

## ВЛИЯНИЕ ПЕТРОГРАФИЧЕСКОГО СОСТАВА УГЛЯ НА ЕГО СПОСОБНОСТЬ К УДЕРЖАНИЮ МЕТАНА

В.Н. Захаров<sup>1</sup>, Е.В. Ульянова<sup>1</sup>, О.Н. Малинникова<sup>1</sup>, Б.Н. Пашичев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия,  
e-mail: ekaterina-ulyanova@yandex.ru

**Аннотация:** Показано, что при разработке угольных пластов достаточно большая часть метана остается в угле призабойной зоны пласта. Используя разработанную в ИПКОН РАН методику, определена остаточная газоносность призабойной зоны угольных пластов шахт им. С.М. Кирова и им. А.Д. Рубана АО «СУЭК-Кузбасс». Исследования углей методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) показали, что спектры ЭПР углей представляют собой суперпозиции двух сигналов: от неспаренных электронов сопряженных систем и неспаренных электронов в алифатической части угля, образующих свободные валентности. При этом количество парамагнитных центров в алифатической части угольного вещества значительно меньше у образцов угля с небольшой остаточной газоносностью и больше у углей с более высоким остаточным содержанием метана. Это позволило предположить, что метан удерживается парамагнитными центрами именно алифатической части угольного вещества, и что в угле с более высокой остаточной газоносностью алифатическая составляющая должна быть более рыхлая и менее упорядоченная. Исследования неоднородности микроструктуры этих же углей проводилось методом построения диаграмм «энтропия-сложность», рассчитанных по цифровым изображениям их поверхности, полученным на сканирующем электронном микроскопе. Показано, что кусочки угля с блестящей поверхностью (обогащенные витринитом) из пластов с более высоким остаточным содержанием метана отличаются от углей мало газоносных, с более неоднородной микроструктурой. Для кусочков угля с матовой поверхностью различной в микроструктуре углей с неодинаковой остаточной газоносностью не обнаружено.

**Ключевые слова:** ископаемый уголь, газоносность, витринит, инертинит, цифровые изображения поверхности угля, энтропия, сложность.

**Благодарность:** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-00824.

**Для цитирования:** Захаров В. Н., Ульянова Е. В., Малинникова О. Н., Пашичев Б. Н. Влияние петрографического состава угля на его способность к удержанию метана // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12. – С. 88–98. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_12\_0\_88.

### Effect of petrographic composition on coal ability to retain methane

V.N. Zakharov<sup>1</sup>, E.V. Ulyanova<sup>1</sup>, O.N. Malinnikova<sup>1</sup>, B.N. Pashichev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources  
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: ekaterina-ulyanova@yandex.ru

**Abstract:** During coal mining, much methane remains in face-adjacent rock mass. Using the procedure developed by the IPKON Institute, the residual gas content is determined in face areas

of coal seams in Kirov Mine and Ruban Mine of SUEK-Kuzbass. The electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy of coal shows that the EPR spectra represent the superposition of two signals: from unpaired electrons of conjugate systems and from unpaired electrons in aliphatic components of coal, which form free valences. The number of paramagnetic centers in the aliphatic components of coal is much less in coal samples having low residual gas content and much higher in coal samples having higher residual methane content. This allows suggesting that methane is retained by the paramagnetic centers in the aliphatic components of coal and that the aliphatic components in coal having higher residual gas content should be more loose and less ordered. The microstructural nonuniformity of these coal samples was examined using the entropy–complexity diagrams plotted using the digital coal surface images from the scanning electron microscopy. Coal particles with glossy surface (rich with vitrinite) from seams having higher residual methane content differ from coal particles from seams having lower gas content by more nonuniform microstructure. Duller surface particles of coal samples having dissimilar residual gas content feature no differences in microstructure.

**Key words:** fossil coal, gas content, vitrinite, inertinite, digital coal surface images, entropy, complexity.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 19-05-00824.

**For citation:** Zakharov V. N., Ulyanova E. V., Malinnikova O. N., Pashichev B. N. Effect of petrographic composition on coal ability to retain methane. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12):88-98. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_12\_0\_88.

---

## Введение

В связи с необходимостью и неизбежностью разработки газоносных угольных пластов все более глубокого залегания, роста нагрузок на лаву и сопряженного с этим возрастания интенсивности гео- и газодинамических процессов в угольных пластах при техногенном воздействии, все более актуальной становится проблема обеспечения безопасного ведения горных работ [1, 2]. Работы на шахтах Кузбасского и Печорского бассейнов осуществляются в постоянно ухудшающихся горно-геологических условиях. Почти все действующие шахты Кузбасса, Печоры и Восточного Донбасса относятся к опасным по газу, увеличивается количество шахт, опасных по внезапным выбросам и самовозгоранию угля, что предопределяет собой высокую угрозу аварийности работ на угледобывающих предприятиях.

При разработке угольного пласта после очередного шага заходки комбайна происходит естественная дегазация пласта, метан через обнаженную поверхность выделяется в выработанное пространство, но часть его, иногда достаточно большая, остается в угле призабойной зоны пласта [3–5]. Этот метан может выделяться в выработки при разрушении угля комбайном, при транспортировке угля по выработкам, и должен учитываться при расчетах вентиляционных сетей. В том случае, когда уголь призабойной зоны содержит большое остаточное количество метана, может быть спровоцировано газодинамическое явление.

## Материалы, методика проведения экспериментов

Для определения остаточной газоносности призабойной зоны были проведены исследования газонасыщенности

Таблица 1

**Технические характеристики и остаточная газоносность  
аналитических проб угля вблизи обнажения пласта**

**Specification and residual gas content of test coal samples taken in exposed coal seam**

№ образца	Выход летучих, %	Зольность, %	Влага, %	Q, м <sup>3</sup> /т
1	38,7	2,5	1,96	11,3
2	41,7	2,99	1,5	12,5
3	39,3	3,7	2,3	9,4
4	39,3	3,9	2,2	7,6
5	40,0	1,2	4,4	1,3
6	38,5	11,3	4,2	3,8
7	37,7	1,9	6,3	2,3

Примечание. Образцы угля: 1 – 4 – пласт Поленовский шахты им. С.М. Кирова; 5 – 7 – пласт Польшаевский-2 шахты им. А.Д. Рубана.

угольных пластов вблизи обнажения на шахтах им. С.М. Кирова и им. А.Д. Рубана АО «СУЭК-Кузбасс». Использовалась разработанная в ИПКОН РАН методика, описанная в работе [6]. Результаты определения количества остаточного газа вблизи обнажения угольных пластов Q и технический анализ проб этих же пластов, определенный на ТГА-701, представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что угли с близкими значениями летучих веществ, зольности и содержания влаги содержат разные остаточные количества газа вблизи обнажения. В нашей работе мы рассматривали способность угля к удержанию метана в зависимости от структуры угольного вещества, ее неоднородности на микроуровне и связанными с ней сорбционными центрами [5 – 8].

Исследования углей методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) показали, что структурная и вещественная неоднородность каменных углей и их петрографических составляющих обуславливает существование парамагнитных центров (ПМЦ), формируемых разными межмолекулярными и внутримолекулярными связями угольного вещества [9]. Это приводит к тому, что спектры ЭПР углей представляют собой

суперпозиции сигналов, причем в сигнал ЭПР поглощения углей основной вклад вносят два типа ПМЦ: слабое обменное взаимодействие неспаренных электронов сопряженных систем и неспаренные электроны, локализованные в участках разрыва связей, а также ненасыщенные химические связи в алифатической части угля, образующие свободные валентности [10, 11]. Поэтому спектры ЭПР каменных углей состоят как минимум из двух линий (рис. 1, б): более узкой (линия 2) – от систем сопряжения – и широкой (линия 1) – от алифатической части угля. (Исследования ЭПР были проведены на спектрометре BRUKER EMX 6/1 с использованием экспериментальной базы ЦКП «Нанохимия и наноматериалы» МГУ в рамках Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова).

Основные параметры спектров ЭПР – это интегральная интенсивность и ширина резонансной линии. Интегральная интенсивность линии определяется площадью под кривой S ЭПР спектра поглощения и пропорциональна числу парамагнитных частиц в образце (рис. 1, а). Интегральную интенсивность можно приближенно оценить, пользуясь выражением:

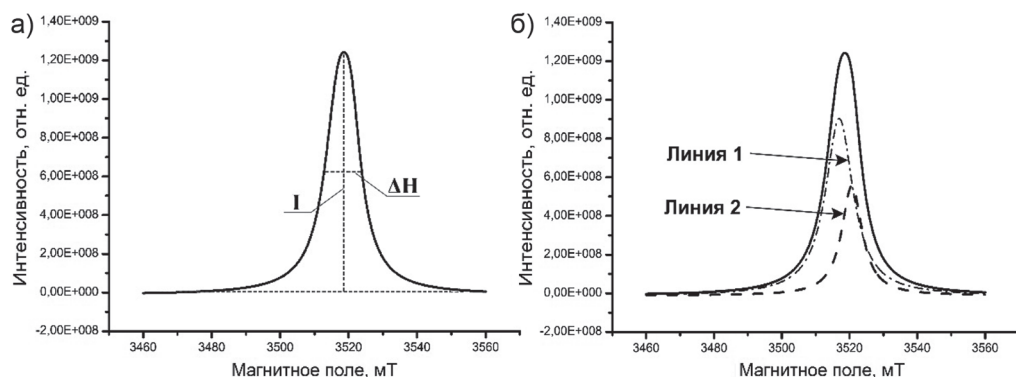


Рис. 1. Пример разложения спектра ЭПР (а) на две линии (б)

Fig. 1. Illustration of EPR spectrum (a) splitting into two lines (b)

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

где  $I$  — интенсивность линии;  $\Delta H$  — ширина линии на полувысоте.

Оценку абсолютного количества ПМЦ осуществляют сравнением интенсивностей (высотой сигнала) спектров исследуемого образца и эталона. Предварительные исследования показали, что в ЭПР-спектрах угля, содержащего большее количество метана (угли шахты им. С.М. Кирова с газонасыщенностью призабойной зоны около  $10 \text{ м}^3/\text{т}$ ) широкая линия (линия 1) от алифатической части угля по площади и по интенсивности преобладает над узкой (линия 2), образующейся от систем сопряжения. Для примера в табл. 2 показаны значения интегральной интенсивности  $S$ , отношение интегральных интенсивностей, определяемых площадями под соответствующими кривыми 1 и 2 спектра соответственно ( $S_1/S_2$ ),

и  $N$  — количество ПМЦ для углей, содержащих остаточные объемы метана  $Q$ .

В углях с газонасыщенностью  $1,3 \text{ м}^3/\text{т}$  ЭПР-спектры раскладываются так, что интенсивность узкой линии (высота линии сигнала ЭПР), пропорциональная количеству ПМЦ больше (линия 2), а интенсивность широкой меньше (линия 1), чем в спектрах образцов с большим содержанием метана. То есть количество парамагнитных центров в алифатической части значительно меньше у образцов угля с небольшой остаточной газонасыщенностью. Предположительно, более высокая остаточная газонасыщенность угля обусловлена тем, что метан удерживается парамагнитными центрами, находящимися в его алифатической части. Получается, что более высокой остаточной газонасыщенности должна соответствовать структура углей с более развитой

Таблица 2

**ЭПР параметры углей с разной газонасыщенностью**  
**EPR characteristics of coal having different gas contents**

№ образца	№ линий	$S \times 10^9$ , отн. ед.	$N \times 10^{17}$ , спин/г	$S_1/S_2$	$Q$ , $\text{м}^3/\text{т}$
3	1	14,2	8,8	0,8	9,4
	2	6,6	4,1		
5	1	11,9	7,4	2,2	1,3
	2	17,9	11,1		

алифатической частью, то есть более рыхлая и менее упорядоченная.

Неоднородность структуры углей исследовалась нами с использованием метода построения диаграммам «энтропия-сложность» по цифровым снимкам поверхности угольных образцов, сделанным сканирующим электронным микроскопом Jeol JSM-6610LV с 1000-кратным увеличением. Вероятно, неоднородность микроструктуры углей отражается в естественных изломах поверхности образцов, поэтому исследовались естественные поверхности кусочков углей размером приблизительно 2 мм.

Расчет пространственной сложности и энтропии для двумерных цифровых изображений состоит из двух этапов:

- разложение цифровой электронной микрофотографии угля на коэффициенты, характеризующие локальную анизотропию и ориентацию основных микроструктур, при помощи дискретного шарлотт-разложения; нормализация квадратов коэффициентов разложения и интерпретация полученных значений как функции плотности распределения микроструктур различного масштаба и ориентации в обрабатываемом распределении;
- на основании полученного распределения устанавливается относительная энтропия Шеннона  $H$ , на базе сравнения с ее равновероятным распределением вводится понятие статистической

сложности  $S$ , вычисляемой как произведение энтропии и расхождения между наблюдаемым и равновероятным распределением [12].

Введенная сложность соответствует отклонению в распределении структурных неоднородностей от равновероятного и обращается в ноль как при абсолютно упорядоченной, так и при абсолютно хаотичной структуре вещества. Нулевая энтропия и сложность соответствуют полностью регулярной структуре, а высокая энтропия и нулевая сложность — полностью случайному пространственно-независимому шуму в структуре угля. Подробнее обоснование и порядок расчета изложены в работах [12 – 14].

Изменение показателей «энтропия — сложность» вдоль поверхности одного цифрового изображения может говорить о большом случайном разбросе, поэтому для получения достоверной информации определяется среднее значение «энтропия — сложность» в виде одной точки для каждого изображения. Так как на каждом образце снимается несколько цифровых изображений, то полученные точки, нанесенные на диаграммы «энтропия — сложность», характеризуют распределение структурных неоднородностей в этом образце.

Для исследований из каждой пробы угля на глаз отбирались образцы, содержащие разные типы мацералов: кусочки

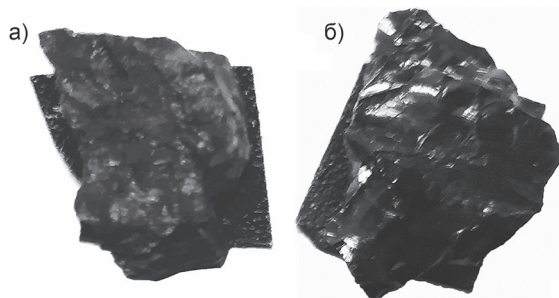


Рис. 2. Образцы угля с матовой (а) и блестящей поверхностью (б)

Fig. 2. Samples of coal with dull surface (a) and glossy surface (b)

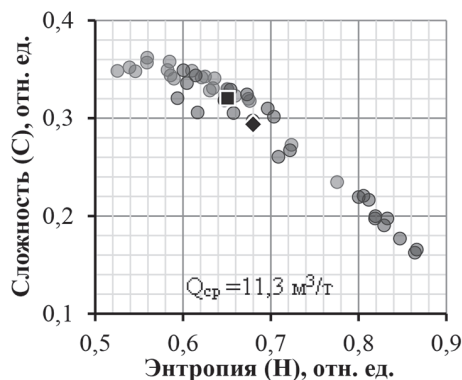
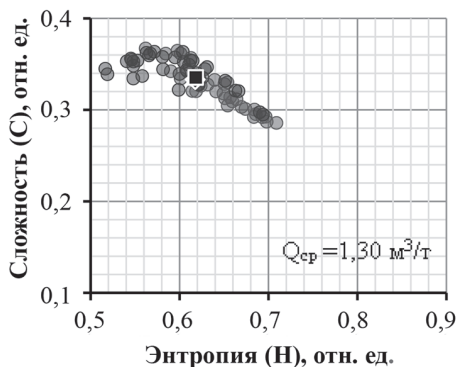


Рис. 3. Диаграммы распределения значений «энтропия — сложность» серий снимков (показаны разными маркерами) поверхности образцов угля одной пробы. Черным квадратом показано среднее значение

Fig. 3. Entropy-complexity diagram plots based on the series of surface images (indicated by different markers) of coal from the same sample. Black-colored square is the average value

угля с блестящей поверхностью — условно обогащенные витринитом и с матовой поверхностью — условно отнесенные к инертиниту (фюзениту), рис. 2.

В связи с петрографической неоднородностью состава углей, для получения наиболее полной и достоверной информации об их структуре при исследовании под микроскопом из каждой пробы угля отбиралось не менее 3—4 кусочков с блестящей поверхностью и матовой. На каждом кусочке были получены цифровые изображения поверхности образца (обычно не меньше 10) в нескольких точках, то есть около 40 снимков для каждого образца.

На всех цифровых изображениях присутствуют участки с разным соотношением неоднородностей, поэтому статистическая обработка снимков с использованием метода построения диаграмм «энтропия — сложность» позволила выявить присутствие закономерностей в этом структурном хаосе. Расчет значений статистических энтропий ( $H$ ) и сложности ( $C$ ), проведенный этим методом по цифровым снимкам поверхности исследуемых объектов, позволил установить связь неоднородности микроструктуры углей с газосодержанием

призобойной зоны угольных пластов. На рис. 3 показан пример распределения неоднородностей для углей с наименьшим ( $Q_{cp} = 1,3 \text{ м}^3/\text{т}$ ) и наибольшим ( $Q_{cp} = 11,3 \text{ м}^3/\text{т}$ ) содержанием метана в призобойной области.

### Обсуждение полученных результатов

Оценка неоднородности микроструктуры по цифровым изображениям поверхности углей с использованием метода расчета значений «энтропия — сложность» была сделана для всех исследуемых образцов. Установлено, что угли, имеющие небольшую газоносность пласта вблизи обнажения, обладают более упорядоченной микроструктурой с наибольшим значением энтропии (около 0,71 отн. ед.), в то время как угли с газоносностью 11—12  $\text{м}^3/\text{т}$  обладают значительно более хаотичной структурой с максимальными значениями энтропии (0,88 отн. ед.). Сравнение микроструктуры образцов, обогащенных витринитом или инертинитом, показало, что микроструктура поверхности угля, обогащенного инертинитом, определенная по разбросу значений энтропии, практически одинакова для всех образцов

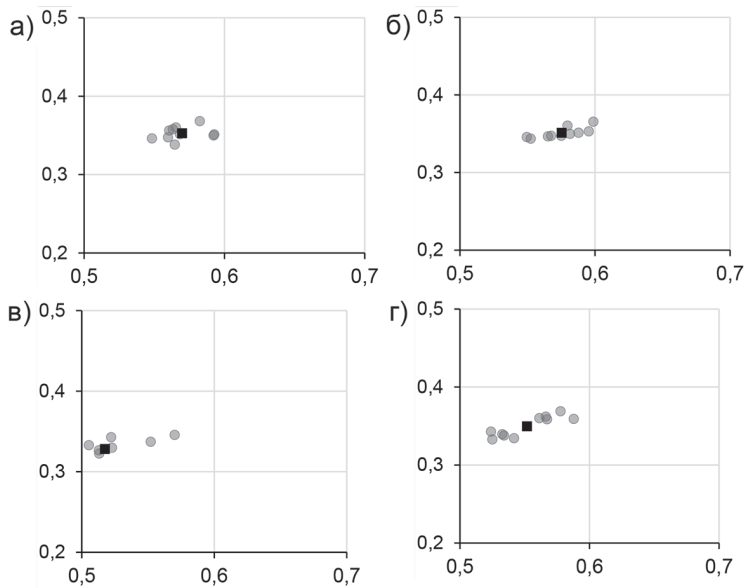


Рис. 4. Диаграмма значений «энтропия – сложность», определенных для матовых кусочков угля (а, б), содержание газа около 2 м<sup>3</sup>/т; и углей (в, г), содержание газа меняется в интервале 8–12 м<sup>3</sup>/т. Черным квадратом отмечено среднее значение для каждого образца

Fig. 4. Entropy–complexity diagram plots for dull coal particles (a, b), gas content around 2 m<sup>3</sup>/t; and coal (v, g), gas content range 8–12 m<sup>3</sup>/t. Black-colored square marks the average value for each sample

углей с высокой и низкой остаточной газоносностью.

На рис. 4 приведены диаграммы «энтропия – сложность» для четырех углей с минимальным и максимальным содержанием метана (поверхности угольных образцов – матовые). В приведенных

на рис. 3 диаграммах разброс значений энтропии находится в пределах от 0,5 до 0,6 отн. ед. для всех углей, хотя содержание газа в этих углях меняется в интервале от 2 до 12 м<sup>3</sup>/т.

На рис. 5 показаны средние значения энтропии для матовых кусочков углей

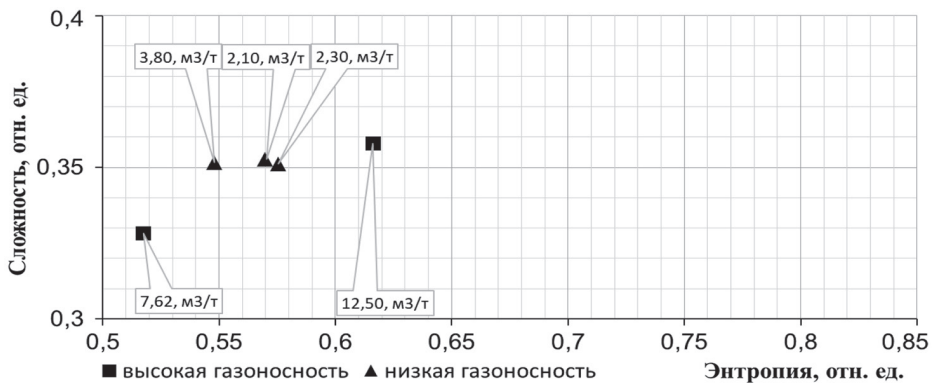


Рис. 5. Диаграмма средних значений «энтропия – сложность», рассчитанных по изображениям поверхности матовым образцов угля

Fig. 5. Averaged entropy–complexity diagrams plotted from surface images of dull coal particles

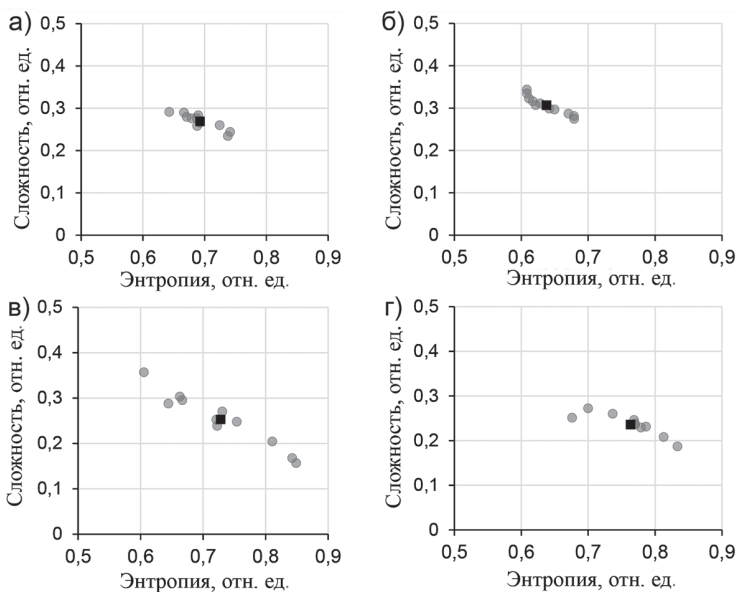


Рис. 6. Диаграмма значений «энтропия – сложность» цифровых изображений образцов углей с блестящей поверхностью: содержание газа около  $2,0 \text{ м}^3/\text{т}$  (а, б); содержание газа  $8–10 \text{ м}^3/\text{т}$  (в, г). Черным квадратом отмечено среднее значение для каждого образца

Fig. 6. Averaged entropy–complexity diagrams plotted from surface images of glossy coal particles: (a), (b) gas content around  $2 \text{ m}^3/\text{t}$ ; (v, g), gas content range  $8–10 \text{ m}^3/\text{t}$ . Black-colored square marks the average value for each sample

с разным содержанием метана. Разброс значений «энтропия – сложность» для образцов углей с блестящей поверхностью (витриниты) и высокой газоносностью существенно отличается от значений «энтропия – сложность» для углей с низкой газоносностью, что хоро-

шо видно на рис. 6. Проведенное сравнение средних значений «энтропия – сложность», рассчитанных по снимкам блестящей поверхности (витринитовая составляющая) для углей разной метаноносности, показало существенное их отличие (рис. 7).

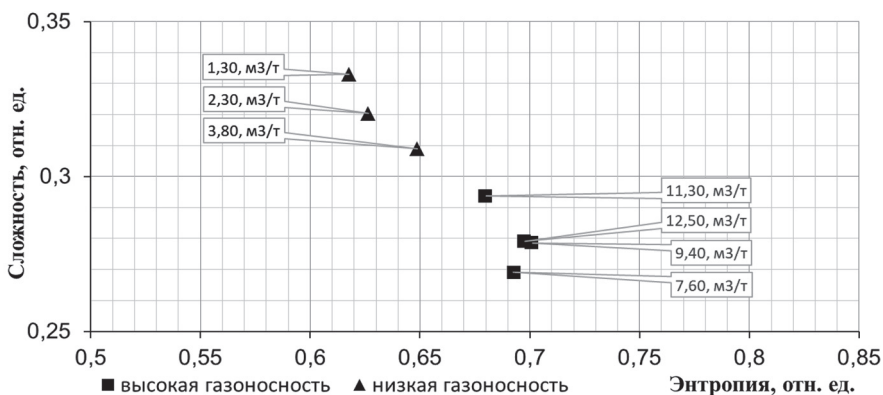


Рис. 7. Диаграмма значений «энтропия – сложность» цифровых изображений образцов углей с блестящей поверхностью

Fig. 6. Entropy–complexity diagram plots for glossy coal particles



Эти исследования позволяют утверждать, что отличия в способности углей удерживать разное количество метана заключено именно в витринитовых составляющих углей, а предварительные исследования ЭПР-спектров углей с различной остаточной газоносностью позволяют предположить, что метан удерживается парамагнитными центрами, находящимися в его алифатической части. То есть более высокой остаточной газоносностью обладают угли с более развитой алифатической частью, более рыхлой и менее упорядоченной микроструктурой.

Обобщая эти результаты, можно сделать вывод, что более высокая остаточная газоносность угля обусловлена большим количеством парамагнитных центров, которые, являясь сорбционными центрами, удерживают метан и располагаются преимущественно в алифатической части витринитовых составляющих углей.

### **Заключение**

Использование созданной в ИПКОН РАН методики определения газоносности разрабатываемых угольных пластов

и метод оценки статистической неоднородности структуры углей по диаграммам «энтропия – сложность», построенным в соответствии с цифровыми снимками их поверхностей, позволили установить, что угли пластов с меньшими значениями газоносности призабойной зоны обладают более упорядоченной структурой на микроуровне, тогда как микроструктура углей с более высокой газоносностью является значительно менее упорядоченной.

Исследования методом ЭПР дали возможность предположить, что метан удерживается парамагнитными центрами алифатической части угольного вещества, и что в угле с более высокой остаточной газоносностью алифатическая составляющая более рыхлая и менее упорядоченная. Применение метода расчета диаграмм «энтропия – сложность» показало, что из петрографических составляющих углей витриниты в большей степени отражают изменения микроструктуры, связанные со способностью угля к накоплению и удержанию метана.

Авторы выражают благодарность А.Н. Ульянову за проведенные ЭПР измерения.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Feng Yan-Yan, Jiang Cheng-Fa, Liu Dai-Jun, Chu Weib* Microstructure and its influence on CH<sub>4</sub> adsorption behavior of deep coal // Chinese Physics B. 2014, vol. 23, no. 2, article 028201. DOI: 10.1088/1674-1056/23/2/028201.
2. *Tang Z., Yang S., Zhai C., Xu Q.* Coal pores and fracture development during CBM drainage: Their promoting effects on the propensity for coal and gas outbursts // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018, vol. 51, pp. 9–17.
3. *Забурдяев В. С.* Категории опасности угольных шахт по метану // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № S1. – С. 300–314.
4. *Егорова Е. А., Коликов К. С., Никитин С. Г.* Оценка условий заблаговременной дегазационной подготовки выбросоопасных угольных пластов в зоне геологических нарушений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S12. – С. 9–12.
5. *Забурдяев В. С.* Выделение метана из отбитого в очистном забое угля // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 11. – С. 13–17. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-11-13-17.
6. *Малинникова О. Н., Ульянова Е. В., Харченко А. В., Пашичев Б. Н.* Влияние микроструктуры угля на газонасыщенность призабойной зоны // Физико-технические проб-

лемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 3. — С. 25–33. DOI: 10.15372/FTPRPI20200303.

7. Lin Hua-lin, Li Ke-jian, Zhang Xuwen, Wang Hongxue Structure characterization and model construction of indonesian brown coal // *Energy Fuels*. 2016, vol. 30, no. 5, pp. 3809–3814. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b02696.

8. Zhang Z., Kang Q., Wei S., Yun T., Yan G., Yan K. Large scale molecular model. Construction of xishan bituminous coal // *Energy Fuels*. 2017, vol. 31, no. 2, pp. 1310–1317. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b02623.

9. Русьянова Н. Д. Углекислотная химия. — М.: Наука, 2003. — 317 с.

10. Лукинов В. В., Гончаренко В. А., Бурчак А. В. Перспективы определения сорбционных свойств угля методом электронного парамагнитного резонанса // *Уголь Украины*. — 2001. — № 6. — С. 44–46.

11. Jiaxun Liu, Xiumin Jiang, Jun Shen, Hai Zhang Chemical properties of superfine pulverized coal particles. Part 1. Electron paramagnetic resonance analysis of free radical characteristics // *Advanced Powder Technology*. 2014, vol. 25, pp. 916–925.

12. Brazhe A. Shearlet-based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns // *Physical Review E*. 2018, vol. 97, no. 6, article 061301. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.061301.

13. Ульянова Е. В., Малинникова О. Н., Пашичев Б. Н., Малинникова Е. В. Микроструктура ископаемых углей до и после газодинамических явлений // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2019. — № 5. — С. 10–17. DOI: 10.15372/FTPRPI20190502.

14. Ульянова Е. В., Малинникова О. Н., Пашичев Б. Н. Влияние неоднородности структуры угля на особенности его термического разложения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 2. — С. 71–81. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-71-81. **ИДБ**

## REFERENCES

1. Feng Yan-Yan, Jiang Cheng-Fa, Liu Dai-Jun, Chu Weib Microstructure and its influence on CH<sub>4</sub> adsorption behavior of deep coal. *Chinese Physics B*. 2014, vol. 23, no. 2, article 028201. DOI: 10.1088/1674-1056/23/2/028201.

2. Tang Z., Yang S., Zhai C., Xu Q. Coal pores and fracture development during CBM drainage: Their promoting effects on the propensity for coal and gas outbursts. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018, vol. 51, pp. 9–17.

3. Zaborudyaev V. S. Methane category dangerous of mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. S1, pp. 300–314. [In Russ].

4. Egorova E. A., Kolikov K. S., Nikitin S. G. Assessment of the conditions in advance decontamination training outburst-hazardous coal seams in the area of geological deformation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. S12, pp. 9–12. [In Russ].

5. Zaborudyaev V. S. Methane emission from the broken-down coal in the working face. *Occupational Safety in Industry*. 2019, no. 11, pp. 13–17. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-11-13-17.

6. Malinnikova O. N., Ulyanova E. V., Kharchenko A. V., Pashichev B. N. Influence of coal microstructure on gas content of the face area. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2020, no. 3, pp. 25–33. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20200303.

7. Lin Hua-lin, Li Ke-jian, Zhang Xuwen, Wang Hongxue Structure characterization and model construction of indonesian brown coal. *Energy Fuels*. 2016, vol. 30, no. 5, pp. 3809–3814. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b02696.

8. Zhang Z., Kang Q., Wei S., Yun T., Yan G., Yan K. Large scale molecular model. Construction of xishan bituminous coal. *Energy Fuels*. 2017, vol. 31, no. 2, pp. 1310–1317. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b02623.

9. Rusanova N. D. *Uglekimiya* [Coal chemistry], Moscow, Nauka, 2003, 317 p.

10. Lukinov V. V., Goncharenko V. A., Burchak A. V. Prospects for determining the sorption properties of coal by the method of electron paramagnetic resonance. *Ugol Ukrainy*. 2001, no. 6, pp. 44–46.

11. Jiaxun Liu, Xiumin Jiang, Jun Shen, Hai Zhang Chemical properties of superfine pulverized coal particles. Part 1. Electron paramagnetic resonance analysis of free radical characteristics. *Advanced Powder Technology*. 2014, vol. 25, pp. 916–925.

12. Brazhe A. Shearlet-based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns. *Physical Review E*. 2018, vol. 97, no. 6, article 061301. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.061301.

13. Ulyanova E. V., Malinnikova O. N., Pashichev B. N., and Malinnikova E. V. Microstructure of coal before and after gas-dynamic phenomena. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2019, no. 5, pp. 10–17. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRI20190502.

14. Ulyanova E. V., Malinnikova O. N., Pashichev B. N. Influence of structural nonuniformity on features of thermal decomposition in coal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 71–81. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-71-81.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Захаров Валерий Николаевич*<sup>1</sup> — член-корреспондент РАН, директор ИПКОН РАН, e-mail: ipkon-dir@ipkonran.ru,

*Ульянова Екатерина Васильевна*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: ekaterina-ulyanova@yandex.ru,

*Малинникова Ольга Николаевна*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, зав. лабораторией, e-mail: olga\_malinnikova@mail.ru,

*Пашичев Борис Николаевич*<sup>1</sup> — аспирант, ведущий инженер, e-mail: borisnik-pa@yandex.ru,

<sup>1</sup> Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

**Для контактов:** Ульянова Е.В., e-mail: ekaterina-ulyanova@yandex.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.N. Zakharov*<sup>1</sup>, Corresponding Member

of the Russian Academy of Sciences, Director of IPKON, e-mail: ipkon-dir@ipkonran.ru,

*E.V. Ulyanova*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, e-mail: ekaterina-ulyanova@yandex.ru,

*O.N. Malinnikova*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, e-mail: olga\_malinnikova@mail.ru,

*B.N. Pashichev*<sup>1</sup>, Graduate Student, Leading Engineer, e-mail: borisnik-pa@yandex.ru,

<sup>1</sup> Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia,

**Corresponding author:** E.V. Ulyanova, e-mail: ekaterina-ulyanova@yandex.ru.

Получена редакцией 19.10.2021; получена после рецензии 25.10.2021; принята к печати 10.11.2021.

Received by the editors 19.10.2021; received after the review 25.10.2021; accepted for printing 10.11.2021.