

Оценка газодинамической опасности угольных пластов в зависимости от неоднородности микроструктуры угля

И. Н. Горшенков✉

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. Предложен подход к дополнительной оценке газодинамической опасности угольных пластов, основанный на количественном описании неоднородности микроструктуры угля и ее сопоставлении с метаноносностью угля. Исследование выполнено на образцах, отобранных на забое пласта Болдыревский шахты имени С. М. Кирова, которые при схожих горно-геологических условиях различались по скорости выхода метана. Микроструктура угля анализировалась по цифровым микро- снимкам его поверхности, полученным методом сканирующей электронной микроскопии, а их обработка была проведена в координатах «энтропия – сложность». Для серий изображений были определены границы информационной энтропии Шеннона и статистической сложности, после чего эти параметры сопоставлены с прямыми измерениями газоносности (Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4). Показано, что микроструктурная неоднородность связана не только с особенностями накопления и удержания метана, но и со способностями его выделения при разгрузке массива и разрушении угля. Сочетание повышенной метаноносности с широким диапазоном значений энтропии и сложности может рассматриваться как дополнительный признак потенциальной газодинамической опасности. Полученные результаты подтверждают, что анализ микроструктуры угля способен служить дополнительным инструментом оценки газодинамической опасности пластов.

Ключевые слова: угольный пласт, метаноносность, микроструктура угля, энтропия – сложность, электронная микроскопия, фильтрация и диффузия метана, Кузбасс

Благодарность: Автор выражает благодарность за поддержку и помощь в подготовке материала научному руководителю ведущему научному сотруднику доктору технических наук Екатерине Васильевне Ульяновой и научному сотруднику Борису Николаевичу Пашичеву.

Для цитирования: 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>.

Assessment of gas-dynamic hazard of coal seams depending on the heterogeneity of coal microstructure

I. N. Gorshenkov✉

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russian Federation

✉ gorshenkov.in@mail.ru

Abstract. An approach is proposed for the additional assessment of gas-dynamic hazard of coal seams based on the quantitative characterization of coal microstructure heterogeneity and its correlation with methane content. The study was carried out on coal samples collected from the working face of the Boldyrevsky seam at the S.M. Kirov mine, which exhibited differences in methane release rates under similar mining and geological conditions. The microstructure was analyzed using digital surface micrographs obtained by scanning electron microscopy, and image processing was performed in entropy – complexity coordinates. For the image series, the ranges of Shannon information entropy and statistical complexity were determined and subsequently compared with direct measurements of methane content (Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4). It is shown that microstructural heterogeneity is associated not only with methane accumulation and retention but also with its release behavior during stress unloading and coal failure. The combination of elevated methane content and a wide range of entropy and complexity values can be considered an additional indicator of potential gas-dynamic

hazard. The obtained results confirm that coal microstructure analysis can serve as a supplementary tool for assessing gas-dynamic hazard of coal seams.

Keywords: coal seam, methane content, coal microstructure, entropy – complexity, electron microscopy, methane filtration and diffusion, Kuzbass

Acknowledgements: The author expresses gratitude for the support and assistance in preparing the material to scientific advisor Ekaterina V. Ulyanova, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, and to Boris N. Pashichev, Researcher.

For citation: Gorshenkov I.N. Assessment of gas-dynamic hazard of coal seams depending on the heterogeneity of coal microstructure. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 50-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-50-55>.

Введение

Одной из ключевых задач современной горной науки и угледобычи является повышение безопасности ведения горных работ, что в значительной степени связано с необходимостью надежного прогнозирования и предупреждения газодинамических явлений (ГДЯ). Особую опасность среди них представляют внезапные выбросы угля и газа, создающие непосредственную угрозу жизни людей и нарушающие устойчивость производственных процессов [1–5]. Основным фактором, обуславливающим развитие таких явлений, является шахтный метан, содержащийся в поровом пространстве и структуре угля и интенсивно выделяющийся в выработанное пространство при разработке пласта. Поэтому прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений, связанных с метаносностью угольных пластов, имеет особую значимость, поскольку к ним относятся как внезапные выбросы угля и газа, так и повышенное газовыделение в горные выработки, способное привести к образованию взрывоопасных смесей метана с воздухом и угольной пылью.

На практике прогноз обычно строится по данным метанообильности, газового давления, параметров дегазации и прямых измерений газоносности пласта. Эти показатели важны, но в основном отражают текущее состояние массива и лишь косвенно описывают строение угольного вещества, от которого зависит накопление и удержание при высвобождении метана. Кроме того, стандартные методы определения газоносности трудоемки, требуют специального оборудования и практически не характеризуют пространственную организацию порово-трещинного пространства [6–11]. Именно микроструктурная организация угля в значительной степени задает емкость сорбционного пространства, соотношение свободного и сорбированного метана, интенсивность его миграции и характер газовыделения при разгрузке пласта. Поэтому даже в схожих горно-геологических условиях образцы с разным строением угольного вещества могут заметно различаться по газодинамической активности [12, 13].

В связи с этим представляет интерес методика, которая позволяет перевести наблюдаемую микроструктурную неоднородность в измеряемые параметры с последующим сопоставлением их с метаносностью угля. Для такой оценки в работе использован метод «энтропия – сложность», применяемый при анализе сложных систем и цифровых изображений [14–16]. Похожие решения уже использовались при изучении структурной неоднородности угольного вещества и его склонности к самовозгоранию [17], однако сопоставление параметров «энтропия – сложность» с компонентами газоносности Q_1 , Q_2 и Q_3 для задач прогноза газодинамической опасности требует отдельной проверки.

Цель исследования: оценить, насколько совместный анализ микроструктуры угля и метаносности может служить дополнительным признаком газодинамической опасности.

Материал и методы исследования

Исследование выполнено на образцах угля пласта Болдыревский шахты имени С. М. Кирова, отобранных в различных точках выемочного участка при близких горно-геологических условиях, но различающихся по величине метаносности. Методологическую основу работы составил комплексный подход, объединяющий электронную микроскопию, цифровую обработку изображений и статистический анализ микроструктуры.

Микроструктура образцов изучалась по цифровым снимкам, полученным на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV при увеличении $\times 1000$. Для каждого образца выполняли не менее двух – трех серий снимков; в каждой серии анализировали в среднем по 10 изображений с различных участков поверхности, что обеспечивало репрезентативность выборки.

Количественную обработку микроснимков выполняли с помощью специализированной программы, реализующей метод «энтропия – сложность». Этот подход позволяет представить визуальную различимую неоднородность поверхности в виде системы воспроизводимых числовых характеристик.

Метод основан на представлении цифрового изображения как распределения яркостных и контурных признаков с последующим анализом в терминах информационной энтропии Шеннона H и статистической сложности C . Параметр H характеризует степень неопределенности распределения элементов изображения, тогда как параметр C отражает выраженность их структурной организации.

Рост значений H соответствует более неоднородному и менее упорядоченному распределению элементов (паттернов) угольной микроструктуры. Показатель C рассчитывается с использованием расстояния Йенсена – Шеннона между анализируемым и равномерным распределениями и позволяет выделять состояния, удаленные как от полного порядка, так и от предельного хаоса [14–16].

Результаты интерпретировали на плоскости «энтропия – сложность». По положению точек и ширине областей их распределения сопоставляли образцы по степени микроструктурной неоднородности и выраженности организованных структурных паттернов. Такой анализ позволяет различать угольные образцы, близкие по петрографическим признакам, но отличающиеся пространственной организацией угольного вещества [12, 13, 17].

Метаносность образцов определяли по методике ИПКОН РАН как сумму трех составляющих. Показатель Q_1 характеризует объем свободного и быстродесорбируемого метана, выделившегося сразу после отбора пробы и помещения ее в герметичную камеру. Показатель Q_2 отражает газ, выделившийся в период транспортирования и выдержки пробы до лабораторных измерений, а Q_3 соответствует

остаточному объему метана, высвобождающемуся после полного механического разрушения образца. Суммарную газоносность Q_{Σ} рассчитывали как $Q_1 + Q_2 + Q_3$ и выразили в м³/тсбм. Такая схема дает возможность раздельно оценить вклад свободного, диффузионно-выделяющегося и прочно удерживаемого метана, что существенно при сопоставлении показателей газоносности с параметрами микроструктуры.

Метаноносность угольных пластов определяется не только объемом порового пространства, но в значительной степени обусловлена микроструктурной неоднородностью угольного вещества. Пространственное распределение зон различной степени упорядоченности формирует сложную систему удержания и миграции газа. Именно вариации микроструктурной организации угля определяют условия аккумуляции метана, его локализацию и кинетику выделения, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние как на общую метаноносность, так и на склонность массива к проявлению газодинамических явлений.

Результаты исследований

В таблице 1 приведены точки отбора исследуемых проб угля пласта Болдыревский шахты имени С. М. Кирова.

Таблица 1 / Table 1

Пробы угля пласта Болдыревский шахты имени С. М. Кирова / Coal samples from the Boldyrevsky seam of the S.M. Kirov mine

№ пробы	Место отбора пробы
256	Вентиляционная печь лавы 24-63, ПК 198
261	Конвейерная печь лавы 24-63, мт 1530 + 10 м
268	Конвейерная печь лавы 24-63, ПК 111 + 7 м

В таблице 2 представлены осредненные значения газоносности образцов № 256, 261 и 268, полученные по составляющим Q_1 , Q_2 , Q_3 и суммарному показателю Q_{Σ} .

Таблица 2 / Table 2

Осредненные значения газоносности пласта Болдыревский шахты имени С. М. Кирова / Average methane content values for the Boldyrevsky seam at the S.M. Kirov mine

Компонент газоносности	Проба		
	№ 256	№ 261	№ 268
Q_1 , м ³ /тсбм	0,32	0,28	0,30
Q_2 , м ³ /тсбм	0,20	0,34	0,05
Q_3 , м ³ /тсбм	8,94	9,64	8,26
Q_{Σ} , м ³ /тсбм	9,46	10,27	8,61

Наибольшее значение Q_{Σ} установлено для образца № 261 (10,27 м³/тсбм), минимальное – для образца № 268 (8,61 м³/тсбм). При этом наибольший разброс характерен для показателя Q_2 , отражающего совместное действие фильтрационных и диффузионных механизмов газовыделения.

На рисунке 1 представлена нормированная гистограмма распределения составляющих газоносности для случаев Q_1 , Q_2 , Q_3 и суммарного значения Q_{Σ} . Каждая колонка приведена к единице, что позволяет анализировать относительный вклад отдельных образцов (№ 256, 261, 268) в общую газоносность независимо от ее абсолютных значений.

Как видно из рисунка 1, доли Q_1 и Q_3 изменяются сравнительно слабо, тогда как параметр Q_2 отличается наиболее за-

метной вариабельностью. Это указывает на существенную роль особенностей микроструктуры в процессах промежуточного газовыделения после отбора пробы [6–12]. Обработка микроснимков по методу «энтропия – сложность» выявила различия в микроструктурной организации исследуемых образцов.

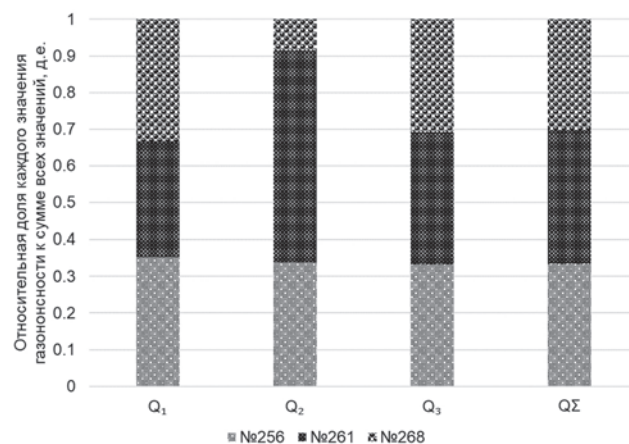


Рис. 1. Нормированная гистограмма распределения составляющих газоносности /

Fig. 1. Normalized histogram of methane content component distribution

На рисунках 2–4 представлены диаграммы «энтропия – сложность» по отдельным сериям снимков и их обобщенные варианты для образцов № 256, 261 и 268.

В таблице 3 приведены граничные значения энтропии и сложности, а также диапазоны их изменения для исследуемых образцов. Таким образом, видно, что наибольшая ширина области распределения характерна для образца № 261 ($\Delta H = 0,267$; $\Delta C = 0,147$), тогда как образец № 268 характеризуется более узкой, но смещенной в область повышенной энтропии зоной.

Таблица 3 / Table 3

Граничные значения энтропии и сложности образцов / Boundary values of entropy and complexity for the samples

№ пробы	Граница	H	C	ΔH	ΔC
№ 256	Левая	0,553	0,212	0,256	0,151
	Правая	0,809	0,364		
№ 261	Левая	0,540	0,203	0,267	0,147
	Правая	0,807	0,350		
№ 268	Левая	0,655	0,231	0,138	0,087
	Правая	0,793	0,319		

Обсуждение результатов

По сравнению с образцами № 256 и 261 в образце № 268 значения энтропии находятся в области больших величин при сравнительно узком диапазоне H и C , что указывает на преимущественно разупорядоченную, но статистически более однородную по выборке микроструктуру. Для образцов № 256 и особенно № 261 характерен более широкий разброс точек на плоскости «энтропия – сложность», то есть присутствует сочетание участков с большей и меньшей упорядоченностью. Именно у образца № 261, имеющего максимальную суммарную метаноносность, наблюдается и наибольшая ширина области распределения, что может свидетельствовать о соче-

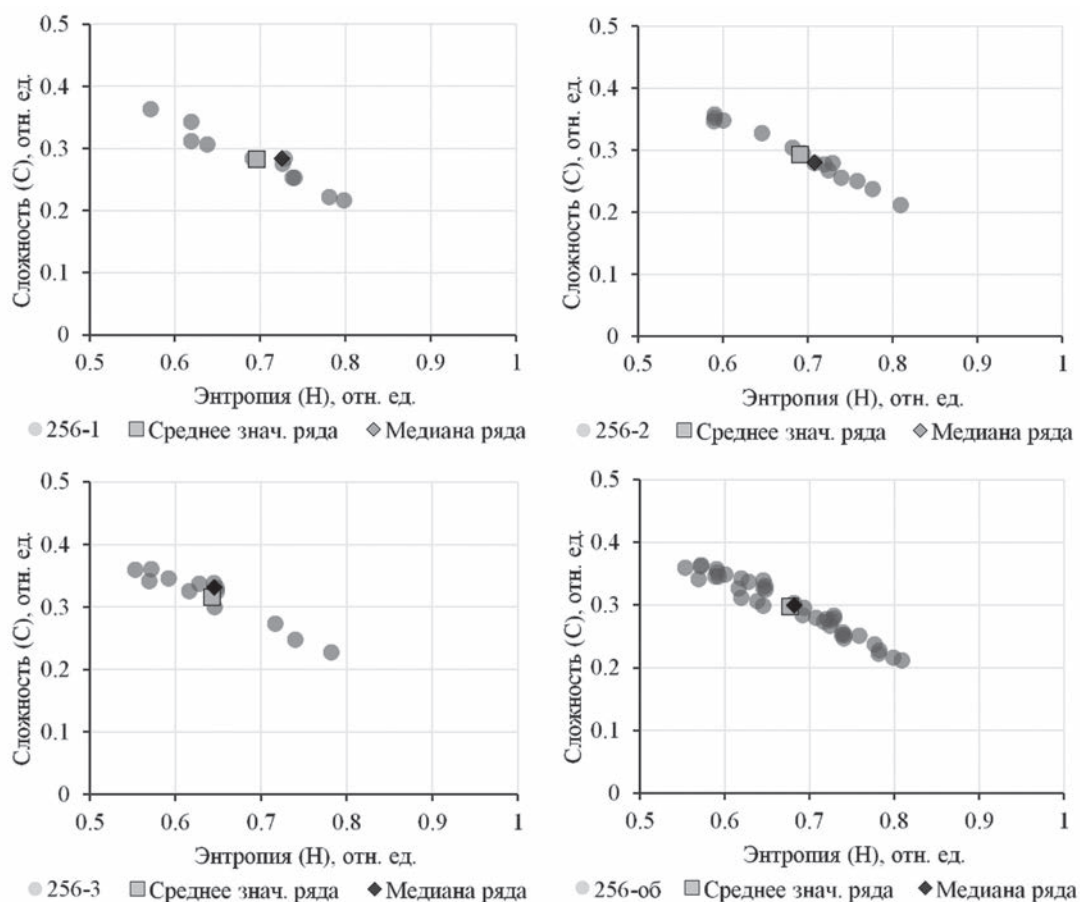


Рис. 2. Диаграммы «энтропия – сложность» для 3 серий снимков и их обобщение для образца № 256 /
Fig. 2. Entropy-complexity diagrams for three image series and their generalized representation for sample No. 256

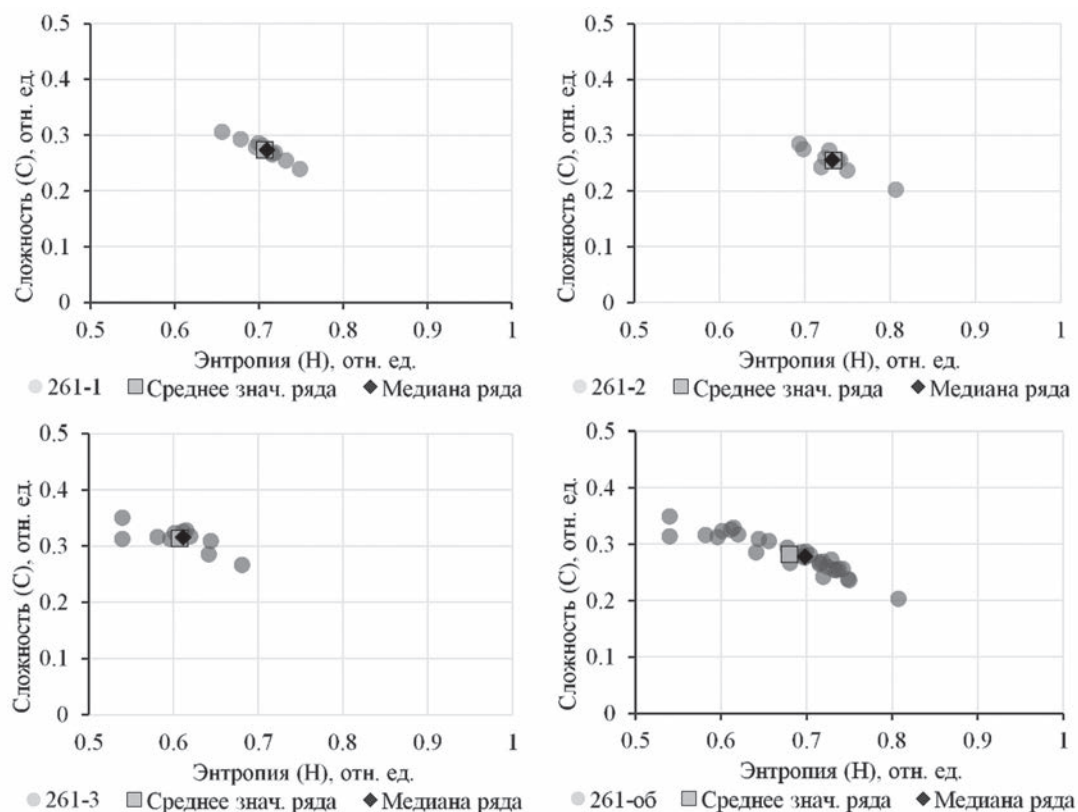


Рис. 3. Диаграммы «энтропия – сложность» для 3 серий снимков и их обобщение для образца № 261 /
Fig. 3. Entropy-complexity diagrams for three image series and their generalized representation for sample No. 261

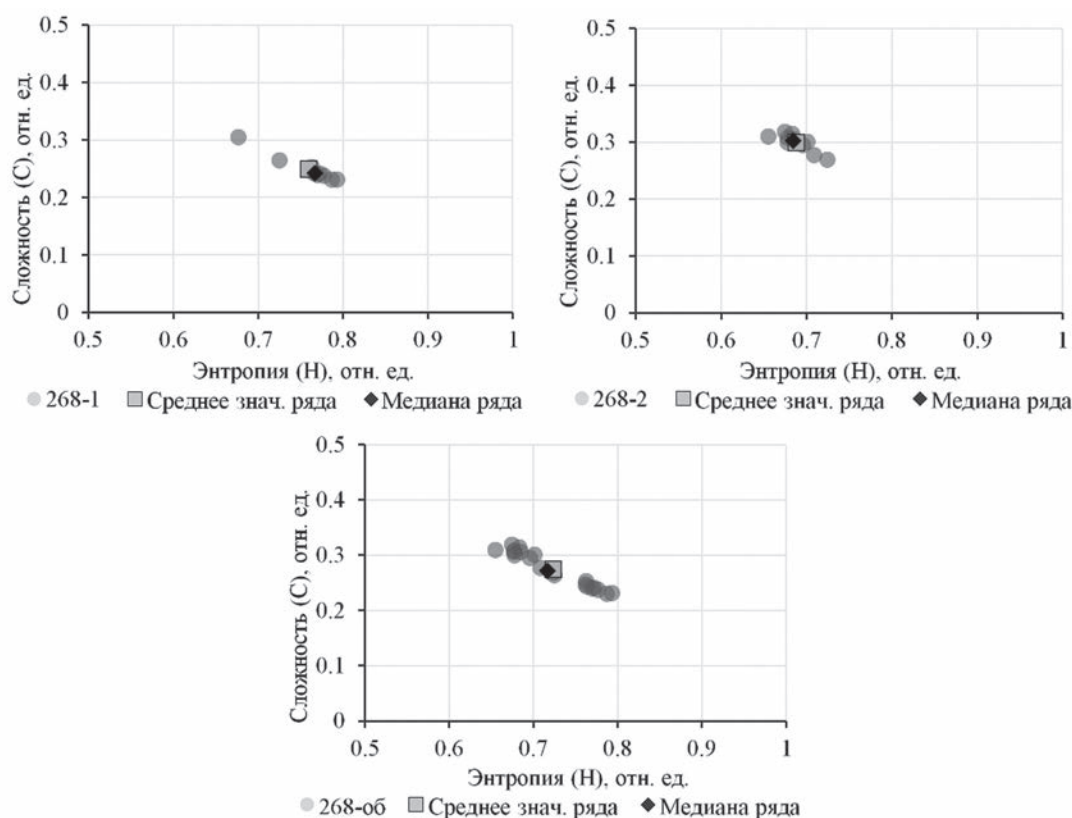


Рис. 4. Диаграммы «энтропия – сложность» для 2 серий снимков и их обобщение для образца № 268 /
Fig. 4. Entropy-complexity diagrams for three image series and their generalized representation for sample No. 268

тании развитого сорбционного пространства и структурных условий для неравномерного высвобождения газа [12, 13].

С точки зрения прогноза газодинамических явлений принципиально важно не только абсолютное значение метаносности, а именно характер сочетания метаносности с микроструктурной неоднородностью. При наличии участков с различной степенью упорядоченности в процессе разгрузки и разрушения угля часть метана быстро поступает из более проницаемых зон, тогда как другая часть высвобождается позднее за счет наличия сорбционных центров на оборванных связях. Такое пространственно-кинетическое несоответствие создает условия для локальной концентрации газового давления, ускоренного развития микротрещин и потери прочности угольного вещества, то есть повышает вероятность реализации газодинамических явлений в очистных и подготовительных выработках [1–5, 9–13].

Следовательно, параметрическая область «энтропия – сложность» может рассматриваться как дополнительный диагностический признак выбороопасности. Наиболее неблагоприятным следует считать сочетание повышенной суммарной метаносности с расширенной областью распределения точек на плоскости «энтропия – сложность», поскольку оно отражает одновременное наличие значительного газового потенциала и выраженной микроструктурной неоднородности, определяющей неравномерный характер десорбции и фильтрации метана [14–17].

Закключение

1. Показано, что метод «энтропия – сложность» позволяет количественно описывать неоднородность микроструктуры

угля по данным электронной микроскопии и сопоставлять образцы не только по средним значениям энтропии и сложности, но и по диапазону их изменений. Структура угля, обладающая более однородными областями, быстрее отдает метан, в то время как в углях с большой неоднородностью микроструктуры метан удерживается за счет большего количества оборванных алифатических связей, являющихся сорбционными центрами, поэтому скорость его выхода из угля замедлена.

2. Установлено, что различия в микроструктурной организации сопровождаются изменением распределения составляющих газосности Q_1 , Q_2 и Q_3 . Наиболее значимым для прогноза представляется значение Q_2 , которое отражает наличие в угле участков с различными условиями накопления и высвобождения метана.

3. Таким образом, анализ микроструктуры угля в координатах «энтропия – сложность» может рассматриваться как дополнительный инструмент оценки газодинамической опасности пластов и использоваться совместно с традиционными показателями газосности, газового давления и технологических условий ведения горных работ.

Выводы

1. В статье предложен подход к дополнительной оценке газодинамической опасности угольных пластов, основанный на количественном описании неоднородности микроструктуры угля и ее сопоставлении с метаносностью угля.

2. Полученные результаты подтверждают, что анализ микроструктуры угля способен служить дополнительным инструментом оценки газодинамической опасности пластов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Колесниченко И.Е., Колесниченко Е.А., Любимищенко Е.И. и др. Механизм внезапных выбросов метана в угольных пластах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020; 1: 108-120. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-0-108-120>.
Kolesnichenko I.E., Kolesnichenko E.A., Lyubomishchenko E.I., et al. Mechanism of sudden methane outbursts in coal seams. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020; 1: 108-120. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-0-108-120>.
2. Portnov V.S., Mindubayev A., Golik A., et al. Risk assessment of sudden coal and gas outbursts based on 3D modeling of coal seams and integration of gas-dynamic and tectonic parameters. *Fire*. 2025; 8 (6): 234. <https://doi.org/10.3390/fire8060234>.
3. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Киряева Т.А. и др. Региональная кластеризация угольных месторождений Кузбасса по газодинамической активности. Часть II: Влияние геотермических, геодинамических и физико-химических процессов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018; 10: 5-29. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0-5-29>.
Oparin V.N., Adushkin V.V., Kiryaeva T.A., et al. Regional clustering of Kuzbass coal deposits by gas-dynamic activity. Part II: Influence of geo-thermal, geodynamic and physicochemical processes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018; (10): 5-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0-5-29>.
4. Портнов В.С., Иманбаева С.Б., Муллагалиева Л.Ф. и др. Прогноз природной метаноносности при разработке угольных пластов. *Уголь*. 2020; 11 (1136): 53-57. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-11-53-57>.
Portnov V.S., Imanbaeva S.B., Mullagalieva L.F., et al. Forecast of natural methane content in coal seam mining. *Coal*. 2020; 11 (1136): 53-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-11-53-57>.
5. Колесниченко И.Е., Артемьев В.Б., Колесниченко Е.А. и др. Взрывы и выбросы метана: квантовая теория метаноносности, выбросоопасности и дегазации угольных пластов. *Горная промышленность*. 2019; 4: 138-143. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-4-138-143>.
Kolesnichenko I.E., Artem'ev V.B., Kolesnichenko E.A., et al. Methane explosions and outbursts: Quantum theory of methane content, outburst hazard and degassing of coal seams. *Mining*. 2019; 4: 138-143. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-4-138-143>.
6. Liu D., Yao Y., Tang D., et al. Pore structure characterization and its significance for gas adsorption in coals: A comprehensive review. *Unconventional Resources*. 2022; 2: 139-157. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2022.10.002>.
7. Wang Z., Li X., Zhang S., et al. Effects of micro-mesopore structure characteristics on methane adsorption capacity of medium rank coal. *Fuel*. 2023; 351: 128910. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128910>.
8. Jiang B., Zhao Y., Lin B., et al. Effect of faults on the pore structure of coal and its resultant change on gas emission. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020; 195: 107919. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107919>.
9. Feng G., Zhao Y., Lin B., et al. Fractal pore and its impact on gas adsorption capacity of outburst coal: Geological significance to coalbed gas occurrence and outburst. *Adsorption Science & Technology*. 2022; 2022: 4273900. <https://doi.org/10.1155/2022/4273900>.
10. Zou P., Liu Y., Chen J., et al. Study on pore structure and adsorption properties of coal and microscopic action mechanism of outburst. *Scientific Reports*. 2025; 15: 7374. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91284-6>.
11. Liu Y., Chen J., Guo M., et al. Study on the differences in the microstructure between outburst and nonoutburst coal. *ACS Omega*. 2025; 10: 33149-33161. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02669>.
12. Ульянова Е.В., Малинникова О.Н., Федоров Е.В. и др. Кинетика газовыделения метана из угля различной микроструктурной неоднородности. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2025; 6: 36-43. <https://doi.org/10.15372/FTPR-PI20250604>.
Ul'yanova E.V., Malinnikova O.N., Fedorov E.V., Gorshenkov I.N., et al. Kinetics of Methane mission from coal of different microstructural non-uniformity. *Journal of Mining Science*. 2025; 61 (6): 893-899. <https://doi.org/10.1134/S1062739125060043>.
13. Малинникова О.Н., Ульянова Е.В., Харченко А.В. и др. Влияние микроструктуры угля на газонасыщенность призабойной зоны. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2020; 3: 25-33. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200303>.
Malinnikova O.N., Ulyanova E.V., Kharchenko A.V., et al. Influence of coal microstructure on gas content of the face area. *Physical and technical problems of mineral development*. 2020; 3: 25-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200303>.
14. Lopez-Ruiz R., Mancini H.L., Calbet X. A statistical measure of complexity. *Physics Letters A*. 1995; 209: 321-326. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(95\)00867-5](https://doi.org/10.1016/0375-9601(95)00867-5).
15. Rosso O.A., Larrondo H.A., Martin M.T., et al. Distinguishing noise from chaos. *Physical Review Letters*. 2007; 99: 154102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.154102>.
16. Brazhe A.R. Shearlet-based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns. *Physical Review E*. 2018; 97: 061301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.061301>.
17. Ульянова Е.В., Малинникова О.Н., Докучаева А.И., и др. Влияние неоднородности структуры угольного вещества на склонность угля к самовозгоранию. *Химия твердого топлива*. 2022; 6: 18-24. <https://doi.org/10.31857/S0023117722060093>.
Ulyanova E.V., Malinnikova O.N., Dokuchaeva A.I., Pashichev B.N. Influence of heterogeneity of coal matter structure on coal propensity to spontaneous combustion. *Solid fuel chemistry*. 2022; 6, 18-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0023117722060093>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.06.2026
Поступила после рецензирования: 18.06.2026
Принята к публикации: 23.06.2026

ABOUT THE AUTHOR

Ivan N. Gorshenkov – Graduate Student, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russian Federation; e-mail: gorshenkov.in@mail.ru

Article info

Received: 01.06.2026
Revised: 18.06.2026
Accepted: 23.06.2026