

Докт. техн. наук С. И. Скипочка,
докт. техн. наук Т. А. Паламарчук
(ИГТМ НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ УГОЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА

Приведено результати лабораторних досліджень мікроструктури вугільної речовини.

RESEARCH OF MICROSTRUCTURE OF COAL MATTER

The results of laboratory researches of microstructure of coal matter are resulted.

Известно, что газоносность угольных пластов и вмещающих пласт горных пород изменяется в широких пределах в зависимости от геолого-тектонического строения и возраста месторождения, масштабов угленасыщения, степени катагенеза пород и углей, коллекторских свойств пород, их дислоцированности и множества иных факторов. Кроме того, в результате механического воздействия на угольный пласт происходит дробление угольного вещества и минеральных включений, которые, на наш взгляд, и, по мнению ряда исследователей, являются природными катализаторами процесса генерации метана угольным веществом. Чтобы эффективно противостоять как нормальным, так и аномальным проявлениям метана в выработках угольных шахт, очень важно знать:

- природу и механизмы образования метана в угольных пластах;
- фазовые состояния, в которых метан находится в угольных пластах;
- что является спусковым механизмом интенсивного выделения метана в выработках, в чем причины и механизмы аномальных газовых проявлений в шахтах, в частности, внезапных выбросов метана, при которых его объемы на порядок превышают естественную газоносность пласта.

Основные научно-практические результаты, отвечающие на эти вопросы, можно получить методами экспериментальной физики, что и реализуют на протяжении последних десятилетий ученые ряда стран. Однако объем этих исследований пока недостаточен, чтобы разработать окончательную модель поведения системы «уголь-газ».

В основу нашего анализа и выводов положены результаты экспериментальных исследований, полученных методами рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа, металлографии и электронной микроскопии. Исследования выполнены совместными усилиями с привлечением специалистов и оборудования кафедр металлофизики и радиоэлектроники Днепропетровского национального университета [1].

Параллельно с рентгеноструктурным анализом осуществляли исследования микроструктуры углей на микро- и наноуровнях с помощью электронного оптического микроскопа “Аксиоверт 250М МАТ” и растрового электронного микроскопа РЭММА 102-02, в состав которого входит рентгеновский энергодисперсионный анализатор ЭДАР, позволяющий проводить точечный рентгеноструктурный анализ угольного вещества. Кроме того, была выполнена металлография образцов угля (№№ 1к, 3к, 4к) марки К, отобранных по одному и тому же шахтопласту на различной глубине.

Наиболее характерные результаты электронно-оптических исследований на микроуровне угольного вещества, относящегося к классам выбросоопасных и невыбросоопасных углей, отобранных в различных регионах Украины, приведены на рис. 1-5.

Из рисунков следует, что для микроструктуры антрацита и углей Павлоградского региона характерно наличие на фоне основной матрицы (АФ) небольших пор, равномерно распределенных по всему объему образца. Объемную долю пор определяли по методу секущих [2]. Объемная доля пор для антрацита и углей Западного района Донбасса составляет 1-2% и 2-4%, соответственно, а размеры пор 5-16 мкм и 15-60 мкм, соответственно.

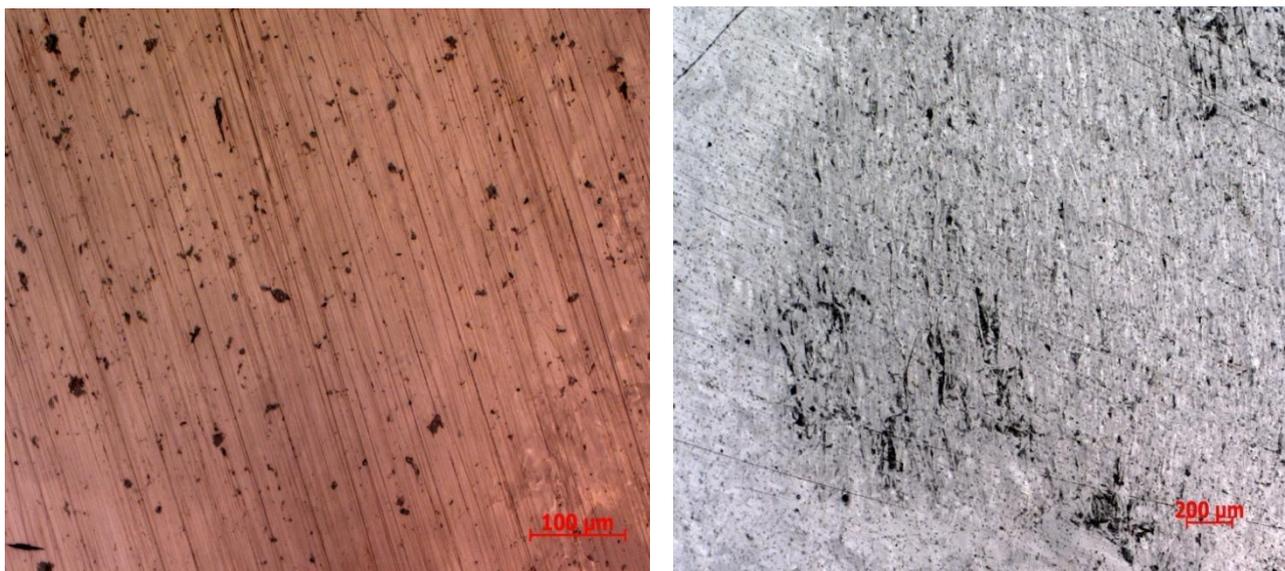


Рис. 1 – Микроструктура антрацитов

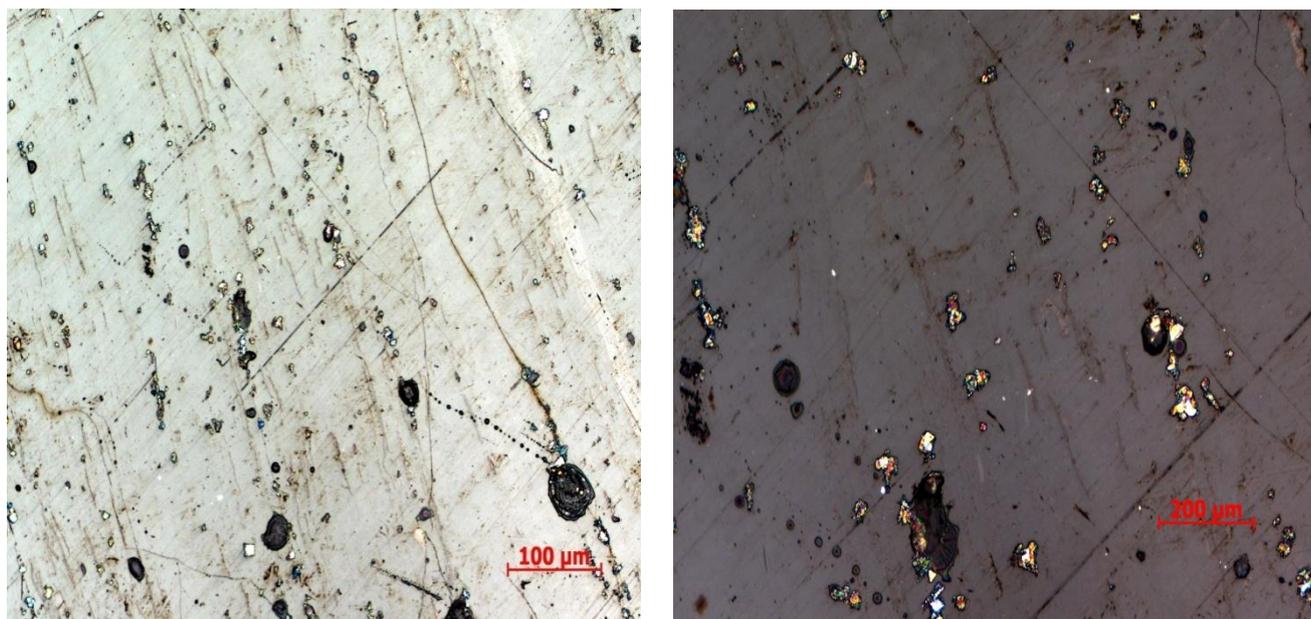


Рис. 2 – Микроструктура невыбросоопасных углей шахт Западного района Донбасса

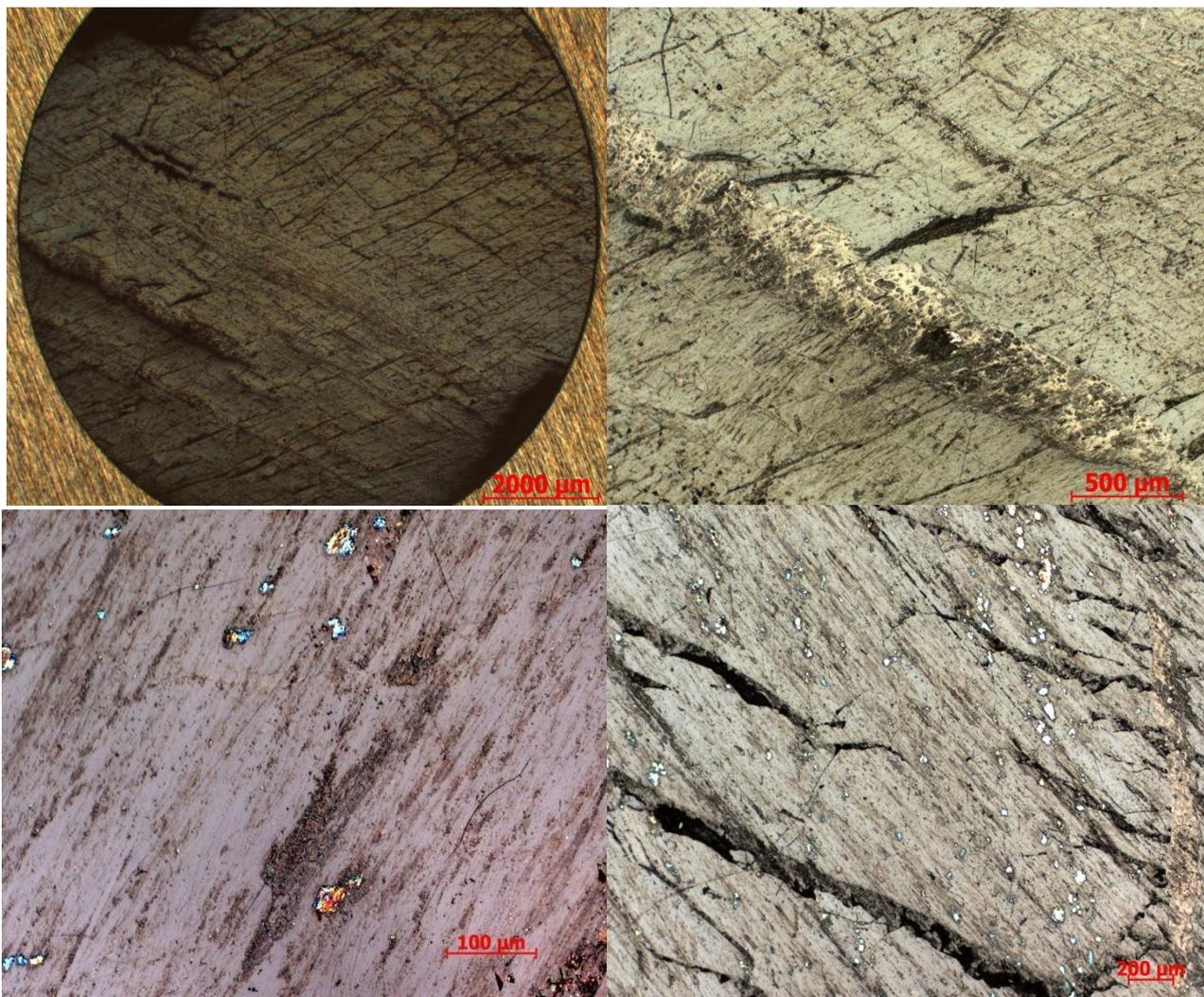


Рис. 3 – Микроструктура угля марки Ж

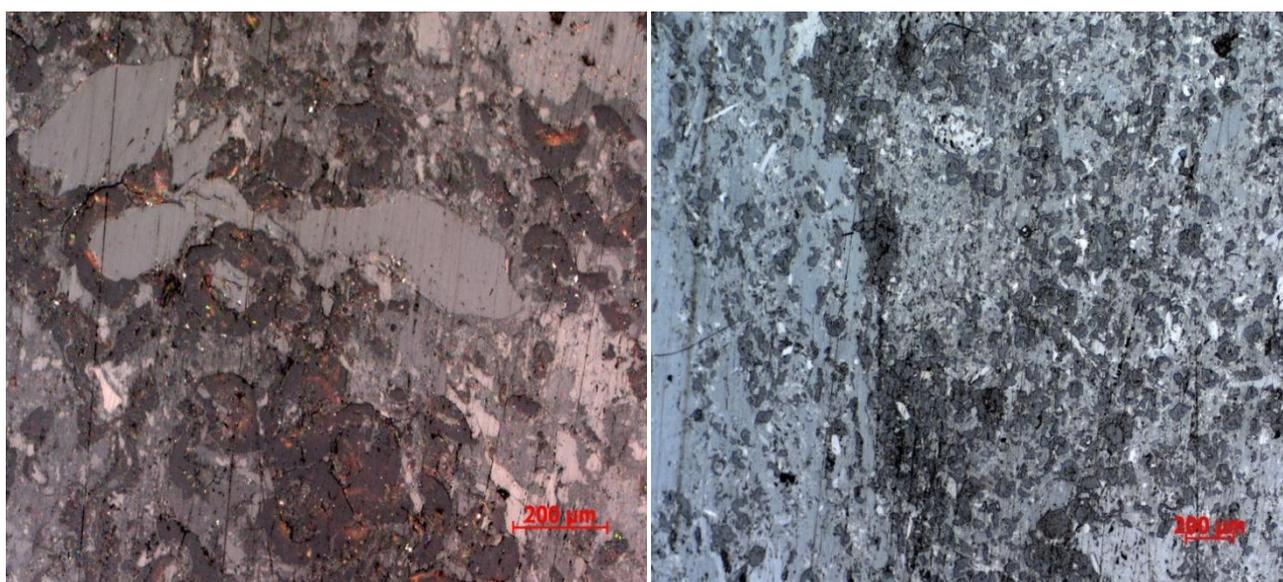


Рис. 4 – Микроструктура вибросоопасного угля пл. t_3
(шахта им. А.Ф. Засядько)

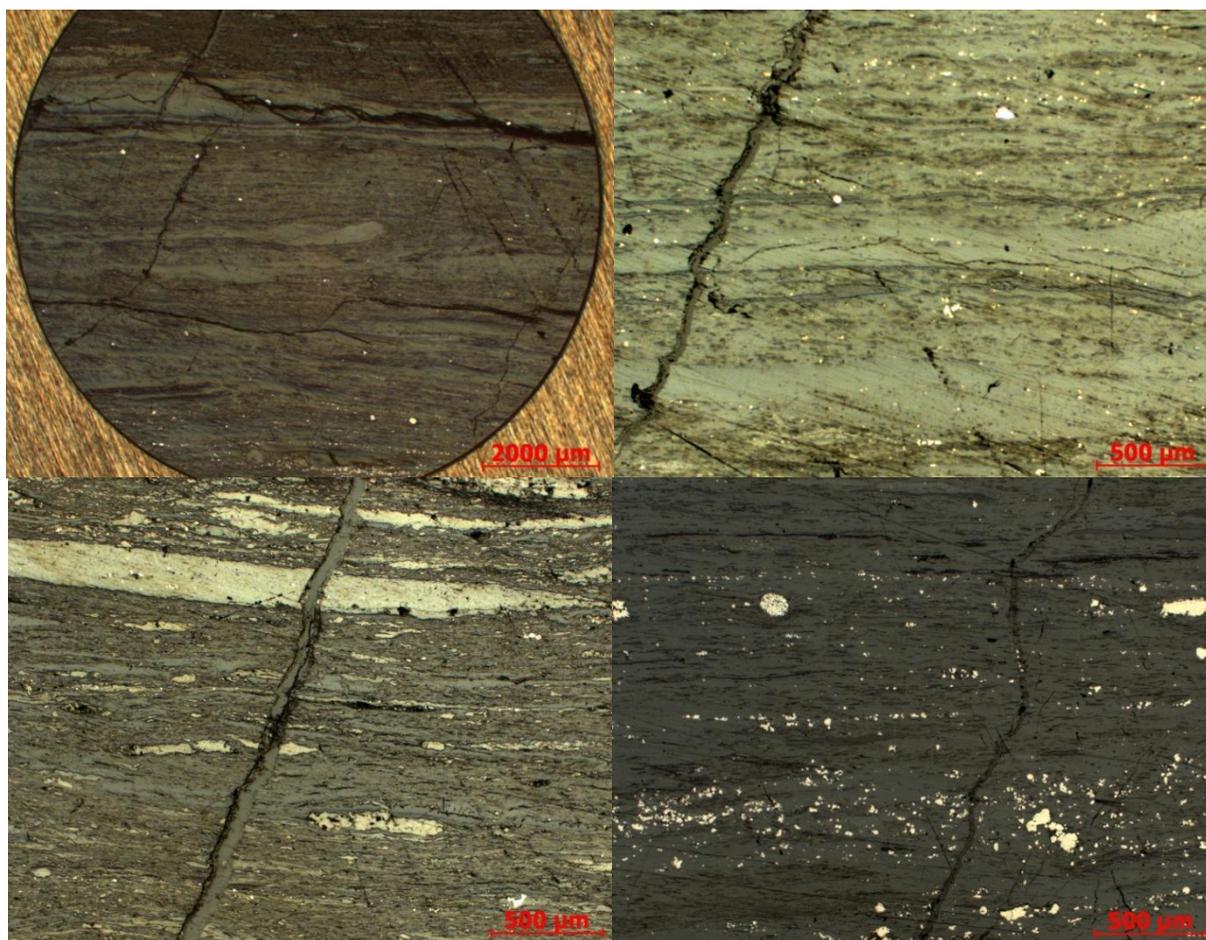


Рис. 5 – Микроструктура невыбросоопасных углей Восточного района Донбасса

В микроструктуре невыбросоопасных углей Восточного района Донбасса на фоне основной матрицы (АФ) отчетливо видны протяженные трещины. Кроме того, в структуре присутствуют включения других фаз (табл. 1). Относительная доля пор и трещин составляет 4-5 %, а размеры пор 3-18 мкм.

Отличительной особенностью микроструктур выбросоопасных углей Донецкого региона (АП «Шахта им. А.Ф. Засядько») является наличие более протяженных пор по всему объему образца. Из рисунков видно, что включения располагаются, в основном, в этих порах. Относительная доля пор для этих углей составляет 6-8%, а размеры пор 30-100 мкм.

Количество, размеры и особенности расположения пор могут быть связаны с различной склонностью углей к выбросоопасности. Так для углей шахты им. А.Ф. Засядько доля пор примерно в два раза больше, чем для углей Павлоградского региона.

На рис. 6-8 приведены результаты металлографии образцов угля (нумерация в соответствии с табл. 2) с увеличением $\times 100$ (а) и $\times 400$ (б).

Обработка металлограмм показала, что в диапазоне глубин (300-700 м) залегания угля изменяется его структура. В частности, в образцах, отобранных на меньшей глубине наблюдается относительно небольшое количество пор, которые распространены равномерно по всему образцу.

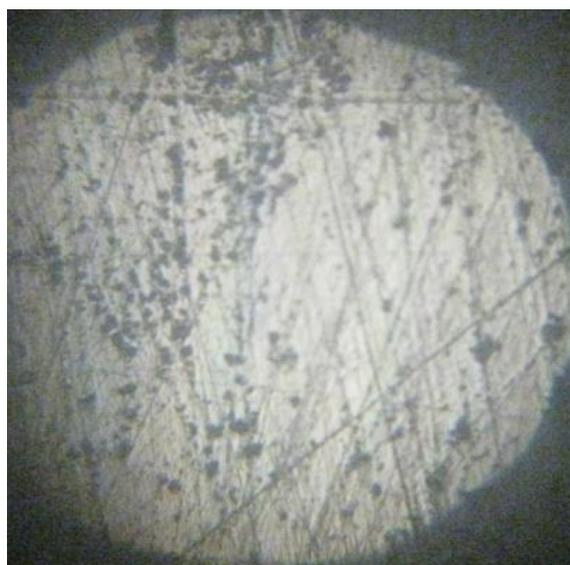
Таблица 1 – Фазовый состав углей

Номер пробы в соответствии с табл. 2	Фазовый состав
608	аморфная фаза (АФ), малая доля кристаллической фазы, FeS ₂ , следы Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃
617	АФ, FeS ₂ , FeO или Fe ₂ O ₃
621	АФ, FeS ₂ , следы окислов и Si
1	АФ, FeS ₂ , Fe ₂ O ₃
1 (отожженная при температуре 550 °С)	АФ, FeS ₂ , Fe ₂ O ₃ (Fe ₃ O ₄)
623	АФ, FeS ₂ , следы окислов
613	АФ, FeS ₂ , SiO ₂ , Fe ₂ O ₃
635	АФ, кристаллическая фаза, FeS ₂ , Fe ₂ O ₃ , следы Al ₂ O ₃
1063	АФ, FeS ₂ , β-SiO ₂ , CaCO ₃
1068	АФ, FeS ₂ , β-SiO ₂ , Si, S, следы Fe ₂ O ₃
Антрацит	АФ
Осажденный углерод	АФ
1д	АФ, FeS ₂ , Fe ₂ O ₃
2д	АФ, FeS ₂ , Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃
3д	АФ, β-SiO ₂ , β-Al ₂ O ₃ (H ₂ O)
4д	АФ, FeS ₂ , Fe ₂ O ₃
1к	АФ, Al ₂ O ₃ SiO ₂ , α-SiO ₂
2к	АФ, α-SiO ₂ , β-Al ₂ O ₃ (H ₂ O)
3к	АФ, SiO ₂ (β-кристаллоболит), β-Al ₂ O ₃ (H ₂ O)
4к	АФ, монтмориллонит (Si _{3.77} Al _{2.03} Fe _{0.03} Mg _{0.2} O ₁₁), Al ₂ O ₃ SiO ₂

Таблица 2 – Информация о месте отбора проб углей

Проба	Шахта, глубина отбора	Место отбора	Марка	Дополнительные сведения
1	2	3	4	5
1	им. А.Ф. Засядько, гор. 1235 м	пл. 1 ₁ , 13-я восточная лава	К	выбросоопасный уголь
2	«Терновская», гор. 245 м	пл. С ₅ , 564-й сборный штрек	ДГ	невыбросоопасный уголь
608	им. А.Ф. Засядько, гор. 1235 м	пл. т ₃ , 17-й ЗКШ, ПК43+6	Ж	материал выброса угля
613	им. А.Ф. Засядько, гор. 1235 м	пл. т ₃ , 17-й ЗКШ, ПК43+6	Ж	материал выброса угля
617	им. А.Ф. Засядько, гор. 1235 м	пл. т ₃ , 17-й ЗКШ, ПК43+6	Ж	материал выброса угля
621	им. А.Ф. Засядько, гор. 1235 м	пл. т ₃ , 17-й ЗКШ, 1069, 2 м	Ж	выбросоопасный уголь, зона трещин
622	им. А.Ф. Засядько, гор. 1235 м	пл. т ₃ , 17-й ЗКШ, 1071,8 м	Ж	выбросоопасный, трещиноватая зона
623	им. А.Ф. Засядько, гор. 1235 м	пл. т ₃ , 17-й ЗКШ, 1090,8 м	Ж	граница трещиноватой зоны
635	им. А.Ф. Засядько, гор. 1235 м	пл. т ₃ , 17-й ЗКШ, 1158,2 м	Ж	выбросоопасный уголь, зона трещин

1	2	3	4	5
25	«Павлоградская», гор. 235 м	пл. C_4 , 405-я лава	Д	невыбросоопасный уголь
1063	«Лутугинская», гор. 570 м	пл. k_7^H , КХ 6-й вос- точной лавы	ДГ	невыбросоопасный уголь, зона тектониче- ского нарушения
1068	«Лутугинская», гор. 570 м	пл. k_7^H , КХ 6-й вос- точной лавы	ДГ	140 м от нарушения
1070	«Лутугинская», гор. 570 м	пл. k_7^H , КХ 6-й вос- точной лавы	Д-Г	150 м от нарушения
1073	«Лутугинская», гор. 570 м	пл. k_7^H , КХ 6-й вос- точной лавы	Д-Г	160 м от нарушения
1д	«Днепровская»	пл. c_8 , 877-я лава	ДГ	
2д	им. Героев Космоса	пл. c_{10} , 1079-я лава	ДГ	
3д	«Суходольская Восточная»	пл. i_3	КЖ	
4д	«Красноармейская Запад- ная»	пл. d_4 , конв. ходок, бл. №3	К	
1к	то же	глубина 386 м	К	
2к	-«-	глубина 530 м	К	
3к	-«-	глубина 570 м	К	
4к	-«-	глубина 644 м	К	



а)



б)

Рис. 6 – Металлограмма образца 1к

Обработка металлограмм показала, что в диапазоне глубин (300-700 м) залегания угля изменяется его структура. В частности, в образцах, отобранных на меньшей глубине наблюдается относительно небольшое количество пор, которые распространены равномерно по всему образцу.

С увеличением глубины залегания в образцах возрастают количество и размеры пор. Кроме того, также наблюдается образование зон концентрации пор. Рассчитанная средняя протяженность пор (линейный размер по вертикали) для данных образцов привела к следующим результатам:

образец 1к – 7 мкм;
образец 2к – 8 мкм;
образец 4к – 10 мкм.

В то же время структура угля с глубиной залегания остается такой же. Т.е. возрастает только ее дефектность.

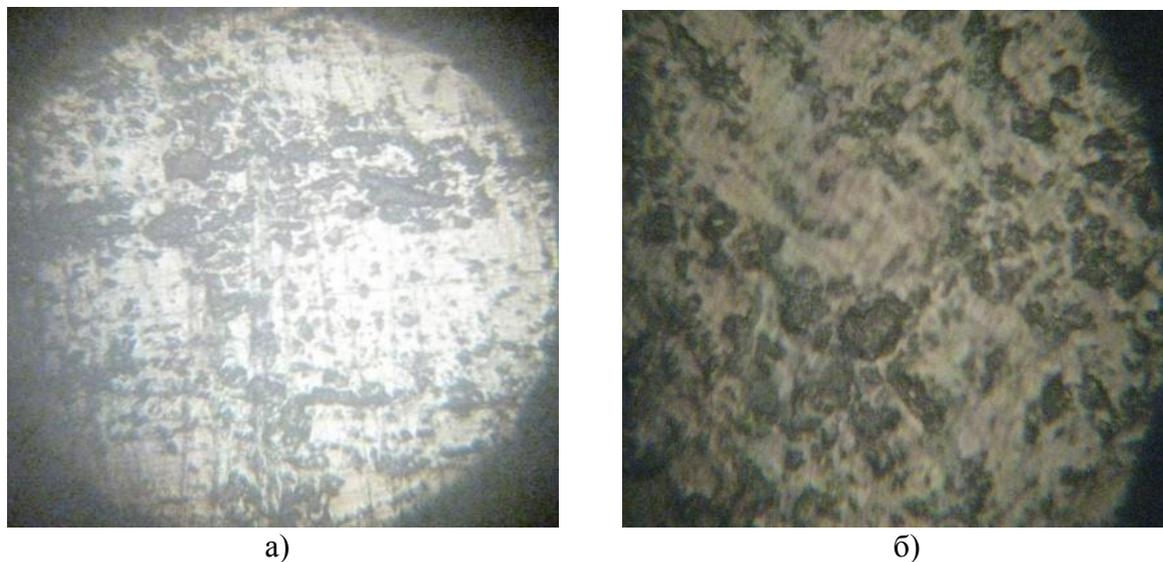


Рис. 7 – Металлограмма образца 3к

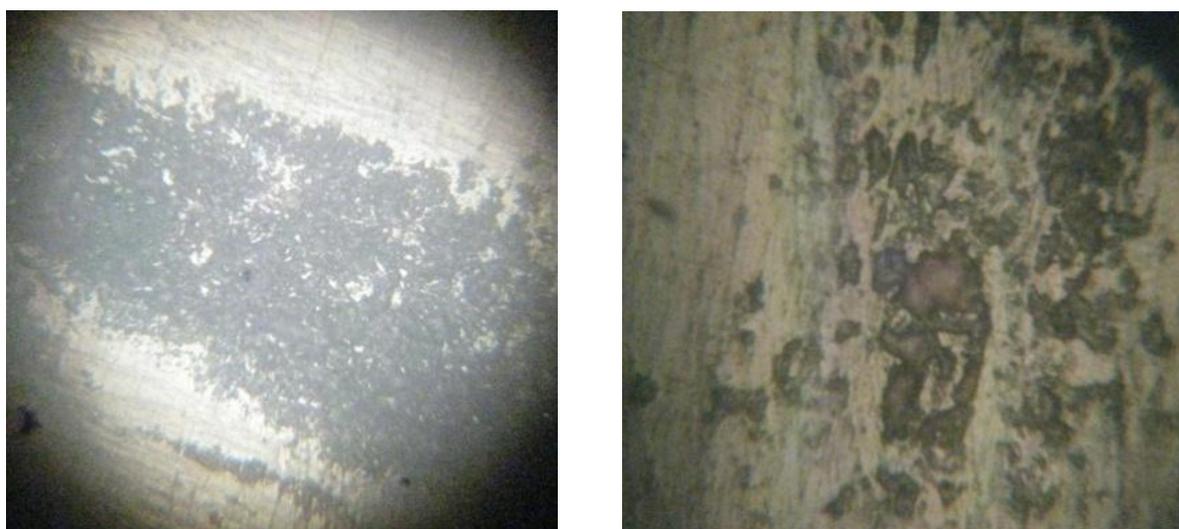


Рис. 8 – Металлограмма образца 4к

Угли разной степени метаморфизма были подвергнуты также микроструктурным исследованиям методом растровой электронной микроскопии. На приведенных ниже снимках цифра с размерностью в правом нижнем углу указывает на длину линейки, а каждый штрих, соответственно, равен одной десятой длины всей линейки. Перед проведением исследований на образцы наносилось покрытие для увеличения контраста и стекания накапливаемого заряда. Рентгеновский микроанализ проводился посредством энергодисперсионного анализатора ЭДАР. Анализ проводился в точке. Точки обозначены на соответствующую

щем снимке крестиками с нумерацией, которая соответствует подписям под спектрами.

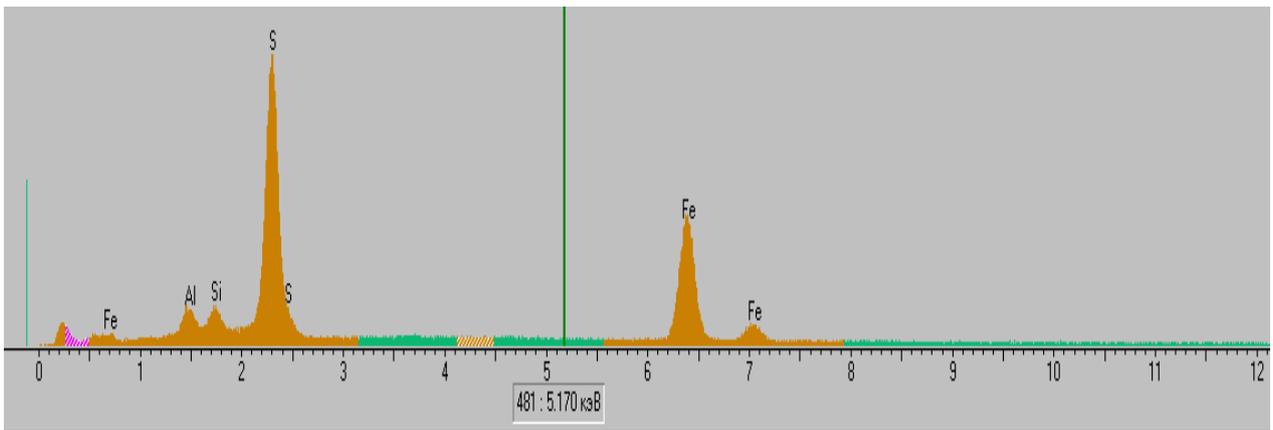
На рис. 9, а приведен снимок участка структуры угля марки КЖ (шахта им. А. Ф. Засядько), содержащий характерные для этих углей поры. На снимке видно, что гладкая прослойка угольного вещества, содержащая включения, как бы разделяет всю структуру. Поверхность образца в основном гладкая, а приведенная структура выглядит в виде слоя. Можно предположить, что пористая структура не что иное, как сплюснутый фюзинит или какая-то его производная. Исследования, проведенные на других образцах, показали, что классический фюзинит выглядит, как периодически чередующиеся отверстия диаметром примерно 10 мкм, а стенка между отверстиями равна примерно 1-2 мкм.



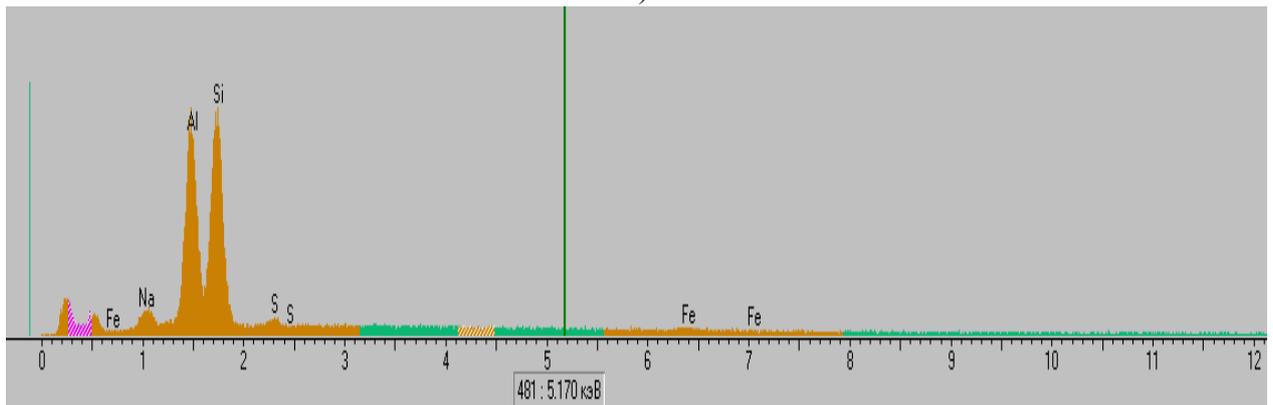
Рис. 9 – Снимки угля марки КЖ (Шахта им. А. Ф. Засядько)

На снимке, приведенном на рис. 9 б, изображены частицы, являющиеся включениями в гладком подслое. Скорее всего их происхождение обусловлено тем, что фюзинит это не просто отверстия, а трубки образованные капиллярами древесины, через которые в древесину вместе с влагой поступают, в атомарном виде, различные химические элементы, образовавшие эти включения в процессе отложений за много миллионов лет. На рис. 10 приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа данных включений, из которых следует, что это, в основном, металлы.

Следует подчеркнуть, что практически все металлы, входящие в состав включений, являются катализаторами синтеза метана. Точки, в которых был проведен микрорентгеноспектральный анализ, на снимке обозначены. Установлено, что в первом случае это сульфид железа с примесью кремния и алюминия, во втором – алюмосиликат с примесью натрия. Причем в каждой из частиц алюмосиликата с примесью натрия имеется пора, образованная механизмом роста частицы.



а)



б)

а) – спектр «гладкого» включения; б) спектр «выпуклого» включения

Рис. 10 – Результаты микрорентгенспектрального анализа включений

На рис. 11 приведены два снимка пористой структуры того же образца, сделанные для оценки размеров пор с разным увеличением.

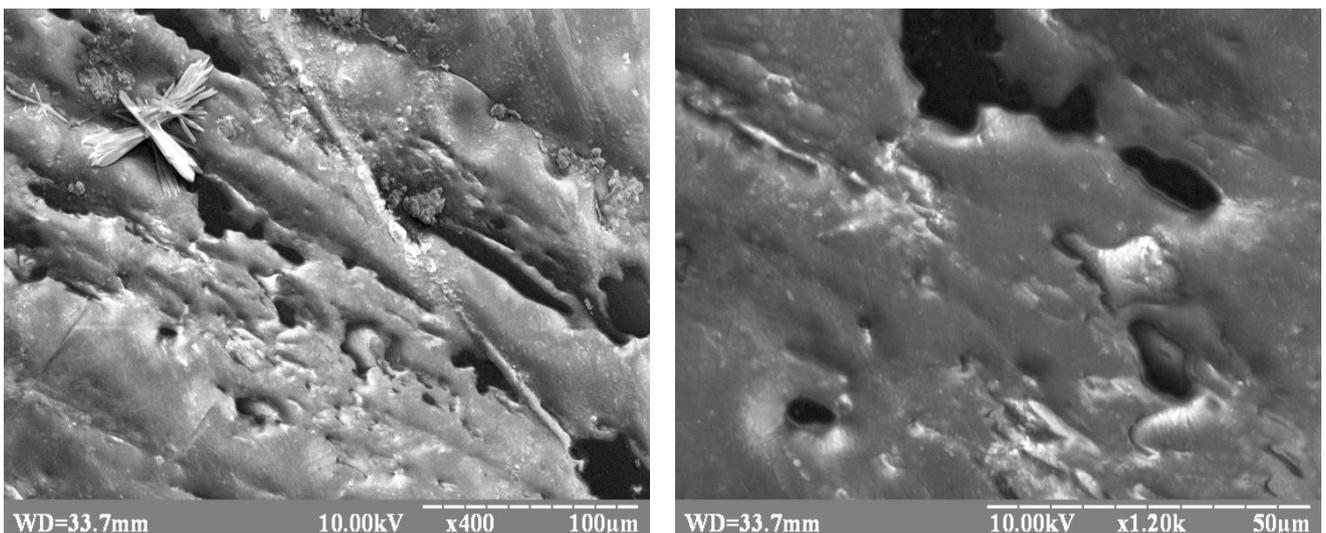


Рис. 11 – Снимки пористой структуры угля марки КЖ

На рис. 12 приведены снимки образца угля марки К (шахта «Красноармейская-Западная», глубина отбора 644 м).

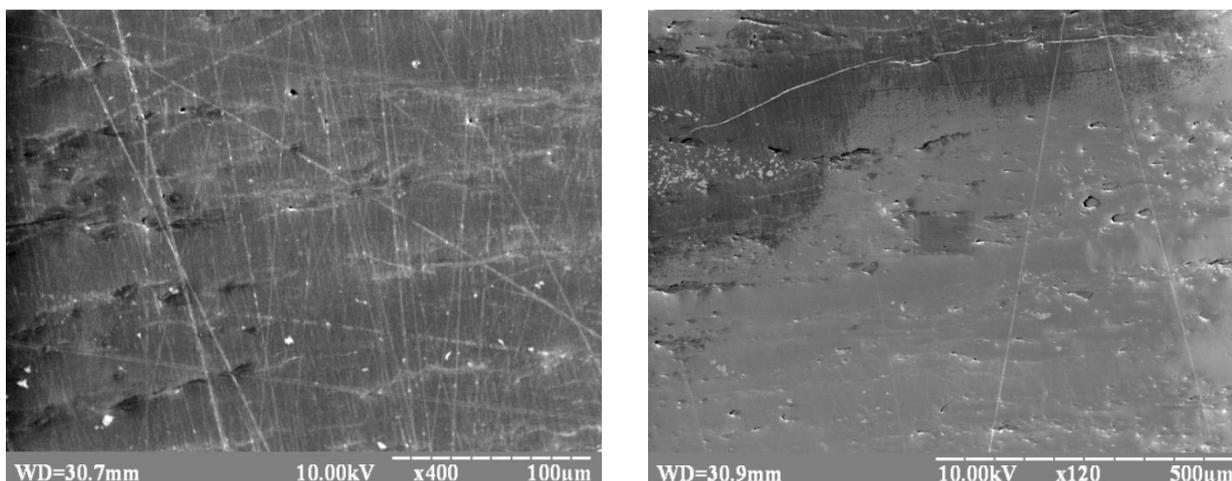


Рис. 12 – Снимки структуры угля марки К ($h=-644$ м)

Анализируя снимки можно сделать вывод, что данный образец по структуре поверхности подобен первому. В частности, в нем наблюдаются такие же прослойки с включениями, а также фюзинитоподобная пористая прослойка, с той лишь разницей, что последняя менее выраженная. Однако, это может зависеть от того, под каким углом по отношению к капиллярным каналам изготовлен шлиф. Кроме того, для этого образца, как, впрочем, и для всех последующих (особенно для третьего), характерно присутствие ярко выраженных магнитных свойств. Причину таких свойств установить пока оказалось технически невозможным, поскольку увеличение тока пучка, для проведения рентгеновского микроанализа, приводит к резкому увеличению магнитных свойств, что делает невозможным определение места или точки, в которой будет проводиться рентгеновский микроанализ.

На рис. 13 приведены снимки того же угля марки К, отобранного на глубине 376 м. Отличие в снимках в том, что, в данном случае, поры проявляются на структуре слоя с включениями. Причем по своей структуре и виду эти включения отличаются от включений, характерных для первого и второго образцов.

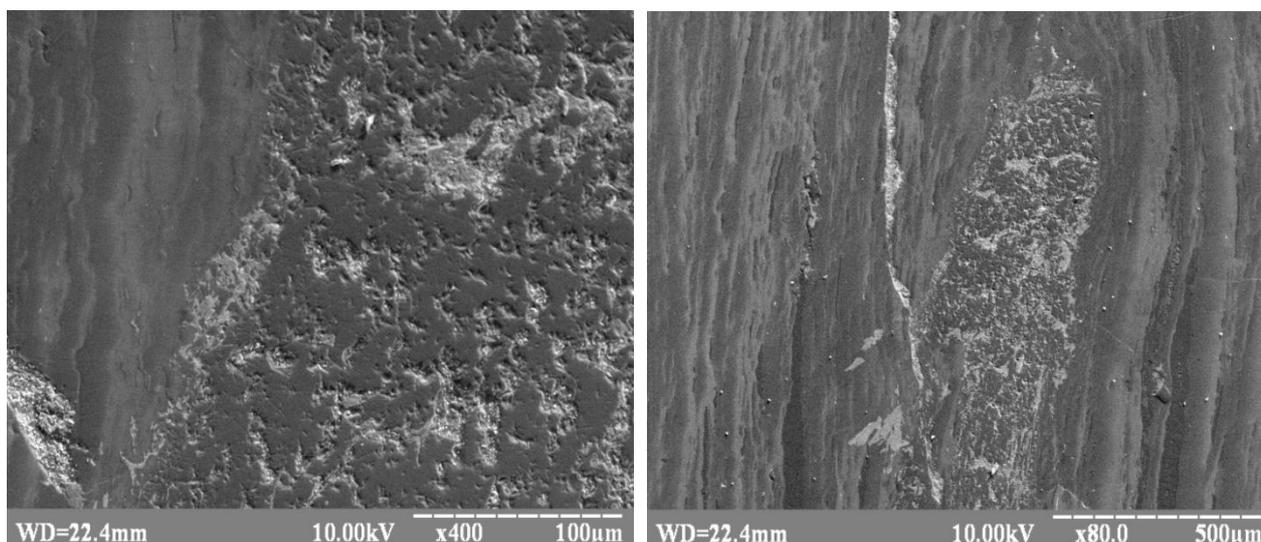


Рис. 13 – Снимки структуры угля марки К ($h=-376$ м)

Анализ результатов растровой микроскопии антрацита (рис. 14) показал, что в данном случае мы имеем дело с однородной структурой, без прослоек.

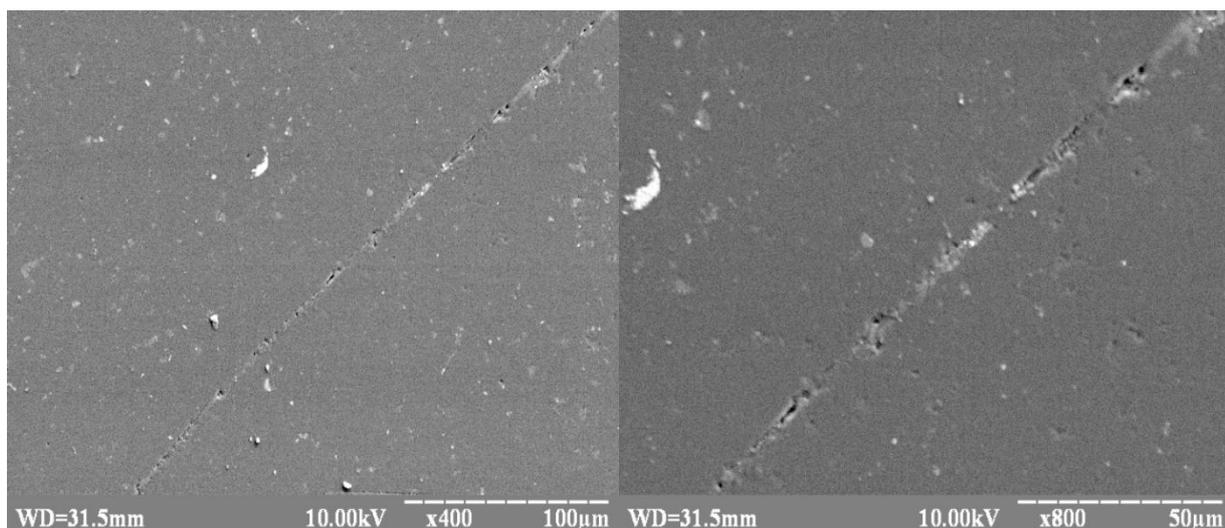


Рис. 14 – Снимки структуры антрацита при различном увеличении

Имеющиеся включения разбросаны хаотично по всей поверхности. В структуре наблюдаются два вида пор. Это поры, встречающиеся бессистемно по всей поверхности образца, как отдельно расположенные, примерный размер от 0,5 до 2,0 мкм, так и поры, выстроенные в линии, которые пересекаются под разными углами. Причем поры в линиях имеют как круглую, так и вытянутую (полостную) формы.

Как следует из снимков угля марки Т-ПА (шахта им. 1 Мая), приведенных на рис. 15, данный уголь имеет слоистую структуру. Имеющиеся в нем включения располагаются зонами, причем как в слоях, так и отдельными скоплениями. Для образца характерно наличие пор двух видов. Во-первых, это небольшие скопления круглых и вытянутых пор размером от 10,0 до 300,0 мкм. Во-вторых, это полостные поры в слоях, по виду напоминающие мелкие трещины, размером примерно 50,0-100,0 мкм в длину и шириной 0,5-1,5 мкм.

На рис. 16 приведены снимки структуры угля марки ДГ (шахта «Павлоградская»). Из рисунка видно, что в образце имеются включения округлой формы, разного размера, расположенные рядами. Для пор этой марки угля характерно наличие внутри огранки и хаотичное расположение, что свидетельствует о структурном происхождении означенных пор.

Исследованный образец угля марки Ж, отобранный из места выброса на шахте им. А.Ф. Засядько (рис. 17) содержит много трещин, расположенных, как в слоях, так и хаотично. Имеются также поры двух видов: пустотелые овальной формы и содержащие внутренние включения. Размер пустотелых пор 1,0-10,0 мкм, пор с включениями – 5,0-12,0 мкм.

Обобщая результаты микроструктурных исследований, выполненных методами металлографии, электронной и растровой микроскопии на углях разного метаморфического ряда, можно сделать следующие выводы:

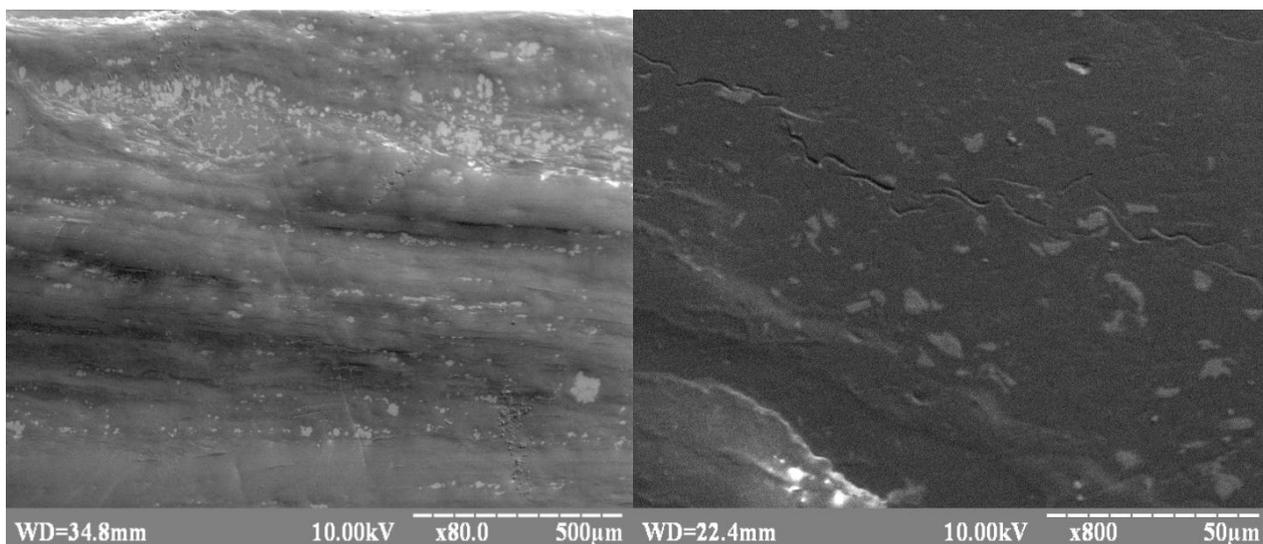


Рис. 15 – Снимки структуры угля марки Т-ПА при различном увеличении

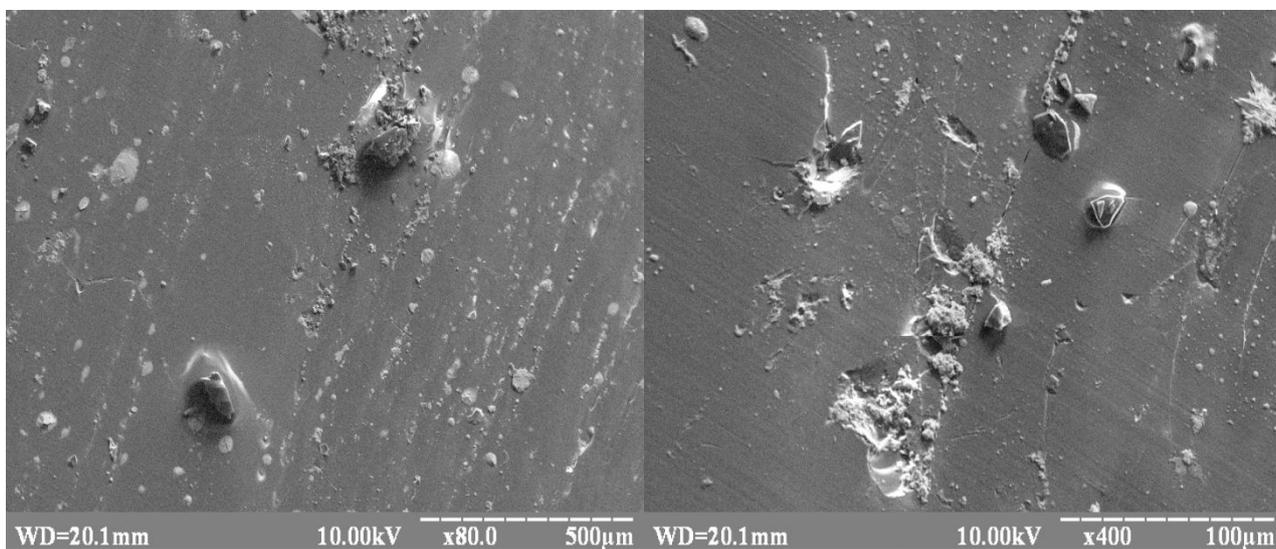


Рис. 16 – Снимки структуры угля марки ДГ при различном увеличении

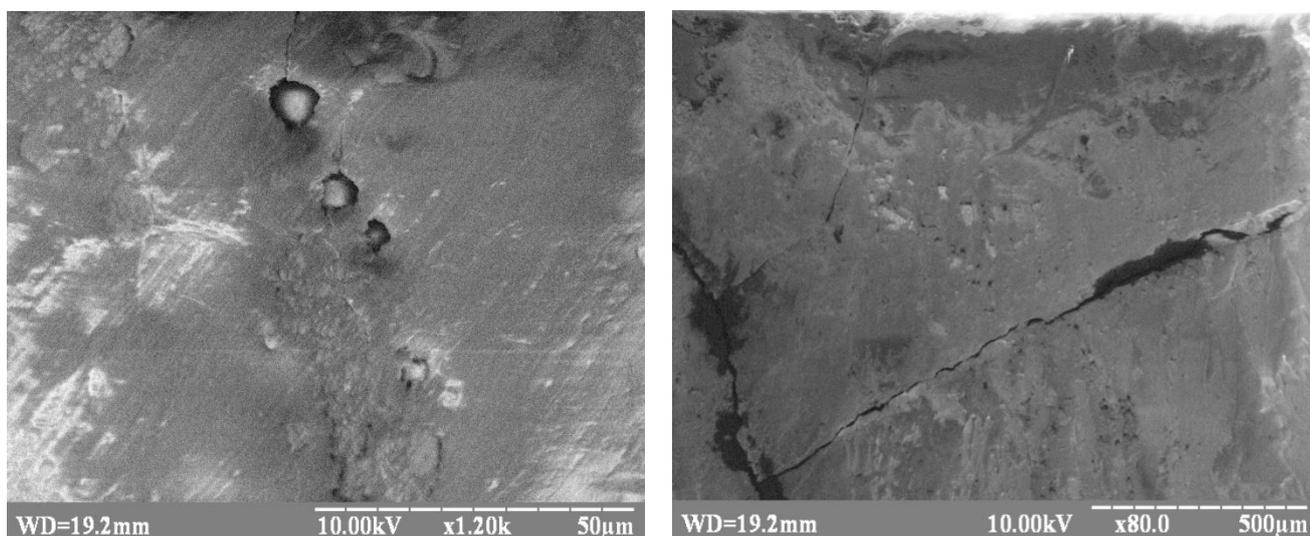


Рис. 17 – Снимки структуры угля марки Ж из места выброса при различном увеличении

– для всех исследованных марок углей характерно присутствие на фоне основной матрицы аморфной фазы пор, равномерно либо хаотично расположенных по всему объему образца;

– объемная доля пор колеблется от 2 до 10 %, причем нижние значения характерны для слабометаморфизованных углей и антрацитов, а верхние – для углей средней стадии метаморфизма (выбросоопасных);

– размеры пор также варьируют в широких пределах: от 3-5 мкм до 80-100 мкм, однако в любом случае являются достаточными для размещения в них молекул метана;

– ориентировочная оценка максимального количества метана, которое может помещаться в поровой структуре угольного вещества, приводит к значению 15-30 м³/т, что на порядок ниже объемов метана, зафиксированных при газодинамических явлениях в угольных шахтах;

– для структуры угля характерно наличие большого количества металлосодержащих включений, входящих в ряд наиболее активных катализаторов синтеза метана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат А. Ф. Метаногенерация в угольных пластах / А. Ф. Булат, С. И. Скипочка, Т. А. Паламарчук, В. А. Анциферов. – Днепропетровск: «Лири ЛТД», 2010. – 328 с.
2. Жиряков В.Г. Органическая химия / В.Г. Жиряков. – М. : Химия, 1991. – 430 с.

УДК 622.831(088.8)

Канд. техн. наук А. П. Клец
(ИГТМ НАН Украины)

ДЕБИТ СКВАЖИН ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ ДЕГАЗАЦИИ

Розроблено методику розрахунку свердловин випереджаючої дегазациї. Викладено приклад розрахунку дебіту для умов шахти «Алмазна» та приведені його прогнозні показники для кількох виїмкових ділянок шахт Донбасу.

WELLS PRODUCTION RATE OF ADVANCING METHANE DRAINAGE

The design procedure of bore wells of advancing methane drainage is developed. The calculation example of production rate for conditions of «Almazna» mine. The prospective indicators of production rate for some panels of mines of Donbass are resulted.

Целью опережающей дегазации [1] является снижение показателей газоносности горных пород до начала ведения горных работ по добыче угля. Это достигается путем извлечения метана из газоносных пород-коллекторов в естественных условиях, когда горный массив еще не подвержен влиянию горных работ, но на выемочном участке уже начаты подготовительные работы, и проводятся подготовительные выработки, из которых возможно бурение дегазационных скважин.