

УДК 622.333:622.817.4

**ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЯ НА  
ГАЗОНАСЫЩЕННОСТЬ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ**

**О. Н. Малинникова, Е. В. Ульянова, А. В. Харченко, Б. Н. Пашичев**

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,  
E-mail: olga\_malinnikova@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Проведено исследование газоносности призабойной зоны угольных пластов ряда шахт АО “СУЭК-Кузбасс”. Установлено, что газоносность угля, отобранного со свежееобнаженной поверхности забоя, варьирует в широких пределах от 2.4 до 13.5 м<sup>3</sup>/т для исследованных пластов и составляет 32–60% от их природной газоносности. Показано, что угольные пласты с меньшими значениями газоносности призабойной зоны обладают более упорядоченной микроструктурой, которая оценивалась методом построения диаграмм “энтропия–сложность”, рассчитанных по цифровым снимкам поверхности углей при тысячекратном увеличении. Угли с более хаотично организованной микроструктурой могут удерживать большее количество метана и имеют более высокую как природную газоносность, так и газонасыщенность призабойной зоны пласта.

*Угольный пласт, призабойная зона, метан, газоносность, микроструктура, информационная энтропия*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200303

---

В долгосрочной программе развития угольной промышленности определено требование к снижению удельного показателя смертельного травматизма до уровня 0.05 чел/млн т. Для этого необходимо полностью исключить взрывы метана, вызванные загазированием выработок при ведении подземных горных работ, которые приводят к большому числу жертв. Однако, как в России, так и за рубежом еще недостаточно опыта работы современных высокопроизводительных шахт, обрабатывающих газоносные, тектонически нарушенные угольные пласты, разработка которых сопровождается высокой метанообильностью горных выработок, а иногда и их внезапными загазированием.

Процесс метановыделения из пластов в призабойное пространство лавы в значительной степени обусловлен природной газоносностью массива угля и интенсивностью его добычи в очистном забое [1–3]. Важным фактором газовой выделению в выработки при разрушении и транспортировке угля является газонасыщенность призабойной зоны пласта, так как уголь вблизи обнажения, несмотря на предварительную и естественную дегазацию, все еще может содержать значительные количества метана [4]. Газоносность призабойной зоны пласта во многом определяет загазированность выработок при ведении добычных и проходческих

работ и существенно влияет на режимы работы вентиляции, допустимую нагрузку на лаву и общий газовый баланс участка при разрушении призабойного массива угля и его транспортировке по выработкам [5, 6].

Угольные пласты Кузбасса, при общей тенденции увеличения газоносности с глубиной, обладают различной способностью к накоплению, удержанию и отдаче метана, зависящей от связи метана с угольным веществом, что приводит как к различной природной газоносности, так и различной газонасыщенности призабойной зоны пласта [7–11]. Несмотря на многочисленные исследования в этой области, взаимосвязи метана с углем еще недостаточно изучены. Они определяют сорбционные и газокинетические свойства угля и зависят не только от распределения пустот (пор, микротрещин), наполненных газом [3, 12, 13], но в большей степени от неоднородности структуры угля на микроуровне [14, 15].

Интерес к исследованиям микроструктуры угля и определению ее влияния на сорбционные [12], физико-механические [16, 17] и другие свойства продолжает расти. Особенности микроструктуры угля исследуются с использованием электронной микроскопии [18], компьютерной томографии [19], рамановской и инфракрасной спектроскопии [12], микроиндентирования [20]. Применение современных методов позволяет описать микроструктуры углей фрактальными моделями по распределению пор [18] и проницаемости [21] или моделью с частично перколяционными областями [22]. Однако еще недостаточно изучено влияние микроструктуры угля на характер протекающих в нем процессов, а поскольку традиционные экспериментальные методы не могут непосредственно выявить микроструктуру угля [19], нужно искать новые методы исследования и описания особенностей строения угля на микроуровне и их связи со свойствами и состоянием углей на макроуровне.

Неоднородность, хаотичность структуры углей находит свое отражение в рельефе поверхности изломов угольных образцов, что позволяет при исследовании их микроструктуры использовать информацию, полученную по цифровым снимкам поверхности угольных образцов, сделанных сканирующим электронным микроскопом. Для описания неоднородности микроструктуры углей применялся метод, предложенный в [23] и адаптированный под исследование ископаемых углей [24, 25]. Использовались значения информационной энтропии и статистической сложности, рассчитанные по цифровым снимкам поверхности углей.

Информационная (статистическая) энтропия является мерой хаотичности системы, а ее расчет основан на определении распределения шиарлет-коэффициентов исходного изображения. Шиарлеты обладают расширенным набором характеристик, в том числе благодаря дополнительно введенному параметру сдвига, что выгодно выделяет их на фоне других функций, используемых при аналогичной обработке изображений, таких, как синусоиды в фурье-преобразовании, вейвлеты, курвлеты и т. п. Поэтому при количественном описании неоднородности (хаотичности) строения микроструктуры угля расчет энтропии и сложности проводился на основании шиарлет-преобразования цифровых снимков поверхности угольных образцов [23–25].

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОНОСНОСТИ УГЛЯ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ ПЛАСТА**

Определение газоносности месторождений проводится как на стадии геологоразведки, так и в процессе разработки угольных пластов. Данные о газоносности месторождений, получаемые при разведке, создают основу для прогноза метанообильности горных выработок. Сложный характер распределения метана в углепородном массиве, связанный с природными осо-

бенностями месторождений, делает полученные представления о пространственном распределении метанообильности обрабатываемого блока угольного пласта приближенными и схематичными. Наиболее достоверная информация о природной газоносности и газоносности частично дегазированного угля в призабойной зоне пласта в непосредственной близости от его обнажения может быть получена при измерении этих параметров в обрабатываемых очистных и проходческих забоях.

В ИПКОН РАН разработана методика определения газоносности разрабатываемых угольных пластов, которая легла в основу Руководства по безопасности, утвержденного Ростехнадзором [26]. Образцы угля отбираются в герметичные пластиковые контейнеры и/или в керноотборники. Методика предусматривает определение объема полного газовыделения из угольного керна в несколько этапов: измерения объемов газа, выделяющегося из угольного керна непосредственно в шахте (с учетом рассчитанного объема газа, “потерянного” при выбуривании керна) —  $V_1$ ; объемы газа, выделившегося из керна в лаборатории при атмосферном давлении —  $V_2$ ; объемы остаточного газа, выделившегося из пробы керна при измельчении в герметичной мельнице до крупности 0.2 мм —  $V_3$ .

Измерение объема газа  $V_1$  проводится в шахте сразу после извлечения керна и помещения его в контейнер или керноотборник с подсоединенной переносной установкой для измерения объема выделяющегося газа. Объем газа  $V_2$  определяется на подобной установке непосредственно в лаборатории после доставки туда контейнера, через 2–3 ч. Измерение объема выделившегося газа  $V_3$  происходит также в лаборатории при помещении части керна в герметичную мельницу, подключенную к системе измерения объема выделяющегося газа. Для каждой отобранной пробы делается анализ зольности, влажности и плотности угля для пересчета полученного объема газа в метаноносность на тонну угля сухой беззольной массы (т с. б. м.). В табл. 1 приведены примеры расчета газоносности угля вблизи обнажения (призабойной зоны) для двух пластов шахт СУЭК-Кузбасс. Установлено, что несмотря на то, что на пласте Польшаевский-2 проводилась предварительная дегазация и призабойная зона пластов активно дегазируется, уголь содержит еще довольно много метана, количество которого варьирует в широких пределах 3.5–13.5 м<sup>3</sup>/т с. б. м.

Усредненные для каждой пробы значения природной газоносности  $X$  и газоносности угля в призабойной зоне  $Q$  (рис. 1) показывают, что эти величины на одной глубине могут сильно различаться, причем для углей шахты им. С. М. Кирова ( $X1, Q1$ ) газоносность заметно выше, чем для угольных пластов шахты им. А. Д. Рубана ( $X2, Q2$ ). Коэффициент дегазации обрабатываемого угольного массива впереди очистного забоя  $k = (X - Q) / X$  (рис. 2) для углей пластов шахты им. А. Д. Рубана ( $k2$ ) ниже, чем для шахты им. С. М. Кирова ( $k1$ ). Среднее значение коэффициента дегазации для углей шахты им. С. М. Кирова  $k1_{cp} = 0.56$ , для углей пластов шахты им. А. Д. Рубана  $k2_{cp} = 0.42$  (рис. 2), что частично объясняется проведенной дегазацией углей шахты им. С. М. Кирова. Кроме того, видно, что коэффициент дегазации зависит от свойств и состояния угля в призабойной зоне пласта, а не от глубины ведения горных работ. Все это позволяет предположить, что причины различий в газоносности и газоотдаче пластов нужно искать в особенностях микроструктуры углей.

ТАБЛИЦА 1. Примеры определения значений газонасыщенности призабойной зоны угольных пластов в 2019 г. на шахтах СУЭК-Кузбасс

Участок	№ п/п	$V_1$ , мл	$m_1$ , кг	$V_2$ , мл	$m_2$ , кг	$V_3$ , мл	$m_3$ , г	$W^a$ , %	$A^d$ , %	Вычисленные значения, м <sup>3</sup> /т с. б. м.			
										$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_{oi}$
03.04.2019, шахта им. С. М. Кирова, Поленовский													
КП 25-97	1	818	870	1376	870	790	160	4.4	3.8	1.02	1.70	5.31	8.0
	2	186	1026	1270	1026	918	160	2.2	3.4	0.20	1.34	6.22	7.8
	3	804	1646	2568	1646	909	160	3.3	10.0	0.56	1.78	6.47	8.8
	4	2455	505	1160	505	855	160	4.4	3.8	5.23	2.47	5.75	13.5
	5	491	246	720	246	990	160	2.2	3.4	2.16	3.17	6.71	12.1
	6	269	589	110	589	980	160	3.2	10.0	0.52	0.21	6.98	7.7
	7	70	82	330	82	510	82	3.3	3.7	0.91	4.30	6.65	11.9
15.05.2019, шахта им. А. Д. Рубана, Польшаевский-2													
ДВШ 816	1	231	439	45	439.0	403	160	7.7	6.0	0.61	0.12	2.92	3.7
	2	290	654	71	653.6	470	160	7.7	6.0	0.51	0.13	3.40	4.0
Лава 814	1	138	625	53	625.0	456	160	7.1	1.5	0.24	0.09	3.12	3.5
	2	57	601	71	601.0	519	160	7.1	1.5	0.10	0.13	3.55	3.8

Примечание:  $V_1$ ,  $V_2$ , и  $V_3$  — объемы газа, выделившегося из угля в шахте, лаборатории и при размоле угля соответственно;  $m_1$ ,  $m_2$  — масса угля, помещенного в контейнер,  $m_3$  — масса угля, помещенного в герметичную мельницу;  $W^a$  и  $A^d$  — влажность и зольность угля соответственно. Значение газонасыщенности призабойной зоны рассчитывается как сумма составляющих, определенных в шахте, лаборатории и при размоле угля:  $Q_{oi} = Q_1 + Q_2 + Q_3$

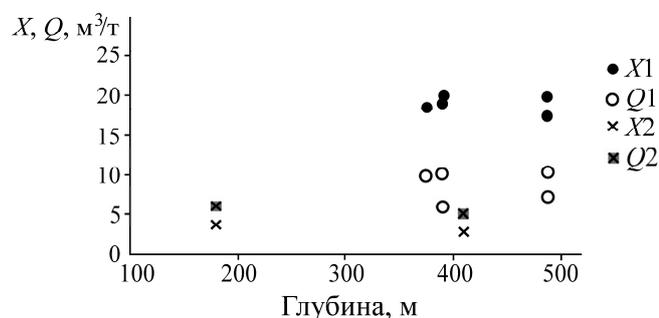
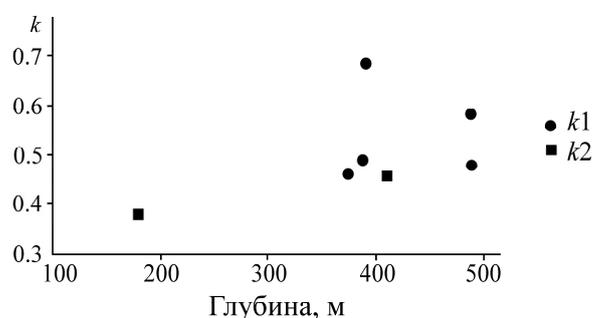
Рис. 1. Природная газонасыщенность  $X$  и газонасыщенность угля вблизи обнажения  $Q$ 

Рис. 2. Значения коэффициентов дегазации угольных пластов

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЯ

Электронно-микроскопические исследования поверхности образцов углей проведены на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6610LV.

Для получения наиболее полной и достоверной информации о структуре углей при их исследовании под микроскопом из каждой пробы угля отбирались кусочки, наиболее полно ее представляющие: с блестящей поверхностью, матовой и полосчатой, не менее 3–4 образцов из пробы. На каждом образце делалась серия снимков (не менее 10) в разных точках, что позволило получить 30–40 снимков для каждой пробы. На рис. 3 показано разнообразие рельефов поверхности углей одной пробы при тысячекратном увеличении различных участков угля из пласта Польшаевский-2 шахты им. А. Д. Рубана; то же наблюдается и для других углей.

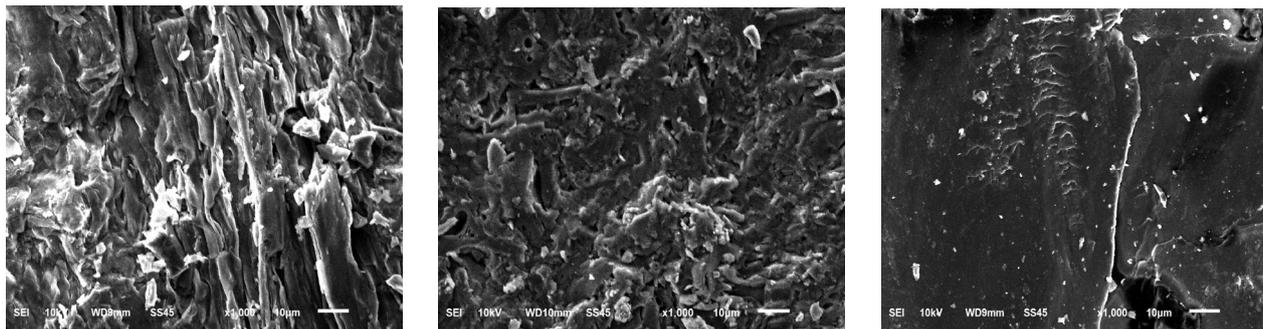


Рис. 3. Снимки различных участков поверхности угля из одной пробы

Во всех пробах есть участки с большим количеством мелких образований и довольно гладкие, однородные поверхности, и только специальные методы статистической обработки снимков позволяют выявить некоторые закономерности в этом структурном хаосе. Полученные цифровые изображения поверхности углей использованы для количественной оценки степени упорядоченности микроструктуры угля в системе координат “энтропия – сложность”.

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

— разложение изображения, электронной микрофотографии угля, на коэффициенты, характеризующие локальную анизотропию и ориентацию основных структур, при помощи дискретного шарлет-разложения; нормализация квадратов коэффициентов и интерпретация полученных значений как функции плотности распределения структур различного масштаба и ориентации в обрабатываемом распределении;

— на основании полученного распределения определяется относительная энтропии Шеннона  $S$  и, на сравнении ее с энтропией равновероятного распределения; вводится понятие статистической сложности  $C$  как произведение энтропии на расхождение между наблюдаемым и равновероятным распределением.

Введенная таким образом сложность должна соответствовать отклонению в распределении структурных неоднородностей от равновероятного и обращаться 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 [23 – 25].

Поскольку разброс значений “энтропия – сложность” по поверхности одного цифрового изображения достаточно велик, для дальнейшего анализа рассчитывается его среднее значение для каждого изображения. Полученные точки, нанесенные на диаграммы “энтропия – сложность”, характеризуют распределение структурных неоднородностей в образце.

На рис. 4 приведены рассчитанные значения энтропии и сложности для двух проб углей из табл. 1 и еще двух, отобранных из тех же шахт на месяц раньше. Приведенные пробы углей выбраны потому, что угольные пласты шахты им. А. Д. Рубана обладают наименьшей, а пласты шахты им. С. М. Кирова — наибольшей газоносностью призабойной зоны из общего количества обследованных угольных пластов АО “СУЭК-Кузбасс”.

Для каждой диаграммы (рис. 4) определены статистические характеристики: среднее арифметическое значение (черный ромб) и медиана (черный квадрат). Экспериментально полученные значения газоносности призабойной зоны для этих угольных проб и статистические характеристики рассчитанных значений энтропии  $H$  и сложности  $C$  представлены в табл. 2.

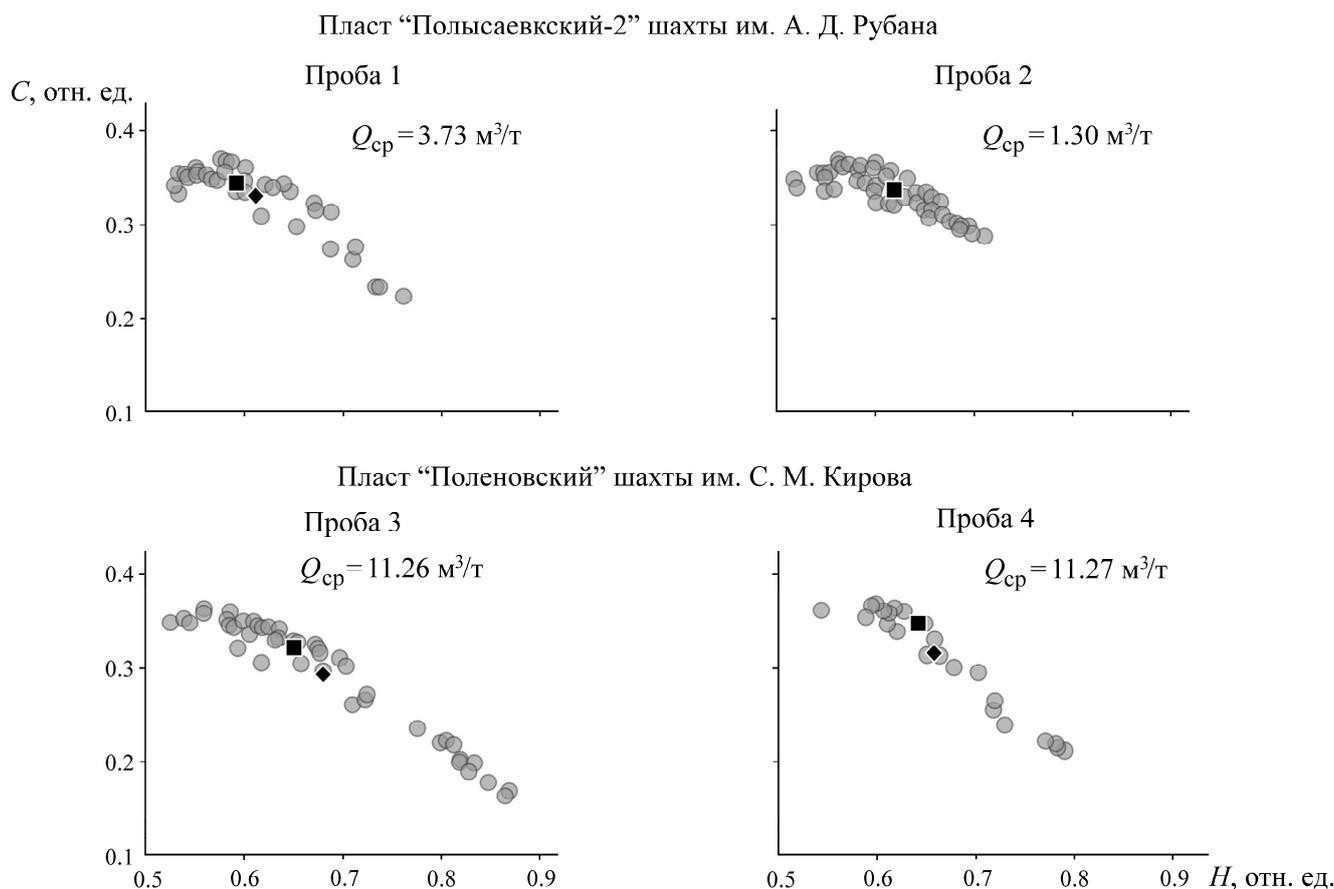


Рис. 4. Диаграммы распределения значений “энтропия–сложность” для серий снимков поверхности образцов угля (табл. 2)

### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенных диаграмм (рис. 4) и табл. 2 видно, что угли шахты им. А. Д. Рубана с меньшими значениями газоносности призабойной зоны пласта (в среднем  $1.3–3.7 \text{ м}^3/\text{т}$ ) обладают более упорядоченной микроструктурой. Наибольшее значение энтропии не опускается ниже  $0.72$  отн. ед. Среднее арифметическое значение и медиана совпадают и равны  $0.62$  отн. ед. Угли шахты им. С. М. Кирова с высокой газоносностью (рис. 1), в среднем  $11–12 \text{ м}^3/\text{т}$ , показывают более хаотичную структуру, с максимальными значениями энтропии  $0.88$  отн. ед. Среднее арифметическое значение равно  $0.68$  отн. ед. Разброс значений  $H$  и  $C$  для углей шахты им. А. Д. Рубана также значительно меньше, чем для углей шахты им. С. М. Кирова (табл. 2). Это свидетельствует о том, что угли с меньшей газоносностью структурно более упорядочены.

Это, казалось бы, парадоксальный результат, так как хорошо известно, что уголь, имеющий более высокую степень неоднородности на макроуровне, в разгруженном состоянии в призабойной зоне и тем более при обнажении быстрее отдает газ и должен показывать меньшие значения газонасыщенности. Но в рассматриваемом случае неоднородность микроструктуры и полученный результат хорошо объясняется исследованиями, проведенными раньше на КР- и ЭПР-спектрометрах, для углей Донбасса [15] той же стадии метаморфизма угольного вещества со значением  $V^{daf}$  примерно  $42\%$ , что и угли шахты им. А. Д. Рубана и шахты им. С. М. Кирова.

ТАБЛИЦА 2. Сопоставление данных лабораторных исследований газоносности и статистических характеристик распределения значений “энтропия – сложность” угольных проб

Дата	Шахта, пласт	Место отбора	Вычисленные значения $Q$ , м <sup>3</sup> /т	Среднее значение $Q_{cp}$ , м <sup>3</sup> /т	Разброс энтропии $H$ , отн. ед.	Разброс сложности $C$ , отн. ед.
15.05. 2019	им. А. Д. Рубана, Польшаевский-2	ДВШ 816	3.65	3.7	0.23	0.140
			4.04			
			3.45			
Лава 814		3.78				
		Лава 812	1.32			
			0.30			
Проходка	0.21					
	2.79					
	1.89					
20.03. 2019	им. С. М. Кирова, Поленовский	Лава 25-97-1	11.48	11.26	0.38	0.250
11.03						
11.27						
КП 2597		13.45				
		12.05				
		7.71				
03.04. 2019			11.27	0.25	0.150	
			11.86			

На рис. 5 для углей с различной газоносностью показаны  $N$ -концентрации парамагнитных центров ЭПР-спектров, которые характеризуют количество свободных радикалов, связанных с оборванными связями в алифатической части угля, и приведены значения ширины  $G$ -полосы КР-спектров этих же углей, зависящей от сочетания количества и длины сопряженных цепочек, а также размеров графитоподобных кластеров в исследуемом веществе.

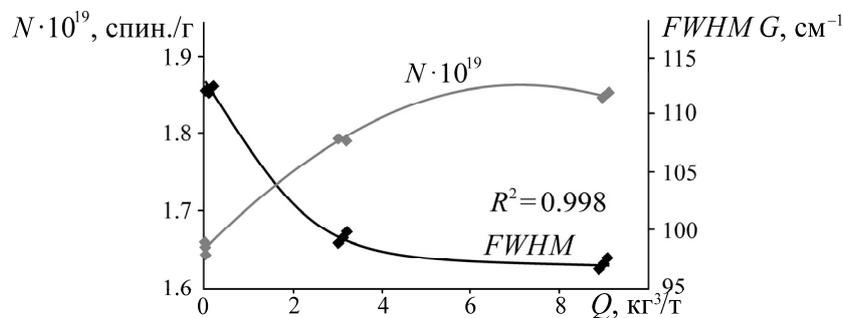


Рис. 5. Корреляционное поле структурных показателей ЭПР- и КР-спектров углей с их газоносностью  $Q$ :  $N \cdot 10^{19}$  спин/г — концентрация парамагнитных центров ЭПР-спектров;  $FWHM G$  — ширина  $G$ -полосы КР-спектров

В случае сочетания максимального значения  $FWHM G$  с низкой концентрацией парамагнитных центров  $N$  можно с уверенностью предположить, что структура угля состоит из длинных цепочно-сопряженных фрагментов и вследствие этого содержит наименьшее количество оборванных связей. В этом случае структура угля хорошо упакована (по аналогу с полимером) и остается мало не скомпенсированных групп, способных участвовать в образовании и удержании метана.

Высоким значениям концентрации парамагнитных центров  $N$  соответствует большее количество неспаренных электронов, локализованных в местах разрывов химических связей, которое возможно при механохимических процессах и указывает на более высокую неоднородность микроструктуры угля. Увеличение количества парамагнитных центров, а значит, и обор-

ванных связей, и уменьшение длины цепочечных фрагментов коррелирует с возрастанием количества содержащегося в угле метана. То есть более неоднородная структура угля, с большим количеством оборванных связей позволяет ему удерживать большее количество метана.

### ВЫВОДЫ

Определение газонасыщенности призабойной зоны угольных пластов, проведенное на ряде шахт АО “СУЭК-Кузбасс”, показало, что уголь в зоне обнажения пласта содержит еще довольно много метана, причем его количество в угле варьирует в широких пределах. Природная газонасыщенность пластов и газонасыщенность пласта вблизи обнажения, при общей тенденции увеличения с глубиной для каждого пласта, не определяются глубиной горных работ, а зависят от особенностей микроструктуры угля.

Оценка упорядоченности микроструктуры угля с помощью диаграмм “энтропия–сложность”, рассчитанных по цифровым снимкам их поверхности, показала, что пласты с меньшими значениями газонасыщенности призабойной зоны (в среднем  $1.3–3.7 \text{ м}^3/\text{т}$ ) обладают более упорядоченной структурой на микроуровне, тогда как микроструктура углей с более высокой газонасыщенностью (в среднем  $11–12 \text{ м}^3/\text{т}$ ) является значительно более хаотичной, неупорядоченной. Это объясняется тем, что неоднородность микроструктуры угля связана с разрывом химических связей и образованием не скомпенсированных групп (свободных радикалов), увеличение которых, видимо, и позволяет удерживаться большому количеству метана в угле.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубан А. Д., Забурдяев В. С. Оценка эффективности дегазации разрабатываемых угольных пластов // Уголь. — 2010. — № 11. — С. 10 — 13.
2. Алексеев А. Д., Каркашадзе Г. Г., Васильковский В. А., Стариков Г. П., Спозакин А. И. Совершенствование методики расчета нагрузки на очистной забой с учетом давления метана в угольном пласте // Горн. журн. — 2009. — № 4. — С. 47–50.
3. Alexeev A. D., Feldman E. P., and Vasilenko T. A. Methane desorption from a coal-bed, Fuel, 2007, Vol. 86, No. 16. — P. 2547–2580.
4. Забурдяев В. С. Метанообильность угольных шахт // Безопасность труда в пром-сти. — 2013. — № 8. — С. 60–64.
5. Забурдяев В. С. Метанообильные шахты: газонасыщенность, метановыделение, дегазация // Безопасность труда в пром-сти. — 2012. — № 11. — С. 28–32.
6. Забурдяев В. С. Выделение метана из отбитого в очистном забое угля // Безопасность труда в пром-сти. — 2019. — № 11. — С. 13–17.
7. Забурдяев В. С. Влияние петрографического состава углей на газоотдачу в скважины // Безопасность труда в пром-сти. — 2019. — № 1. — С. 14–18.
8. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов. — Киев: Наук. думка, 2010. — 422 с.
9. Лукинов В. В., Пимоненко Л. И., Барановский В. И., Гуня Д. П., Ткаченко А. В. Петрографические и физические характеристики угольного вещества из кинкбандов // Уголь Украины. — 2012. — № 2. — С. 36–38.
10. Шепелева С. А., Дырдин В. В., Ким Т. Л., Смирнов В. Г., Гвоздиков Т. Н. Метан и выбросоопасность угольных пластов. — Томск: ТГУ, 2015. — 178 с.
11. Булат А. Ф., Минеев С. П., Прусова А. А. Генерирование сорбированного метана, обусловленное релаксационным механизмом деформирования молекулярной структуры угля // ФТПРПИ. — 2016. — № 1. — С. 91–99.

12. **Feng Yan-Yan, Jiang Cheng-Fa, Liu Dai-Jun, and Chu Weib.** Microstructure and its influence on CH<sub>4</sub> adsorption behavior of deep coal, *Chinese Phys. B*, 2014, Vol. 23, No. 2 (2014) 028201. DOI: 10.1088/1674-1056/23/2/028201.
13. **Tang Z., Yang S., Zhai C., and Xu Q.** Coal pores and fracture development during CBM drainage: Their promoting effects on the propensity for coal and gas outbursts, *J. Natural Gas Sci. and Eng.*, 2018, Vol. 51. — P. 9–17.
14. **Ульянова Е. В., Малинникова О. Н., Долгова М. О., Зверев И. В. Бурчак А. В., Молчанов А. Н., Пичка Т. В.** Структура и метаноносность ископаемых углей // ХТГ. — 2016. — № 4. — С. 3 — 8.
15. **Ульянова Е. В., Малинникова О. Н., Бурчак А. В., Балалаев А. К., Барановский В. И.** Газоносность и структура ископаемых углей Донецкого бассейна // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 60–68.
16. **Li Q., Chen J., and He J.** Physical properties, vitrinite reflectance, and microstructure of coal, Taiyuan Formation, Qinshui Basin, China, *Appl. Geophys.*, 2017, Vol. 14, No. 4. — P. 480–491. <https://doi.org/10.1007/s11770-017-0651-8>
17. **Zhao Y., Song H., Liu S., Zhang C., Dou L., and Cao A.** Mechanical anisotropy of coal with considerations of realistic microstructures and external loading directions, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2019, Vol. 116. — P. 111 — 121. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2019.03.005>
18. **Bo Han, Guang-yin Lu, Zi-qiang Zhu, You-jun Guo, and Yun-wei Zhao.** Microstructure features of powdery coal-bearing soil based on the digital image measurement technology and fractal theory, *Geotech. and Geolog. Eng.*, 2019, Issue 3. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0691-8>
19. **Wang Gang, Zhang Xiaoqiang, Yang Xinxiang, Sun Lulu, and Qu Hongyuan.** Establishment and application study of digital model for coal microstructure based on CT images, *J. of Eng. Sci. and Technol. Rev.*, 2016, Vol. 9, No. 4. — P. 177–184.
20. **Kossovich E. L., Epshtein S. A., Prosina V. A., Borodich F. M., Galanov B. A., and Minin M. G.** Mechanical, structural and scaling properties of coals: depth-sensing indentation studies, *App. Phys. A: Materials Sci. and Proc.*, 2019, Vol. 125, No. 3. — P. 195.
21. **Liu G., Liu J., Liu L., Ye D., and Gao F.** A fractal approach to fully-couple coal deformation and gas flow, *Fuel*, 2019, Vol. 240. — P. 219–236. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.140>
22. **Wang H., Zhang J., Yang Y S., Li R., Li J., Yang J., and Liu K.** Microstructure-based multi-scale evaluation of fluid flow in an anthracite coal sample with partially-percolating voxels, *Modelling and Simulation in Materials Sci. and Eng.*, 2019, Vol. 27, No. 6. — P. 1–13. <https://doi.org/10.1088/1361-651X/ab1b02>
23. **Brazhe A.** Shearlet-based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns, *Phys. Rev. E*, 2018, Vol. 97, No. 6. — P. 061301–061307. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.061301
24. **Malinnikova O., Uchaev Dm., Uchaev D., Malinnikov V., and Ulyanova E.** “Complexity-entropy” diagrams and their application to the study of coal tectonic disturbance, *E3S Web of Conf.*, 2019, Vol. 129. — P. 01016–01023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912901016>
25. **Ульянова Е. В., Малинникова О. Н., Пашичев Б. Н. Малинникова Е. В.** Микроструктура ископаемых углей до и после газодинамических явлений // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 10–17.
26. **Руководство по безопасности “Рекомендации по определению газоносности угольных пластов”.** — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017. — Сер. 5. — Вып. 48. — 44 с.

*Поступила в редакцию 18/V 2020*

*После доработки 26/V 2020*

*Принята к публикации 29/V 2020*