешние факторы также создают условия для развития процесса возгорания угля, поскольку возгорания угля случаются, как в массиве полезного ископаемого на всех стадиях угледобычи, так и в выработанном пространстве. При оценке склонности угольного пласта к самовозгоранию основными факторами являются химическая активность угля по поглощению кислорода, инкубационный период самовозгорания угля и горно-геологические условия. Поскольку самовозгоранию всегда предшествует процесс взаимодействия угля с кислородом, в данном разделе рассмотрена склонность угля к самовозгоранию как его свойство, в зависимости от микроструктурных особенностей.

Химическая активность угля по кислороду выражается усредненной величиной скорости сорбции кислорода углем ( $U(25)$ ,  $\text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{ч})$ ). Согласно действующему Руководству по безопасности «Рекомендации по определению инкубационного периода самовозгорания угля» инкубационный период самовозгорания ( $\tau_{инк}$ , сут.) вычисляется по формуле 4.1:

$$\tau_{инк} = \frac{C_y \cdot (T_{kp} - T_0) + 0,6 \cdot \lambda \cdot W_0 / 100 + q_d \cdot X_0}{24 \cdot \alpha \cdot K^{0,45} \cdot C_{o_2q_2}} \quad (4.1)$$

где:  $C_y$  – теплоемкость угля,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;

$T_{kp}$  – критическая температура самовозгорания угля,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_0$  – начальная температура скопления угля,  $^\circ\text{C}$ ;

$\lambda$  – теплота испарения воды,  $\text{Дж}\cdot\text{кг}$ ;

$W_o$  – начальная влажность угля, %;

$q_d$  – удельная теплота десорбции метана, Дж/м<sup>3</sup>;

$X_0$  – природная метаноносность, м<sup>3</sup>/кг;

$\alpha$  – коэффициент усвоения кислорода воздуха;

$K$  – константа скорости сорбции углем кислорода, м<sup>3</sup>/(кг·ч).

Константа скорости сорбции углем кислорода – показатель химической активности угля по кислороду, определяется по разработанному В.С. Веселовским методу [135], основанном на изменении концентрации кислорода в измерительном сосуде. При величине  $0,025 \leq K \leq 0,050$  м<sup>3</sup>/(кг·ч) уголь считается склонным к самовозгоранию, при значениях  $K > 0,050$  м<sup>3</sup>/(кг·ч) и  $K < 0,025$  м<sup>3</sup>/(кг·ч) соответственно весьма склонные к самовозгоранию и несклонные к самовозгоранию.

При значении  $\tau_{инк} < 40$  сут. угольный пласт относят к категории весьма склонных к самовозгоранию; при  $41 \leq \tau_{инк} \leq 80$  – к склонным к самовозгоранию; при  $\tau_{инк} > 80$  – пласт угля считают несклонным к самовозгоранию [55].

В разделе диссертации представлены результаты термического разложения исследованных углей: несклонных к самовозгоранию – пробы 183 – 185 – шахты «Комсомольская», пласт Четвёртый, и склонных к самовозгоранию из шахты «Воргашорская», пласт «Мощный» – пробы 186 – 198, и произведено сравнение с результатами определения неоднородности микроструктуры этих же углей методом «энтропия – сложность».

Из полученных результатов исследований по расчёту значений  $U(25)$  следует, что группы проб углей с номерами 183 – 185, 197 следует отнести к категории несклонных по самовозгоранию углей; группы проб углей 193, 195, 196, 198 – к опасным. Можно заметить, что значение показателя для группы проб № 197 явно выбивается из ряда других проб шахты «Воргашорская». Результаты технического анализа угля и лабораторного определения нормативным методом показателя химической активности по сорбции кислорода  $U(25)$  этими углями представлены в таблице 4.2.

С целью проверки результатов отнесения углей к группам по склонности к самовозгоранию было проведено определение другим методом – по изменению массы углей при нагревании с использованием термогравиметрического анализатора.

Таблица 4.2 – Стандартные величины технического анализа и значения показателя химической активности проб углей [80]

Номер образца	Наименование шахты, пласта	$U(25)$ , $\text{см}^3/\text{г}\cdot\text{ч}$	$V^{daf}$ , %	$A^{daf}$ , %	$W^a$ , %
183	Комсомольская, Четвертый	0,019	28,65	7,11	1,34
184	Комсомольская, Четвертый	0,020	28,56	7,45	1,17
185	Комсомольская, Четвертый	0,024	30,06	17,07	2,02
193	Воргашорская, Мощный	0,036	31,94	5,46	2,60
195	Воргашорская, Мощный	0,042	30,36	5,70	2,03
196	Воргашорская, Мощный	0,037	32,18	5,03	2,05
197	Воргашорская, Мощный	0,024	31,46	6,11	2,13
198	Воргашорская, Мощный	0,031	30,12	5,38	2,26

Метод термического анализа (ТГА) даёт возможность получить сравнительные показатели исследуемых материалов одного класса, поэтому он успешно применяется при исследовании угольной структуры [76]–[79], [136]. Сущность метода заключается в определении потери массы  $\Delta m$  исследуемой навески угля и скорости потери массы  $\Delta m/\Delta t$  при нагревании угля с постоянной скоростью. Изменения в угольных пробах при нагревании исследовались на термогравиметрическом анализаторе TGA-701 фирмы Leco, методика исследования угольных проб описана в работе [5].

Температурная зависимость скорости потери массы углем в единицу времени показывает, что процесс разложения углей происходит с разной скоростью на различных температурных участках. Так, пробы углей из групп № 193, 195 – 198 показывают большую скорость потери массы ( $\Delta m/\Delta t$ ), чем не склонные к самовозгоранию пробы групп № 183 – 185.

Пробы угля 185 и 197, показавшие одинаковые значения показателя химической активности по сорбции кислорода  $U(25) = 0,024 \text{ см}^3/\text{г}\cdot\text{ч}$ , при

термографических исследованиях ведут себя по-разному. Проба 197 показывает активное поглощение кислорода, характерное для углей, склонных к самовозгоранию, а проба 185 при нагревании ведёт себя, как угли, не склонные к самовозгоранию. Представляет интерес, что группы проб № 185 и 197, для которых в соответствии с методикой [135] определён показатель химической активности, показали одинаковые значения этого показателя, но разные термограммы методом ТГА. Для уточнения причин такого различного поведения, были проведены исследования неупорядоченности микроструктуры всех углей методом построения диаграмм «энтропия – сложность».

### **Микроструктурные исследования поверхности проб углей**

Использование цифровых изображений поверхности углей позволяет оценить степень упорядоченности их микроструктуры, используя метод расчёта и построения диаграмм «энтропия – сложность», приведённый в главе 3. Для расчётов использована программа «Shearlexity» [101], расчёт значений энтропии и сложности выполнялся для каждого изображения, и затем определялись средние значения по всему снимку. На каждом образце, согласно методике, делалось от 30 до 40 снимков [80].

Диаграммы строились для проб углей, склонных к самовозгоранию («Воргашорская», пласт «Мощный» – №№ 193, 195 - 198) (рисунок 4.6 б) и не склонных к самовозгоранию (шахты «Комсомольская», пласт Четвёртый – №№ 183-185) (рисунок 4.6 а). По рассчитанным значениям энтропии и сложности на диаграммах, для каждой выделенной группы углей были найдены диапазоны разброса значений энтропии и сложности. В частности, как видно из приведённых на рисунке 4.7 диапазонов распределения значений энтропии и сложности для групп проб углей 185 и 197, показавших одинаковое значение склонности к самовозгоранию (близкое к критериальному) по методу Веселовского, следует, что разброс значений энтропии  $H$  и сложности  $C$  для угля № 197 намного больше, чем для угля № 185, что говорит о большой неоднородности структуры угля № 197.

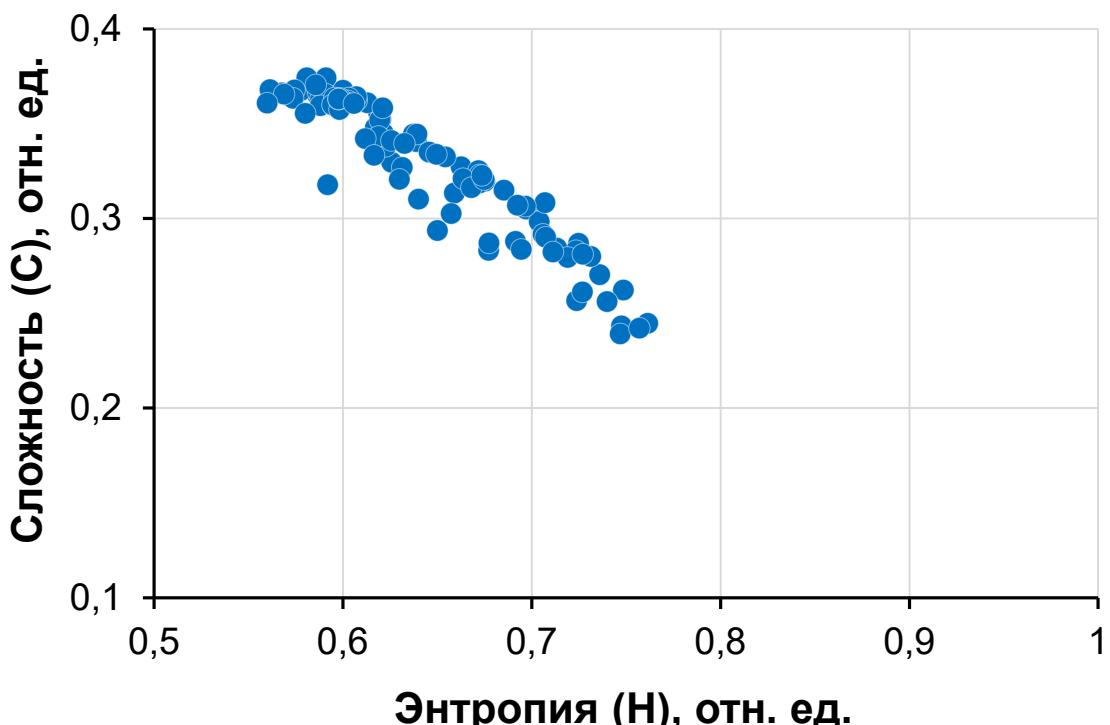
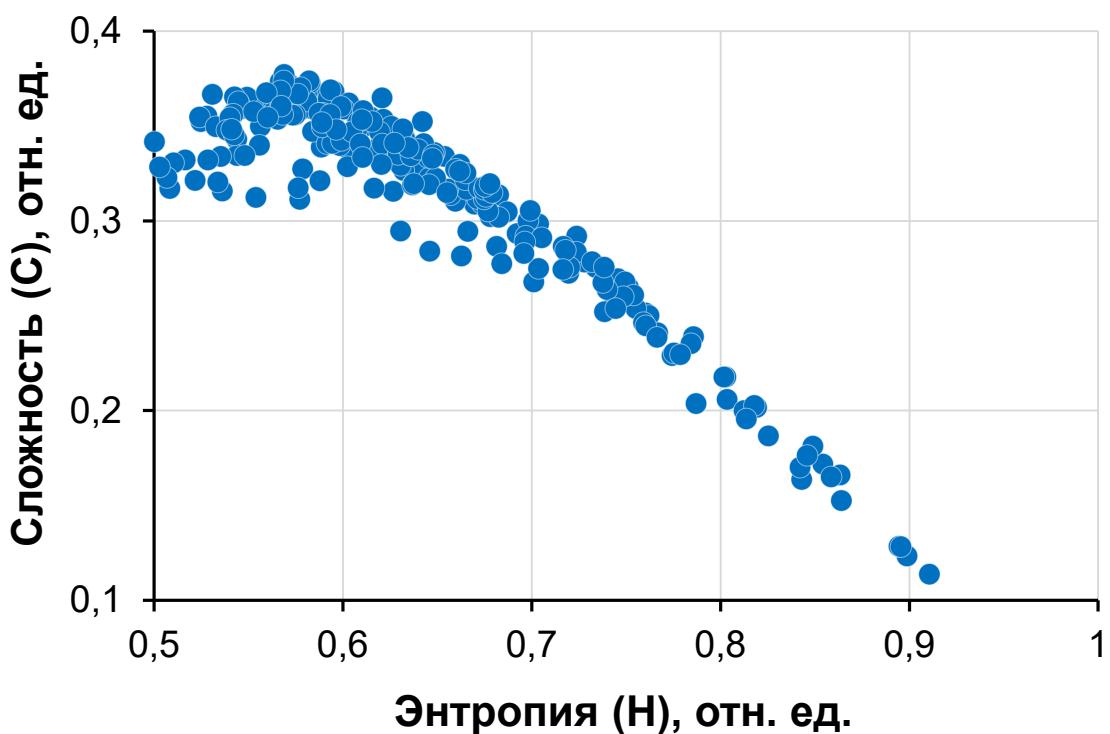
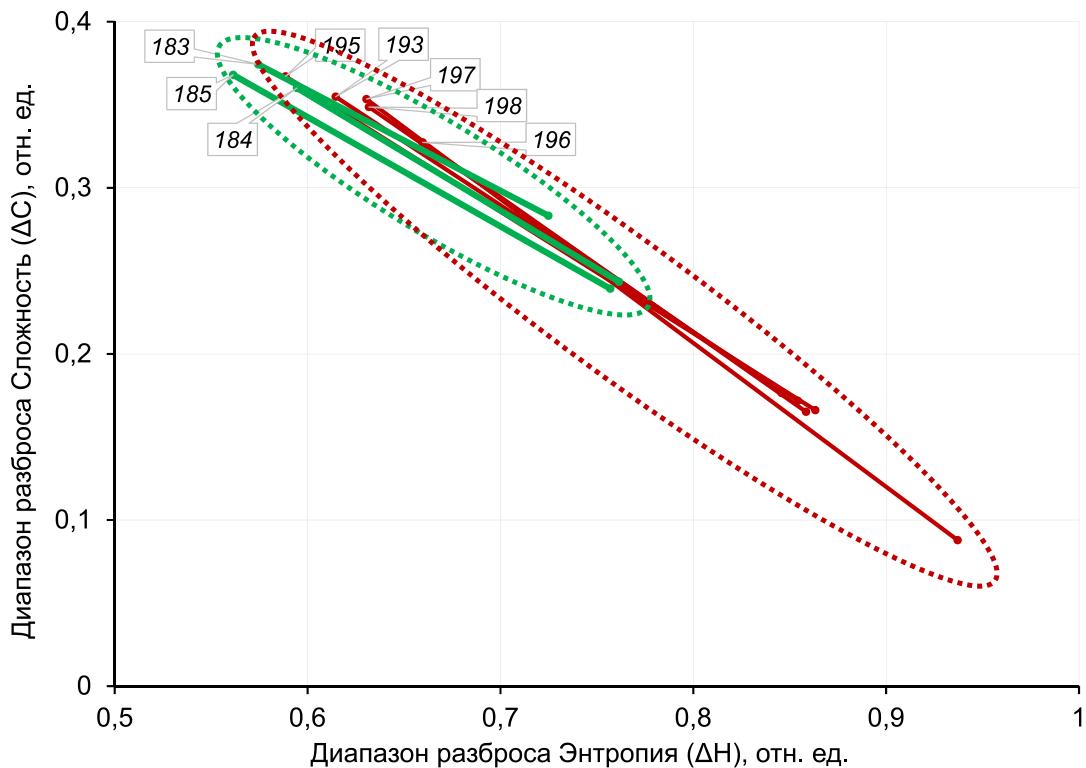
*a**b*

Рисунок 4.6 – Диаграммы областей разброса значений энтропии и сложности для групп проб углей склонных (*a*) и не склонных (*б*) к самовозгоранию

Такое резкое различие можно объяснить тем что, именно неоднородность микроструктуры образца № 197 явилась причиной такого же активного окисления этого угля при повышении температуры, как и углей № 193, 195, 196, 198, что позволило отнести его также к склонным к самовозгоранию углям [80].

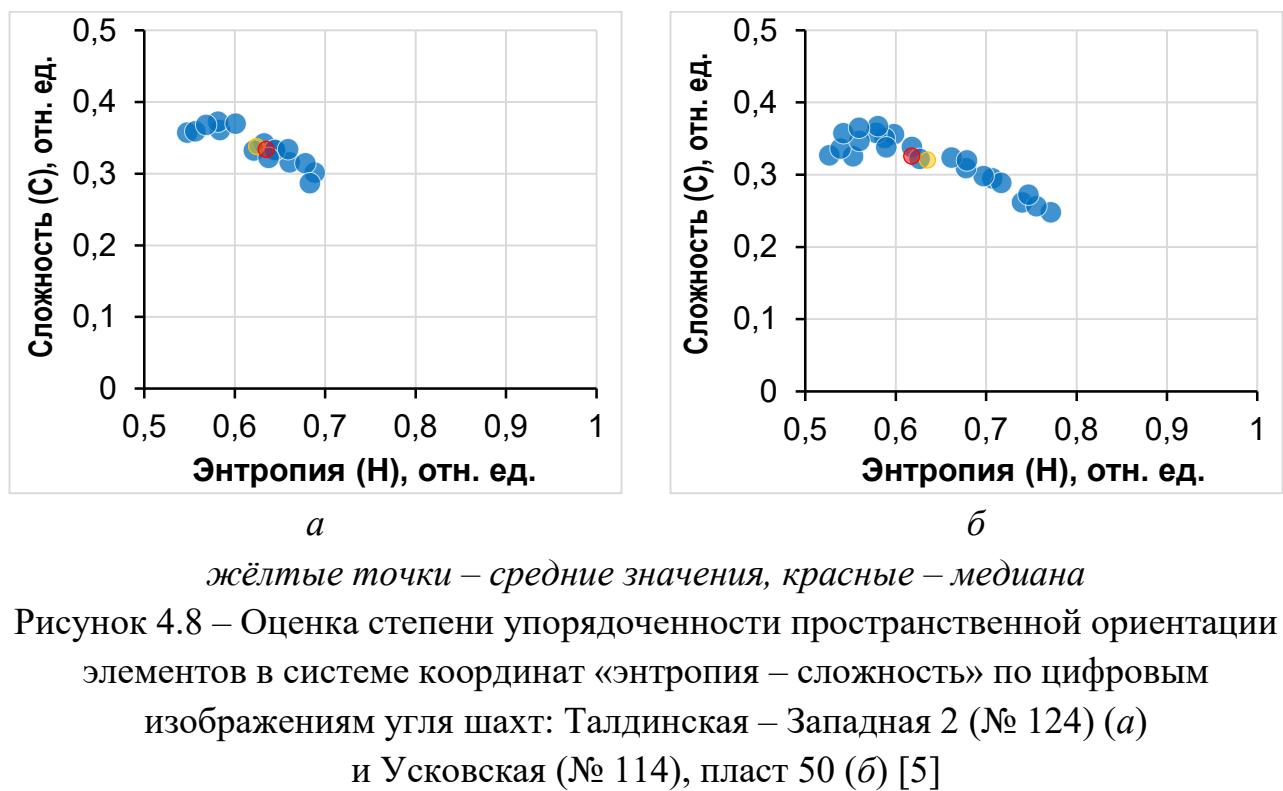


*красные линии – группа проб угля, склонного к самовозгоранию;*  
*зеленые – группа проб угля, несклонного к самовозгоранию.*

Рисунок 4.7 – Диапазон разброса значений энтропии и сложности для исследуемых углей [80]

Получено, что для углей, несклонных к самовозгоранию, диапазон значений энтропии  $H$ , составляет примерно 0,2 отн. ед., тогда как для углей, склонных к самовозгоранию, диапазон значений составляет примерно 0,4 отн. ед. Из рисунка 4.7 видно, что структура углей, склонных к самовозгоранию, представляет собой сочетание участков как со сравнительно упорядоченными элементами структуры (диапазон значений  $H$  от 0,5 до 0,6 отн. ед.), так и значительно более хаотично организованными структурными элементами (изменение значений  $H$  от 0,6 до 0,9 отн. ед.) [80].

Исследовалась группа проб углей шахт «Талдинская – Западная 2» (№ 124) и «Усковская», пласт 50 (№ 114), соответственно несклонных и склонных к самовозгоранию. Для всех проб также получены серии цифровых изображений их естественной поверхности, рассчитаны значения величин и построены диаграммы «энтропия – сложность», отражающие структурные особенности проб углей на микроуровне (рисунок 4.8).



Статистическая обработка цифровых изображений поверхности проб углей в системе координат «энтропия – сложность» показала, что разброс значений энтропии для проб из пласта, склонного к самовозгоранию, максимальны и лежат в области 0,53 – 0,77 отн. ед., сложности 0,25 – 0,37 отн. ед. Для пробы из неопасного по самовозгоранию пласта характерна более упорядоченная структура с меньшим средним значением и разбросом значений энтропии 0,55 – 0,69 отн. ед., сложности 0,29 – 0,37 отн. ед. (см. рисунок 4.8).

То есть максимальные значения энтропии для углей пластов, не склонных к опасным явлениям, в среднем ограничиваются значением 0,7 отн. ед. Все угли, для которых получены значения информационной энтропии больше 0,7 отн. ед.,

можно считать склонными к выбросоопасности и к самовозгоранию по фактору неоднородности их микроструктуры. Значение 0,7 отн. ед. как критерия является предварительным, оно может быть уточнено и конкретизировано для склонности к выбросоопасности и к самовозгоранию после расширения набора статистического материала.

Резюмируя, большая хаотичность организации микроструктуры угля говорит о её большей нарушенности и большей химической реакционной способности. Это выражается в наличии большего количества разорванных связей молекулярной структуры угля, то есть повышается его удельная поверхность и контакт угля с кислородом происходит на большей площади, также возможна и лучшая доступность к разупорядоченным элементам угля вблизи поверхности. Эти факторы и способствуют развитию процесса самовозгорания. Угли, несклонные к самовозгоранию, обладают заметно более однородной микроструктурой.

#### **4.3 Сравнение неоднородности микроструктур углей склонных с несклонными к самовозгоранию и к выбросоопасности**

Проведено сравнение термического разложения двух пар углей: склонные и несклонные к самовозгоранию (пробы 114 и 124) и из выбросоопасной и невыбросоопасной зон пласта (пробы № 117 – ш. «Осинниковская», пласт Е-5; вблизи проекции разлома «Сейсмический» глубина 600 м и № 118 – ш. «Осинниковская», пласт К-5, разлом «Тальпинский», глубина 500 м), со значениями выхода летучих веществ ( $V_{daf}$ ) 34,5 % (пробы 114 и 124) и 30 % (пробы 117 и 118) соответственно. Пробы углей Кузнецкого бассейна примерно одной марки ДГ, Г, с близкими значениями выхода летучих веществ в паре исследовались при различных режимах нагревания: угли отжигались без доступа кислорода (закрытые тигли) и в окислительной среде, то есть с доступом кислорода воздуха (открытые тигли). Характеристики исследованных пар углей приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Скорость изменения массы образцов при нагреве без доступа кислорода и в окислительной среде [5]

№ пробы	$V^{daf}$ , %	$A^d$ , %	Нагрев без доступа кислорода			Нагрев в окислительной среде		
			T, °C	$\Delta m/\Delta t$ , %	m, % при 1000°C	T, °C	$\Delta m/\Delta t$ , %	m, % при 1000°C
114	34,9	2,4	509	2,02	34,9	484	1,28	66,4
124	34,4	3,0	490	1,28	36,7	566	1,80	96,9
117	30,0	3,5	554	0,80	35,7	552	0,82	35,7
118	30,3	4,4	554	0,82	28,7	577	1,70	84,8

Примечание. T, °C – значение температуры, при которой скорость потери массы образцами максимальна.

Несмотря на небольшую разницу в технических характеристиках (таблица 4.3), образцы со значением  $V^{daf}$  около 30 % (из выбросоопасной и невыбросоопасной зон) при нагреве до 1000 °C без доступа воздуха имеют примерно равную максимальную скорость разложения. При нагреве же в окислительной среде максимальное значение  $\Delta m/\Delta t$  для всех образцов разное, изменяясь от 0,8 до 1,7 %. На рисунках 4.9 и 4.10 приведены зависимости скорости потери массы от температуры для исследованных проб угля в окислительной среде (с доступом воздуха) и без доступа кислорода воздуха.

Аналогичные исследования термических изменений в угле проведены для проб с количеством выхода летучих веществ ( $V^{daf}$ ) 34,5 % (угли марки ДГ, Г), также при различных режимах нагревания: угли отжигались без доступа кислорода (закрытые тигли) и в окислительной среде, то есть с доступом кислорода воздуха (открытые тигли). Данные таблицы 4.3 показывают, что угли со значением  $V^{daf}$  около 34 % характеризуются разными температурами максимальной скорости потери массы при нагреве без доступа воздуха. При этом значения потери массы этими углями при 1000 °C также различны. Образцы с  $V^{daf}$  около 30 % имеют близкие значения температуры максимальной скорости потери массы и значения скорости потери массы ( $\Delta m/\Delta t$ ). При нагреве в окислительной среде разница в температурах и скорости разложения заметна для обеих групп углей.

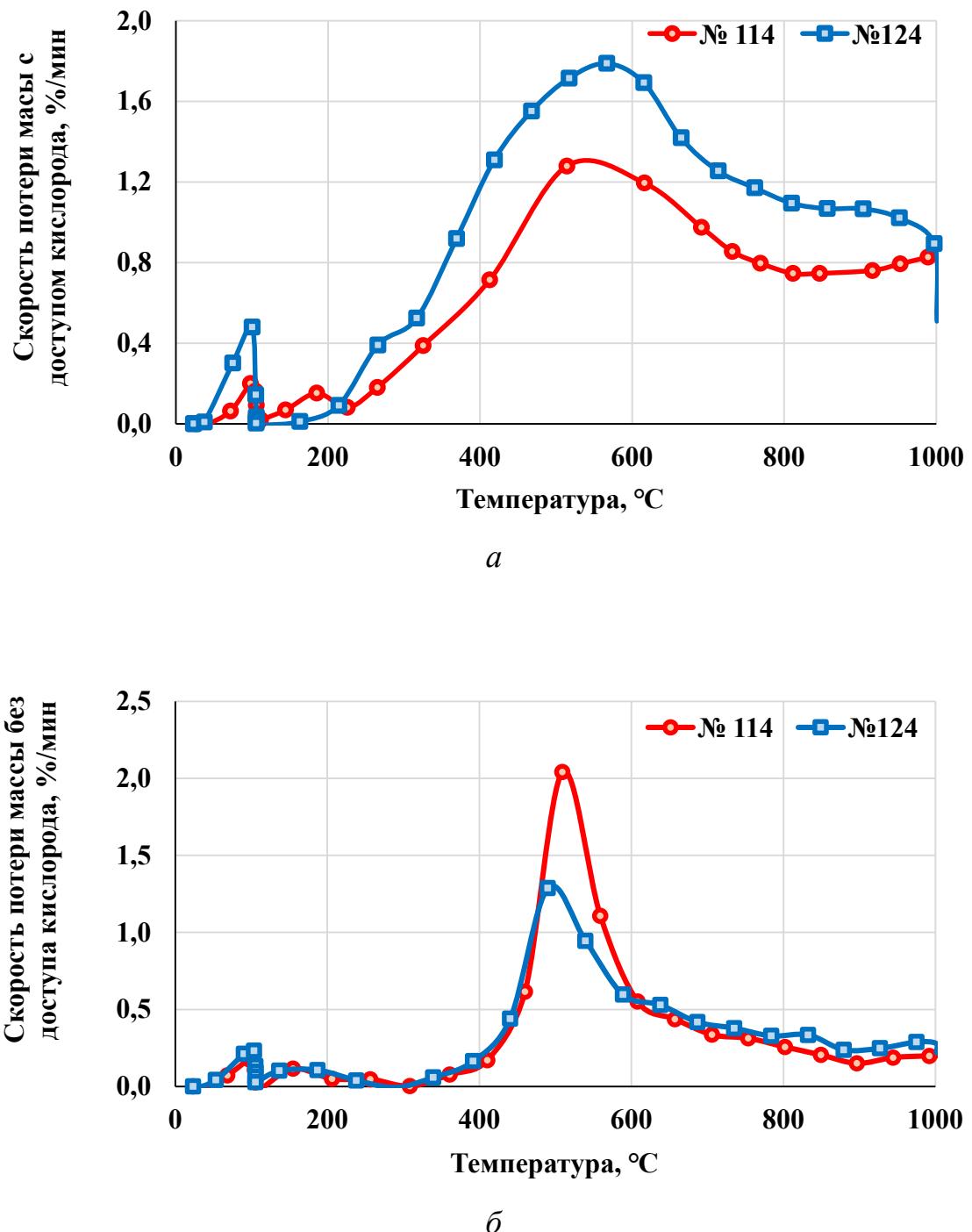


Рисунок 4.9 – Зависимость потери массы от температуры для образцов № 114 и 124 при нагреве в окислительной среде (а); без доступа воздуха (б) в температурном интервале 25 – 1000 °C [5]

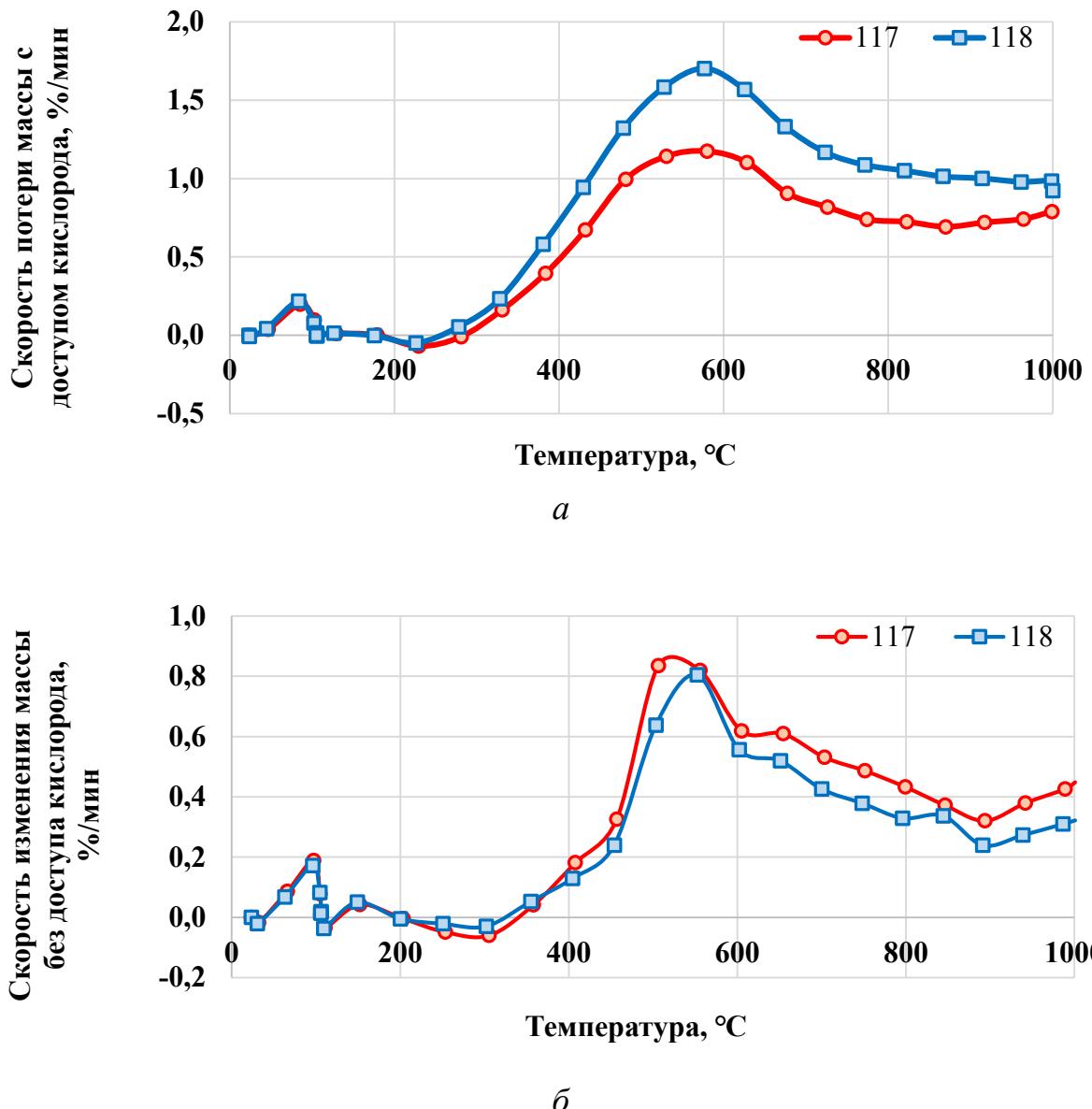


Рисунок 4.10 – Зависимость потери массы от температуры для образцов № 117 и 118 при нагреве: в окислительной среде (а); без доступа воздуха (б) при 25 – 1000 °С [5]

Из таблицы 4.3 видно, что в режиме без доступа воздуха разница в температурах и значения  $\Delta m/\Delta t$  при нагревании характерна для углей, имеющих выход летучих веществ 34,4 и 34,9 % (угли 114 и 124, склонные и несклонные к самовозгоранию); образцы со значением  $V^{daf}$  около 30 % имеют близкие значения температуры и значения  $\Delta m/\Delta t$ . При нагреве в окислительной среде разница в температурах и скорости разложения характерна для обеих групп углей, но для образцов 114 и 124 она больше.

Термогравиметрические исследования показали различное поведение углей для двух групп опасных явлений – по склонности к выбросоопасности и к самовозгоранию. Установлено, что угли, имеющие одинаковые технические характеристики, имеют разную скорость разложения при нагревании, что в свою очередь зависит от свойств их микроструктуры. Эти выводы дополняют результаты исследований микроструктуры методом «энтропии – сложности» и объясняют, то что, несмотря на различную физику протекания процессов, оба они зависят от организации – неоднородности структуры угля на микроуровне.

#### **4.4 Расчёт статистических характеристик оценки массива данных**

Проведённые исследования по оценке неоднородности микроструктуры каменных углей с использованием пространственных информационной энтропии и статистической сложности показали, что группу проб из участков, склонных к опасным явлениям, отличает присутствие неупорядоченности (хаотичности) элементов структуры. С точки зрения распределения значений величин, это выражается в наличии области значений высокой энтропии 0,8 – 1,0 отн. ед. – низкой сложности 0,1 – 0,2 отн. ед. Тогда как для проб из неопасных областей пластов характерна более упорядоченная структура с меньшим значением энтропии и большим сложности. На рисунке 4.11 приведены статистические характеристики пар образцов угля для значений энтропии и сложности.

Из приведенных графиков (рисунок 4.11) видно, что значения «энтропии – сложности» и их статистических характеристик: величины дисперсии и среднеквадратического отклонения, существенно отличаются внутри каждой группы образцов: отобранных из участков угольных пластов, склонных к выбросоопасности и самовозгоранию, и участков, не опасных к этим явлениям. В тех пробах, где значения дисперсии и среднеквадратического отклонения меньше, структура угля более однородная, где больше – структура более хаотична. Сопоставление полученных данных по степени упорядоченности структуры со скоростью разложения углей при нагреве показало, что угли, имеющие более

неупорядоченную структуру, имеют большую скорость потери массы ( $\Delta m/\Delta t$ ), то есть разлагаются быстрее в режиме без доступа воздуха. Эти угли отобраны из пластов, склонных к внезапным выбросам угля и газа и к самовозгоранию. Эти же угли в кислородной среде теряют массу медленнее, но при этом уголь из пласта, склонного к самовозгоранию, в интервале температур 100–200 °C разлагается с большей скоростью, что указывает на его большую химическую активность в этом диапазоне [5].

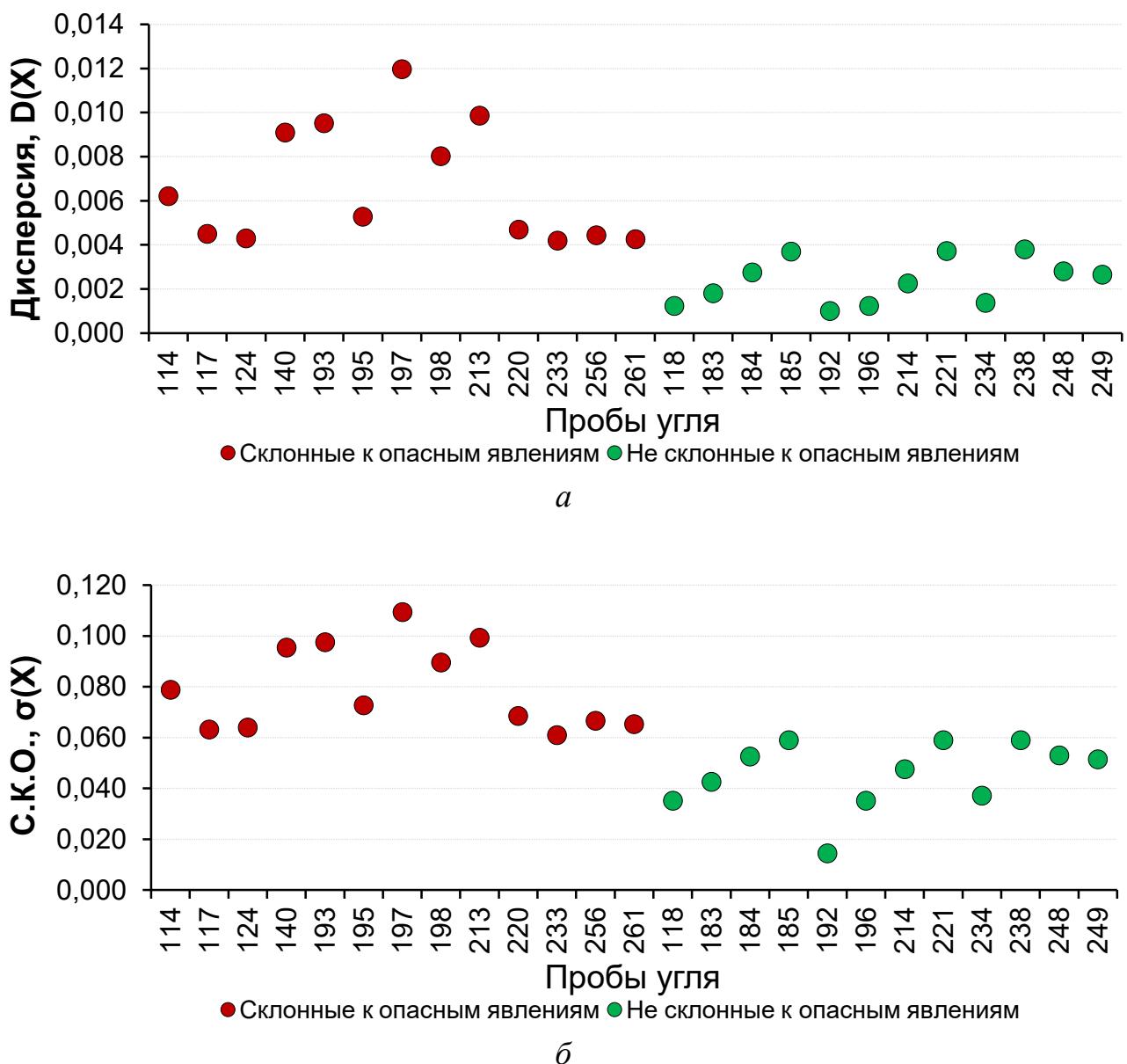


Рисунок 4.11 – Графики статистических характеристик значений мер энтропии и сложности для групп проб, разделённых по склонности/неклонности к опасным явлениям в пласте: дисперсия рядов значений энтропии  $D(X)$  (а); величины среднеквадратичного отклонения рядов значений энтропии  $\sigma(X)$  (б)

## Проверка независимости работы метода оценки неоднородности структуры природных объектов с помощью энтропии и сложности от положения цифрового снимка

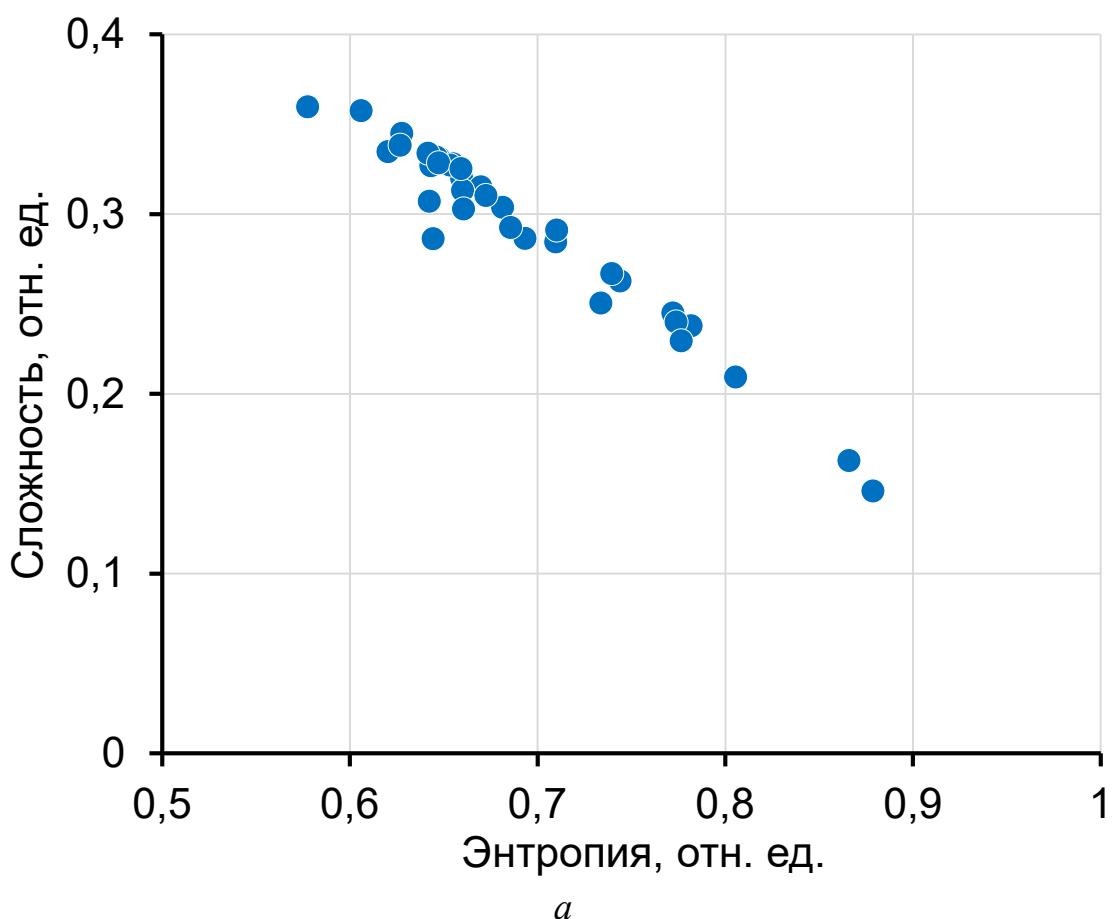
Для проверки определяемых показателей: информационной энтропии и статистической сложности на корректность и независимость от конкретной пространственной ориентации распределения яркости пиксел на цифровом снимке был проделан тест-эксперимент. Он заключался в том, что в серии изображений пробы они были повёрнуты на  $180^\circ$  и  $90^\circ$ . Результаты показали достаточную схожесть результатов (см. таблицу 4.4), для наглядности также приведены диаграммы «энтропия – сложность» (рисунок 4.12).

Таблица 4.4 – Значения средний величин энтропии  $H$  и сложности  $C$  для снимков пробы 233 в нормальном, перевёрнутом ( $180^\circ$ ) и развёрнутом ( $90^\circ$ ) положении

№ снимка	Нормальное расположение		Перевёрнутое ( $180^\circ$ ) расположение		Развёрнутое ( $90^\circ$ ) расположение	
	$H$	$C$	$H$	$C$	$H$	$C$
233-1-2	0,77	0,24	0,76	0,25	0,76	0,25
233-1-3	0,65	0,33	0,65	0,33	0,65	0,33
233-1-4	0,68	0,30	0,67	0,31	0,67	0,31
233-1-5	0,65	0,33	0,65	0,33	0,64	0,33
233-1-6	0,58	0,36	0,58	0,36	0,57	0,36
233-1-7	0,74	0,26	0,72	0,27	0,72	0,27
233-1-8	0,69	0,29	0,69	0,29	0,69	0,29
233-1-9	0,64	0,31	0,63	0,31	0,63	0,31
233-1-10	0,71	0,28	0,71	0,28	0,70	0,28
233-1-11	0,78	0,24	0,76	0,24	0,75	0,25
233-1-12	0,66	0,32	0,66	0,32	0,65	0,32
233-1-13	0,65	0,33	0,64	0,33	0,64	0,33
233-1-14	0,71	0,29	0,70	0,29	0,70	0,30
233-2-2	0,62	0,33	0,62	0,34	0,62	0,34
233-2-3	0,63	0,34	0,62	0,35	0,62	0,35
233-2-4	0,63	0,34	0,62	0,34	0,62	0,34
233-2-5	0,65	0,33	0,64	0,33	0,64	0,33
233-2-6	0,67	0,32	0,66	0,32	0,66	0,32
233-2-7	0,64	0,33	0,64	0,32	0,64	0,33
233-2-8	0,66	0,31	0,65	0,31	0,65	0,32
233-2-9	0,67	0,31	0,67	0,31	0,67	0,31

Продолжение таблицы 4.4

№ снимка	Нормальное расположение		Перевёрнутое (180°) расположение		Развёрнутое (90°) расположение	
	H	C	H	C	H	C
233-2-10	0,64	0,33	0,64	0,33	0,64	0,34
233-2-11	0,65	0,33	0,65	0,33	0,64	0,33
233-2-12	0,66	0,33	0,66	0,33	0,66	0,33
233-3-2	0,73	0,25	0,72	0,25	0,72	0,25
233-3-3	0,61	0,36	0,61	0,36	0,60	0,36
233-3-4	0,64	0,29	0,64	0,29	0,64	0,29
233-3-5	0,77	0,24	0,75	0,25	0,75	0,25
233-3-6	0,74	0,27	0,73	0,27	0,73	0,27
233-3-7	0,81	0,21	0,81	0,20	0,81	0,20
233-3-8	0,87	0,16	0,84	0,17	0,84	0,17
233-3-9	0,69	0,29	0,67	0,30	0,66	0,30
233-3-10	0,78	0,23	0,72	0,24	0,72	0,24
233-3-11	0,66	0,30	0,66	0,30	0,66	0,30
233-3-12	0,88	0,15	0,85	0,16	0,85	0,15



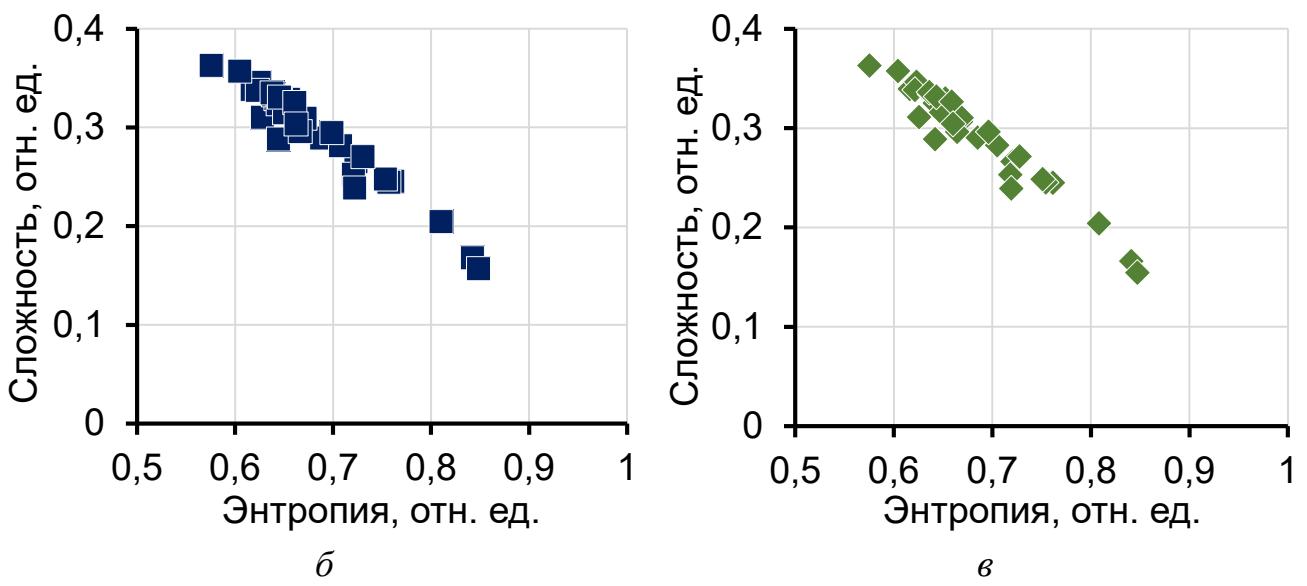


Рисунок 4.12 – Диаграммы «энтропия – сложность» значений средних величин энтропии и сложности для снимков пробы 233 в нормальном (а), перевёрнутом ( $180^\circ$ ) (б) и развёрнутом ( $90^\circ$ ) положении (в)

Можно отметить, что хотя и некоторые незначительные смещения значений присутствуют, но общая картина распределения сохранена, как и граничные (минимум и максимум) пределы диапазона распределения значений оценки.

#### 4.5 Выводы по главе 4

Оценка степени упорядоченности пространственной ориентации элементов в системе координат «энтропия – сложность», проведенная по цифровым изображениям поверхности углей показала, что выбросоопасная зона пласта характеризуется сочетанием областей упорядоченных и хаотично расположенных элементов структуры. Для группы углей из зоны внезапного выброса областей с наиболее высокими значениями энтропии (соответствующей наиболее хаотично организованной структуре) не обнаружено. Это, вместе с тем фактом, что в выбросоопасных зонах выход летучих веществ  $V^{\text{daf}}$  повышен, относительно неопасных областей, а в выброшенном угле  $V^{\text{daf}}$  снижается до значений, характерных для неопасной области, говорит в пользу гипотезы об «ускоренном метаморфизме» угля в процессе выброса. То есть в процессе выброса в первую очередь разрушаются наиболее структурно неорганизованные области, и видится логичным, что именно они создают условия для повышения вероятности

развязывания газодинамических явлений. Интенсивное разрушение структуры угля во время выброса происходит с разрывом наиболее слабых межатомных связей, преимущественно в алифатической части угольной молекулы, и сопровождается отрывом большого количества метильных групп  $-\text{CH}_3$ , что и приводит к образованию метана и может объяснить выделение метана при выбросе, в пересчёте на выброшенный уголь, многократно превышающее природную газоносность пласта.

Таким образом, в главе показана возможность определить заведомо невыбросоопасные области по структурным параметрам угля на макроуровне с использованием предложенного метода построения диаграмм «энтропия – сложность» по цифровым фотографиям поверхности проб углей.

Также в перспективе, при получении достаточного количества статистических данных, по приведенному методу можно будет уточнять тип произошедшего газодинамического явления при аварии в угольной шахте, то есть установить допустимо ли относить явление к внезапному выбросу или высыпанию (обрушению).

Исследование проблемы явления склонности углей к самовозгоранию показало, что угли, отличающиеся разной склонностью к самовозгоранию, характеризуются разной степенью упорядоченности их микроструктуры и различным поведением при нагревании в интервале температур от 100 до 250 °C. В углях, склонных к самовозгоранию, процесс окисления начинается при заметно меньших температурах и происходит со значительно большей интенсивностью, причём склонные к самовозгоранию угли поглощают на порядок больше кислорода в условиях доступа воздуха. Выявлено значительное различие в диапазонах значений информационной энтропии и статистической сложности, угли, несклонные к самовозгоранию, обладают более упорядоченной структурой, в отличие от склонных, у которых ещё присутствует неупорядоченная область высоких значений энтропии. Таким образом, ключевым фактором в развитии процесса самовозгорания может являться разная степень упорядоченности микроструктуры угля.

## 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 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, 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 // 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков Ю. В., Нестеренко Л. А. Структура и свойства углей в ряду метаморфизма. Киев : Наукова думка, 1985. – С. 16.
2. Marsh H., Rodriguez-Reinoso F. Activated carbon. Elsevier Science and Technology, Amsterdam, 2006, 536 p.
3. Фролков Г. Д., Фролков А. Г. Взаимосвязь выбросов угольного метана и структуры органической массы углей. // XTT. – 2011. – №1. – С. 9-11.
4. Van Krevelen D. W. Coal-typology, chemistry, physics, constitution. Elsevier, Amsterdam, 1993, 1000 p.
5. 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.
6. 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.
7. Stassart S., Lemaire E. Les dégagements instantanés de grisou: dans les mines de houille de Belgique (période de 1892-1908). Бельгия : Imprimérie Lucien Narcisse, 1910. Vol. 15 livr. 4.
8. Скочинский А. А. Современное состояние изученности проблемы внезапных выбросов угля и газа в шахтах / Научные исследования в области борьбы с внезапными выбросами угля и газа. Углехимиздат. – 1958. – С. 5–15.
9. Ходот, В. В. Внезапные выбросы угля и газа. М.: Госгортехиздат, 1961. 363 с.
10. Малинникова, О. Н. Условия формирования и методология прогнозирования газодинамических явлений при техногенном воздействии на угольные пласты : диссертация ... доктора технических наук : 25.00.20 / Малинникова Ольга Николаевна; [Место защиты: Ин-т проблем комплекс. освоения недр РАН]. – Москва, 2011. – 269 с.

11. Гагарин, С. Г. Структурно-химические аспекты нарушенности каменных углей выбросоопасных пластов / Гагарин С. Г., Еремин И. В., Лисуренко А. В. // Химия твердого топлива. – 1997. – № 3. – С. 3–14.
12. Лисуренко, А. В. О природе метастабильного состояния углей выбросоопасных пластов / А.В. Лисуренко, С.Г. Гагарин, И.В. Еремин // Химия твердого топлива. – 1997. – № 5. – С. 37–43.
13. Ульянова, Е. В. Микроструктура ископаемых углей до и после газодинамических явлений / Е. В. Ульянова, О. Н. Малинникова, Б. Н. Пащичев, Е. В. Малинникова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 5. – С. 10–17. – DOI 10.15372/FTPRPI20190502.
14. Иванов, Б. М. Механические и физико-химические свойства углей выбросоопасных пластов / Иванов Б. М., Фейт Г. Н., Яновская М. Ф. – Москва : Наука, 1979. – 195 с.
15. Beamish B. B., Crosdale P. J. Instantaneous outbursts in underground coal mines: an overview and association with coal type, J Coal Geology. – 1998. – Vol. 35 (1–4). – P. 27–55. - DOI: 10.1016/S0166-5162(97)00036-0.
16. Cao Y. Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults / Cao Y., He D., Glick DC. // Int. J. Coal Geology. – 2001. – Vol. 48. – P. 47–63. DOI 10.1016/S0166-5162(01)00037-4.
17. Tang Z., Coal pores and fracture development during CBM drainage: Their promoting effects on the propensity for coal and gas outbursts / Tang Z., Yang S., Zhai C., Xu Q. // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2018. – Vol. 51. – P. 9–17. – DOI 10.1016/j.jngse.2018.01.003.
18. Захаров В.Н., Малинникова О.Н. Особенности разрушения призабойной зоны угольного пласта: В сборнике: Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания. под ред. В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян. 2015. С. 247–235.

19. Захаров В.Н., Малинникова О.Н. Выбросоопасность призабойной зоны газонасыщенных угольных пластов при ведении горных работ // Горный журнал. 2018. – № 12. – С. 81–85. – DOI 10/17580/gzh.2018.12.17.
20. Этtingер, И. Л. Внезапные выбросы угля и газа и структура угля / И. Л. Этtingер. – Москва : «Недра», 1969. – 160 с.
21. Физико-химия газодинамических явлений в шахтах / В. В. Ходот и др. // АН СССР. М-во угольной пром-сти СССР. Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского. – Москва : Наука, 1973. – 139 с.
22. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов / Москва : Недра, 1983. – 280 с.
23. Айруни А. Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в шахтах. – Москва : Наука, 1987. – 310 с.
24. Lama R. D., Bodziony J. Management of outburst in underground coal mines, Intl. Jnl. of Coal Geology, 1998, Vol. 35. – P. 83–115.
25. Опарин, В. Н. О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса / В. Н. Опарин, Т. А. Киряева, В. Ю. Гаврилов, Р. А. Шутилов, А. П. Ковчавцев, А. С. Танайно, В. П. Ефимов, И. Е. Астраханцев, И. В. Гренев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 3–30.
26. Han Y., Wang J., Dong Y., Hou Q., Pan J. The role of structure defects in the deformation of anthracite and their influence on the macromolecular structure, Fuel, 2017, Vol. 206. – P. 1–9.
27. Чанышев, А. И. Об одном способе описания блочно-иерархической структуры массива горных пород с позиции учета неоднородности механических свойств / А. И. Чанышев, О. Е. Белоусова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 3. – С. 29–36.
28. Ройтер, М. О геомеханическом состоянии очистного забоя при отработке угольных пластов на шахте "Полысаевская" в Кузбассе / Ройтер М., Крах М.,

- Кислинг У., Векслер Ю. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 47–52.
29. Хренкова, Т. М. Исследование продуктов механодеструкции газового угля, применяемого в процессе гидрогенизации / Т. М. Хренкова, Н. Л. Голденко // Химия твердого топлива. – 1978. – № 5. – С. 43–45.
  30. Хренкова, Т. М. Механическая активация углей / Т. М. Хренкова, В. С. Кирда // Химия твердого топлива. – 1994. – № 6. – С. 36–42.
  31. Фролков, Г. Д. Механохимическая концепция выбросоопасности угольных пластов / Фролков Г. Д., Фролков А. Г. // Уголь. – 2005. – № 2. – С. 18–22.
  32. Фролков, Г. Д. О механохимической природе выделений угольного метана / Г. Д. Фролков, А. Ф. Липчанский, А. Г. Фролков // Безопасность труда в промышленности. – 2006. – № 7. – С. 50–53.
  33. Булат, А. Ф. Генерирование сорбированного метана, обусловленное релаксационным механизмом деформирования молекулярной структуры угля / А. Ф. Булат, С. П. Минеев, А. А. Прусова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 1. – С. 91–99.
  34. Колесниченко, И. Е. Механизм внезапных выбросов метана в угольных пластах / И. Е. Колесниченко, Е. А. Колесниченко, Е. И. Любомищенко, Е. И. Колесниченко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 1. – С. 108–120. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-1-0108-120.
  35. Шепелева С.А., Дырдин В.В. Газовыделение при внезапных выбросах угля и газа // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 109–113.
  36. Шепелева, С. А. Метан и выбросоопасность угольных пластов / С. А. Шепелева, В. В. Дырдин, Т. Л. Ким // Томск : изд. Томского ун-та, 2015. – 180 с.
  37. Лебедев, В. В. Образование парамагнитных центров при измельчении угля / В. В. Лебедев, Т. М. Хренкова, Н. Л. Голденко // Химия твердого топлива. – 1978. – № 5. – С. 15–18.

38. Русыянова, Н. Д. Углехимия / Н. Д. Русыянова ; Рос. акад. наук. Урал. отд-ние, Ин-т орган. синтеза, М-во экономики Рос. Федерации, Вост. науч.-исслед. углехим. ин-т. – Москва : Наука, 2003. – 315 с. : ил.; 22 см. – ISBN 5-02-033064-7 : 470.
39. Захаров В.Н., Фейт Г.Н., Малинникова О.Н. Геомеханика и прогноз возникновения газодинамических явлений в тектонически нарушенных (трещиноватых) газоносных техногенно изменяемых углепородных массивах // Современные проблемы шахтного метана: Сб. научн. трудов к 85-летию проф. Н.В. Ножкина. М.: ИД ООО Роликс, 2014. – С. 292–316.
40. Малинникова, О. Н. Мультифрактальная оценка склонности угольных пластов к газодинамическим явлениям / О. Н. Малинникова, Д. В. Учаев, Д. В. Учаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S12. – С. 214-232. – EDN LTZOSR.
41. Трубецкой, К. Н. Фрактальная структура нарушенности каменных углей и их предрасположенность к газодинамическому разрушению / К. Н. Трубецкой, А. Д. Рубан, С. Д. Викторов [и др.] // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 431, № 6. – С. 818-821. – EDN LRGFEB.
42. Методические указания по классификации газодинамических явлений на угольных шахтах / А. И. Бобров, Л. А. Вайнштейн, М. А. Ильяшов [и др.] ; под общей редакцией А. И. Бобров, И. М. Петухов ; МакНИИ, ВНИМИ, ИГД им. А. А. Скочинского [и др.]. – Донецк : ЦБНТИ Минуглепрома СССР, 1991. – 18 с.
43. ГОСТ Р 58150-2018. Горное дело. Динамические явления в угольных шахтах. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 июня 2018 г. № 312-ст : введен впервые : дата введения 2018-11-01 / разработан ЗАО «МВК по ВД при АГН». – Москва : Стандартинформ, 2021. – 24 с.
44. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений : официальное издание : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и

атомному надзору : введены в действие приказом Ростехнадзора № 515 от 10.12.2020 г. – Москва : НТЦ ЯРБ, 2020. – 113 с. – (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности).

45. Малышев, Ю. Н. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов / Ю. Н. Малышев, К. Н. Трубецкой, А. Т. Айруни. – Москва : Изд-во Акад. горн. наук, 2000. – 517 с. : ил., табл. : 21 см.; ISBN 5-7892-0058-3.
46. Забурдяев, В. С. Выделение метана из отбитого в очистном забое угля / В. С. Забурдяев // Безопасность Труда в Промышленности. – 2019. – № 11. – С. 13–17. – DOI 10.24000/0409-2961-2019-11-13-17.
47. Забурдяев, В. С. Категории опасности угольных шахт по метану / В. С. Забурдяев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № S1. – С. 300–314.
48. Егорова, Е. А. Оценка условий заблаговременной дегазационной подготовки выбросоопасных угольных пластов в зоне геологических нарушений / Е. А. Егорова, К. С. Коликов, С. Г. Никитин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S12. – С. 9–12.
49. 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.
50. Лукинов, В. В. Петрографические и физические характеристики угольного вещества из кинкбандов / Лукинов В. В., Пимоненко Л. И., Барановский В. И. и др. // Уголь Украины. – 2012. – № 2. – С. 36–38.
51. Feng Yan-Yan, Microstructure and its influence on CH<sub>4</sub> adsorption behavior of deep coal / Feng Yan-Yan, Jiang Cheng-Fa, Liu Dai-Jun, Chu Weib // Chinese Physics B. – 2014. – Vol. 23. – № 2. – P. 028201. – DOI 10.1088/1674-1056/23/2/028201.
52. Ульянова, Е. В. Газоносность и структура ископаемых углей Донецкого бассейна / Ульянова Е. В., Малинникова О. Н., Бурчак А. В. и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 4. – С. 60–68.

53. 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.
54. Горная энциклопедия [Текст] : в 5 т. / редкол.: Е. А. Козловский (гл. ред.) [и др.]. – Москва : Советская энциклопедия, 1984. – 27 см.
55. Инструкция по предупреждению экзогенной и эндогенной пожароопасности на объектах ведения горных работ угольной промышленности : официальное издание : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору : введены в действие приказом Ростехнадзора № 469 от 27.11.2020 г. – Москва : НТЦ ЯРБ, 2020. – 58 с. – (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности).
56. Печук И.М., Маевская В.М. Эндогенные пожары в Донецком бассейне / Москва : Углетехиздат, 1954. – 276 с.
57. Линденгау Н.И., Маевская В.М., Крылов В.Ф. Физические основы самовозгорания угля и руд / Москва : Недра, 1977. – 320 с.
58. Саранчук В.И., Баев Х.А. Теоретические основы самовозгорания угля / Москва : Недра, 1976. – 151 с.
59. Игишев В.Г. Борьба с самовозгоранием угля в шахтах / М.: Недра, 1987. 177 с.
60. Глузберг Е.И., Гращенков Н.Ф., Шалаев В.С. Комплексная профилактика газовой и пожарной опасности в угольных шахтах / М.: Недра, 1988. – 181 с.
61. Кучер Р.В., Компанец В.А., Бутузова Л.Ф. Структура ископаемых углей и их способность к окислению / Киев : Наук. думка, 1980. – 168 с.
62. Зборщик М.П., Осокин В.В. Предотвращение самовозгорания горных пород / Киев : Техника, 1990. – 165 с.
63. Пащковский, П. С. Разработка способов прогноза и предотвращения эндогенных пожаров в глубоких шахтах: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.26.01 / Донецк : Донецк. политех. ин-т, 1992. – 40 с.
64. Ворошилов, С. П. Влияние влаги на окисление каменных углей / С. П. Ворошилов, Я. С. Ворошилов, А. С. Ворошилов, В. А. Уварова // Вестник

- научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2008. – № 2. – С. 68–82. – EDN JWPJVD.
65. Голынская, Ф. А. Исследование влияния генетической влаги на процесс самовозгорания углей / Ф. А. Голынская // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 9. – С. 183–187. – EDN RLECLJ.
  66. Захаров, Е. И. Механизм процесса самонагревания угля и перехода его в самовозгорание / Е. И. Захаров, Н. М. Качурин, Д. Д. Малахова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2013. – № 2. – С. 42–51. – EDN TKKTXD.
  67. Северина, В. А. Оценка экологической нагрузки при пожарах при добыче и транспортировке углей / В. А. Северина, С. С. Тимофеев // XXI век. Техносферная безопасность. – 2020. – Т. 5, № 2(18). – С. 187–197. – DOI 10.21285/2500-1582-2020-2-187-197. – EDN SSISIS.
  68. Суксова, С. А. Обзор методов идентификации процессов самовозгорания углей / С. А. Суксова, Ю. В. Тимофеева, А. А. Долкан, Е. В. Попов // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13, № 1. – С. 19. – EDN WWQYPV.
  69. Lu W., Method for prevention and control of spontaneous combustion of coal seam and its application in mining field / Lu W., Cao Y.J., Tien J.C. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. V. 27. № 5. – P. 839. – DOI 10.1016/j.ijmst.2017.07.018.
  70. Spontaneous combustion of coals and coal-shales / Onifade M., Genc B. // Intern. J. Mining Sci. and Technolo. – 2018. – V. 28. – № 6. – P. 933. – DOI 10.1016/j.ijmst.2018.05.013.
  71. A review of research on spontaneous combustion of coal / Onifade M., Genc B. // Intern. J. Mining Sci. and Technolo. – 2020. – V. 30. – № 3. – P. 303. – DOI 10.1016/j.ijmst.2020.03.001.
  72. Evolution patterns of coal micro-structure in environments with different temperatures and oxygen conditions / Pan R., Li C., Yu M., Xiao Z., Fu D. // Fuel. – 2020. – V. 261. – № 1. – P. 116. – DOI 10.1016/j.fuel.2019.116425.

73. Surface-based radon detection to identify spontaneous combustion areas in small abandoned coal mine gobs: Case study of a small coal mine in China / Zhou B., Wu J., Wang J., Wu Y. // Process Safety and Environmental Protection. – 2018. – V. 119. – P. 223–232. – DOI 10.1016/j.psep.2018.08.011.
74. A new apparatus to establish the spontaneous combustion propensity of coals and coal-shales / Onifade M., Genc B., Carpede A. // Intern. J. Mining Sci. and Technolo. – 2018. – V. 28. – № 4. – P. 649–655. – DOI 10.1016/j.ijmst.2018.05.012.
75. Wang X. Spontaneous Combustion of Coal. Characteristics, Evaluation and Risk Assessment. CH: Springer, 2020. – 240 p. – DOI 10.1007/978-3-030-33691-2. – ISBN 978-3-030-33690-5.
76. Application of TG technique to determine spontaneous heating propensity of coals / Mohalik N.K., Lester E., Lowndes I.S. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2021. – № 143. – P. 185. – DOI 10.1007/s10973-019-09237-x.
77. Фетисова, О. Ю. Кинетическое изучение стадийности термического разложения различных углей Монголии / Фетисова О.Ю., Кузнецов П.Н., Пуревсурен Б., Авид Б. // Химия твердого топлива. – 2021. – № 1. – С. 3. – DOI 10.31857/S0023117721010035.
78. Исламова, С. И. Кинетический анализ термического разложения низинного и верхового торфа / Исламова С.И., Тимофеева С.С., Хаматгалимов А.Р., Ермолаев Д.В. // Химия твердого топлива. – 2020. – № 3. – С. 32. – DOI 10.31857/S0023117720030044.
79. Янковский, С. А. Особенности физико-химических превращений смесевых топлив на основе типичных каменных углей и древесины при нагреве / Янковский С.А., Кузнецов Г.В. // Химия твердого топлива. – 2019. – № 1. – С. 26. – DOI 10.1134/S0023117719010080.
80. Ульянова, Е. В. Влияние неоднородности структуры угольного вещества на склонность угля к самовозгоранию / Е. В. Ульянова, О. Н. Малинникова, А. И. Докучаева, Б. Н. Паичев // Химия твердого топлива. – 2022. – № 6. – С. 18–24. – DOI 10.31857/S0023117722060093.

81. Правила безопасности в угольных шахтах : официальное издание : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору : введены в действие приказом Ростехнадзора № 507 от 08.12.2020 г. – Москва : НТЦ ЯРБ, 2020. – 190 с. – (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности).
82. Li Q., Physical properties, vitrinite reflectance, and microstructure of coal, Taiyuan Formation, Qinshui Basin, China / Li Q., Chen J., and He J. // Applied Geophysics. – 2017. – Vol. 14. – No 4. – pp. 480–491. – DOI 10.1007/s11770-017-0651-8.
83. Zhao Y., Song H., Liu S., Zhang C., Dou L., and Cao A. Mechanical anisotropy of coal with considerations of realistic microstructures and external loading directions / Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. – 2019. – Vol. 116. – P. 111–121. – DOI 10.1016/j.ijrmms.2019.03.005.
84. Bo Han, Guang-yin Lu, Zi-qiang Zhu, You-jun Guo, and Yun-wei Zhao. Microstructure features of powdery coal-bearing soil based on the digital image measurement technology and fractal theory / Geotech. and Geolog. Eng. – 2019. – Issue 3. – DOI 10.1007/s10706-018-0691-8.
85. Wang, G. Establishment and application study of digital model for coal microstructure based on CT images / Wang Gang, Zhang Xiaoqiang, Yang Xinxiang, Sun Lulu and Qu Hongyuan // J. of Eng. Sci. and Technol. Rev. – 2016. – Vol. 9. – No. 4. – P. 177–184. – ISSN 1791-2377\_2016\_9(4)\_177-184.
86. Kossovich E. L., Epshtein S. A., Prosina V. A., Borodich F. M., Galanov B. A., and Minin M. G. Mechanical, structural and scaling properties of coals: depth-sensing indentation studies / App. Phys. A: Materials Sci. and Proc. – 2019. – Vol. 125. – No. 3. – P. 195.
87. Liu G., Liu J., Liu L., Ye D., and Gao F. A fractal approach to fully-couple coal deformation and gas flow / Fuel. – 2019. – Vol. 240. – P. 219–236. – DOI 10.1016/j.fuel.2018.11.140.
88. Wang H., Zhang J., Yang Y S., Li R., Li J., Yang J., and Liu K. Microstructure-based multi-scale evaluation of fluid flow in an anthracite coal sample with partially-

- percolating voxels / Modelling and Simulation in Materials Sci. and Eng. – 2019. – Vol. 27. – No. 6. – P. 1–13. – DOI 10.1088/1361-651X/ab1b02.
89. Фейт, Г. Н. Прочностные свойства и устойчивость выбросоопасных угольных пластов / [Предисл. проф. д-ра техн. наук В. В. Ходота] ; АН СССР. М-во угольной пром-сти СССР. Ин-т горного дела им. А. А. Скочинского. – Москва : Наука, 1966. – 80 с.
90. Аммосов, И. И. Трещиноватость углей / И. И. Аммосов, И. В. Еремин ; Акад. наук СССР. Ин-т геологии и разработки горючих ископаемых. – Москва : Изд-во Акад. наук СССР, 1960. – 110 с.
91. Захаров В. Н., Малинникова О. Н. Исследование структурных особенностей углей выбросоопасных пластов // Записки горного института. – СПб., 2014. – Т. 210. – С. 43–52.
92. Zhang Z., Kang Q., Wei S., Yun T., Yan G., Yan K. Large Scale Molecular Model Construction of Xishan Bituminous Coal // Energy and Fuels. – 2017. – Vol. 31. – No 2. – P. 1310–1317. – DOI 10.1021/acs.energyfuels.6b02623.
93. Han Y., Wang J., Dong Y., Hou Q., Pan J. The role of structure defects in the deformation of anthracite and their influence on the macromolecular structure // Fuel. – 2017. – Vol. 206. – P. 1–9. – DOI 10.1016/j.fuel.2017.05.085.
94. Мандельброт, Бенуа. Фрактальная геометрия природы / Мандельброт, Бенуа ; перевод с английского А. Р. Логунова ; научная редакция д.ф.и.н. А. Д. Морозова. – Москва : Ин-т компьютерных исследований, 2002. – 654 с. ; ISBN 5-93972-108-7.
95. Булат, А. Ф. Фракталы в геомеханике / А. Ф. Булат, В. И. Дырда / Киев : Издательство Наукова думка, 2005. – 356 с.
96. Malinnikov, V.A. Multifractal analysis of electron images of fossil coal surface / V.A. Malinnikov, V.N. Zakharov, D.V. Uchaev, Dm.V. Uchaev, O.N. Malinnikova // E3S Web of Conferences, Khabarovsk, [25–27 сентября]. – 2018. – Vol. 56. – P. 01020. – DOI 10.1051/e3sconf/20185601020.

97. Курако М. А., Симонов К. В., Кудря Н. О., Следы морских природных катастроф: численный анализ данных // Образовательные ресурсы и технологии. Специальный выпуск. – 2016. – № 2 (14). – С. 186–192.
98. Ribeiro, H. V. Complexity-Entropy Causality Plane as a Complexity Measure for Two-Dimensional Patterns / Ribeiro H. V., Zunino L., Lenzi E. K., Santoro P. A., Mendes R. S. // PLoS ONE. – 2012. – Vol. 7(8): e40689. – DOI 10.1371/journal.pone.0040689.
99. López-Ruiz R., Mancini H. L., Calbet X. A statistical measure of complexity, Physics Letters A. – 1995. – Vol. 209. – P. 321–326.
100. Bandt, C. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series / Bandt C., Pompe B. // Physical Review Letters. – 2002. – Vol. 88, № 17. – P. 174102. – DOI 10.1103/PhysRevLett.88.174102.
101. Brazhe, A. Shearlet-based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns / Brazhe A. // Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. – 2018. – Vol. 97, No 6. – P. 061301. – DOI 10.1103/PhysRevE.97.061301.
102. ГОСТ 17070-2014. Угли. Термины и определения = Interstate council for standardization, metrology and certification: национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 14 ноября 2014 г. N© 72-П) : введен впервые : дата введения 2016-04-01 / разработан Росстандарт. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 20 с.
103. Lu L. Quantitative X-ray diffraction and its application to various coals / L. Lu, V. Sahajwalla, C. Kong, D. Harris // Carbon. – 2001. – V. 39. – P. 1821–1833.
104. Рубан, А. Д. Оценка эффективности дегазации разрабатываемых угольных пластов / А. Д. Рубан, В. С. Забурдяев // Уголь. – 2010. – № 11. – С. 10–13.
105. Алексеев, А. Д. Совершенствование методики расчета нагрузки на очистной забой с учетом давления метана в угольном пласте / А. Д. Алексеев, Г. Г. Каркашадзе, В. А. Васильковский и др. // Горный журнал. – 2009. – № 4. – С. 47–50.

106. Alexeev, A. D. Methane desorption from a coal-bed / A. D. Alexeev, E. P. Feldman, T. A. Vasilenko // Fuel. – 2007. – Vol. 86. – No. 16. – P. 2547–2580.
107. Забурдяев, Б. С. Метанообильность угольных шахт / Б. С. Забурдяев // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 8. – С. 60–64.
108. Забурдяев, Б. С. Метанообильные шахты: газоносность, метановыделение, дегазация / Б. С. Забурдяев // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 11. – С. 28–32.
109. Забурдяев В. С. Влияние петрографического состава углей на газоотдачу в скважины // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 1. – С. 14–18.
110. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов / Киев : Наук. думка, 2010. – 422 с.
111. Ульянова, Е. В. Структура и метаноносность ископаемых углей / Ульянова Е. В., Малинникова О. Н., Долгова М. О. и др. // Химия твердого топлива. – 2016. – № 4. – С. 3–8.
112. Рекомендации по определению газоносности угольных пластов. – Серия 5, выпуск 48. – Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности». – Москва, 2017. – 44 с. (Руководство по безопасности).
113. Uebersfeld J., Eitenne A., Combrisson J. Paramagnetic resonance, a new property of coal-like material. // Nature. – 1954. – Vol. 174. – P. 614.
114. Ingram J.E., Tapley J.G., Jackson R., Bond R.L., Muranghan A.R., Paramagnetic resonance in carbonaceous solids // Nature. – 1954. – Vol. 174. – P. 797.
115. L. Petrakis, D.W. Grandy, Electron spin resonance spectrometric study of free radicals in coals. // Anal. Chem. – 1978. – Vol. 50, – P. 303–308.
116. Silbernagel B.G., Gebhard L.A., Dyrkacz G.R., Bloomquist C.A.A. Electron spin resonance of isolated coal macerals // Fuel. – 1986. – Vol. 65. – P. 558–565.
117. Pilawa B. B., Wieckowski A.B., Pietrzak R., Wachowska H. Oxidation of demineralized coal and coal free of pyrite examined by EPR spectroscopy. / Fuel. – 2002. – Vol. 81. – P. 1925–1931.

118. Бинеев, Э. А. Изменение молекулярной структуры углей и выбросоопасности угольных пластов в процессе метаморфизма / Э. А. Бинеев, В. М. Зотов, Г. И. Степовой, А. В. Фролов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1982. – № 4. – С. 86.
119. Lyons MJ, Spence JB. Environmental free radicals // Brit J Cancer. – 1960. – Vol. 14(4):703–8. – DOI 10.1038/bjc.1960.79.
120. Тютюнников, Ю. Б. О природе сигналов ЭПР каменных углей / Ю. Б. Тютюнников, И. С. Ромаданов, Л. Г. Синцерова // Химия твердого топлива. – 1973. – № 1. – С. 140–141.
121. Недошивин, Ю. Н. К вопросу о парамагнитном поглощении в антрацитах / Ю. Н. Недошивин, Н. В. Фролова, В. И. Касаточкин, В. Я. Посыльный // Химия твердого топлива. – 1973. – № 1. – С. 141–143.
122. Мессерле, П. Е. Парамагнитные свойства каменноугольных пеков и каменных углей / П. Е. Мессерле, Л. А. Бикбулатова // Химия твердого топлива. – 1973. – № 2. – С. 129 – 135.
123. Watanabe, A. Electron spin resonance characteristics of humic acids from a wide range of soil types / Watanabe A., McPhail D.B., Maie N., Kawasaki S., Anderson H.A., Cheshire M.V. / Org Geochem, 36(7) (2005), P. 981–990. – DOI 10.1016/j.orggeochem.2005.03.002.
124. Блюменфельд, Л. А. Применение электронного парамагнитного резонанса в химии / Л. А. Блюменфельд, В. В. Воеводский, А. Г. Семенов. – Новосибирск : Изд. СО АН СССР, – 1962. – 240 с.
125. Касаточкин В.И. Проблема молекулярного строения и структурная химия природных углей // Химия твердого топлива. – 1969. – № 4. – С. 33-48.
126. Андреева, В. Д. Электронная микроскопия материалов : учебное пособие / В. Д. Андреева, И. И. Горшков. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 139 с.
127. Власов, А. И. Электронная микроскопия : учебное пособие / А. И. Власов, К. А. Елсуков, И. А. Косолапов. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 168 с.

128. Lamberti P. W., Martin M. T., Plastino A., Rosso O. A. Intensive entropic non-triviality measure, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2004, Vol. 334(1–2). – P. 119–131.
129. Zunino, L. Discriminating image textures with the multiscale two-dimensional complexity-entropy causality plane / Zunino L., Ribeiro H. V. // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2016. – Vol. 91. – P. 679–688. – DOI 10.1016/j.chaos.2016.09.005.
130. ГОСТ Р 59248-2020 «Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и угольные брикеты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний».
131. Malinnikova, O. “Complexity-entropy” diagrams and their application to the study of coal tectonic disturbance / Malinnikova O., Uchaev Dm., Uchaev D., Malinnikov V., and Ulyanova E. // E3S Web of Conferences. GHCRM 2019. – 2019. – Vol. 129. – P. 01016(8). – DOI 10.1051/e3sconf/201912901016.
132. Марьяндышев, П. А. Термогравиметрическое исследование процесса термического разложения и горения древесного топлива, углей и гидролизного лигнина / П. А. Марьяндышев, А. А. Чернов, Е. И. Попова, В. К. Любов // Современные научно-технические технологии. – 2015. – № 5. – С. 26–31.
133. Малинникова, О. Н. Изменение микроструктуры ископаемых углей в результате внезапных выбросов угля и газа / О. Н. Малинникова, Е. В. Ульянова, М. О. Долгова, И. В. Зверев // Горный журнал. – 2017. – № 11. – С. 27–32.
134. Алексеев, А. Д. Особенности структуры угля выбросоопасных зон / А. Д. Алексеев, Е. В. Ульянова, В. А. Васильковский и др. // Горный информационно – аналитический бюллетень. – 2010. – № 8. – С. 164–179.
135. Методика оценки склонности шахтопластов угля к самовозгоранию : введена приказом Минтопэнерго РФ № 151 от 29 апреля 1998 г. – Москва, 1998.
136. Феоктистов, А. В. Термогравиметрический анализ изменения параметров литейного кокса и антрацита / А. В. Феоктистов, Н. Ф. Якушевич, В. М. Страхов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58, № 11. – С. 837–845. – DOI 10.17073/0368-0797-2015-11-837-845.

**Приложение А**  
**(обязательное)**

**Методика выделения зон угольных пластов склонных к внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию по неоднородности микроструктуры  
(на основе построения диаграмм «энтропия – сложность»)**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР  
ИМ. АКАДЕМИКА Н. В. МЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПКОН РАН)



**МЕТОДИКА**  
**выделения зон угольных пластов склонных к внезапным выбросам угля  
и газа и самовозгоранию по неоднородности микроструктуры  
(на основе построения диаграмм «энтропия – сложность»)**

Москва – 2025

### Аннотация

Методика разработана в качестве практической реализации выполненных в ИПКОН РАН исследований особенностей структуры образцов угля на микронном уровне, отобранных из пластов, склонных и несклонных к опасным явлениям в шахтах, таким как внезапные выбросы угля и газа и самовозгорание. Методика позволяет проводить оценку склонности углей к указанным опасным явлениям по структурному фактору, тем самым выявлять участки с высокой вероятностью возникновения таких явлений. Преимущество методики в том, что по анализу цифровых снимков поверхности углей на микроуровне проводится количественная оценка неоднородности угольной структуры. Неоднородность микроструктуры напрямую связана со способностью угля образовывать химические связи с газами, в частности с метаном и кислородом, и накапливать метан. В результате анализа рассчитываются значения статистических энтропии и сложности, и строятся диаграммы «энтропия – сложность», по которым можно выделить угли, склонные к рассматриваемым опасным явлениям по организации их микроструктуры.

Автором методики является: Б.Н. Пащичев (ИПКОН РАН).

### Условные обозначения и сокращения, принятые в тексте

ГДЯ	Газодинамические явления
СЭМ	Сканирующая электронная микроскопия ( <i>метод</i> )
РСЭМ	Растровый сканирующий электронный микроскоп
Н	Пространственная информационная энтропия, отн. ед.
С	Пространственная статистическая сложность, отн. ед.

### Введение

Свойство угля – склонность к опасным явлениям в шахтах, таким как внезапные выбросы угля и газа и самовозгорание, обусловлено особенностями исходного вещества углепородного массива и характеризует его способность взаимодействовать с газами – метаном и кислородом (окисляться). Определяется кинетикой процессов, протекающих в угле, то есть его химической активностью (в случае склонности к самовозгоранию), и интенсивностью взаимодействия угля с газом – метаном (в случае склонности к внезапным выбросам угля и газа).

К настоящему моменту среди учёных нет единого мнения относительно экспериментального параметра, который смог бы количественно охарактеризовать

склонность угля к внезапным выбросам угля и газа. Способность угля вступать в реакцию с кислородом, иными словами окисляться, также зависит от структуры угля. Структурными параметрами, по которым можно судить о склонности углей к опасным явлениям в пласте, могут быть показатели, характеризующие нарушенность структуры угля на молекулярном уровне и по иерархическому принципу – уровне отдельностей (зёрен).

Среди большого разнообразия методов определения структурных особенностей природных объектов, интерес представляет метод цифрового анализа сложных изображений объектов, который применительно к углям позволяет по рельефу естественных изломов поверхности пробы угля судить о неоднородности структуры на микронном уровне, а также о его сорбционной способности.

Анализ изображений подразумевает выявление характерных для нарушенной или ненарушенной структуры угля паттернов, распределение которых численно оценивается по показателям «энтропия,  $H$ » и «сложность,  $C$ » с помощью специального программного обеспечения обработки снимков. На основе данных строятся диаграммы «энтропия – сложность», а по критериальному значению, пробы дифференцируются по склонности к опасным явлениям.

Методика лабораторного определения склонности углей к внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию в шахтах, при оценке неоднородности структуры угля методом цифрового анализа изображений его поверхности, даёт представления о химической активности нескомпенсированных связей (радикалов). Полученный критерий разделения может быть использован в прогнозных мероприятиях, поскольку позволяет оценить предрасположенность конкретной пробы, изъятой из пласта, к опасным явлениям в шахтах и выявить потенциально опасные зоны в пласте.

## 1 Общие положения

**1.1** Методика устанавливает последовательность действий при экспериментальных лабораторных исследованиях неоднородности структуры углей методом анализа текстурных признаков микроструктуры угольной поверхности на цифровых снимках, построении диаграмм «энтропия – сложность» и на основании вычисленных зависимостей определения склонности к внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию по фактору структуры.

**1.2** Фактическим материалом являются неокисленные пластовые пробы каменного угля, отобранного со свежеобнажённой поверхности угольного пласта (либо свежеотбитый уголь). Из них, для лабораторных испытаний отбираются лабораторные пробы.

**1.3** Цель испытаний – экспериментальное определение склонности углей к опасным явлениям по структурному фактору методами электронной микроскопии и цифрового распознавания образов.

**1.4** Склонность угля к внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию определяется по показателям «энтропия,  $H$ » и «сложность,  $C$ », характеризующим неоднородность структуры угля на микронном уровне, с применением сканирующего электронного микроскопа и специального программного обеспечения обработки снимков.

**1.5** Результатом испытаний является сравнение полученных значений  $H$  и  $C$  с их критериальными значениями и заключение о склонности каменного угля, представленного на испытания, к внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию в шахтах.

## 2 Требования к проведению испытаний

### 2.1 Требования к условиям проведения испытаний

Испытания должны проводиться в нормальных климатических условиях:

- температура окружающего воздуха, °C                   $20 \pm 10$
- относительная влажность воздуха, %                  от 45 до 80
- атмосферное давление, мм. рт. ст.                  от 740 до 750

### 2.2 Требования к исследуемым пробам углей

**2.2.1** Лабораторные исследования проводятся на неокисленных каменных углях.

**2.2.2** Отбор проб углей.

Определение требуемого числа проб углей проводят согласно ГОСТ Р 59248-2020.

Отбираются пробы со свежеобнажённой поверхности в разных местах на угольных пластах на расстоянии 30-50 м друг от друга по падению или простирианию пласта. Масса одной пластовой пробы не менее 1 кг, размер кусков в пробе не менее 30-50 мм.

Нужно учитывать, что место отбора проб должно быть удалено от зон, где проводилось нагнетание воды в пласт, дегазационных и разведочных скважин, тектонических нарушений не менее чем на 20 м. Если это условие невозможно выполнить, то в акте отбора проб указывают расстояние до указанных объектов и их описание.

Для транспортировки отобранныю пробу угля (или керна) помещают в герметичный двухслойный полиэтиленовый пакет и (или) оборачивают пищевой пленкой и кладут в ещё один плотный полиэтиленовый пакет. Внутрь верхнего мешка обязательно помещается

этикетка с информацией о пробе угля с указанием даты, времени отбора пробы, места отбора, угольной пачке (прослойке или пропластке), из которой была отобрана пробы.

**2.2.3** Ввиду того, что уголь – сложное вещество, приготовление лабораторной пробы для испытаний проводят, исходя из опыта сохранения представительности.

Линейные размеры лабораторной пробы угля выбираются в зависимости от характеристик прибора, микроскопа, применяемого при проведении испытаний.

### **2.3 Требования к приборам, применяемым для испытаний**

**2.3.1** Прибор для лабораторного исследования структуры угля на микронном уровне методом СЭМ должен быть внесен в Госреестр средств измерений и иметь Сертификат об утверждении типа средств измерений, а также действующее Свидетельство о поверке.

**2.3.2** Применяют автоматизированные приборы анализа методом СЭМ, имеющие соответствующее программное обеспечение для получения цифровых результатов – электронных снимков.

**2.3.3** Применяют программное обеспечение, позволяющее проводить автоматический анализ изображений и получать ряды данных: «энтропия,  $H$ » и «сложность,  $C$ ».

## **3 Методы испытания**

### **3.1 Подготовка лабораторных проб углей**

**3.1.1** Для лабораторного определения склонности углей к внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию по неоднородности их микроструктуры, от каждой пластовой

пробы ископаемого угля отбираются лабораторные пробы, не менее 3-4 штук (рисунок 1). При этом следует выбирать кусочки с блестящей поверхностью, то есть угли из витринитовой мацеральной группы.

Линейные размеры проб составляют порядка 15 мм (в длину) × 10 мм (в ширину) × 5 мм (в высоту), однако нужно руководствоваться ограничивающими размерами рабочей камеры используемого микроскопа, например, одна из моделей микроскопов обладает следующими параметрами: в диаметре – 30 мм, по высоте – 8 мм. На предметном столике допустимо размещать как одну, так и несколько проб



Рисунок 1 – Подготовленные для исследования с помощью сканирующего микроскопом лабораторные пробы углей

одновременно. В случае размещения нескольких проб следует соблюдать их приблизительное равенство по высоте.

Пробы с помощью лабораторных инструментов готовят так, чтобы снимаемая поверхность имела естественную (без техногенных нарушений), близкую к плоской форму, так как в случае сильного перепада высот часть поверхности окажется не в фокусе. Противоположную сторону при необходимости щадяще шлифуют параллельно интересуемой поверхности. Удаляют излишнюю пыль со шлифованной поверхности пробы (обратной к интересующей поверхности), например, клейкой лентой, для предотвращения загрязнения микроскопа и лучшего прилипания пробы. Подготовленные пробы устойчиво размещают на предметной пластинке при помощи двустороннего проводящего скотча.

### **3.2 Проведение испытания проб угля**

**3.2.1** В программном обеспечении растрового сканирующего электронного микроскопа (РСЭМ) задают режим работы со следующими параметрами:

- режим сканирования: SEI – изображение с детектора вторичных электронов;
- уровень увеличения:  $\times 1000$  (тысяча кратное), то есть не хуже 10 нм;
- расширение файлов снимков: bmp (одноканальное изображение).

**3.2.2** Подготовленные пробы углей помещают на предметный столик и отправляют в рабочую камеру микроскопа.

**3.2.3** Проводят сканирование.

**3.2.4** Для каждой пробы проводят съёмку серии снимков: определяют несколько характерных областей интереса на угольной поверхности, где в окрестности каждой делают не менее десятка фотографий.

### **3.3 Обработка результатов**

**3.3.1** Полученные снимки обрабатывают специальной программой, например, «Shearlexity» (разработана на языке Python с использованием стандартных библиотек языка для научных расчётов и визуализации (scipy, matplotlib), и библиотеки для шиарлет-разложения «PyShearlets») или программой с аналогичными параметрами. Результатом расчёта являются ряды значений «энтропия» и «сложность». Программой также определяются средние значения «энтропия» и «сложность», принимаемые в качестве характеристики каждого конкретного снимка.

**3.3.2** По полученным средним значениям серии снимков производят построение диаграммы зависимости «энтропия – сложность», тем самым определяя разброс значений для пробы в целом.

**3.3.3** Вычисление показателей пространственной неоднородности изображения позволяет количественно оценить нарушенность структуры угля на микроуровне.

Определение склонности угля к внезапным выбросам угля и газа или самовозгоранию по лабораторной пробе проводится по критерию разделения по склонности, в относительных единицах:

- диапазоны распределения значений для несклонных:  $0,5 \leq H \leq 0,7$  и  $0,2 \leq C \leq 0,4$  ,
- диапазоны распределения значений для склонных:  $0,5 \leq H \leq 0,9$  и  $0,1 \leq C \leq 0,4$  .

**3.3.4** Если из серии проб хотя бы одна даёт результат «склонный» – то данная зона считается «склонной к внезапным выбросам угля и газа» или «склонной к самовозгоранию».

#### **Перечень ссылочных документов**

1. ГОСТ ISO 13909-4-2018. Уголь каменный и кокс. Механический отбор проб. Часть 4. Уголь. Подготовка проб для испытаний.
2. ГОСТ Р 53293-2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа.
3. ГОСТ Р 59248-2020. Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и угольные брикеты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний.
4. Программное обеспечение по распознаванию образов «Shearlexity: shearlet-based spatial entropy and complexity maps for textures». – URL: <https://github.com/abrazhe/shearlexity/>

## Приложение Б

### (обязательное)

#### **Справка о внедрении методики выделения зон угольных пластов склонных к внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию по неоднородности микроструктуры (на основе построения диаграмм «энтропия – сложность»)**

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
 **МИСИС**  
УНИВЕРСИТЕТ  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
 АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
 УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»  
 (НИТУ МИСИС)»**  
 Ленинский проспект, 4, стр.1, Москва, 119049  
 Тел. (495)955-00-32; Факс: (499)236-21-05  
<http://www.misis.ru>  
 E-mail: [kancelia@misis.ru](mailto:kancelia@misis.ru)  
 ОКПО 02066500 ОГРН 1027739439749  
 ИНН/КПП 7706019535/ 770601001  
 №

На №

**СПРАВКА**  
 об использовании результатов диссертационной работы  
 Пашичева Бориса Николаевича, представленной на соискание ученой  
 степени кандидата технических наук, на тему: «Оценка влияния  
 микроструктуры угля на его склонность к удержанию метана,  
 выбросоопасности и самовозгоранию»

Настоящей справкой подтверждаем, что «Методика выделения зон угольных пластов склонных к внезапным выбросам угля и газа и самовозгоранию по неоднородности микроструктуры (на основе построения диаграмм «энтропия – сложность»)», разработанная младшим научным сотрудником лаборатории 2.1 «Лаборатория многофазных процессов в массивах горных пород при разработке месторождений» Центра проблем метана и газодинамических явлений угольных и рудных месторождений (Отдел № 2) ИПКОН РАН Пашичевым Борисом Николаевичем в рамках диссертационной работы «Оценка влияния микроструктуры угля на его склонность к удержанию метана, выбросоопасности и самовозгоранию», используется в учебном процессе при проведении практических и лабораторных занятий по дисциплине «Физико-химические методы исследования материалов», читаемой студентам специальности 21.05.05 «Физические процессы горного или нефтегазового производства».

Директор Горного института  
 НИТУ МИСИС, д.э.н.

А.В. Мяков



Исполнитель: Винников Владимир Александрович  
 Телефон: 8-916-016-53-51,  
 e-mail: [yinnikova@misis.ru](mailto:yinnikova@misis.ru); [evgeny.vinnikov@mail.com](mailto:evgeny.vinnikov@mail.com)