НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.333:622.817.4
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-130-135

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 622.333:622.817.4

Связь содержания железа и серы с газоносностью и неоднородностью микроструктуры углей

И. Н. Горшенков✉, Б. Н. Пашичев, Е. В. Ульянова
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени Н. В. Мельникова»
Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация
✉ *gorshenkov.in@mail.ru*

Резюме. Безопасность подземной разработки метаноносных угольных пластов во многом определяется газокинетическим состоянием массива. При этом исследования показывают, что метаноносность и интенсивность выделения метана могут существенно различаться в пределах одного угольного пласта даже при сходных геологических условиях его формирования. Это свидетельствует о необходимости учитывать свойства угольного вещества, связанные с его газоносностью, способностью к удерживанию и естественной отдачей метана. Целью исследования является выявление связи содержания железа (*Fe*), серы (*S*) и пирита (FeS_2), а также относительного баланса железо- и серосодержащих компонентов (*Fe/S*) с составляющими общей газоносности и микроструктурной организацией угля. Содержание *Fe* и *S* определялось методом рентгенофлуоресцентного анализа. Составляющие общей газоносности Q_1, Q_2, Q_3 и $Q\Sigma$ определялись по методике, разработанной ИПКОН РАН, а средние значения информационной энтропии H и статистической сложности C рассчитывались по сериям СЭМ-изображений. Выявлены положительные связи содержания железа, серы и пирита с Q_1, Q_2, Q_3 и общей газоносностью $Q\Sigma$. При увеличении *Fe/S* средняя энтропия уменьшается, а средняя статистическая сложность возрастает; направление связей сохраняется при последовательном исключении отдельных наблюдений. Полученные зависимости могут применяться при сравнении участков пласта для контроля метановыделения, обоснования вентиляционных и дегазационных мероприятий. Результаты согласуются с гипотезой о возможном участии железосодержащих минералов в формировании метана, однако не доказывают конкретный механизм его образования.

Ключевые слова: угольный пласт, метаноносность, газоотдача, железо, сера, пирит, рентгенофлуоресцентный анализ, микроструктура угля, информационная энтропия, статистическая сложность

Для цитирования: Горшенков И.Н., Пашичев Б.Н., Ульянова Е.В. Связь содержания железа и серы с газоносностью и неоднородностью микроструктуры углей. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 130-135. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-130-135.

Relationships of iron and sulfur content with gas content and heterogeneity of microstructure of coals

I. N. Gorshenkov✉, B. N. Pashichev, E. V. Ulyanova
Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ *gorshenkov.in@mail.ru*

Abstract. The safety of underground mining of methane-bearing coal seams is largely determined by the gas-kinetic state of the rock mass. Studies show that methane content and methane-emission intensity may vary substantially within the same coal seam even under similar geological conditions of its formation. This indicates the need to consider the properties of coal associated with its gas content, its ability to retain methane, and the natural release of methane. The aim of the study is to identify the relationships of the contents of iron (*Fe*), sulfur (*S*), and pyrite (FeS_2), as well as the relative balance of iron- and sulfur-bearing components (*Fe/S*), with the components of total gas content and the microstructural organization of coal. The contents of Fe and S were determined by X-ray fluorescence analysis. The components of total gas content Q_1, Q_2, Q_3, and $Q\Sigma$ were determined using the method developed at ICEMR RAS, while the mean values of information entropy H and statistical complexity C were calculated from series of SEM images. Positive relationships were found between the contents of iron, sulfur, and pyrite and Q_1, Q_2, Q_3, and total gas content $Q\Sigma$. As Fe/S

© Горшенков И. Н., Пашичев Б. Н., Ульянова Е. В., 2026

increased, mean entropy decreased and mean statistical complexity increased; the directions of the relationships remained unchanged when individual observations were sequentially excluded. The relationships obtained may be used when comparing different sections of a coal seam to control methane emissions and substantiate ventilation and degassing measures. The results are consistent with the hypothesis that iron-bearing minerals may participate in methane formation but do not prove a specific mechanism of its formation.

Keywords: coal seam, methane content, gas emission, iron, sulfur, pyrite, X-ray fluorescence a nalysis, c oal microstructure, information entropy, statistical complexity

For citation: Gorshenkov I.N., Pashichev B.N., Ulyanova E.V. Relationships of iron and sulfur content with gas content and heterogeneity of microstructure of coals. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 130-135. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-130-135.

Введение

Метан является одним из основных факторов риска при подземной добыче угля. Его количество и характер выделения определяют требования к газовому контролю, режимам проветривания и дегазации, а также влияют на характер локального накопления метана и образования взрывоопасных метанопылевоздушных смесей. Действующие методы прямого определения газоносности дают необходимую количественную оценку содержания газа, однако одинаковая общая газоносность может соответствовать угольным пластам с различными свойствами в отношении удерживания и отдаче метана [1–3, 13]. Поэтому для интерпретации газового состояния пласта важно учитывать не только общую газоносность, но и микроструктурные особенности и минеральные составляющие угля.

Железо и сера присутствуют в углях в различных минеральных и органических формах. Одним из распространенных железосодержащих минералов является пирит FeS_2, однако железо может входить также в другие минеральные и органоминеральные компоненты [14].

Рентгенофлуоресцентный анализ определяет содержащиеся элементы, но не позволяет идентифицировать составляемые ими минеральные формы. По этой причине железо, сера, пирит и отношение *Fe/S* отражают разную информацию [4, 5, 8, 14].

В зарубежных исследованиях экспериментально проверена гипотеза о том, что одним из механизмов образования метана в угольных пластах может быть гидрирование CO_2 на восстановленном железосодержащем катализаторе при температурах, сопоставимых с условиями катагенеза. В контрольных опытах без восстановленного катализатора метан не обнаруживался [6]. В другом зарубежном исследовании рассмотрено влияние соединений железа на перестройку углеродной матрицы и образование метана [7]. Молекулярное моделирование также показывает, что сопутствующие минералы способны изменять адсорбцию метана и механические свойства угольной матрицы [15]. Эти работы обосновывают проверяемую гипотезу о возможном участии железосодержащих минералов в каталитических процессах и взаимодействии угля с метаном.

В отечественных работах изучены различия в содержании железа и серы в углях из выбросов и неопасных зон, а также показано, что соотношение железа и серы относительно стехиометрии пирита связано с газодинамическими свойствами [4]. Также была установлена связь содержания пирита, оцененного по данным элементного анализа, с газонасыщенностью призабойной зоны [5]. Отличие настоящей работы состоит в том, что определялась связь железо- и серосодержащих компонентов с газоносностью и с неоднородностью микроструктуры.

Целью работы является установление связи содержания железа, серы, пирита и отношения *Fe/S* с составляющими общей газоносности и параметрами микроструктурной неоднородности, а также обоснование возможности использования этих показателей при характеристике газоносности, удерживания метана и микроструктурного состояния угля.

Научная новизна исследования состоит в установлении связи отношения *Fe/S* с количественными параметрами неоднородности микроструктуры, что позволило сопоставить относительный баланс железо- и серосодержащих минеральных составляющих с микроструктурным состоянием угольного вещества и составляющими общей газоносности.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования являлись угольные пробы, отобранные на шахтах имени А. Д. Рубана, «7 Ноября-Новая», «Талдинская-Западная-1», имени С. М. Кирова, имени В. Д. Ялевского и «Комсомолец» Кузнецкого угольного бассейна. В выборку вошли пробы пластов Полысаевского, Сычевского, Болдыревского, Поленовского, Толмачевского, а также пластов 50, 52, 66 и 69.

Составляющие общей газоносности определялись по методике, разработанной ИПКОН РАН [1]. Q_1 характеризует количество метана, естественно выделившегося в первые минуты преимущественно из трещин и открытых макропор. Q_2 характеризует количество метана, продолжающего естественно выделяться из внутренних участков угольного вещества за счет фильтрационно-диффузионных процессов. Q_3 – количество метана, высвобождаемое после механического разрушения пробы и характеризующее удерживаемую составляющую общей газоносности. Общая газоносность рассчитывалась как $Q\Sigma = Q_1 + Q_2 + Q_3$. где Q_1 и Q_2 рассматривались как газокинетические показатели естественной газоотдачи, при этом Q_2 в большей степени связан с переносом газа изнутри неоднородной микроструктуры [1–3].

Определение содержания железа и серы выполнялось методом рентгенофлуоресцентного анализа на анализаторе ЭКРОС XRF-9710 PEARL. Перед прессованием уголь измельчался до порошкообразного состояния и тщательно перемешивался. В пресс-форме предварительно формировалась таблетка-подложка из сухой борной кислоты диаметром 20 мм с центральным цилиндрическим углублением. В сформированное углубление помещалась навеска подготовленного угольного порошка, после чего проба совместно с подложкой прессовалась при давлении 2,5–3 МПа. Борная кислота использовалась в качестве подложки, обеспечивающей механическую целостность прессованной пробы и не содержащей определяемых элементов *Fe* и *S*. Диапазон давления 2,5–3 МПа был выбран экспериментально по результатам предварительной подготовки проб, так как при меньшем

давлении таблетка оставалась недостаточно прочной и легко разрушалась, тогда как при превышении указанного диапазона наблюдались растрескивание и разрушение сформированной пробы. Количественное определение выполнялось по градуировочным зависимостям «интенсивность–концентрация», построенным по эталонным смесям с известными массовыми долями *Fe* и *S* [8].

Поскольку РФА не определяет минеральные формы, содержание пирита оценивалось стехиометрически по сере. Массовая доля серы в FeS_2 составляет 0,534, поэтому использовалось выражение:

$$FeS_2 = S / 0{,}534 \approx 1{,}87 \cdot S.$$

Расчет выполнялся по *S*, поскольку во всех исследованных образцах фактическое содержание *Fe* превышало количество железа, стехиометрически необходимое для связывания измеренной серы в FeS_2. Таким образом, сера являлась ограничивающим элементом.

Отношение *Fe/S* рассчитывалось по измеренным массовым долям элементов и рассматривалось как показатель относительного баланса железосодержащих и серосодержащих компонентов угля. Для чистого пирита стехиометрическое массовое отношение *Fe/S* равно 0,871, однако это значение использовалось только как ориентир. Показатель *Fe/S* не определяет количество пирита, но позволяет сравнивать образцы по относительному балансу железосодержащих и серосодержащих минеральных составляющих и отделять вариации этого баланса от изменений абсолютного содержания *Fe* и *S*.

Микроструктуру изучали по сериям цифровых изображений естественной поверхности угля. Снимки получали на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV с 1000-кратным увеличением при одинаковых условиях съёмки. Количественная обработка СЭМ-изображений применяется для описания структурной неоднородности угля, и позволяет выявлять связь неоднородности с адсорбцией метана [16, 17]. Изображения обрабатывались по алгоритму с применением библиотек Python и PyShearlets. Информационная энтропия *H* отражает неоднородность распределения структурных признаков на цифровом изображении: ее увеличение соответствует более неупорядоченной организации изображения. Статистическая сложность *C* учитывает внутреннее разнообразие таких признаков, посредством оценки отличия их распределения от равновероятного состояния, характеризуя организованность структуры между абсолютным порядком и предельным хаосом [9–12]. Для каждого образца использовались средние H^- и C^- по серии изображений.

Связи оценивались коэффициентами Пирсона *r* и Спирмена *ρ*. Коэффициент Пирсона характеризует направление и силу линейной связи, коэффициент Спирмена – направление и силу монотонной ранговой связи. При $p < 0{,}050$ связь рассматривалась как статистически значимая на принятом уровне значимости. Устойчивость связей *Fe/S* с H^- и C^- проверялась последовательным исключением каждого отдельного образца.

Результаты исследований

Характеристики содержания *Fe*, *S*, FeS_2 и отношения *Fe/S* представлены в таблице 1.

Содержание *Fe* изменяется от 0,57 до 2,60 %, S – от 0,25 до 0,62 %. Содержание пирита, оцененное по сере, составляет 0,47-1,16 %. Изменение *Fe* не повторяет изменение *S*, что подтверждает необходимость раздельного исследования обоих экспериментально определяемых элементов. Отношение *Fe/S* изменяется от 1,32 до 6,66 и во всех образцах превышает стехиометрическое значение для FeS_2.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики содержания *Fe*, *S*, FeS_2 и отношения *Fe/S* / Characteristics of *Fe*, *S* and FeS_2 contents and *Fe/S* ratio

Показатель	Минимум	Максимум	Среднее	Медиана	Коэффициент вариации, %
Fe, %	0,57	2,60	1,65	1,78	34,6
S, %	0,25	0,62	0,43	0,43	27,0
FeS_2, %	0,47	1,16	0,80	0,80	27,0
Fe/S	1,32	6,66	4,02	3,97	35,3

Связь *Fe* и *S* с составляющими общей газоносности

На рисунке 1 отражено визуальное распределение исследованных проб угля на плоскости «содержание элемента – общая газоносность». В таблице 2 представлены результаты расчетов корреляционных коэффициентов.

Для железа установлена положительная связь с общей газоносностью: $r = +0{,}428$ при $p = 0{,}033$ и $\rho = +0{,}482$ при $p = 0{,}015$. Связь Fe с Q_3 также положительна: $r = +0{,}439$ при $p = 0{,}028$ и $\rho = +0{,}481$ при $p = 0{,}015$. Для Fe и Q_1 получено $\rho = +0{,}589$ при $p = 0{,}002$, а для Fe и Q_2 – $\rho = +0{,}429$ при $p = 0{,}033$.

Для серы установлена положительная связь с общей газоносностью: $r = +0{,}587$ при $p = 0{,}002$ и $\rho = +0{,}571$ при $p = 0{,}003$. Положительные связи установлены также для $S–Q_1$ ($r = +0{,}430$; $p = 0{,}032$; $\rho = +0{,}552$; $p = 0{,}004$), $S–Q_2$ ($r = +0{,}465$; $p = 0{,}019$; $\rho = +0{,}559$; $p = 0{,}004$) и $S–Q_3$ ($r = +0{,}554$; $p = 0{,}004$; $\rho = +0{,}571$; $p = 0{,}003$).

Поскольку оценка FeS_2 является линейным преобразованием *S*, её связь с составляющими общей газоносности имеет то же направление.

Таблица 2 / Table 2

Связь показателей содержания минеральных составляющих с составляющими общей газоносности и параметрами микроструктуры / Relationships of mineral constituent parameters with components of total gas content and microstructural characteristics

Отношение	*r* Пирсона	*p*	*p* Спирмена	*p*
$Fe – Q_1$	+0,211	0,311	+0,589	0,002
$Fe – Q_2$	+0,248	0,232	+0,429	0,033
$Fe – Q_3$	+0,439	0,028	+0,481	0,015
$Fe – Q\Sigma$	+0,428	0,033	+0,482	0,015
$S – Q_1$	+0,430	0,032	+0,552	0,004
$S – Q_2$	+0,465	0,019	+0,559	0,004
$S – Q_3$	+0,554	0,004	+0,571	0,003
$S – Q\Sigma$	+0,587	0,002	+0,571	0,003
$FeS_2 – Q_1$	+0,430	0,032	+0,552	0,004
$FeS_2 – Q_2$	+0,465	0,019	+0,559	0,004
$FeS_2 – Q_3$	+0,554	0,004	+0,571	0,003
$FeS_2 – Q\Sigma$	+0,587	0,002	+0,571	0,003
$Fe/S – H^-$	–0,580	0,002	–0,458	0,019
$Fe/S – C^-$	+0,546	0,004	+0,448	0,022

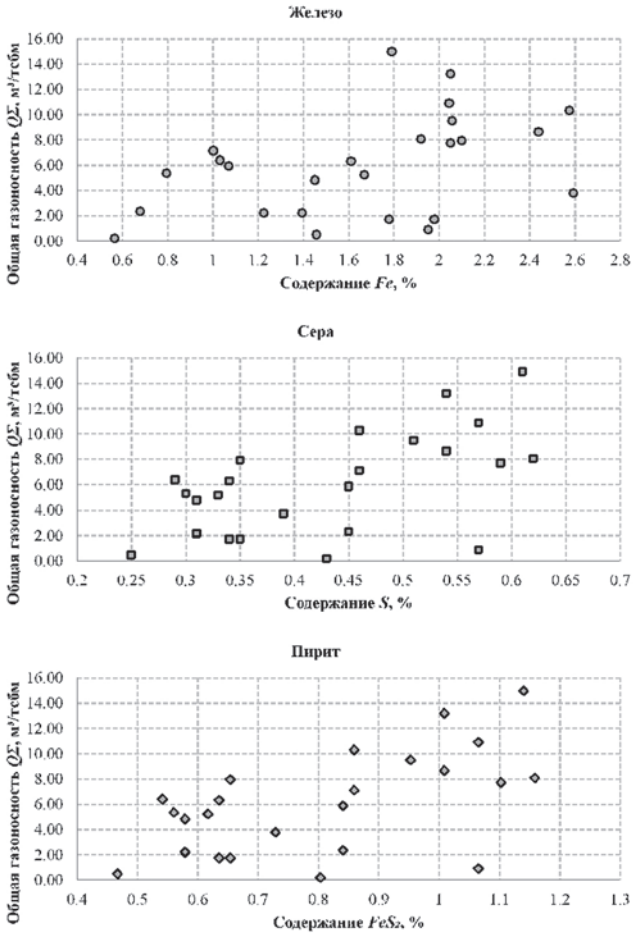


Рис. 1. **Связь содержания железа, серы и пирита с общей газоносностью /**
Fig. 1. **Relationship of iron, sulfur, and pyrite content to total gas content**

Связь *Fe/S* с неоднородностью микроструктуры

Анализ связи изменения отношения *Fe/S*, как количественной характеристики относительного баланса железосодержащих и серосодержащих компонентов и распределения значений *H* и *C*, как количественных характеристик структурной неоднородности, показал следующее: с увеличением *Fe/S* средняя энтропия H^- уменьшается, а средняя статистическая сложность C^- возрастает. При последовательном исключении каждого отдельного наблюдения коэффициент Пирсона для *Fe/S–H* оставался отрицательным и изменялся от −0,629 до −0,492, а для *Fe/S–C* оставался положительным и изменялся от +0,450 до +0,618; ранговые коэффициенты также сохраняли направление. Результат показывает, что изменение относительного баланса железосодержащих и серосодержащих компонентов сопровождается изменением организации микроструктуры угля.

Обсуждение результатов

В результате исследования установлены две группы взаимосвязей. Первая – между содержанием *Fe* и *S*, а также расчётным содержанием FeS_2, с одной стороны, и составляющими общей газоносности Q_1, Q_2, Q_3 и $Q\Sigma$ с другой. Вторая – между отношением *Fe/S* и параметрами микроструктурной неоднородности H^- и C^-. Эти группы взаимосвязей отражают разные аспекты состояния угля. В первой группе увеличение содержания *S* и расчетного содержания пирита, оцененного по *S*, сопровождается увеличением $Q\Sigma$, а для *Fe* выявлены положительные связи с отдельными составляющими общей газоносности. Вторая группа характеризует связь относительного баланса железо- и серосодержащих компонентов с микроструктурным состоянием угольного вещества, поскольку *Fe/S* связан с H^- и C^-.

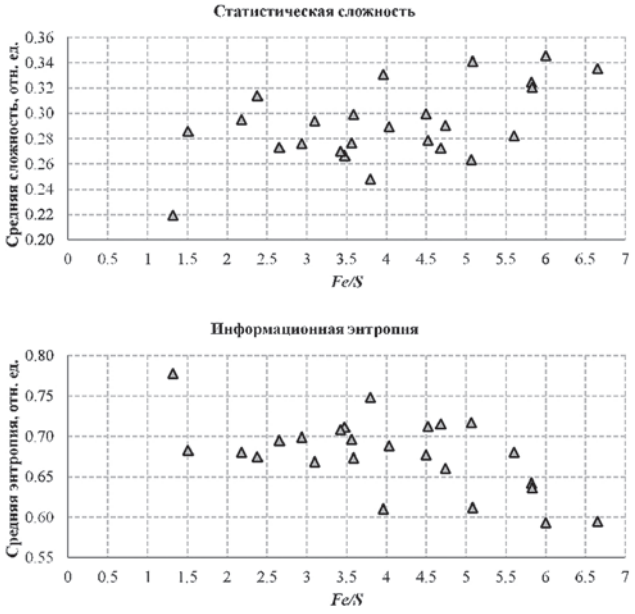


Рис. 2. **Связь отношения *Fe/S* со средней информационной энтропией H^- и средней статистической сложностью C^- /**
Fig. 2. **Relationship between the *Fe/S* ratio, average information entropy H^-, and average statistical complexity C^-**

Полученные результаты согласуются с предшествующими данными о связи железа и пирита со способностью угля к удержанию метана и газонасыщенностью угля [5], с экспериментально показанной возможностью образования метана в присутствии железосодержащих катализаторов [6, 7] и с данными о влиянии сопутствующих минералов на адсорбцию метана [15]. Поэтому содержание *Fe*, *S* и оцененное содержание пирита целесообразно рассматривать как показатели минеральных составляющих, связанных с газоносностью угля и удерживанием метана.

Связь *Fe* с Q_3 представляет отдельный интерес. Q_3 высвобождается после механического разрушения пробы и характеризует метан, удерживаемый в угольном веществе до разрушения. Положительная ранговая связь *Fe* с Q_3 указывает на согласованное изменение этих показателей. Для выяснения природы этой связи необходимы прямое определение минеральных фаз и исследование распределения железосодержащих включений относительно порово-трещинной структуры.

Энтропия и сложность описывают разные стороны организации изображения угольной поверхности: энтропия характеризует неупорядоченность распределения признаков, а сложность – степень их внутренней неоднородности. Совместное изменение обеих величин означает смещение микроструктурного состояния. Такая интерпретация согласуется с исследованиями, в которых цифровые характеристики СЭМ-изображений и показатели неоднородности микропор рассматриваются как взаимодополняющие характеристики угольной структуры [16, 17].

Современные зарубежные исследования дополнительно показывают, что характеристики микроструктуры угля тесно связаны с процессами сорбции и десорбции метана. Установлено, что адсорбционно-десорбционные процессы могут

сопровождаться изменением микропоровой и микрокристаллической структуры угля и формированием гистерезиса десорбции [18], а механизм адсорбции CH_4 определяется развитием порового пространства и условиями сорбции [19]. Изменение молекулярной и поровой структуры также сопровождается изменением метаноадсорбционной способности угля [20]. Эти данные подтверждают целесообразность совместного рассмотрения микроструктурных характеристик, показателей общей газоносности, удерживания и отдачи метана.

Практическое значение

Для проб из разных участков пласта определяют *Fe* и *S*, оценивают содержание пирита по *S* и рассчитывают *Fe/S*. Содержание *Fe*, *S* и пирита сопоставляют с $Q\Sigma$ и Q_3, а *Fe/S* – с H и C. Такое сопоставление позволяет различать участки по содержанию и относительному балансу минеральных составляющих, связанным с общей газоносностью и удерживанием метана, а также по микроструктурному состоянию.

На шахте исследование может выполняться последовательно: отбор проб по длине выработки или лавы; прямое определение Q_1, Q_2, Q_3 и $Q\Sigma$ по методике ИПКОН РАН; рентгенофлуоресцентный анализ *Fe* и *S*; оценка содержания пирита по *S* и расчёт *Fe/S*; расчёт средних H и C по сериям СЭМ-изображений; сравнение участков и формирование локальной базы конкретного пласта.

Результаты предназначены для выделения участков, требующих более детального контроля метановыделения, и для обоснования вентиляционных и дегазационных мероприятий, направленных на снижение вероятности локального скопления метана в выработках и образования взрывоопасных метанопылевоздушных смесей [21, 22].

Заключение

Методом рентгенофлуоресцентного анализа определено содержание железа и серы. По сере оценено содержание пирита. Содержание железа и серы изменяется несинхронно. Расчет содержания пирита позволил охарактеризовать минеральную составляющую угля.

Содержание железа, серы и пирита связано с показателями естественной газоотдачи Q_1 и Q_2, удерживаемой составляющей Q_3 и общей газоносностью $Q\Sigma$. Результаты характеризуют связь минеральных составляющих угля с естественной газоотдачей, удерживаемой составляющей общей газоносности и общей газоносностью угля.

Отношение *Fe/S* характеризует относительный баланс железосодержащих и серосодержащих компонентов. При увеличении *Fe/S* средняя энтропия H уменьшается, а средняя статистическая сложность C возрастает; направление связей устойчиво к исключению отдельных образцов.

Совместное рассмотрение минеральных составляющих угля, составляющих его общей газоносности и микроструктурных показателей позволяет сравнивать участки пласта по общей газоносности, способности удерживать и естественно отдавать метан и использовать результаты для контроля метановыделения, обоснования вентиляционных и дегазационных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. ГОСТ Р 70830–2023 (ИСО 18871: 2015). Горное дело. Метод определения содержания метана в угольных пластах. Москва: Российский институт стандартизации; 2023. GOST R 70830–2023 (ISO 18871: 2015). Mining. Method for determining methane content in coal seams. Moscow: Russian Institute for Standardization; 2023. (In Russ.).
2. Горшенков И.Н. Оценка газодинамической опасности угольных пластов в зависимости от неоднородности микроструктуры угля. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 50-55. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-50-55. Gorshenkov I.N. Assessment of gas-dynamic hazard of coal seams depending on coal microstructure heterogeneity. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 50-55. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-50-55.
3. Ульянова Е.В., Малинникова О.Н., Федоров Е.В., Горшенков И.Н., Пашичев Б.Н. Кинетика газовыделения метана из угля различной микроструктурной неоднородности. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2025; (6): 36-43. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20250604. Ulyanova E.V., Malinnikova O.N., Fedorov E.V., Gorshenkov I.N., Pashichev B.N. Kinetics of methane emission from coal of different microstructural nonuniformity. *Journal of Mining Science*. 2025; 61 (6): 893-899. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20250604.
4. Ульянова Е.В., Малинникова О.Н., Пашичев Б.Н., Долгова М.О. Связь включений железа и серы в ископаемых углях с их склонностью к газодинамическим явлениям. *Химия твердого топлива*. 2020; (2): 50–54. https://doi.org/10.31857/S0023117720020115. Ulyanova E.V., Malinnikova O.N., Pashichev B.N., Dolgova M.O. Relationship of iron and sulfur inclusions in fossil coals with their tendency to gas-dynamic phenomena. *Solid Fuel Chemistry*. 2020; (2): 50–54. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S0023117720020115.
5. Захаров В.Н., Ульянова Е.В., Малинникова О.Н. Вклад минеральных включений в накопление и удержание метана в угольных пластах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023; (5): 3–11. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230501. Zakharov V.N., Ulyanova E.V., Malinnikova O.N. Contribution of mineral impurities to coalbed methane accumulation and retention. *Journal of Mining Science*. 2023; 59 (5): 705-712. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230501.
6. Medina J.C., Butala S.J., Bartholomew C.H., Lee M.L. Iron-catalyzed CO_2 hydrogenation as a mechanism for coalbed gas formation. *Fuel.* 2000; 79 (1): 89-93. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00131-3.
7. Skoblik A.P., Shanina B.D., Kolesnik V.N., Konchits A.A., Gavriljuk V.G. A modeling for effect of iron compounds on methane formation in the coal. *Fuel.* 2012; 98: 124-130. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.080.
8. Ревенко А.Г., Пашкова Г.В. Применение рентгенофлуоресцентного метода анализа для исследования состава угля и золы. *Аналитика*. 2022; 12 (6): 410-419. https://doi.org/10.22184/2227-572X.2022.12.6.410.419. Revenko A.G., Pashkova G.V. Application of X-ray fluorescence analysis for studying the composition of coal and ash. *Analytics*. 2022; 12 (6): 410-419. (In Russ.). https://doi.org/10.22184/2227-572X.2022.12.6.410.419.
9. Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*. 1948; 27: 379-423, 623-656.
10. Lopez-Ruiz R., Mancini H.L., Calbet X. A statistical measure of complexity. *Physics Letters A*. 1995; 209 (5-6): 321-326.
11. Brazhe A.R. Shearlet-based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns. *Physical Review E.* 2018; 97 (6): 061301. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.061301.
12. Ribeiro H.V., Zunino L., Lenzi E.K., Santoro P.A., Mendes R.S. Complexity-entropy causality plane as a complexity measure for two-dimensional patterns. *PLoS ONE*. 2012; 7 (8): e40689. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040689.

13. Moore T.A. Coalbed methane: A review. *International Journal of Coal Geology*. 2012; 101: 36-81. https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.05.011.
14. Коровушкин В.В., Эпштейн С.А., Дуров Н.М., Добрякова Н.Н. Минеральные и валентные формы железа и их влияние на окисление и самовозгорание углей. *Горный журнал*. 2015; (11): 66-70. https://doi.org/10.17580/gzh.2015.11.14.
Korovushkin V.V., Epshtein S.A., Durov N.M., Dobryakova N.N. Mineral and valence forms of iron and their influence on coal oxidation and spontaneous combustion. *Gornyi Zhurnal*. 2015; (11): 66-70. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/gzh.2015.11.14.
15. Zhang X., Liu Y., Zhou T., Cai Y., Zhang B. Molecular simulation study on the effect of co-associated minerals on methane adsorption and mechanical properties of coal. *Applied Sciences*. 2023; 13 (24): 12975. https://doi.org/10.3390/app132412975.
16. Zou G., She J., Peng S., Yin Q., Liu H., Che Y. Two-dimensional SEM image-based analysis of coal porosity and its pore structure. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2020; 7: 350-361. https://doi.org/10.1007/s40789-020-00301-8.
17. Fang J., Li Q., Yin T., Cai Y. Investigation on the nanopore heterogeneity in coals and its influence on methane adsorption: A multifractal theory study. *ACS Omega*. 2024; 9 (17): 19504-19516. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01040.
18. Wang Z., Li Z., Zhang S., Zhang X. Microstructure changes induced by adsorption/desorption of low rank coals and its desorption hysteresis mechanism. *Fuel*. 2024; 357: 129804. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129804.
19. Liu H., Liu J., Gao D., Fan Z., Xu H., Ding H., Fang H., Zhang K. New insight into CH_4 adsorption mechanism in coal based on modeling analysis of different adsorption theories. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024; 12 (4): 113174. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113174.
20. Yang W., Wang Y., Yan F., Si G., Lin B. Evolution characteristics of coal microstructure and its influence on methane adsorption capacity under high temperature pyrolysis. *Energy*. 2022; 254: 124262. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124262.
21. Забурдяев В.С. Выделение метана из отбитого в очистном забое угля. *Безопасность труда в промышленности*. 2019; (11): 13-17. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-11-13-17.
Zaburdiaev V.S. Methane release from broken coal in a mining face. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2019; (11): 13-17. (In Russ.). https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-11-13-17.
22. Малашкина В.А. Направления снижения эмиссии шахтного метана в атмосферу. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021; (10-1): 137-145. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_101_0_137.
Malashkina V.A. Trends toward reduction of mine methane emission in atmosphere. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021; (10-1): 137-145. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_101_0_137.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Иван Николаевич Горшенков –
аспирант, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация; e-mail: gorshenkov.in@mail.ru; SPIN-код: 8372-8732

Борис Николаевич Пашичев –
научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация;
e-mail: borisnik-pa@yandex.ru; SPIN-код: 9007-1431

Екатерина Васильевна Ульянова –
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация;
e-mail: ekaterina-ulyanova@yandex.ru;
SPIN-код: 4126-3612

Критерии авторства:
Авторы заявляют о равном вкладе в работу.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 24.09.2026
Поступила после рецензирования: 30.09.2026
Принята к публикации: 07.10.2026

ABOUT THE AUTHORS

Ivan N. Gorshenkov –
Postgraduate Student, Academician N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russian Federation; e-mail: gorshenkov.in@mail.ru; SPIN-code: 8372-8732

Boris N. Pashichev –
Researcher, Academician N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russian Federation;
e-mail: borisnik-pa@yandex.ru; SPIN-code: 9007-1431

Ekaterina V. Ulyanova –
Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Academician N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russian Federation;
e-mail: ekaterina-ulyanova@yandex.ru;
SPIN-code: 4126-3612

Contribution:
The authors declare the equal contribution to the work in the article.

Conflicts of Interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 24.09.2026
Revised: 30.09.2026
Accepted: 07.10.2026