

УДК 622:552.5

ОСНОВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ ПОР УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКОЙ

Воробьев А.Е.¹, Кожогулов К.Ч.², Воробьев К.А.³

¹ГГНТУ РФ, ²НАН КР, ³ИПКОН РАН

¹ФГБОУВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет им. академика М.Д. Миллионщикова», РФ

²Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР

³Институт проблем комплексного освоения недр РАН

Представлены основные разновидности пор угольных пластов, находящихся под городской застройкой, и влияющие на устойчивость городских сооружений. Показано распределение пор в углях по размерам. Описаны такие виды пор, как нанопоры в органическом веществе, поры, связанные с минералами, поры микронного масштаба. Раскрыты условия и механизмы их формирования, и локализованы на СЭМ-изображениях места их расположения.

Ключевые слова: городские территории, уголь, поры, нанопоры, микропоры, условия локализации.

ШААРДЫК ӨНҮКТҮРҮҮДӨГҮ КӨМҮР КАТТАРЫНДАГЫ ПОРЛАРДЫН НЕГИЗГИ ТҮРЛӨРҮ

Воробьев А.Е.¹, Кожогулов К.Ч.², Воробьев К.А.³

¹"Академик М.Д. Миллионщиков атындагы Грозный мамлекеттик мунай технологиялык университети" Федералдык мамлекеттик бюджеттик жогорку окуу жайы, Россия Федерациясы

²Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын Машина куруу, автоматика жана геомеханика институту

³Россия илимдер академиясынын минералдык ресурстарды комплекстүү иштетүү институту

Бул макалада шаар курулушунун туруктуулугуна таасир этүүчү көмүр катмарларындагы тешикчелердин негизги түрлөрү берилген. Көмүрдөгү тешикчелердин өлчөмүн бөлүштүрүү көрсөтүлгөн. Органикалык заттардагы нанопорлар, минералдар менен байланышкан тешикчелер жана микрон масштабдуу тешикчелер сыяктуу тешикчелердин түрлөрү сүрөттөлөт. Алардын пайда болуу шарттары жана механизмдери ачылып, алардын жайгашкан жерлери SEM сүрөттөрүндө локализацияланган.

Баштапкы сөздөр: шаар жерлери, көмүр, тешикчелер, нанотешикчелер, микротешикчелер, локализация шарттары.

MAIN TYPES OF PORES IN COAL SEAMS UNDER URBAN DEVELOPMENT

Vorobyov A.E.¹, Kozhogulov K.Ch.², Vorobyov K.A.³

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Grozny State Petroleum Technological University named after Academician M.D. Millionshchikov", Russian Federation

²Institute of Mechanical Engineering, Automation, and Geomechanics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic

³Institute of Integrated Mineral Resource Development of the Russian Academy of Sciences

The main types of pores in coal seams located under urban development are presented. The distribution of pores in coals by size is shown. Such types of pores as nanopores in organic matter, pores associated with minerals, and micron-scale pores are described. The conditions and mechanisms of their formation are revealed, and their locations are localized in SEM images.

Keywords: urban areas, coal, pores, nanopores, micropores, localization conditions.

Введение. Многие городские территории (г. Донецк, Россия, г. Караганда, Казахстан, г. Ташкумыр, Кыргызстан) находятся над угольными пластами (зачастую находящимися в разработке) При этом, необходимо отметить, что поровые структуры углей, находящихся под городской застройкой, по своей природе довольно неоднородны по своей форме и размерам [14], что влияет на изменение их параметров, проявляясь в формах городских ландшафтов и устойчивости городских строений.

В частности, в ходе осуществленных исследований, было установлено, что основное количество поровых каналов оказывается

сосредоточенным, прежде всего, в микропорах и лишь небольших сегментах мезопор (рис. 1).

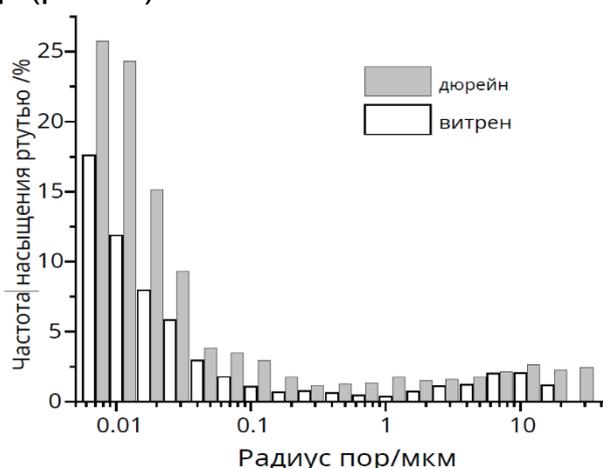


Рис. 1. Распределение пор в углях по размерам [7]

Нанопоры ОВ. В настоящем исследовании 3 группы нанопор ОВ (диаметром 10 нм – 10 мкм) были дополнительно дифференцированы на основе различных морфологических характеристик. На основе объяснения механизмов формирования пористой среды в угольной матрице было предложено следующее их пространственное расположение [6]: фитеральные остаточные нанопоры (ОВ-I), микроскопические органические составляющие межчастичных нанопор (ОВ-II) и наномасштабные тепловые поры (ОВ-III).

При этом, фитеральные остаточные нанопоры (ОВ-I) были сформированы в органических компонентах растений с нерегулярной морфологией (рис. 2 а-с). А сами формы внутренних поверхностей этих остаточных нанопор фитерала являются нерегулярными и неровными.

Межчастичные нанопоры ОВ (ОВ-II) в основном присутствуют в тех местах угольной матрицы, где микроскопические органические компоненты обладают диаметрами от 10 нм до 3 мкм, но они оказываются более согласованными в диапазоне диаметров от 10 нм до 200 нм. В этих местах они обычно образуют треугольные, щелевидные и четырехугольные топографии пор (рис. 2 d-h), с довольно простой внутренней структурой поверхности. Поры ОВ-I и ОВ-II большей частью являются изолированными в 2D, демонстрируя относительно слабую связанность.

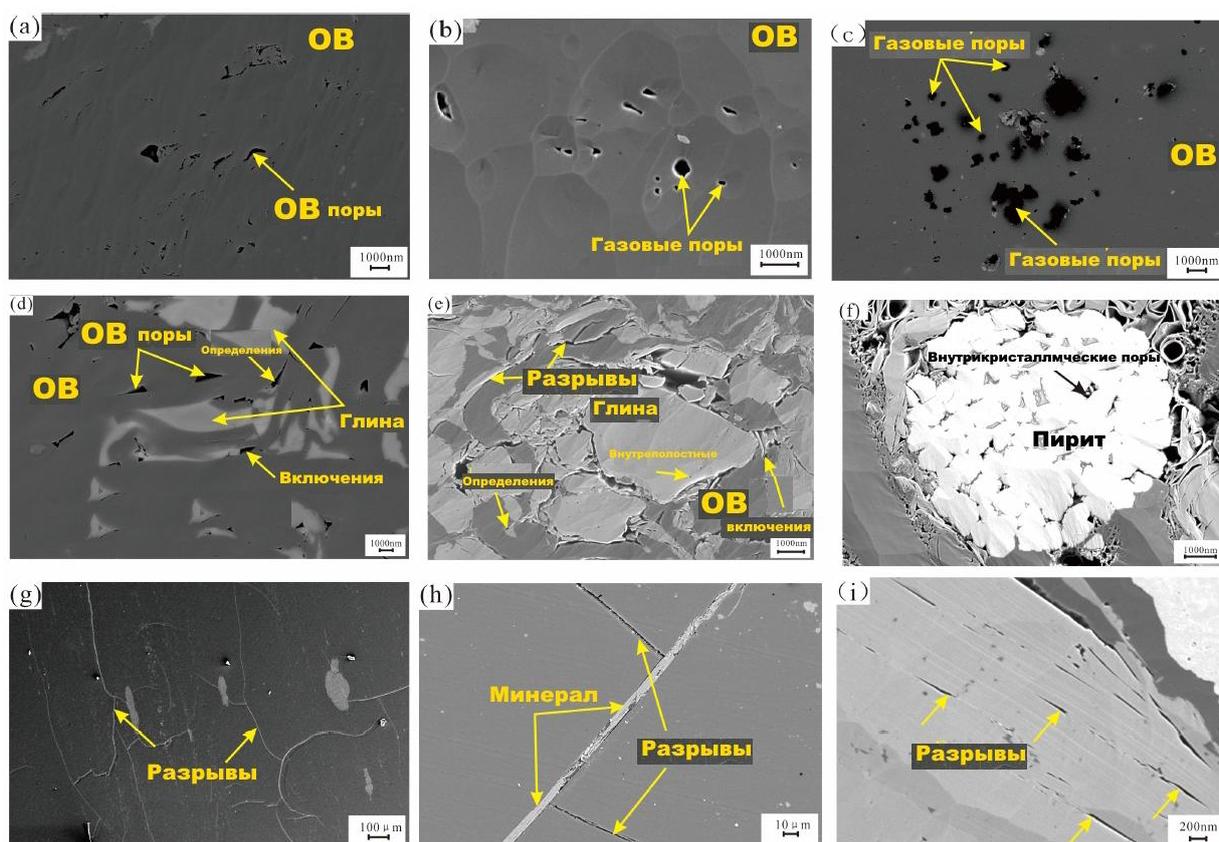


Рис. 2. Изображения FE-SEM различных пор в образцах угля:
 а) DJ1-3, $R_{o, \text{макс}} = 2,08 \%$; б) DJ2-2, $R_{o, \text{макс}} = 2,13 \%$; в) П-2, $R_{o, \text{макс}} = 3,04 \%$;
 д) DJ2-2, $R_{o, \text{макс}} = 2,13 \%$; е) DJ2-3, $R_{o, \text{макс}} = 2,19 \%$; ф) DJ2-2, $R_{o, \text{макс}} = 2,13 \%$;
 г) П-1, $R_{o, \text{макс}} = 3,05 \%$; з) DJ1-4, $R_{o, \text{макс}} = 2,20 \%$; и) DJ2-3, $R_{o, \text{макс}} = 2,19 \%$

Несмотря на некоторое сходство внешнего вида, из-за разных механизмов формирования, всё же следует различать поры ОВ-I и ОВ-II. Так, наномасштабные термические поры развивались не так хорошо по сравнению с микронным масштабом (рис. 2и).

При этом довольно легко отличить поры класса ОВ-III от пор ОВ-I и ОВ-II, обладающих большим диапазоном размеров пор и сферической или эллипсоидальной морфологией, что может быть результатом проявления значительного давления угольного газа внутри этих пор.

В ходе исследований, на основе изображений FESEM, было обнаружено, что поры ОВ в наномасштабе лишь только частично были сформированы во время генерации углеводородов. Так, поры диаметром менее 10 нм в основном являются метаморфическими и межмолекулярными порами.

Однако, механизмы образования нанопор диаметром более 10 нм существенным образом отличаются по сравнению с молекулярными порами. Фитеральные остаточные нанопоры (ОВ-I) представляют собой наномасштабную остаточную исходную структуру растительных тканей, образовавшуюся после процесса геологической генерации углеводородов и проявления сил напряжения. А межчастичные нанопоры ОВ (ОВ-II) являются результатами контакта и разделения микроорганических частиц. Наномасштабные термические поры (ОВ-III) образовались в процессе генерации газа, уже непосредственно внутри ОВ.

Как известно, уголь включает в себя различные органические и минеральные соединения, показанные цветом на изображениях FESEM (рис. 3), где цвет серого представляет ОВ, в то время как цвет от белого до светло-серого указывает на присутствие различных минералов.

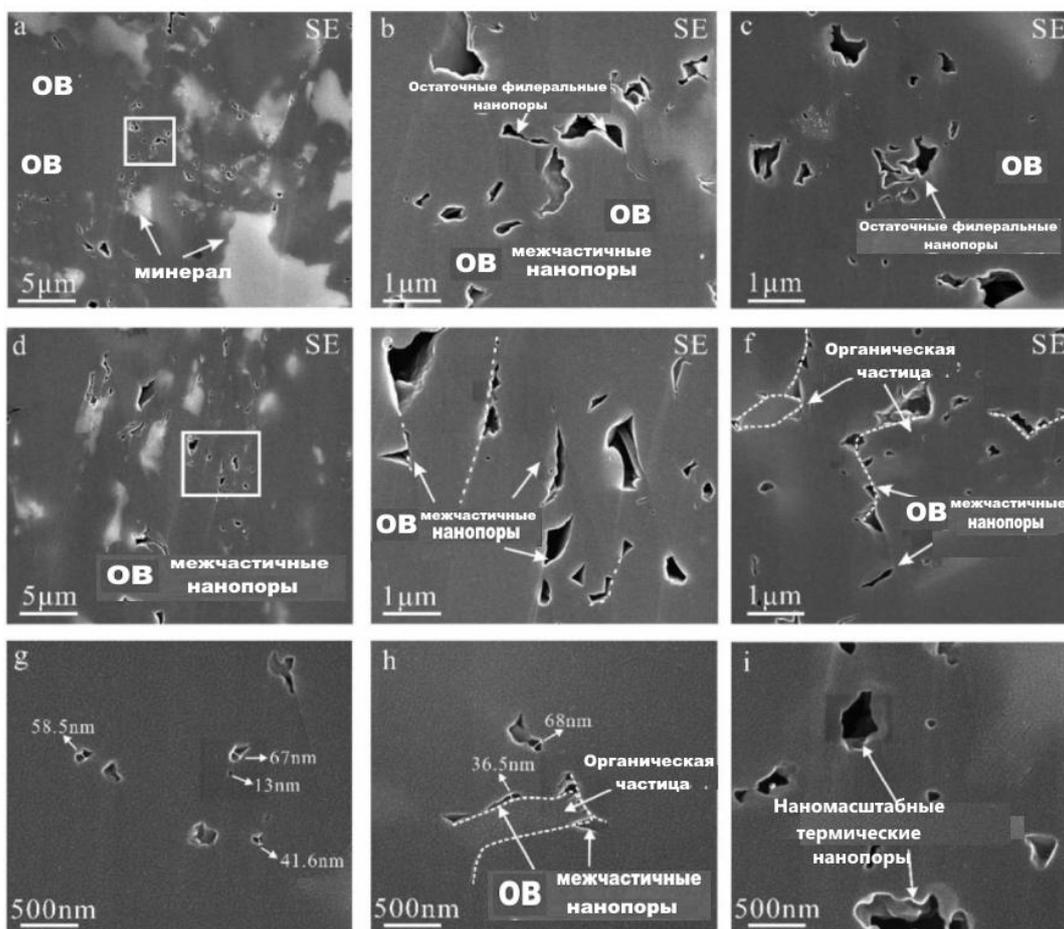


Рис. 3. Изображения FESEM (SE-изображения) нанопор в органической матрице антрацитовых углей:

а–с) Фитерал. Наномасштабные термические поры. Выделенные области были выбраны для наблюдения при большем увеличении (соответствующие панели b) и e)).

ОВ - органическое вещество; SE - вторичные электроны

В процессах метаморфизма, после глубокого захоронения и уплотнения, эти поры довольно часто становятся по форме сплюснутыми, эллиптическими или неправильно треугольными и многоугольными (рис. 3g), диаметром от десятков нанометров до нескольких микрометров, и могут быть заполнены глинистыми минералами (рис. 3d). Межзерновые поры располагаются между минералами и угольной матрицей, а также находятся внутри самих минералов (рис. 3e).

Эти поры довольно часто развиваются в микроскопической структуре угольного тела вдоль механически слабых плоскостей, и под воздействием внешних условий (во время добычи метана из угольных пластов) могут превратиться в микротрещины, способствуя образованию весьма эффективных каналов газопроницаемости.

Многочисленные микротрещины наблюдаются в глинистых минералах (содержащихся в угле), особенно в чешуйчатых и гармошкообразных каолинитовых минералах, где множество узких пластинчатых структурных трещин открываются на одном конце (рис. 3i), с апертурами от 100 до 300 нм и длиной в основном от 2 до 5 нм.

Кроме того, в угле локально присутствуют некоторые переломы (рис. 3 g, h), с длиной кливажа в микромасштабе от десятков микрометров до нескольких миллиметров и шириной от нескольких сотен нанометров до нескольких микрометров.

Некоторые из более крупных пор в исследуемых образцах угля оказываются полностью или частично заполнены (рис. 3d) с заполняющими геоматериалами (включающими глинистые минералы, пирит и карбонатные минералы), которые существенно снижают связность системы «поры – трещин».

Поры, связанные с минералами, из-за относительно их низкого содержания в угле, в наномасштабе имеют гораздо меньшее распространение (рис. 4).

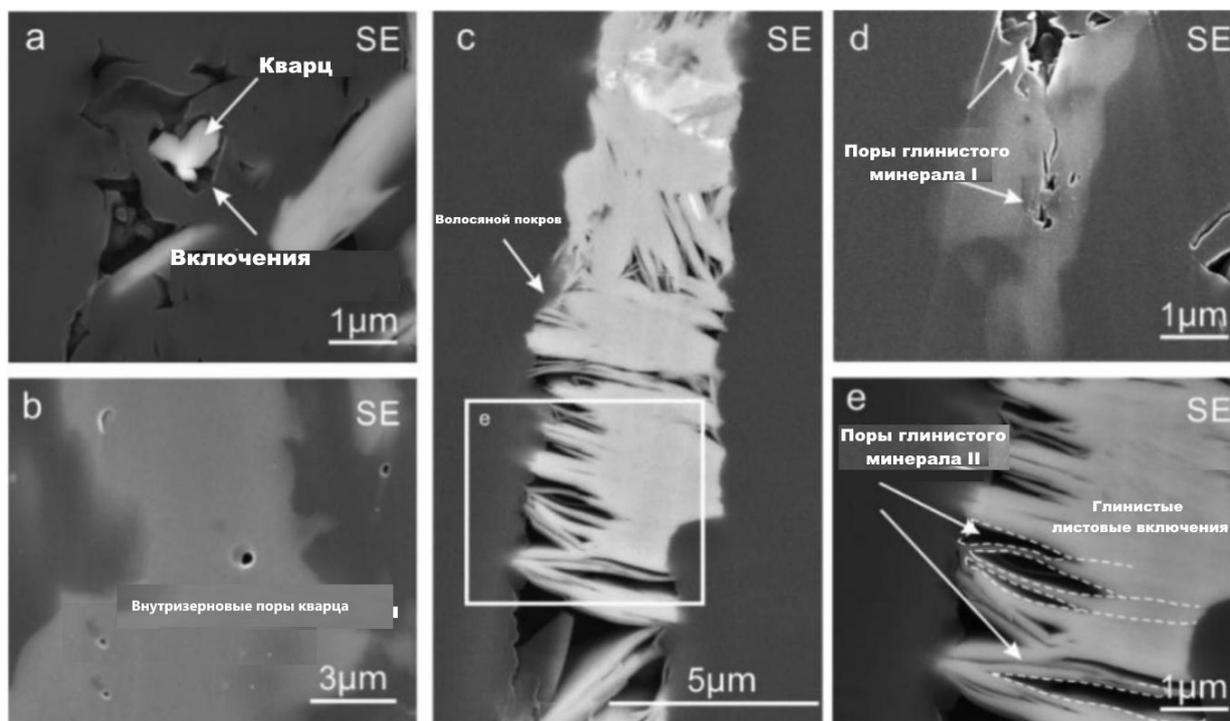


Рис. 4. Изображения FESEM (изображения SE) минеральных пор в антрацитовых углях:

- а) поры в минералогической кромке; б) кварцевые внутризерновые поры; в) поры между глинистыми слоями; д) поры внутри глинистого минерального агрегата; е) поры между глинистыми слоями. SE - вторичные электроны

Минералы в образцах угля, как было установлено с помощью EDS, представляют собой кварц, глину и небольшое количество пирита, а также тяжелые минералы (такие, как рутил и др.).

В ходе исследований были идентифицированы 4-е группы нанопор на основе этих минералов и их пространственного расположения [5]:

1) M-I: поры на минералогическом крае или в точках контакта нескольких различных составов геоматериалов (рис. 4а);

2) M-II: внутризерновые поры (с размерами от нескольких нанометров до нескольких микрометров), которые образовались внутри зернистых минералов, путем растворения растворами кислой жидкости, образующейся в процессе углеводородо образования и диагенеза органического вещества, в изолированном состоянии с плохой связностью (рис. 4с);

3) M-IV: поры между частицами глинистых минералов (рис. 4е);

4) M-III: поры внутри агрегатов глинистых минералов (рис. 5).

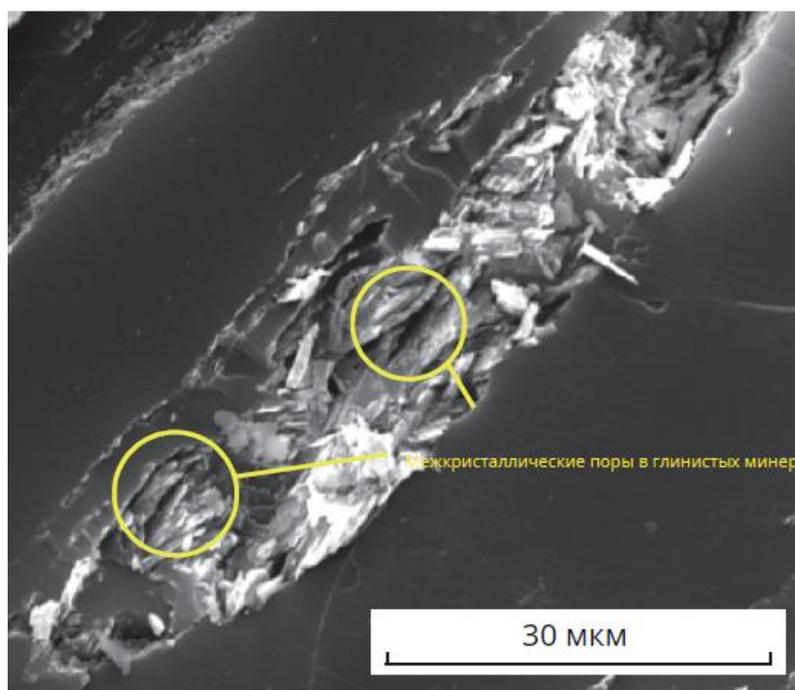


Рис. 5. Межкристаллические поры в глинистых минералах

При чем, поры M-I и поры M-II развивались вокруг или в гранулярных минералах (таких, как кварц – рис. 4 а-с). Так, в частности, поры M-II, как правило, развивались в интракристаллах кварца, с круглой или эллиптической морфологией и средним диаметром <20 нм, их основой могут быть перехваченные жидкие включения или дефекты роста кристалла (рис. 4с). Поры глинистых минералов в основном коррелируют с ростом аутигенных минералов (таких, как каолинит – рис. 4 с-е).

Поры M-III обычно имеют неправильную форму, в то время как поры M-IV возникают в пластинчатых поперечных сечениях, которые обычно лежат между двумя глиняными листами с удлиненной формой, и форма таких пор контролируется ориентацией глинистых листов. Кроме того, поры M-I, M-III и M-IV имеют широкий спектр распределения размеров наночастиц, который варьируется от 10 нм до 5 мкм, и более лучшую связанность (по сравнению с изолированными нанопорами ОВ в угольной матрице и внутривчастичными порами M-II внутри минералов).

Поры в микронном масштабе. Похожие типы пор ОВ были развиты в микронном масштабе в разных пропорциях (рис. 6).

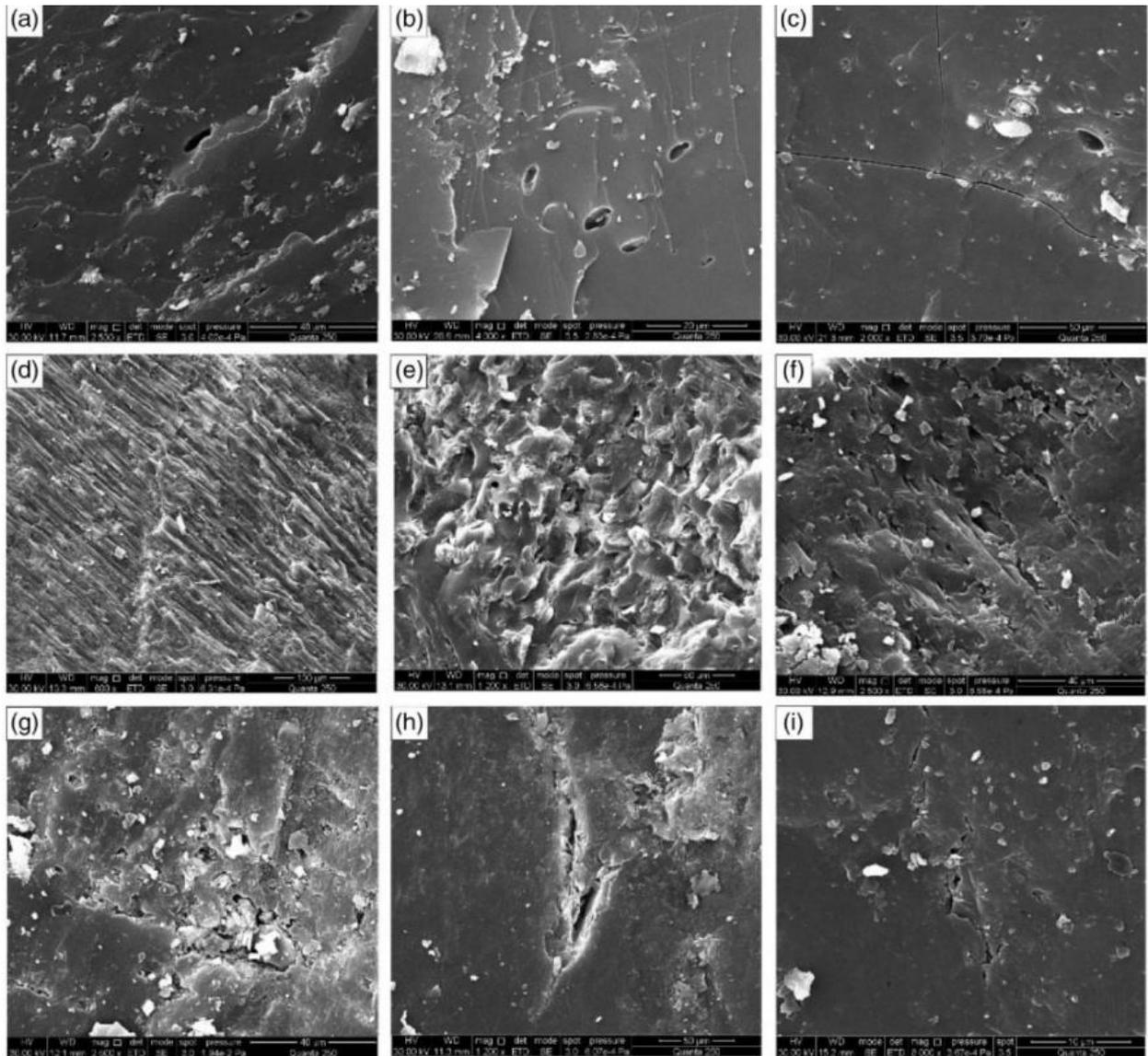


Рис. 6. Поры микронного масштаба в антрацитовых углях [5]:
 а–с) термически образовавшиеся поры в ОВ (некоторые поры (с)
 заполнены глинистыми минералами, а некоторые органические
 компоненты межчастичных пор в микронном масштабе можно увидеть
 (а));
 d–f) фитеральные остаточные поры в микронном масштабе (поры
 фюзинита в панелях (d–e));
 g) поры в минералогическом крае; h–i) микротрещины

Также в микромасштабе представлены термические (газовые) поры (рис. 6 а-с) и фитеральные остаточные поры (рис. 6 d-f). Органические составляющие межчастичных пор в микронном масштабе можно наблюдать на рис. 6а, но они не были столь распространены, как в наномасштабе. Поры, связанные с минералами (рис. 6g), MF (рис. 6h) и сопутствующие им трещины имеют более крупные размеры (рис. 6i).

Заклучение. Выделены и исследованы несколько типов пор по размерности (микро и нанопоры), локализуемые в разных геоморфологических частях угольной матрицы: от органического вещества угля, до входящих в него различных минералов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев А.Е. Характеристика особенностей нанокристаллитов углей // Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. участников VIII Международной научно-практической конференции. Белово. Изд-во филиала КузГТУ. Велико Тырново. Болгария. 2015. С. 14-17.
2. Воробьев А.Е. и др. Основные закономерности изменения свойств углей//Материалы международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр». Москва (Россия) – Котону (Бенин). М., РУДН. 2010. С. 304-306.
3. Воробьев А.Е., Комащенко В.И., Дребенштедт К., Зубков В.Г. и др. Уголь: процессы глобализации и национальная безопасность. – М.: МИИР, 2006. – 264 с.
4. Воробьев А.Е., Лоцев Г.В. Особенности наноминералогии углей // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2015. Т. 15. № 9. С. 165-167.
5. Difei Zhao, Yinghai Guo, Geoff Wang and Xiaoxiao Mao. Characterizing nanoscale pores and its structure in coal: Experimental investigation // Energy Exploration & Exploitation. 2019. Vol. 37(4). Pp. 1320–1347. DOI: 10.1177/0144598719831397.
6. Li B., Guo Y., Hu X., Wang T., Wang R., Chen X., Fan W., Deng Z. Pore structure and heterogeneity characteristics of deep coal reservoirs: a case study of the daning–jixian block on the southeastern margin of the ordos basin // Minerals 2025, 15, 116. <https://doi.org/10.3390/min15020116>.
7. Ma D.M., Li Q., He Q. and Wang C.T. Pore characteristics of vitrain and durain in low rank coal area // Journal of Power and Energy Engineering 5, 2017. С. 10-20. <https://doi.org/10.4236/jpee.2017.511002>.

***Исследование осуществлялось в рамках гранта № BR24993009 «Создание научно-исследовательского инжинирингового центра передовых технологий разработки месторождений полезных ископаемых» Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.**