

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД, РУДНИЧНАЯ
АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА
GEOMECHANICS, DESTRUCTION OF ROCKS BY EXPLOSION,
MINE AEROGASDYNAMICS AND MINING THERMOPHYSICS**

Научная статья

УДК 622.324.5

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-71-83

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ И
ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ
АНАЛИЗА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Смирнова Арина Дмитриевна^{1, 2*},
Михайлова Татьяна Викторовна¹
Попов Алексей Васильевич³

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева² Шаньдунский университет науки и технологий³ ООО «Распадская угольная компания»

* для корреспонденции: smirnovaad@kuzstu.ru

**Информация о статье**

Поступила:

12 мая 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 июня 2025 г.

Принята к публикации:

30 июня 2025 г.

Опубликована:

28 августа 2025 г.

Ключевые слова:

Кузбасс, метан угольных
пластов, заблаговременная
дегазация, керн, физико-
механические свойства,
геомеханическое
районирование, цифровое
моделирование.

Аннотация.

Несмотря на мировой тренд перехода к возобновляемым источникам энергии, уголь остается ключевым звеном энергетики, особенно в странах с индустриальной экономикой. Перед топливно-энергетическим комплексом России стоит задача перехода к интеллектуальному, технологичному и экологически безопасному освоению месторождений. Одним из ключевых решений является комплексное освоение угольных месторождений с попутным извлечением метана, что требует точного прогнозирования участков с повышенной трещиноватостью и газоотдачей. Поэтому в рамках исследования по обоснованию рациональных мест заложения скважин заблаговременной дегазации на слабо разведанных участках высокометаносных угольных месторождений необходим комплексный учет имеющихся инженерно-геологических и геомеханических данных с интеграцией методов цифрового моделирования. Работа посвящена анализу пространственного распределения физико-механических свойств вмещающих углепородный массив пород как основы для геомеханического моделирования и выделения первоочередных зон бурения скважин заблаговременной дегазации. Используются результаты лабораторных испытаний керна структурных скважин, пробуренных в южной части Тутуясской площади Кузбасса. Выполнен анализ значений физико-механических свойств горных пород и целевых угольных пластов. Систематизация поскважинных ведомостей позволила сформировать базу данных с информацией о литологическом составе кернового материала, интервалах опробования и физико-механических свойствах горных пород. Описаны процессы построения карт изолиний усредненных значений объемной плотности и предела прочности для каждой скважины и литологической разности, а также оформления карт районирования. Выявлены закономерности пространственного распределения свойств и определены критерии наиболее перспективных и первоочередных участков для бурения дегазационных скважин.

Для цитирования: Смирнова А.Д., Михайлова Т.В., Попов А.В. Комплексный подход к оценке степени трещиноватости и газопроницаемости угленосного массива на основе анализа физико-механических свойств // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 4 (170). С. 71-83. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-71-83, EDN: QYZXKY

Введение

Несмотря на общемировую тенденцию к отказу от углеводородного топлива в пользу возобновляемой энергетики, спрос на ископаемое топливо как самый надежный источник энергии (в том числе уголь) сохранится в ближайшие десятилетия. По данным отчета [1] за 2023 год, мировая добыча угля снова достигла своего максимума, побив установленный в 2022 году рекорд, при этом Китай, Индия и Индонезия являются крупнейшими производителями угля в мире. Это является следствием планомерно растущего мирового спроса на данный энергоноситель, так как 35% электроэнергии по-прежнему получают именно из угля.

Для удовлетворения спроса Россия продолжает наращивать объемы угледобычи, что позволяет нашей стране сохранять третье место (после Австралии и Индонезии) в рейтинге самых крупных экспортеров угля и второе место по количеству запасов [2]. При этом из всех угледобывающих регионов самым крупным производителем и поставщиком угля является Кузбасс [3], на долю которого приходится около половины (48,5%) всей добычи угля в стране [4].

Немаловажным фактором, требующим адаптации угольной промышленности, является переход к экономике устойчивого низкоуглеродного развития, обусловленный Парижским соглашением по сокращению выбросов парниковых газов [5–7]. Угледобыча как один из основных источников выбросов CH_4 в атмосферу генерирует порядка 12% от общего объема антропогенных выбросов метана в мире [8]. В последнее десятилетие объем экспорта угля из России увеличился на рынки Азиатско-Тихоокеанского региона [9], при этом Китай является основным направлением экспорта угля [10]. Страны Азии уделяют существенное внимание экологической повестке, в частности, в Китае запланирован полный переход к углеродной нейтральности к 2060 году, поэтому логично предположить, что требования к минимизации углеродного следа ввозимой продукции будут ужесточаться. Так, по прогнозным оценкам, экспорт российского угля будет снижаться примерно до 150 млн тонн к концу 2025 года вследствие глобальной тенденции к декарбонизации [11].

В таких условиях предприятиям угольной промышленности для обеспечения повышения эффективности функционирования, а также сохранения конкурентоспособности как в экономическом, так и в экологическом смыслах,

необходимо развитие энерго- и ресурсосберегающих технологий и повышение экологичности ведения производственной деятельности угольными предприятиями. При этом в рамках реализации стратегических направлений цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса РФ до 2030 года и развития минерально-сырьевой базы РФ до 2050 года использование технологий цифрового моделирования является необходимым для долгосрочного, устойчивого, технологически независимого и экологически безопасного развития угольной промышленности и воспроизводства минерально-сырьевых ресурсов страны.

Современная практика освоения угольных месторождений все в большей степени ориентирована на комплексное освоение, включающее добычу угля и извлечение метана угольных пластов (МУП) как попутного полезного ископаемого. Россия обладает значительными прогнозными ресурсами МУП [12], в том числе в пределах Южно-Кузбасской группы угольных месторождений в объеме 13,1 трлн м^3 [13]. Эти масштабы оцененных ресурсов дают основания рассматривать Кузбасс не только как базу для добычи угля, но и как весомый источник нетрадиционного и экологически чистого углеводорода.

Комплексное освоение высокометаносных угольных месторождений позволяет одновременно решать задачи промышленной безопасности, декарбонизации и рационального недропользования. Однако при малых объемах и низкой концентрации извлеченный метан преимущественно сжигается на факельных установках, что сопровождается выбросами углеислого газа. Данный способ утилизации снижает экологическую эффективность процесса комплексного освоения и противоречит задачам программы долгосрочного развития угольной промышленности до 2035 года, также нацеленной на декарбонизацию и достижение углеродной нейтральности. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы эффективного извлечения и полезного использования МУП.

К числу наиболее перспективных технологий относится заблаговременная дегазация, осуществляемая за 5-7 лет до начала очистных или подготовительных работ. Метод позволяет извлекать 60-80% сорбированного газа с концентрацией 98% [14, 15] и реализуется посредством бурения вертикальных или

наклонно-направленных скважин с поверхности. Тем не менее, данная технология в России до сих пор остается недостаточно изученной и реализованной [16, 17]. Одной из ключевых проблем является низкая продуктивность скважин [18, 19], так как при низкой проницаемости угольных пластов и увеличении глубины резко снижается эффективность дренирования. Поэтому разработка эффективных методов прогнозирования зон с потенциально высокой газоотдачей является актуальной задачей.

Изучение трещиноватости углепородного массива на угольных месторождениях имеет значение как фактор, определяющий его проницаемость и газоотдающую способность [20]. Формирование и развитие проводящих трещин, их ориентация, интенсивность и раскрытие, определяющие пути миграции флюидов, зависят от напряженно-деформированного состояния углепородного массива и физико-механических свойств (ФМС) слагающих его пород [21, 22]. Обычно изучение геолого-промысловых характеристик угольных пластов как нетрадиционного коллектора и определение ФМС углей и вмещающих пород проводятся в целях геомеханического моделирования участка недр в двух- или трехмерном пространственном представлении [23]. При этом первым этапом создания геомеханической модели служит геомеханическое районирование участка недр, основой которого являются материалы геологического и инженерно-геологического изучения участка недр на всех стадиях его освоения.

Поэтому целью данного исследования является анализ пространственного изменения ФМС слагающих углепородный массив пород с использованием методов цифрового моделирования для определения зон повышенной трещиноватости и, соответственно, газоотдачи.

В исследовании среди ФМС особое внимание уделяется таким ключевым характеристикам, как объемная плотность и предел прочности пород при одноосном сжатии, которые служат косвенными индикаторами проницаемости и трещиноватости массива [24, 25]. Объемная плотность представляет собой отношение массы породы к ее объему, включая имеющиеся пустоты, минеральный каркас и жидкости. Согласно терминологии инженерной геологии, объемная плотность является природной плотностью, то есть плотностью породы, у которой в момент исследования все пустоты заполнены жидкостью. При расчете объемной плотности в экспериментальных условиях в качестве жидкости используется

керосин. Чем ниже объемная плотность образца породы, тем больше порода напитается керосином, и значит, потенциально проницаемость выше. Зависимость проницаемости от объемной плотности хорошо подтверждается экспериментальными данными, демонстрирующими зависимость скорости диффузии угольного метана от размеров и процентного содержания пор в угольных пластах [26–28].

Знание распределения объемной плотности вмещающих пород необходимо в контексте приуроченности миграции газа к угольным пластам и пористым зонам, которые разделены породами с высокой объемной плотностью, затрудняющими процесс естественной дегазации. Таким образом, анализ распределения объемной плотности неразрывно связан с

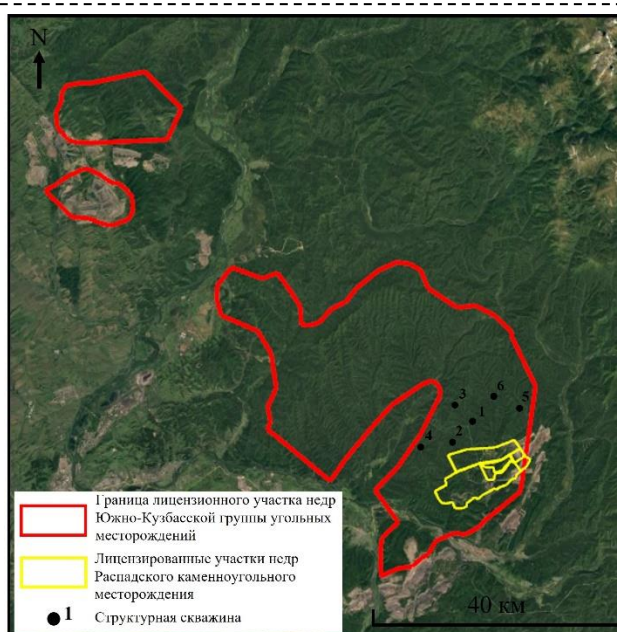


Рис. 1. Границы участков распределенного фонда недр в границах южной части Тутуясской площади Кузбасса

Fig. 1. Boundaries of distributed subsoil fund areas within the southern part of the Tutuyasskaya area of Kuzbass

оценкой проницаемости и играет ключевую роль в оптимизации процесса заблаговременной дегазации угольных пластов.

Кроме этого, в целях прогнозной оценки степени трещиноватости углепородного массива и создания геомеханической модели необходимо проводить районирование по пределу прочности при одноосном сжатии [29]. Породы, характеризующиеся высоким пределом прочности, обычно менее подвержены деформации и разрушению во время бурения скважин, что создает стабильные условия работы и снижает риск аварийных ситуаций. Увеличение прочности указывает на устойчивость пород к механическим нагрузкам, что, в свою очередь,

свидетельствует о меньшем количестве трещин [30]. Трещиноватость напрямую влияет на проницаемость и газоотдающую способность углей, так как трещины создают путь для движения флюидов [31]. Поэтому, зная распределение предела прочности горных пород, возможно осуществлять прогноз степени трещиноватости на слабо разведанных участках.

Объект и методы исследования

Исследование проводилось на данных, полученных при бурении и испытаниях структурных скважин под условными номерами 1-5 в пределах Тутуянской площади Кузбасса. Площадь расположена в пределах Южно-Кузбасской группы угольных месторождений в юго-восточной части бассейна и, учитывая геолого-технологические факторы, считается перспективной для извлечения метана [32].

Промышленная угленосность площади приурочена к балахонской и кольчугинской сериям отложений каменноугольно-пермского возраста. В юго-восточной части Тутуянской площади наибольший интерес представляют продуктивные отложения ускатской, ленинской и грамотеинской свит кольчугинского цикла угленакопления. Пластовая залежь сложного строения и представляет собой последовательное чередование угольных пачек и разделяющих прослоев алевролитов и аргиллитов. Угленосные толщи повсеместно перекрываются мощными юрскими отложениями конгломератовой серии, которые препятствуют миграции метана в атмосферу.

В настоящее время территория является объектом предварительных исследований и характеризуется низкой геолого-геофизической изученностью. При этом в южной части площадь тесно прилегает к действующим шахтам ООО «Распадская угольная компания» (Рис. 1). Согласно ежегодным планам развития горных работ, Тутуянская площадь потенциально рассматривается как место заложения новых угольных шахт в ближайшее десятилетие, что предопределяет постановку вопроса по определению зон повышенной газоотдачи на основе имеющихся данных.

Процесс геомеханического районирования в двухмерной среде в целях прогнозной оценки степени трещиноватости и газопроницаемости углепородного массива можно разделить на несколько этапов:

- сбор и статистическая обработка исходных данных, в частности результатов лабораторных исследований и испытаний

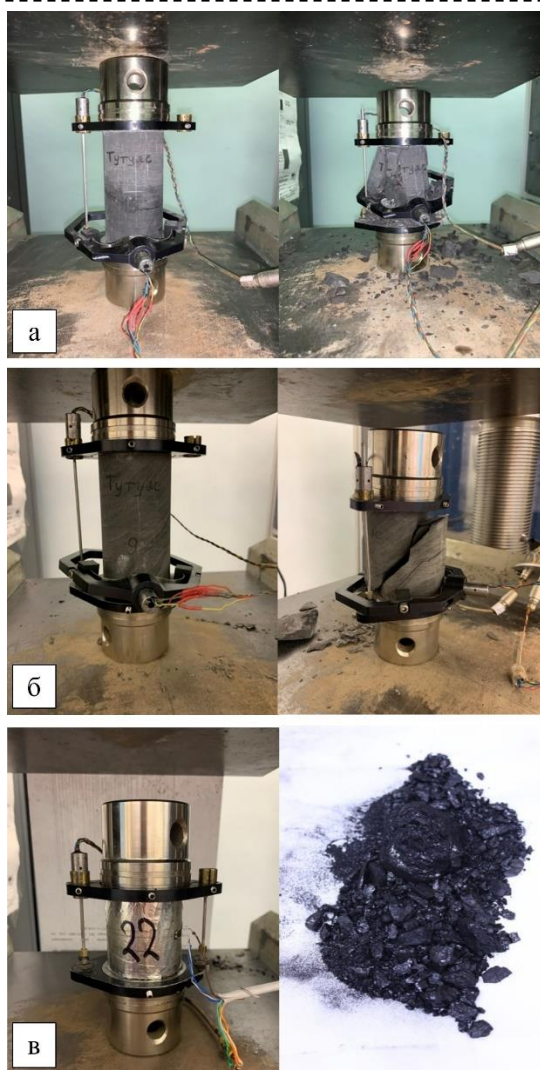


Рис. 2. Испытания исследуемых литотипов методом одноосного сжатия: а – алевролит; б – аргиллит; в – уголь

Fig. 2. Uniaxial compressive testing of studied lithotypes: a – siltstone; б – mudstone; в – coal

образцов на одноосное сжатие, отобранных из трех последовательно чередующихся литотипов;

- построение двумерных сеточных поверхностей, отображающих пространственное распределение ФМС изучаемых литотипов;

- построение и интерпретация прогнозных карт районирования с целью установления критериев наиболее перспективных и первоочередных участков для бурения скважин заблаговременной дегазации.

С применением стационарной буровой установки были извлечены цилиндрические образцы полноразмерного кернового материала диаметром 45 мм. Исследования проводились по образцам, представленным алевролитами, аргиллитами и углями, поднятыми с глубин от 445 м до 1075 м.

В лабораторных условиях из общего количества проб было изготовлено 43 образца правильной цилиндрической формы для

определения предела прочности породы при одноосном сжатии. Испытания образцов осуществлялись методом измерения максимального давления, приложенного к плоским торцам образца, через плоские стальные плиты, в атмосферных условиях до его разрушения согласно ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии». Поэтому для некоторых образцов потребовалось восстановление их торцевых поверхностей. Для этого торцевая поверхность обеспыливалась с последующим установлением специальной формы, изготовленной из медной фольги. В форму заливался цементно-песчаный раствор, после отверждения которого образец извлекался и торцевался до необходимой длины и плоскости торцевой поверхности.

После изготовления образцов производилась их маркировка, фотодокументирование, литологическое описание образцов и составление учетной ведомости. Далее образцы высушивались до постоянного веса в сушильных шкафах при температуре 70°C. Далее производилось сжатие на модернизированной установке «Autolab 1500», дополненной наружным устройством «ИП-250». Образец помещался между стальными плитами, на который с помощью встроенного насоса осуществлялось плавное увеличение давления до его разрушения (Рис. 2). При этом производилась

непрерывная регистрация давления на образец, также во время нагружения непрерывно фиксировалась вертикальная и горизонтальная деформация образца датчиками линейно-индуктивного перемещения «LVDT».

Кроме этого, из кернового материала были отобраны 45 образцов для расчета объемной плотности методом Преображенского в соответствии с ГОСТ 26450.1-85 «Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением».

Результаты лабораторных испытаний образцов вмещающих горных пород и угольных пластов представлены в Таблице 1, где в числителе приведены значения от – до, в знаменателе – среднее значение, в скобках – количество определений.

Объемная плотность исследуемых литотипов изменяется в пределах от 1,2 г/см³ до 2,6 г/см³. Для разнотермических серых алевролитов величины колеблются от 2,17 г/см³ до 2,57 г/см³, темно-серых углистых аргиллитов – от 1,23 г/см³ до 2,56 г/см³, легких трещиноватых углей – от 1,2 г/см³ до 1,62 г/см³. Прочность исследуемых литотипов изменяется в широких пределах от 2,5 МПа до 111,6 МПа. В пределах исследуемой территории прочность алевролитов достигает максимальных значений, прочность аргиллитов изменяется в пределах от 4,1 МПа до 94,6 МПа. Наиболее распространенные значения прочности угольных пластов характеризуются значениями

от 2 МПа до 10 МПа, однако по результатам лабораторных испытаний прочность четырех образцов изменяется в пределах от 11,7 МПа до 20,7 МПа.

Несмотря на значительный диапазон глубин опробованных пересечений, необходимость усреднения параметров обоснована низкой геолого-геофизической изученностью территории и ограниченным количеством проб кернового материала. В условиях слабо разведанных, но перспективных для добычи МУП участков затруднительно установить достоверную зависимость ФМС горных пород и угольных пластов от глубины их залегания. Тем не менее, результатом статистической обработки имеющихся данных является выявленное отсутствие зависимости объемной плотности и прочности исследуемых

Таблица 1. Результаты определения ФМС образцов литотипов

Table 1. Results of determining physical and mechanical properties of lithotype samples

Условный индекс структурной скважины	Литотип	Объемная плотность, г/см ³	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа
1	Алевролит	<u>2,17 – 2,57</u> 2,45 (7)	<u>10,30 – 111,60</u> 55,64 (7)
	Аргиллит	<u>1,23 – 2,56</u> 2,28 (5)	<u>32,50 – 94,60</u> 63,15 (4)
	Уголь	<u>1,23 – 1,45</u> 1,27 (11)	<u>3,30 – 20,70</u> 7,69 (10)
2	Алевролит	2,21 (1)	12,8 (1)
	Аргиллит	<u>2,35 – 2,53</u> 2,42 (4)	<u>4,10 – 43,30</u> 22,35 (4)
	Уголь	<u>1,20 – 1,42</u> 1,28 (7)	<u>4,80 – 20,00</u> 9,94 (7)
3	Аргиллит	<u>1,73 – 1,77</u> 1,75 (2)	<u>21,20 – 34,40</u> 27,80 (2)
	Уголь	<u>1,25 – 1,62</u> 1,35 (4)	<u>2,50 – 6,60</u> 4,30 (4)
4	Алевролит	2,43 (1)	17,00 (1)
	Аргиллит	2,46 (1)	30,00 (1)
5	Уголь	1,33 (2)	<u>7,80 – 16,60</u> 12,20 (2)

литотипов от глубины залегания. Однако для повышения достоверности геомеханической модели и точности прогноза проницаемости и трещиноватости горных пород требуется детализированное районирование и анализ изменения ФМС с глубиной, что является направлением дальнейших исследований.

Затем для эффективной интерпретации геопроостранственных изменений ФМС угольных пластов и вмещающих пород по площади были построены гриды (сеточные поверхности) для каждого литотипа с использованием методов математического моделирования в среде Surfer (Golden Software).

Файл сеток служит двумерным представлением трехмерных пространственных данных в виде линий одинаковых значений. Процесс их генерации заключался в преобразовании неоднородно расположенных

данных с известными координатами X , Y и Z в регулярную сетку значений путем интерполяции и экстраполяции данных. Учитывая, что расположение скважин на исследуемой территории неравномерное, для корректной аппроксимации требовалось создание структурированной таблицы вводных данных. При этом в поля таблицы координат X и Y указывалось реальное географическое расположение скважин, в то время как поле с координатой Z представляло собой усредненные значения объемной плотности и предела прочности.

В рамках исследования в качестве геостатистического метода интерполяции использован метод Кригинга, встроенный в используемый программный комплекс.

Метод базируется на вероятностно-статистическом аппарате геостатистики и

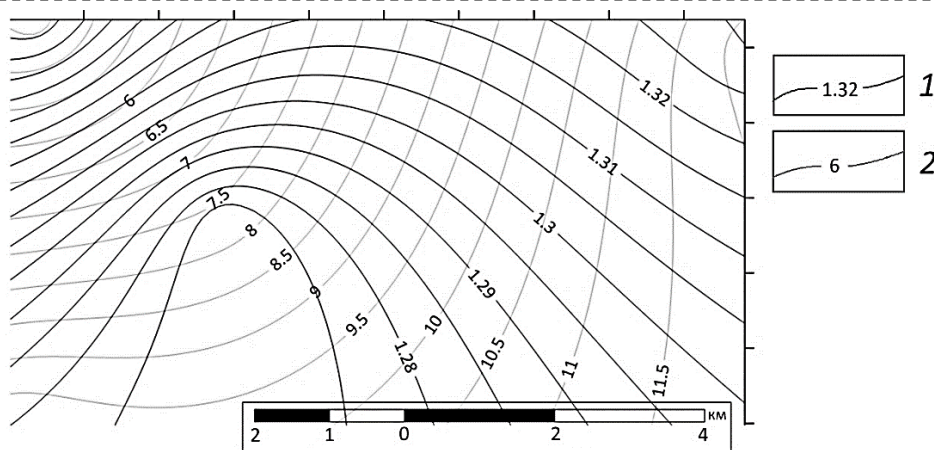


Рис. 3. Сеточная поверхность распределения ФМС угольных пластов в плане: 1 – изолинии объемной плотности, г/см^3 ; 2 – изолинии предела прочности при одноосном сжатии, МПа

Fig. 3. Grid surface of spatial distribution of coal seam physical and mechanical properties: 1 – bulk density contour lines, g/cm^3 ; 2 – uniaxial compressive strength contour lines, MPa

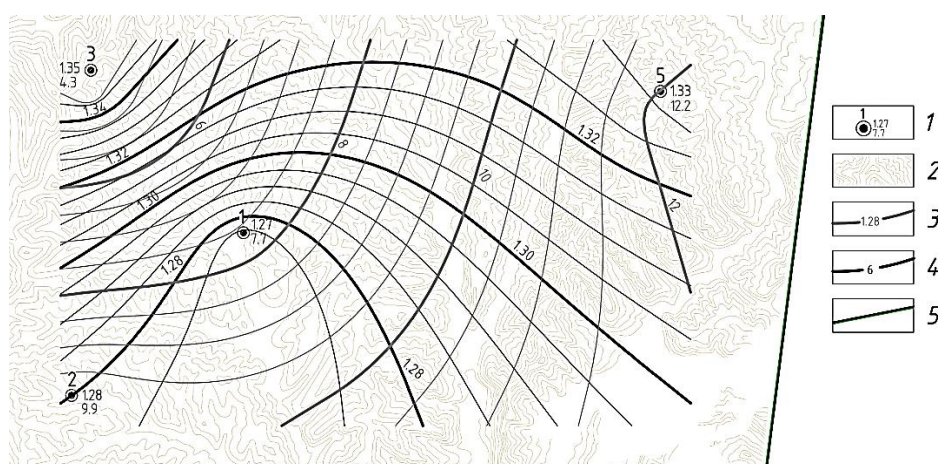


Рис. 4. Прогнозная карта изменений ФМС угольных пластов: 1 – структурная скважина; 2 – изолинии земной поверхности; 3 – изолинии объемной плотности, г/см^3 ; 4 – изолинии предела прочности при одноосном сжатии, МПа

Fig. 4. Predictive map of physical and mechanical properties variation in coal seams: 1 – structural well; 2 – ground surface contour lines; 3 – bulk density contour lines, g/cm^3 ; 4 – uniaxial compressive strength contour lines, MPa

позволяет производить аппроксимацию пространственно распределенных параметров в точках, где отсутствуют прямые измерения, с учетом корреляции между известными значениями. Метод Кригинга сохраняет высокую точность при ограниченном объеме исходных данных, что делает его универсальным инструментом для условий слаборазведанных угольных месторождений. Благодаря широкой применимости и интеграции в прикладные геоинформационные системы (например, ArcGIS), метод Кригинга продолжает активно использоваться для аппроксимации пространственных данных при построении цифровых моделей месторождений полезных ископаемых [33]. В частности, практическая эффективность метода подтверждается рядом научных исследований о создании геологических моделей различных показателей угольных месторождений (гипсометрия и мощность пласта, показатели качества угля) [34, 35].

В рамках данного исследования применение метода Кригинга обусловлено необходимостью геопространственного анализа слаборазведанного участка угольного месторождения. Несмотря на ограниченное количество информации, полученной по результатам лабораторных испытаний керна нескольких скважин, метод лег в основу построения двумерных сеточных поверхностей распределения ФМС.

В качестве примера смоделированных сеточных поверхностей представлены изолинии пространственного распределения объемной плотности и предела прочности при одноосном сжатии угольных пластов на основе данных четырех структурных скважин (Рис. 3).

Для интерпретации пространственного изменения величин ФМС каждого литотипа были созданы прогнозные карты распределения исследуемых показателей в пределах слабо изученной территории. Для этого процесса потребовалось экспортировать изолинии свойств в двухмерную систему автоматизированного проектирования с последующим оформлением листов.

Затем полученные прогнозные карты изолиний были совмещены с топографией земной поверхности Тутуяской площади Кузбасса и расположением устьев керновых скважин, что позволило визуализировать пространственные изменения свойств литотипов в пределах изучаемого интервала, экстраполировать данные и создать прогнозные карты распределения значений объемной плотности и предела прочности пород при одноосном сжатии.

На Рис. 4 представлена прогнозная карта изменений ФМС угольных пластов в пределах южной части Тутуяской площади Кузбасса.

Рядом с условными обозначениями устьев скважин приведены средние значения объемной плотности (в числителе) и предела прочности (в знаменателе).

Результаты и их обсуждение

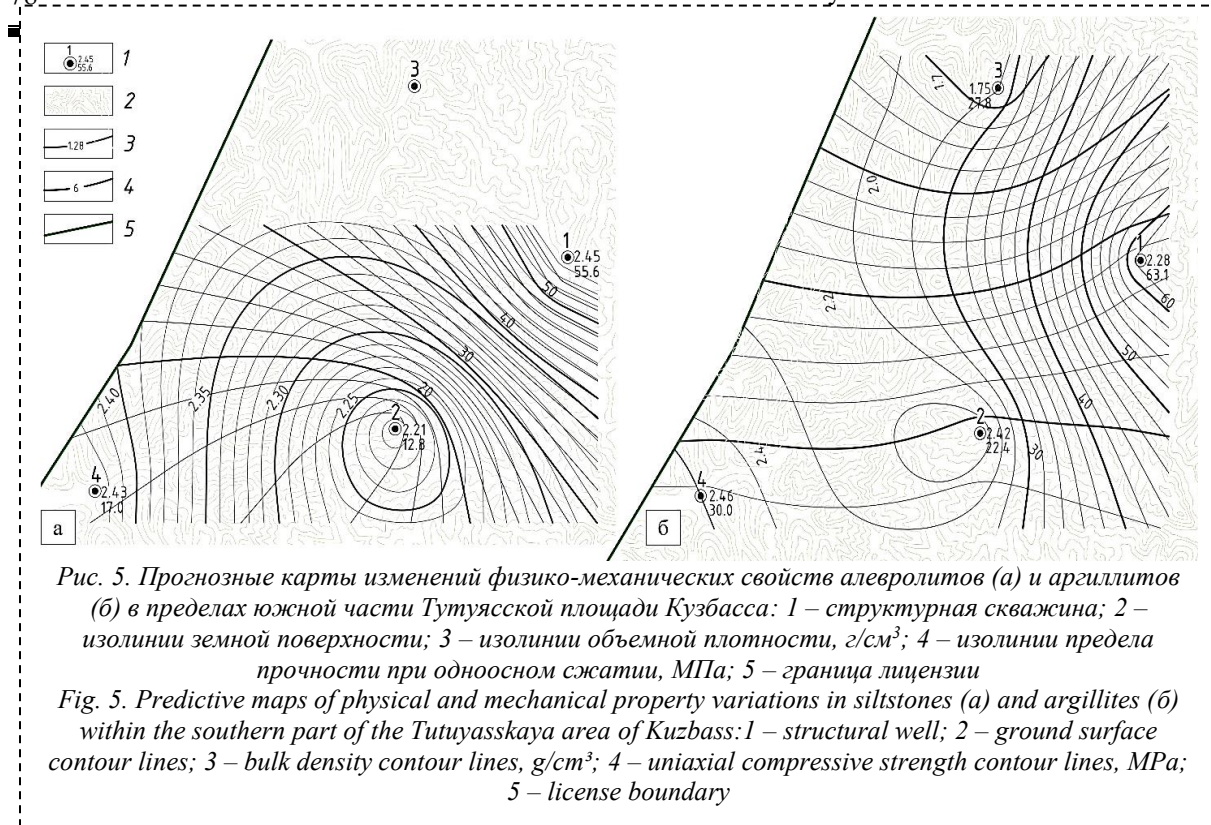
Интерпретация прогнозных карт распределения ФМС исследуемых литотипов является важным этапом геомеханического районирования южной части Тутуяской площади Кузбасса. Основной задачей данного этапа является выделение зон, характеризующихся повышенной газоотдачей.

На полученной прогнозной карте прослеживается изменение значений объемной плотности и предела прочности углей по площади расположения скважин, что указывает на разную степень уплотнения и пористости. Угольные пласты, вскрытые скважиной 1, характеризуются наименьшей объемной плотностью, что свидетельствует о большем количестве пор в угольном пласте и потенциально более высокой проницаемости. В северном направлении прослеживается постепенное увеличение объемной плотности, достигающее до $1,35 \text{ г/см}^3$ вблизи скважины 3. Эта тенденция может быть интерпретирована как проявление процессов уплотнения угля и сжатия имеющихся пустот в структуре пласта, что приводит к снижению проницаемости.

Таким образом, участки с пониженной объемной плотностью потенциально обладают более высокой газоотдачей и, следовательно, представляют наибольший интерес с точки зрения организации первоочередной дегазации. В частности, зоны вблизи скважин 1 и 2 могут рассматриваться как оптимальные участки для размещения скважин заблаговременной дегазации, так как обладают благоприятными инженерно-геологическими условиями. Напротив, области, приуроченные к скважинам 3 и 5, характеризуются повышенной плотностью, что свидетельствует о сниженной проницаемости. Это ограничивает потенциал углепородного массива по метаноотдаче и эффективность дегазации.

Распределение значений предела прочности при одноосном сжатии также демонстрирует выраженную пространственную неоднородность. Так, минимальные значения зафиксированы в пределах скважины 3, по мере удаления от которой наблюдается постепенное увеличение прочности угля в направлении скважины 5. В свою очередь, в скважине 5 зафиксировано максимальное значение предела прочности, что можно объяснить отсутствием трещиноватых и проницаемых зон в этой области.

Данный показатель является важным индикатором при выборе участков бурения и оценки устойчивости массива. Повышенные значения предела прочности свидетельствуют о



большей устойчивости углей к механическим воздействиям и меньшей склонности к деформации и трещинообразованию. Напротив, участки с пониженной прочностью, в том числе вблизи скважин 1 и 3, потенциально более восприимчивы к образованию трещин под действием горного давления, что способствует интенсивному выделению метана.

Интерпретация прогнозных карт распределения объемной плотности и предела прочности алевролитов (Рис. 5, а) и аргиллитов (Рис. 5, б) также позволяет выделить первоочередные для бурения скважин участки. При анализе данных трех структурных скважин выявлено увеличение показателей исследуемых ФМС алевролитов в направлении от скважины 2 к скважинам 1 и 4, достигая максимальных значений в северо-восточной части. Данный пространственный тренд служит косвенным признаком наличия более плотных и менее трещиноватых алевролитов с пониженной пористостью и проницаемостью в этом направлении.

По данным четырех керновых скважин минимальные значения объемной плотности аргиллитов зафиксированы в скважине 3 с постепенным увеличением в южном направлении. Также от скважины 2 по периферии участка отмечается рост прочности, достигая максимальных значений в пределах скважины 1. Это указывает на повышение устойчивости аргиллитов к механическим нагрузкам и снижение трещиноватости углепородного массива в данной зоне.

Участки, характеризующиеся повышенными значениями объемной плотности и предела прочности пород, в данном исследовании рассматриваются как менее перспективные с точки зрения извлечения метана, поскольку такие инженерно-геологические условия потенциально свидетельствуют о низкой пористости и проницаемости угольного массива. С другой стороны, понимание геопро пространственной изменчивости свойств имеет ключевое значение для комплексной оценки миграционных путей флюидов и выявления пористых, трещиноватых зон в пределах угленосной толщи. Плотные и прочные породы могут выполнять функцию естественных экранирующих барьеров, разделяющих более проницаемые участки и препятствующих естественной дегазации, тем самым формируя сложные схемы газоаккумуляции.

Выводы

Результаты исследования подтверждают, что геопро пространственный анализ карт распределения объемной плотности и предела прочности, построенных на основе сеточных интерполяционных моделей, представляет собой эффективный инструмент для прогнозной оценки степени трещиноватости и газопроницаемости слабо разведанного участка угольного месторождения. Определение зон повышенной газоотдачи и первоочередных участков бурения дегазационных скважин является неотъемлемой частью стратегии комплексного освоения угольных месторождений и обеспечения промышленной и

экологической безопасности ведения горных работ.

Согласно установленным критериям, наибольший интерес для размещения дегазационных скважин и извлечения больших объемов метана представляют зоны с пониженными значениями ФМС. Так, области с низкой плотностью и прочностью обладают более развитой системой проводящих трещин и пустот, функционирующих как каналы миграции пластовых флюидов. При этом объемная плотность рассматривается как более значимый индикатор потенциала газоотдачи, поскольку напрямую коррелирует с пористостью и проницаемостью.

Направлением дальнейших исследований является выявление связи ФМС пород с проницаемостью и трещиноватостью на основе лабораторных испытаний керна и геомеханического районирования участка Распадского каменноугольного месторождения, примыкающего с южной стороны Тутуянской площади Кузбасса. Продолжение исследований в рамках работы будет также направлено на создание геомеханической модели исследуемого участка недр, необходимой для прогноза напряженного состояния и анализа распределения действующих в нетронутом массиве напряжений.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Statistical review of world energy – 2024 edition. UK, London : Energy Institute, 2023 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.energyinst.org/statistical-review> (дата обращения: 20.09.2024).
2. Агафонов И. А., Чечина О. С., Васильчиков А. В. [и др.] Перспективы угля в топливно-энергетическом комплексе России и мира // Московский экономический журнал. 2022. № 2. С. 366–382. DOI: 10.55186/2413046X_2022_7_2_99.
3. Мешков Г. Б., Петренко И. Е., Губанов Д. А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. 2024. Т. 1178. № 3. С. 18–29. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29.
4. Министерство угольной промышленности Кузбасса [Электронный ресурс]. URL: <http://murk42.ru/ru/> (дата обращения: 20.09.2024).
5. Рыльникова М. В. Условия и принципы устойчивого развития горнодобывающих предприятий в период повышенных рисков и глобальных вызовов // Горная Промышленность. 2022. № 3. С. 69–73. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-

3-69-73.

6. Ivanova S., Vesnina A., Fotina N. [и др.] An overview of carbon footprint of coal mining to curtail greenhouse gas emissions // Sustainability. 2022. V. 14. P. 15135. DOI: 10.3390/su142215135.

7. Karacan C., Ruiz F. A., Cote M. [и др.] Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction // International journal of coal geology. 2011. V. 86. № 2-3. Pp. 121–156. DOI: 10.1016/j.coal.2011.02.009.

8. UNECE – Best practice guidance for effective management of coal mine methane at national level: monitoring, reporting, verification and mitigation [Электронный ресурс]. URL: <https://unece.org/> (дата обращения: 20.09.2024).

9. Хмелева Г. А., Матерова Е. С., Курникова М. В. [и др.] Торговые отношения России и Азии в угольной промышленности // Уголь. 2025. Т. 1189. № 1. С. 64–68. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-64-68.

10. ITC – International Trade Centre [Электронный ресурс]. URL: <https://www.intracen.org/> (дата обращения: 20.09.2024).

11. Степанов Н. С. Направления экспорта угля в России: возможности сотрудничества с Китаем // Уголь. 2025. Т. 1189. № 2. С. 42–47. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-2-42-47.

12. Соловьева Ю. В., Черняев М. В. Обоснование экономической эффективности заблаговременного извлечения метана из угольных пластов // Экономические системы. 2022. Т. 15. № 1. С. 80–89. DOI: 10.29030/2309-2076-2022-15-1-80-89.

13. Гайворонский А. И., Горбунов М. В. Техничко-технологические решения проектов сжижения метана угольных пластов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. Т. 754. № 1. С. 63–75. DOI: 10.18698/0536-1044-2023-1-63-75.

14. Ahuja M., Mondal D., Mishra D. P. [и др.] Assessment of financial and environmental impacts of pre-mining methane drainage in Indian scenario: A case study using Jharia coal seams // Innovation and green development. 2023. V. 2. № 3. P. 100065. DOI: 10.1016/j.igd.2023.100065.

15. Thakur P. Gas and dust explosions. In: Advanced mine ventilation. Sawston: Woodhead Publishing, 2019. Pp. 377–398. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100457-9.00023-7>.

16. Исаченко А. А., Петрова Т. В. Закономерности проявления динамических событий и распределения локальных коллекторов метана в структурно неоднородном геомассиве при отработке угольных пластов с применением заблаговременной дегазации // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. Т. 151. № 3. С. 54–63. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-3-54-63.

17. Кузина Е. С. Экономические механизмы реализации заблаговременной дегазационной подготовки угольных месторождений России для повышения безопасности труда // Уголь. 2024. Т. 1176. № 1. С. 55–60. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-55-60.
18. Кузина Е.С., Мелехин Е.С. Экономическая эффективность процессов отработки высокогазоносных угольных пластов. Нижний Новгород : НИЦ «Открытое знание», 2020. 140 с.
19. Пазюченко М. А. Экономическая и экологическая эффективность добычи метана из угольных пластов // Экономические системы. 2023. Т. 16. № 2. С. 173181. DOI: 10.29030/2309-2076-2023-16-2-173-181.
20. Смирнова А. Д., Шевцов А.Г., Чэнь Ш. Анализ распределения проницаемости угольных пластов Южной части Тутуяской площади Кузбасса // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14. № 4. С. 657–665. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-657-665.
21. Шевцов А. Г., Хмяляйнен В. А. Геомеханическая оценка влияния трещины гидроразрыва на проницаемость угольного пласта в условиях Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2018. Т. 130. № 6. С. 15–19. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-6-15-19.
22. Шевцов А. Г., Попков А. С., Смирнова А. Д. Подготовка одномерных геомеханических моделей метаноугольных месторождений в условиях недостаточности исходных данных // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность. Материалы XI молодежной международной научно-практической конференции. Видное, п. Развилка: ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ», 2023. С. 11.
23. Шевцов А. Г. Определение физико-механических свойств угля по результатам исследований керна для решения задач геомеханики при добыче метана угольных пластов // Вести газовой науки. 2023. Т. 54. № 2. С. 55–58.
24. Li L., Zhang S., Li Z. [и др.] An experimental and numerical study of abrupt changes in coal permeability with gas flowing through fracture-pore structure // Energies. 2022. Vol. 15. № 21. P. 7842. DOI: 10.3390/en15217842.
25. Kumar H., Mishra M.K., Mishra S. Effect of permeability and geomechanical properties on coal matrix during CBM production – An overview // Journal of engineering science and technology review. 2018. V. 11. № 2. P. 160–173. DOI: 10.25103/jestr.112.22.
26. Hou X., Zhu Y., Wang Y. [и др.] Experimental study of the interplay between pore system and permeability using pore compressibility for high rank coal reservoirs // Fuel. 2019. V. 254. P. 115712. DOI: 10.3390/en15217842.
27. Zhu H., Zhang Y., Liao Q. [и др.] Molecular insight into the diffusion/flow potential properties initiated by methane adsorption in coal matrix: taking the factor of moisture contents into account // Environmental science and pollution research. 2022. V. 29. P. 36225–36242. DOI: 10.1007/s11356-022-18704-2.
28. Ge Z., Zhang H., Zhou Z. [и др.] Pore permeability model based on fractal geometry theory and effective stress // Journal of energy resources technology. 2023. V. 145. № 8. P. 081701. DOI: 10.1115/1.4056890.
29. Немов Н. А., Резник А. В., Карпов В. Н. О моделировании геомеханических процессов на месторождениях в условиях цифровой трансформации горнодобывающих предприятий // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 2. № 3. С. 332–341. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-3-332-341.
30. Dinoy E., Tampaty Y., Mabat I. [и др.] Analysis of the rock fracture on uniaxial compressive strength test // Journal of earth and marine technology. 2021. V. 2. № 1. P. 40–43. DOI: 10.31284/j.jemt.2021.v2i1.2170.
31. Cheng G., Deng B., Liu Y. [и др.] Experimental investigation on the feasibility and efficiency of shear-fracturing stimulation for enhancing coal seam permeability // Journal of natural gas science and engineering. 2020. V. 81. P. 103381. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103381.
32. Копытов А. И., Войтов М. Д., Тагиев С. М. О. Современные методы добычи метана из угольных пластов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. Т. 114. № 2. С. 35–41.
33. Zhang J., Liu G. Research on a coal seam modeling construction method based on improved kriging interpolation // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. № 1. P. 25631. DOI: 10.1038/s41598-024-77114-1.
34. Писаренко М. В., Рогова Т. Б., Шаклеин С. В. Определение границ доменов по результатам уравнивания геологоразведочной сети при геометризации угольных месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2021. № 2. С. 220–231.
35. Шурыгин Д. Н., Кошелев А. В., Клоков Д. С. [и др.] Математические методы выделения геологически однородных участков угольного месторождения // Вестник молодежной науки России. 2020. № 1. С. 11.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Смирнова Арина Дмитриевна, аспирант, ассистент кафедры маркшейдерского дела и геологии, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), исследователь по программе академического обмена в институте энергетики и горного дела, Шаньдунский университет науки и технологий (266590, КНР, г. Циндао, ул. Цяньванан, 579), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9985-0958>, e-mail: smirnovaad@kuzstu.ru

Михайлова Татьяна Викторовна, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой маркшейдерского дела и геологии, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7756-8225>, e-mail: mdg@kuzstu.ru

Попов Алексей Васильевич, начальник управления дегазации, ООО «Распадская угольная компания» (654006, Россия, г. Новокузнецк, пр. Курако, 33), e-mail: aleksey.popov@raspadskaya.ru

Заявленный вклад авторов:

Смирнова Арина Дмитриевна – концептуализация исследования и разработка методологии; постановка исследовательской задачи; обзор соответствующей литературы; сбор и анализ данных, формулирование выводов; написание основного объема статьи.

Михайлова Татьяна Викторовна – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; концептуализация исследования; написание и редакция статьи.

Попов Алексей Васильевич – постановка исследовательской задачи; рецензирование; консультирование; редакция статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

AN INTEGRATED APPROACH TO THE ASSESSMENT OF FRACTURING AND GAS PERMEABILITY OF COAL-BEARING ROCKS BASED ON THE ANALYSIS OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

Arina D. Smirnova^{1,2*}, Tatiana V. Mikhaylova¹
Aleksey V. Popov³

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

² Shandong University of Science and Technology

³ Raspadskaya PJSC

* for correspondence: smirnovaad@kuzstu.ru



Article info

Received:

12 May 2025

Accepted for publication:

22 June 2025

Accepted:

30 June 2025

Published:

28 August 2025

Keywords: Kuzbass, coalbed

Abstract.

Despite the global transition to renewable energy sources, coal continues to play a vital role in the energy balance of industrialized countries. In this context, the Russian coal and energy sector is facing the urgent challenge of shifting towards a technologically sophisticated, environmentally responsible, and resource-efficient model of deposits development. A strategic focus within this framework is the integrated development of coal deposits, including the co-extraction of coalbed methane. This approach requires reliable forecasting of zones with increased fracturing and gas permeability potential. The present study aims to develop a methodology for justifying the placement of pre-mining methane drainage wells in poorly explored, but methane-rich coal deposits. It emphasizes the importance of integrating available engineering-geological and geomechanical data with digital modeling techniques. The research investigates the spatial variability of physical and mechanical properties of coal-bearing rocks as a foundation for geomechanical modeling and identifying of priority zones for drilling. Core samples from structural wells drilled in the Tutuyasskaya area of Kuzbass were analyzed in laboratory settings. Values of bulk density and uniaxial

methane, pre-mining methane drainage, core, physical and mechanical properties, geomachanical zonation, digital modeling

compressive strength were determined for three lithotypes. A database was compiled containing lithological descriptions, sampling intervals, and physical and mechanical properties values. Applying Kriging interpolation method, two-dimensional grid-based maps of properties distribution were created, enabling geomachanical zonation. The spatial patterns of physical and mechanical properties variation revealed criteria for selecting the most optimal zones for drilling

For citation: Smirnova A.D., Mikhaylova T.V., Popov A.V. An integrated approach to the assessment of fracturing and gas permeability of coal-bearing rocks based on the analysis of physical and mechanical properties. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 4(170):71-83. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-71-83, EDN: QYZXKY

REFERENCES

1. Statistical review of world energy – 2024 edition. UK, London: Energy Institute; 2023. Available at: <https://www.energyinst.org/statistical-review> (date of reference: 20.09.2024).
2. Agafonov I.A., Chechina O.S., Vasilchikov A.V. [et al.] Prospects for coal in the fuel and energy complex of Russia and the world. *Moscow economic journal*. 2022; 2:366–382 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.55186/2413046X_2022_7_2_99.
3. Meshkov G.B., Petrenko I.E., Gubanov D.A. Russia's coal industry performance for 2023. *Ugol'*. 2024; 3(1178):18–29 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29.
4. Ministry of coal mining industry of Kuzbass. Available at: <http://mupk42.ru/ru/> (date of reference: 20.09.2024).
5. Rylnikova M.V. Conditions and principles for sustainable development of mining companies during a period of higher risks and global challenges. *Russian mining industry*. 2022; 3:69–73 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-69-73.
6. Ivanova S., Vesnina A., Fotina N. [et al.] An overview of carbon footprint of coal mining to curtail greenhouse gas emissions. *Sustainability*. 2022; 14:15135. DOI: 10.3390/su142215135.
7. Karacan C., Ruiz F.A., Cote M. [et al.] Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction. *International journal of coal geology*. 2011; 2–3(86):121–156. DOI: 10.1016/j.coal.2011.02.009.
8. UNECE – Best practice guidance for effective management of coal mine methane at national level: monitoring, reporting, verification and mitigation. Available at: <https://unece.org/> (date of reference: 20.09.2024).
9. Khmeleva G.A., Materova E.S., Kurnikova M.V. [et al.] Trade relations between the Russian Federation and Asia in the coal industry. *Ugol'*. 2025; (1):64–68 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-64-68.
10. ITC – International Trade Centre. Available at: <https://www.intracen.org/> (date of reference: 20.09.2024).
11. Stepanov N.S. Coal export destinations in Russia: opportunities for cooperation with China. *Ugol'*. 2025; (2):42–47 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-2-42-47.
12. Solovieva Y.V., Chernyaev M.V. Justification of the economic efficiency of early extraction of methane from coal seams. *Economic systems*. 2022; 15(1(56)):80–89 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.29030/2309-2076-2022-15-1-80-89.
13. Gaivoronsky A.I., Gorbunov M.V. Technical and technological solutions for the coal bed methane liquefaction projects. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroyeniye*. 2023; 1(754):63–75 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.18698/0536-1044-2023-1-63-75.
14. Ahuja M., Mondal D., Mishra D.P. [et al.] Assessment of financial and environmental impacts of pre-mining methane drainage in Indian scenario: A case study using Jharia coal seams. *Innovation and green development*. 2023; 3(2):100065. DOI: 10.1016/j.igd.2023.100065.
15. Thakur P. Gas and dust explosions. In: Advanced mine ventilation. Sawston: Woodhead Publishing; 2019. Pp. 377–398. DOI: 10.1016/B978-0-08-100457-9.00023-7.
16. Isachenko A.A., Petrova T.V. Regularities of the manifestation of dynamic events and the distribution of local methane reservoirs in a structurally heterogeneous rock mass during the development of coal seams with the use of early degassing. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2022; 3(151):54–63. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2022-3-54-63.
17. Kuzina E.S. Economic mechanisms for the implementation of early degassing preparation of coal deposits in Russia to improve labor safety. *Ugol'*. 2024; 1(1176):55–60 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-55-60.
18. Kuzina E.S., Melehin E.S. Economic efficiency of mining processes of highly gas-bearing coal seams monograph. Nizhny Novgorod: NIC “Otkrytoe znanie”; 2020. 140 p (In Russ.).
19. Pazyuchenko M.A. Economic and environmental efficiency of methane extraction from coal seams. *Economic systems*. 2023; 2(16):173–181 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.29030/2309-2076-2023-16-2-173-181.
20. Smirnova A.D., Shevtsov A.G., Chen S. Analysis of factors affecting the coal seams distribution permeability in the southern part of the Tutuyasskaya Area of the Kuznetsk Basin, Russia. *Sustainable development of mountain territories*. 2022; 4(14):657–665 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-657-665.
21. Shevtsov A.G., Khyamyalyaynen V.A. Geomechanical estimation of hydraulic fracture's influence on permeability of coal seam in conditions of Kuzbass. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2018; 6(130):15–19 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2018-6-15-19

22. Shevtsov A.G., Popkov A.S., Smirnova A.D. Podgotovka odnomernykh geomekhanicheskikh modelej metanougol'nykh mestorozhdenij v usloviyah nedostatochnosti iskhodnykh dannykh. *XI molodezhnaya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Novye tekhnologii v gazovoj otrasli: opyt i pre-emstvennost"*. Vidnoe, Razvilka: OOO "Nauchno-issledovatel'skij institut prirodnih gazov i gazovykh tekhnologii – Gazprom VNIIGAZ"; 2023. 11 (In Russ.).

23. Shevtsov A.G. Determination of the physical and mechanical properties of coal based on the results of core analyses for solving geomechanics problems in coalbed methane production. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2023; 2(54):55–58 (In Russ., abstract in Eng.).

24. Li L., Zhang S., Li Z. [et al.] An experimental and numerical study of abrupt changes in coal permeability with gas flowing through fracture-pore structure. *Energies*. 2022; 21(15):7842. DOI: 10.3390/en15217842.

25. Kumar H., Mishra M.K., Mishra S. Effect of permeability and geomechanical properties on coal matrix during CBM production – An overview. *Journal of engineering science and technology review*. 2018; 2(11):160–173. DOI: 10.25103/jestr.112.22.

26. Hou X., Zhu Y., Wang Y. [et al.] Experimental study of the interplay between pore system and permeability using pore compressibility for high rank coal reservoirs. *Fuel*. 2019; 254:115712. DOI: 10.3390/en15217842.

27. Zhu H., Zhang Y., Liao Q. [et al.] Molecular insight into the diffusion/flow potential properties initiated by methane adsorption in coal matrix: taking the factor of moisture contents into account. *Environmental science and pollution research*. 2022; 29:36225–36242. DOI: 10.1007/s11356-022-18704-2.

28. Ge Z., Zhang H., Zhou Z. [et al.] Pore permeability model based on fractal geometry theory and

effective stress. *Journal of energy resources technology*. 2023; 8(145):081701. DOI: 10.1115/1.4056890.

29. Nemova N.A., Reznik A.V., Karpov V.N. Modeling of geomechanical processes in the fields in the conditions of digital transformation of mining enterprises. *Interexpo GEO-Siberia*. 2021; 3(2):332–341 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-3-332-341.

30. Dinoy E., Tampaty Y., Mabuati I. [et al.] Analysis of the rock fracture on uniaxial compressive strength test. *Journal of earth and marine technology*. 2021; 1(2):40–43. DOI: 10.31284/j.jemt.2021.v2i1.2170.

31. Cheng G., Deng B., Liu Y. [et al.] Experimental investigation on the feasibility and efficiency of shear-fracturing stimulation for enhancing coal seam permeability. *Journal of natural gas science and engineering*. 2020; 81:103381. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103381.

32. Kopytov A.I., Vojtov M.D., Tagiev S.M.O. Modern methods of methane production from coal beds. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016; 2(114):35–41 (Russ., abstract in Eng.).

33. Zhang J., Liu G. Research on a coal seam modeling construction method based on improved Kriging interpolation. *Scientific reports*. 2024; 1(14):25631. DOI: 10.1038/s41598-024-77114-1.

34. Pisarenko M.V., Rogova T.B., Shaklein S.V. Determination of domain boundaries by results of adjustment of the exploration grids in geometrization of coal deposits. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*. 2021; 2:220–231 (In Russ., abstract in Eng.).

35. Shurygin D.N., Koshelev A.V., Klovov D.S. [et al.] Mathematical methods for identifying geological homogeneous sections of a coal field. *Vestnik molodyozhnoj nauki Rossii*. 2020; 1:11 (Russ., abstract in Eng.).

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Arina D. Smirnova, Postgraduate Student, Assistant of Mine Surveying and Geology Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennyya St., 28), Academic Exchange Researcher at College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology (266590, P.R. China, Qingdao, Qianwangang St., 579), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9985-0958>, e-mail: smirnovaad@kuzstu.ru

Tatiana V. Mikhaylova, Candidate of Engineering Sciences, Associate professor, Head of Mine Surveying and Geology Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennyya St., 28), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7756-8225>, e-mail: mdg@kuzstu.ru

Aleksey V. Popov, Head of Mine Methane Drainage Department, Raspadskaya PJSC (654006, Russia, Novokuznetsk, Kurako St., 33), e-mail: aleksey.popov@raspadskaya.ru

Contribution of the authors:

Arina D. Smirnova – research conceptualization and methodology; relevance and objectives formulation; relevant literature review; initial data collection; data analysis; summarizing; article writing and drafting.

Tatiana V. Mikhaylova – research problem statement; scientific management; research conceptualization; consulting; article writing and editing.

Aleksey V. Popov – research problem statement; reviewing; consulting; article editing and refining

All authors have read and approved the final manuscript.

