

УДК 622.411.33 + 553.93/94

## ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПУСТОТНОГО ПРОСТРАНСТВА УГЛЕЙ И ЕГО РОЛЬ ПРИ ТЕХНОГЕННОМ ФОРМИРОВАНИИ РЕЗЕРВУАРНЫХ СВОЙСТВ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ДЛЯ ДОБЫЧИ МЕТАНА

Е.Ю. Макарова, Хань Цзиньсюань, А.Р. Пискунов, И.В. Кувинов, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Одним из методов, применяемых при добыче метана угольных пластов как самостоятельного полезного ископаемого, является гидроразрыв пласта, который используется при разработке традиционных месторождений нефти и газа. Безусловно, использование подобных технологий для углей должно учитывать особенности структуры и прочностные характеристики объекта разработки – угольного пласта. Знание пространственного положения природных пустот позволит с большей долей вероятности моделировать формирование техногенных трещин, являющихся основными каналами движения газа к стволу скважины в метаноугольном объекте разработки. В статье обобщаются результаты аналитических исследований по изучению размерности, структуры и генетической приуроченности пустотного пространства углей различного марочного состава.

**Ключевые слова:** метан угольных пластов (МУП), трещины, поры, трещиноватость, пустотное пространство, размеры пустот, фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС), гидроразрыв (ГРП)

## COAL VOIDS STRUCTURE STUDY AND ITS ROLE IN THE FORMATION OF MAN-MADE RESERVOIR PROPERTIES OF COAL RAKES FOR METHANE OUTPUT

E.Yu. Makarova, Han Jinxuan, A.R. Piskunov, I.V. Kuvinov, Lomonosov Moscow State University

In the process of coal methane extraction one of the main methods of desorption stimulation is a hydraulic fracturing used in traditional oil and gas development. Of course using of this technology for coal extraction needs to take account of special characteristics of strength and structure of the coal seam. Knowledge of natural voids spatial position allows to better simulate the formation of man-made cracks, the main channels of gas movement to the wellbore, in the methane-coal exploration target. This article summarizes the results of analytical studies on dimensions, structure and genotype of the voids in different coal ranks.

**Keywords:** coal bed methane (CBM), cracks, pores, fractures, voids, size distribution of voids, porosity & permeability properties, fracturing

### Введение

В текущем мировом балансе потребления первичных топливно-энергетических ресурсов основную долю (до 80%) составляют нефть, газ и уголь. Углеводороды (УВ) будут продолжать доминировать с тенденцией вовлечения большего объема нетрадиционных и трудноизвлекаемых ресурсов, к которым относится метан, содержащийся в угольных пластах (МУП). На территории России имеется целый ряд крупных угольных бассейнов и месторождений широкого возрастного диапазона, с разнообразием марочного состава, химико-технологических свойств углей. Прогнозные ресурсы угольного метана в Российской Федерации оцениваются неоднозначно в пределах 17-113 трлн м<sup>3</sup>, по данным ОАО «Газпром» - 83,7 трлн м<sup>3</sup> (Голицын и др., 2013).

Изучение вопросов, касающихся наличия метана в горных выработках, началось ещё в Российской империи, но только в 50-х годах XX в. исследования газоносности при проведении геологоразведочных работ на угольных месторождениях стали обязательными. Данные исследования применялись для расчётов параметров вентиляции и дегазации горных выработок, обеспечения безопасности работ горнодобывающих предприятий (Газоносность угольных..., 1979-80). В тот же период встал вопрос о его

попутном извлечении и возможностях использования. Интерес к МУП, как самостоятельному нетрадиционному источнику углеводородного сырья, возник в конце 80-х годов XX в. после того, как появились сведения о его промышленной добыче в США (Saulsberry et al, 1996). На сегодня рассматриваются два основных подхода к добыче метана из угольных пластов:

- метан угольных пластов как попутное полезное ископаемое, добыча которого осуществляется средствами шахтной дегазации и его каптирования при добыче основного полезного ископаемого - угля;
- метан угольных пластов как самостоятельное полезное ископаемое, добыча которого может осуществляться независимо от добычи угля или существенно предвзвешивать ее.

Второй способ является более продуктивным, т.к. эффективность извлечения метана из угольных пластов может достигать 80%, при концентрации метана в газовой смеси 75-98%. При традиционной предварительной шахтной дегазации эти показатели значительно ниже – эффективность дегазации не превышает как правило 10-20%, при содержании метана в газовой смеси 30-45% (Руководство ..., 2010), что требует сепарирования шахтного газа для утилизации метана.

Кроме того, возможна и местами успешно осуществляется добыча из скоплений свободных газов, находящихся в традиционных коллекторах вмещающих пород угленосной формации.

## Постановка задачи

Угольный пласт следует рассматривать как нетрадиционный коллектор в связи с малыми значениями основных характеристик его фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС): эффективная пористость углей в среднем меньше 5%, проницаемость меньше  $0,1D$ . При этом, основной формой нахождения газа в углях является сорбированное состояние на органическом веществе (ОВ), в свободном состоянии находится 3-10% газа в углях, что было показано в многочисленных работах (Эттингер и др., 1975; Rogers, R. et al., 2007; Алексеев, 2010). В связи с этим газоносный угольный пласт является объектом для создания резервуара техногенным воздействием (ГРП, импульсное или сейсмо- воздействие и др. технологии повышения ФЕС) в целях формирования благоприятных для эксплуатации ФЕС и интенсификации десорбции газа.

В угольных пластах объем пустотного пространства на макроуровне (в пределах системы кливажа и пор, связанных с клеточным строением самого органического вещества углей) содержит воду, свободный метан и метан, растворенный в воде, и предопределяет их движение в пластах по законам фильтрации. Считается, что коэффициент пористости по макропорам и системе трещин кливажа изменяется в пределах 1-5%. Основной объем пустотного пространства угольных пластов связан с капиллярами и полостями молекулярных размеров в угольной матрице, в которых газ находится в сорбированном состоянии. Движение или диффузия газа через эти пустоты описывается согласно закону Фика (Алексеев, 2010; Rogers, R. et al. 2007). Учитывая эту особенность ископаемых углей, часто говорят о двойных системах пористости и проницаемости угольных пластов, в которых газ находится как в свободном, так и в сорбированном состоянии (не подчиняющемся газовым законам), а при движении газа возможны различные режимы – от диффузии до фильтрации. Трещины, макро- и микропоры составляют меньшую часть от общего объема пустотного пространства ископаемых углей, а большая часть представлена молекулярными порами.

Таким образом, одной из важных задач для характеристики имеющегося пустотного пространства и прогноза

изменения его структуры при дополнительном воздействии является изучение размерности, количества, пространственного положения, генетической предрасположенности различных видов пустот в угле, что и являлось целью проведенных исследований.

Классификация форм и размеров пор природных углей носит условный характер из-за большого их разнообразия. При этом у разных авторов классификации разнятся незначительно и отражают размерность, сорбционные характеристики и типы движения газа. Международным союзом по теоретической и прикладной химии (IUPAC) официально принята Классификация пор по размерам М.М. Дубинина. Каждый интервал размеров пор соответствует характерным адсорбционным свойствам, находящим свое выражение в изотермах адсорбции с использованием модельной зависимости размера мезопор от давления равновесного газа над ними (модель Барретта-Джойнера-Халенда, метод ВЖН). В соответствии с принципом учета возможного фазового состояния метана, поглощенного природным углем, поры можно подразделить на пять групп (Сорбционные..., 1987): 1) микропоры (6-10 Å); 2) субмикропоры (12-32 Å); 3) мезопоры (32-100 Å); 4) макропоры (100-1000 Å); 5) супермакропоры (>1000 Å).

Основным процессом перемещения газа в угольном пласте является диффузия. Движение потока газа по закону Дарси осуществляется только в прискважинном пространстве и связано с движением по макротрещинам, которые присутствуют в матрице угля и дополнительно созданы при освоении углеметанового месторождения. Классификация пустот (рис. 1), учитывающая размерность пор и трещин в углях и возможность перемещения молекул метана (законы движения), была предложена в работах Эттингера (Эттингер, Еремину 1980).

Уголь, как природный объект, обладает естественной трещиноватостью и пористостью, образующейся на разных стадиях катагенетического преобразования вещества угля, а также под действием эндогенных и экзогенных факторов. Системы естественной пустотности углей (трещины и поры вместе) очень различны и зависят от множества факторов: исходного органического вещества и условий его захоронения (мацерального состава), зольности, степени метаморфизма угля, удаленности от разрывных нарушений, присутствия в разрезе магматических пород, глубины залегания пласта, напряженности массива горных пород и др.

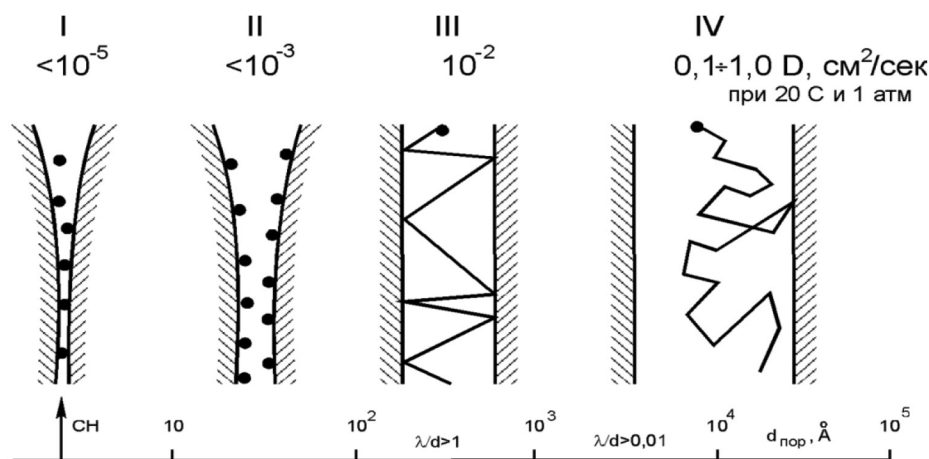


Рис. 1. Схематическое представление о массопереносе в порах различных размеров (по И.Л. Эттингеру и И.В. Еремину, 1980)

I – молекулярные поры,  
 II – фольмеровские поры,  
 III – кнудсеновские поры,  
 IV – паузейлевские поры

Для удобства представлений о возможностях передвижения молекул метана за критический диаметр молекулы был принят 4,5 Å (диаметр молекулы метана 4,14 Å). Таким образом, мы рассматривали широкий диапазон пустот от макротрещин вплоть до 4-5 Å (0.0004 - 0.0005 микрона).

**Методы и результаты**

В основу коллекции для исследований были выбраны образцы углей средних марок (ГЖ, Ж, ЖК), отобранные из действующих шахт Воркутской мульды Печорского каменноугольного бассейна, а также из керна скважины, пробуренной в ее центральной части из пластов нерабочих мощностей (всего более 20 образцов). Кроме того для сравнения с углями другого марочного состава анализировались образцы углей рабочих пластов Зашуланского месторождения (Д, ДГ) и антрациты бассейна Циньшуй (КНР). Аналитические исследования, результаты которых приводятся в работе, были выполнены в лабораториях геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова (Р.А.Хамидуллин, Д.В.Корост, А.Хомяк, Д.Гафурова, Н.В.Пронина) и ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

В настоящее время в связи с развитием приборной базы и возможностью проведения тонких и уникальных аналитических исследований и постановкой различных задач в области исследования пустотного пространства углей следует обращать внимание на разделение методов исследования по возможности выявления пустот разной размерности. Нами был опробован комплекс различных аналитических исследований, позволяющий оценить пространственное положение трещин разного размера в угле, выявить их приуроченность, показать наличие пустот молекулярного уровня. В ходе обработки полученных данных проведено сравнение результатов, полученных разными методами, и выявлены особенности и определена чувствительность отдельных методов исследований.

При макроописании углей особое внимание было уделено наличию трещин кливажа, построены модели распределения трещин. Трещины расположены в трех взаимно перпендикулярных направлениях, чаще заполнены кальцитом. Во всех исследованных образцах наиболее развитая система трещин расположена перпендикулярно напласто-

ванию, расстояние между трещинами и их протяженность варьируют. Четкой зависимости от стадий метаморфизма углей не прослеживается, у нескольких образцов были отмечены зеркала скольжения. Послойная трещиноватость угля приурочена к полуматовым разностям, связана чаще всего с наличием минеральных примесей. Также при макроскопическом описании выделялись макролитотипы угля (блестящий, полублестящий, матовый, полуматовый) с характерными текстурными признаками (полосчатость, штриховатость и др.), из которых впоследствии отбирались образцы для дальнейших исследований.

На макроуровне была проведена компьютерная макротомография с последующей обработкой полученных данных. Статистическим методом сегментации изображений были получены гистограммы распределения протяженностей и ширины раскрытия трещин в образцах, построена круговая диаграмма распределения трещин по сторонам света (рис. 2). На примере хорошо видно, что наиболее развита система кливажных трещин одного направления. Безусловно, подобные результаты следует учитывать при моделировании разработки пласта с целью добычи метана, т.к. это направление трещин будет принимать более активное участие в формировании движения свободного газа и влиять на форму депрессионной воронки. Основной проблемой, выявленной при обработке полученных материалов, является, по нашему мнению, отсутствие ориентировки образцов для исследований (метка «север» ставилась на образцах условно, для расчета данных). При детальном анализе работ по характеристике пластов с целью организации метаноугольного промысла следует организовать ориентированный отбор образцов, например из обнажений, горных выработок и составлять карты с розами-диаграммами распределения трещиноватости по площади участка планируемых работ.

Также применялась обработка данных макротомографических исследований с помощью другого программного обеспечения (DataViewer, Ctan, CTvol и CTvox). Пористость, рассчитанная по полноразмерному керну образцов нерабочих пластов средних марок метаморфизма, составляет 1,29 – 8,42%. Были построены пространственные модели распределения раскрытых трещин по этим образцам (рис. 3).

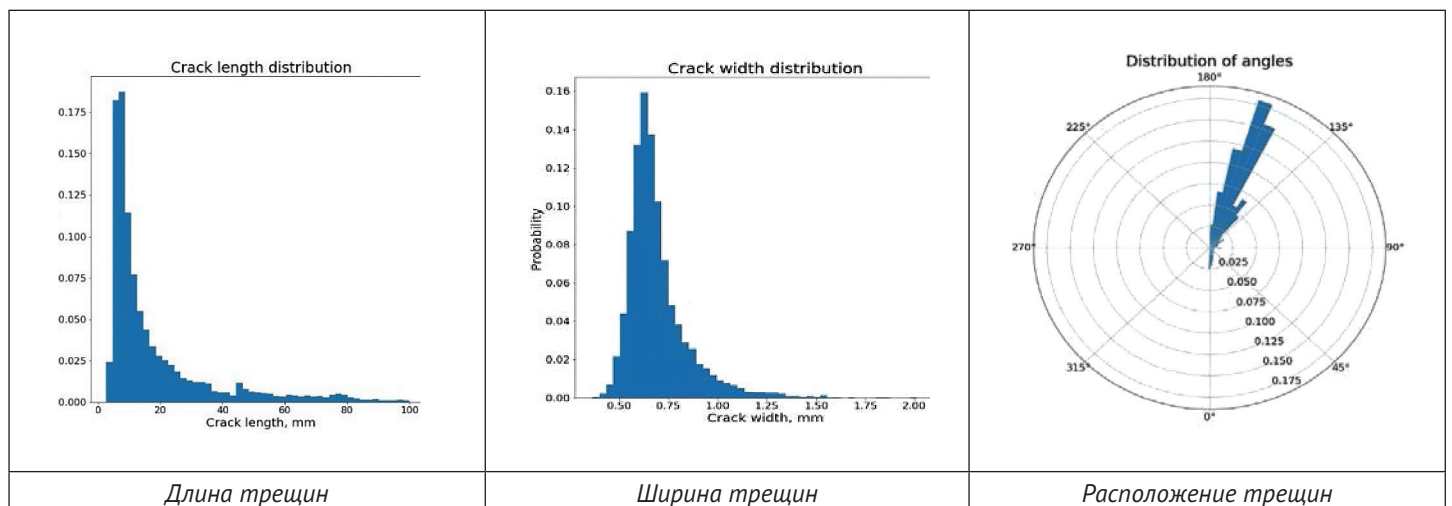
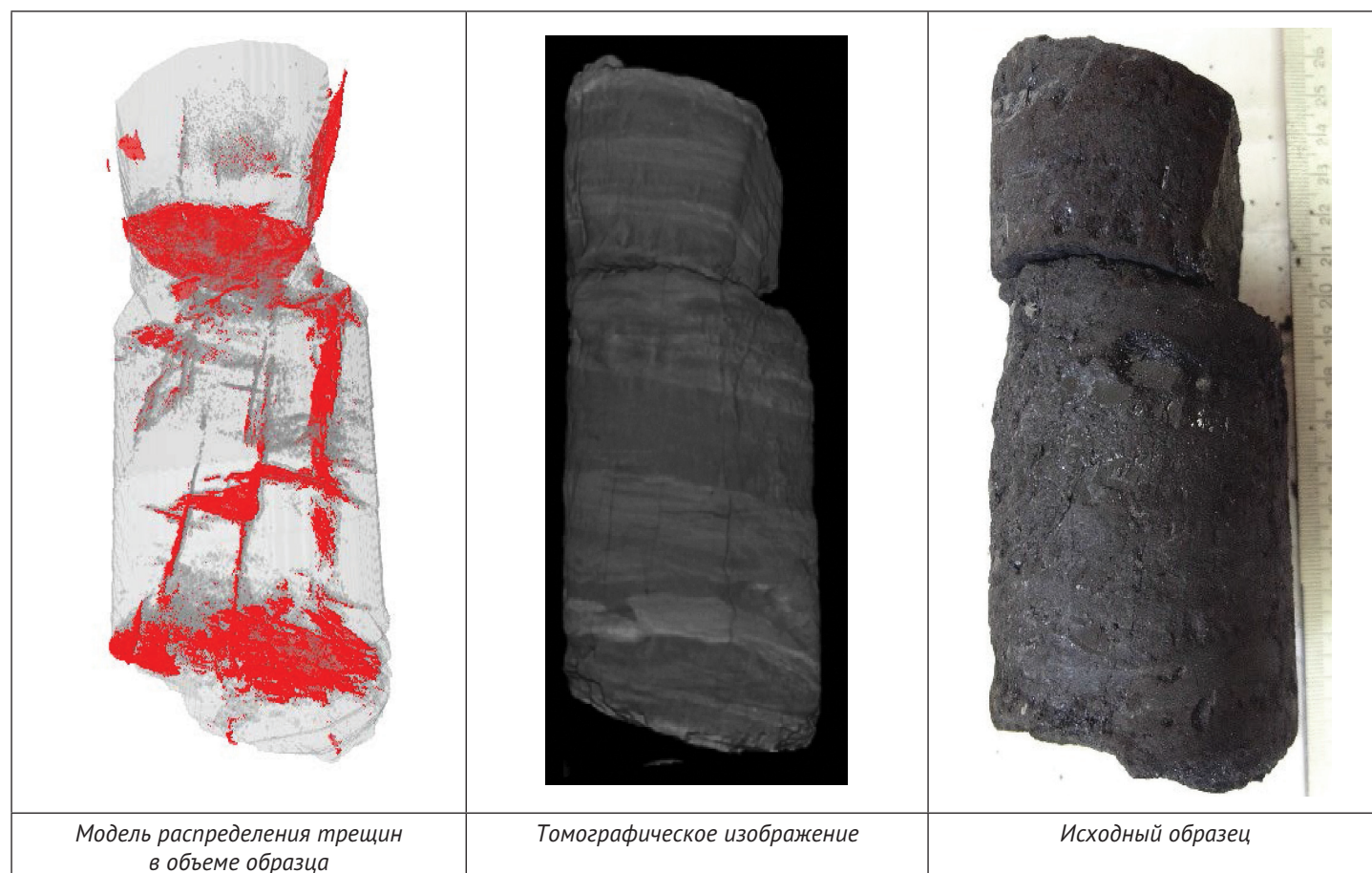
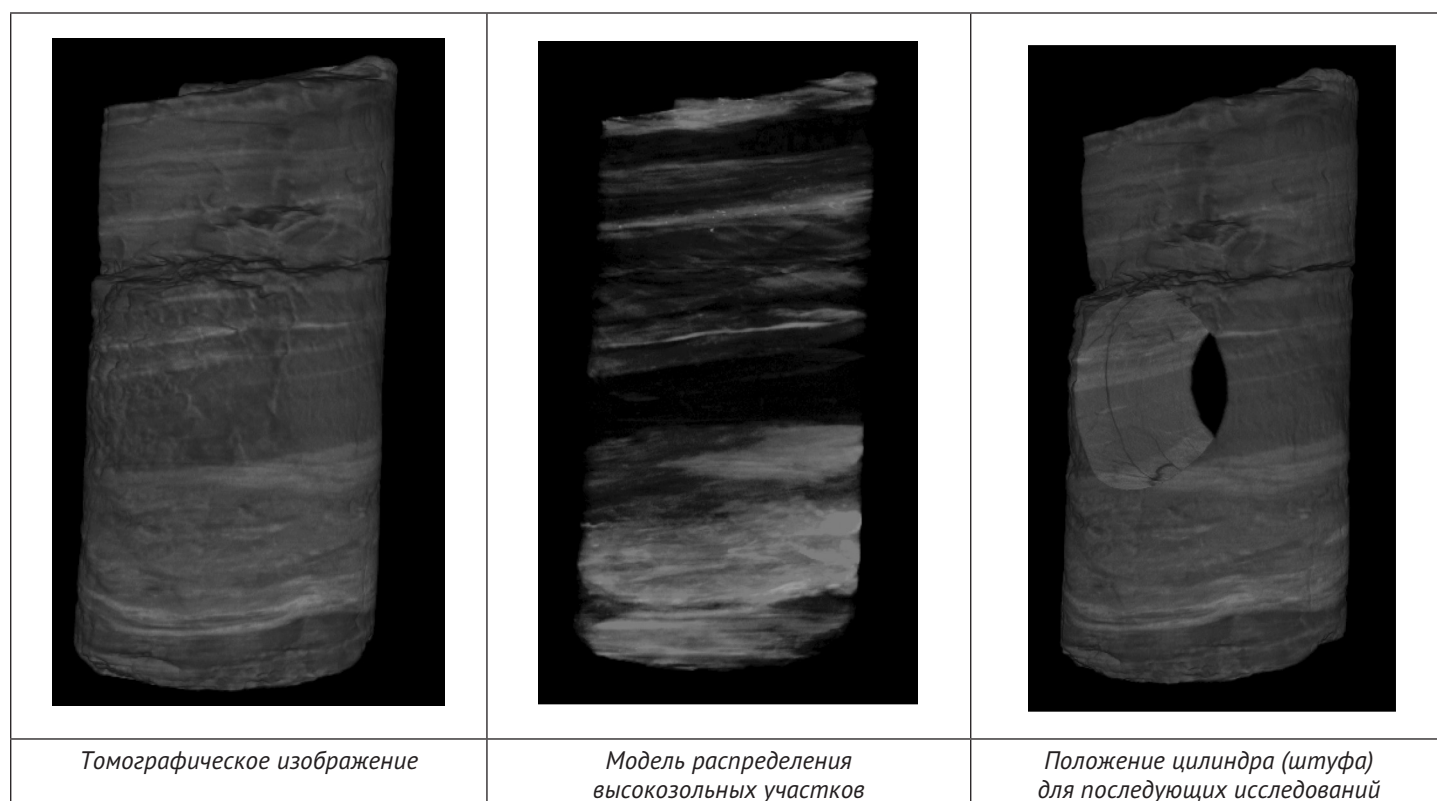


Рис. 2. Пример результатов обработки данных макротомографии методом сегментации изображений: чувствительность макротомографии составляет 1 воксель = около 0,17мм





**Рис. 3.** Пример результата пространственного моделирования распространения трещин по данным макротомографических исследований



**Рис. 4.** Пример результата пространственного моделирования с выделением участков, обогащенных минеральными примесями для выбора интервала выбуривания штуфа по данным макротомографических исследований



**Рис. 5.** График сопоставления результатов рассчитанной и измеренной пористости по образцам углей из керна нерабочих пластов Воркутской мульды (оранжевый – рассчитано по томографии, серый – измерено методом газонасыщения)

В дальнейшем из образцов выбуривались поперек напластования цилиндры (штуфы) размером 30х60мм для измерения открытой пористости по газу (насыщение азотом). Цилиндры, по возможности, выбирались с учетом выделенных при описании образцов макролитотипов угля. Это условие было трудно соблюдать, т.к. ширина прослоев описанных литотипов часто была меньше параметров, необходимых для замеров открытой пористости по цилиндрам (рис. 4). Кроме того, к сожалению, наиболее блестящие прослои обладают высокой хрупкостью, в процессе выбуривания разрушались, по некоторым образцам не удалось провести успешную пробоподготовку. Полученные в результате такого аналитического исследования данные относятся к более зольным прослоям, или обогащенным липоидными и инертинитовыми микрокомпонентами.

Пространственные модели, полученные по результатам томографических исследований, позволяют рассчитывать необходимые параметры, как по всему исследованному образцу, так и по выбранной его части. В данном случае, мы моделировали фрагмент образца, который выбуривался для других исследований. При сравнении результатов пористости по выбуренным штуфам (изменяется в широких пределах 0,79 – 10,2%), полученной в результате расчетов по данным макротомографии (рис. 4) и аналитических исследований насыщения газом (от 0,8 до 9,5%) была получена хорошая сходимость результатов (рис. 5), что свидетельствует о получении значений открытой пористости углей, связанной преимущественно с открытыми трещинами. Именно такие пустоты содержат метан в свободном состоянии в углях. Доля их в общей пустотности угольного пласта невелика. Проведенное сравнение доказывает возможность применения любого из этих методов и их заменяемость, что особенно ценно в связи с хрупкостью углей и затрудненной подготовкой цилиндров для анализа.

Также по всем исследованным образцам определялась зольность, ее значения варьируют в широком диапазоне вплоть до углистых пород. Зависимости открытой пористости, полученной разными методами (рассчитана или измерена) от зольности не выявлено. Отмечается, что наименее зольные образцы (до 10%) обладают более высокими значениями пористости. По нашему мнению, это может

свидетельствовать о большей трещиноватости и хрупкости блестящих литотипов, сложенных преимущественно мацералами группы витринита.

Как уже отмечалось ранее, по описанным литотипам отбирались образцы (1-1,5 см) для микротомографических исследований. Результаты компьютерной микротомографии также обрабатывались с помощью программных пакетов (DataViewer, Stan, CTvol и CTvox), результатом чего стали пространственные модели пустотности и минерализации исследованных образцов. Надо отметить, что большинство микротрещин, выявленных этим методом исследования, являются «залеченными» и содержат минеральные включения аутигенного происхождения. При более детальном исследовании было показано, что заполненность микротрещин минеральными включениями не сплошная (рис. 6 лев.), они остаются проницаемыми для диффузии молекул метана.

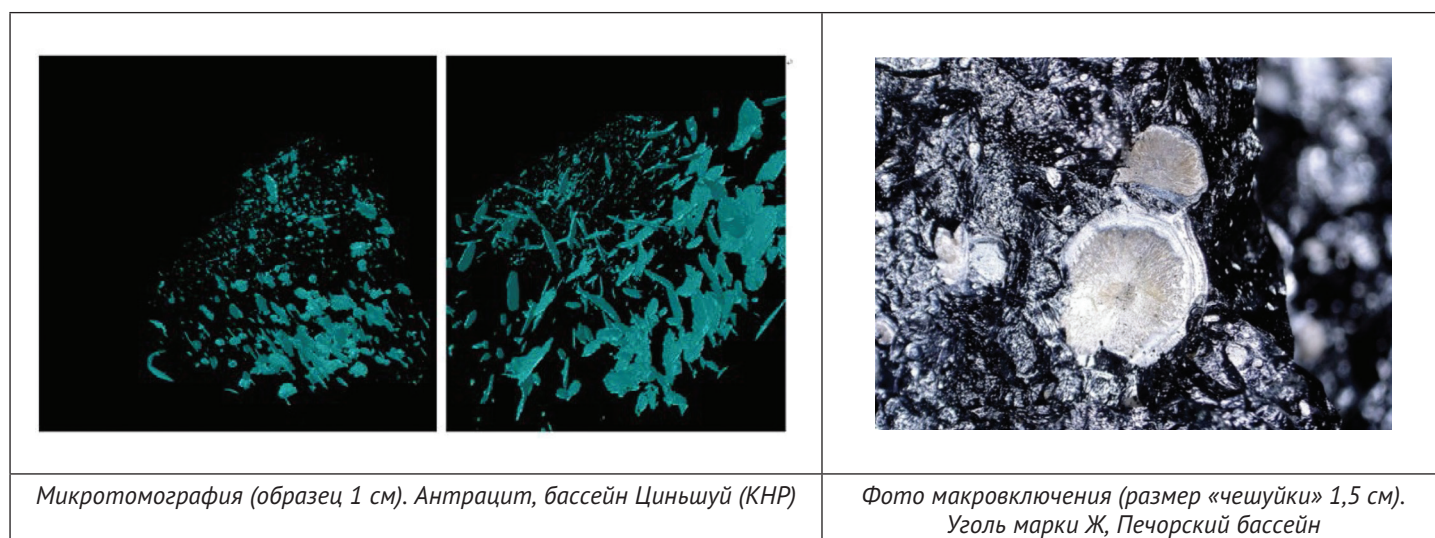
Наиболее интересно наличие систем взаимно перпендикулярных трещин, выполненных кальцитом (рис. 6), повторяющих трещины кливажа, выявленные на макроуровне при описании образцов и обработке данных макротомографии (рис. 6 прав.). Подобный характер распределения трещин был выявлен только у антрацитов пласта 3 бассейна Циньшуй (КНР). В других случаях расположение пустот и их «залечивание» минеральными компонентами не имеет четких закономерностей.

Вопрос формирования трещин, включая микротрещины, и заполнения их минеральным веществом, а также время, когда эти процессы происходят, остается до сих пор до конца не определенным. Отмечается, что угли средних стадий метаморфизма (марки Ж, ЖК) обладают наибольшей трещиноватостью, что было показано еще в работах середины XX в. (Аммосов, 1960). Частные случаи распределения трещиноватости не всегда укладываются в эту закономерность. Так нами, при изучении трещиноватости антрацитов двух перспективных для добычи метана угольных пластов бассейна Циньшуй (КНР), было отмечено, что пласт №3 трещиноват (трещины кливажа выявляются как на макро-, так и на микроуровне – рис. 6 прав.), в то время как пласт №15 не обладает макротрещиноватостью, а при микротомографических исследованиях содержит минеральные включения, не связанные с седиментогенезом,





**Рис. 6.** Примеры микрофотографических исследований. Микротрещины заполнены кальцитом (антрацит, бассейн Циньшуй (КНР))



**Рис. 7.** Чешуйчатые минеральные включения в углях

расположенные хаотично поперек напластования (рис. 7 лев.). Мелкие минеральные образования аутигенного происхождения, не связанные между собой и не образующие системы, обнаружены практически во всех исследованных образцах углей. Часто они представляют собой чешуеобразные (дискообразные) минеральные выделения разной размерности (наблюдаемые в образцах при макроописании и на микрофотографических снимках) с выраженным центром кристаллизации (рис. 7 прав.) представлены карбонатами (кальцит, сидерит, доломит, др.). Уточнение химического состава подобных минеральных образований планируется в дальнейшем.

Как было показано при детальном рассмотрении (рис. 6 лев.), образованные минеральные выделения заполняют полость не полностью и могут таким образом рассматриваться как реперы нарушения прочностных характеристик исследованных образцов, что особенно важно при моделировании воздействия на пласт. В ходе исследований было выявлено, что подобные минеральные образования можно дифференцировать по плотности их минерального выполнения, соответственно составу, что дало возможность проследить зональность приуроченности разных минеральных включений и свободных пустот (рис. 8). Это связывается нами с разным временем генерации отдельных пустот и вторичным их заполнением. Вероятно, эти

процессы коррелируются с углефикационными скачками, фиксирующими катагенетическое преобразование органического вещества (ОВ) углей. Химическая перестройка ОВ приводит к образованию трещин, которые заполняются минеральными образованиями из циркулирующей в пласте воды. На рис. 8В видно присутствие в образце трех разноокрашенных групп минеральных включений. Первая группа параллельная напластованию (розовый цвет) связана, по-видимому, с зольным прослоем в угле, образовавшемся во время осадконакопления. Две другие группы (зеленая и фиолетовая) расположены поперек напластования, формировались позже и заполнены аутигенными минералами. При этом выявленные пустоты в образце (так же как и на рис.8А) не всегда совпадают с группами минеральных включений.

Были проведены эксперименты для подтверждения генерационной способности углей и углистых пород – способность образовывать газообразные и жидкие углеводороды при катагенезе (гидропиролиз образцов). Нагреву до температуры 300°C без доступа воздуха в присутствии дистиллированной воды подвергались образцы углей разных марок (от Б до ЖК), углистых пород, янтарей, горючих сланцев. Эксперимент продолжался 5 дней. Все исследованные образцы сгенерировали газообразные и жидкие углеводороды в разном объеме. В данной работе, посвя-

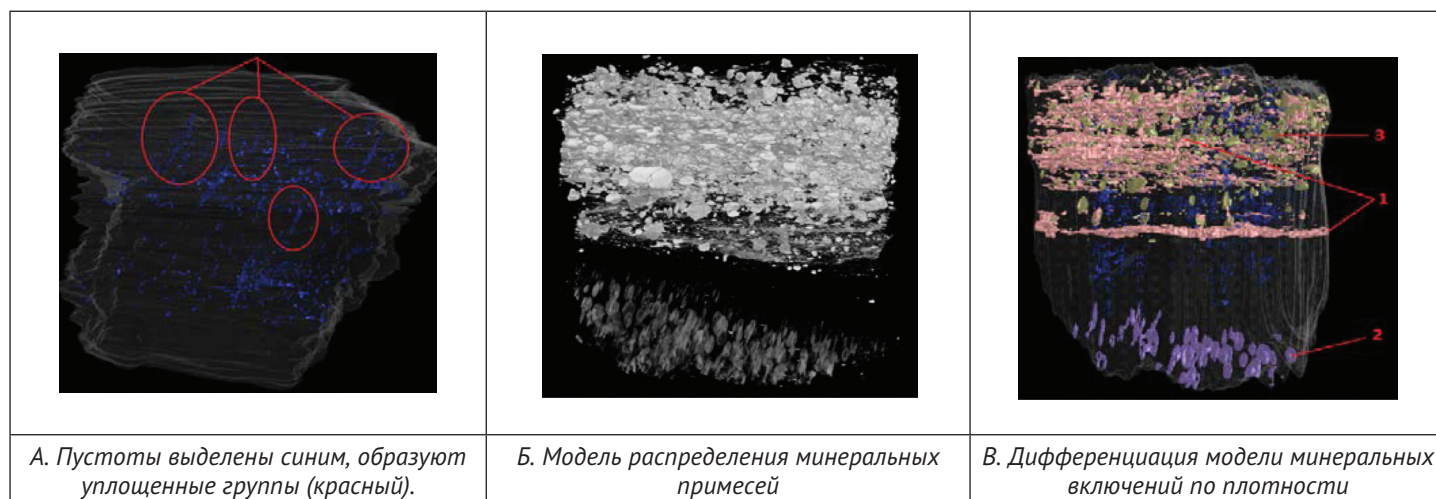


Рис. 8. Томографические модели. Образец (1 см) угля марки Ж, Печорский бассейн

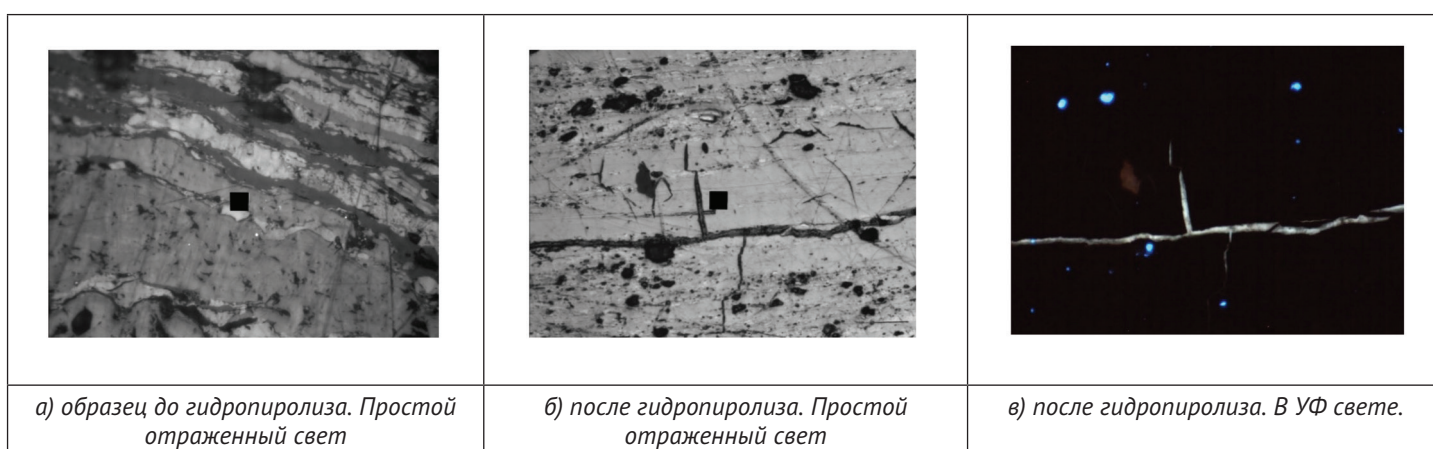


Рис. 9. Трещины в прослое витринита, образованные в процессе эксперимента по гидропиролизу. Уголь марки Ж, Печорский угольный бассейн. (Размер метки 12x12 мкм)

щенной структуре пустотного пространства в углях, хотелось бы обсудить частичные результаты, связанные именно с этим вопросом. В исследованных образцах углей после гидропиролиза образовались дополнительные трещины (изучение в аншлифах под микроскопом), вызванные процессами деструкции органического вещества углей. Трещины приурочены к мацералам группы витринита (рис. 9), заполнены сгенерированными УВ, что фиксируется их свечением в ультрафиолетовом свете. Подобный процесс в нефтематеринских породах описывается как микрофлюидоразрыв с образованием микроневти.

Кроме того, характер трещиноватости и связанность трещин между собой и приуроченность их к отдельным мацералам углей изучалась в петрографических аншлифах в отраженном свете без проведения термических экспериментов с образцами. При микроскопическом изучении определяют удельную трещиноватость, аперттуру раскрытия трещин, характер и приуроченность трещин к микролитотипам.

Приуроченность трещин к блестящим и полублестящим литотипам углей связана с присутствием в них микрокомпонентов группы витринита, которые достаточно чутко и равномерно реагируют на изменяющиеся Р-Т условия (факторы катагенетического преобразования ОВ углей). Формирование подобных катагенетических трещин про-

слеживается даже на ранних стадиях преобразования углей (гуминит в бурых углях - рис. 10в). Именно они, впоследствии, составляют основную систему кливажных трещин, большая часть которых является открытыми и принимает участие в свободном перемещении газа. Однако, как было показано нашими исследованиями (Макарова, Пискунов, 2018), эти трещины (как макро- так и микро-) при перераспределении минерализованных пластовых вод, «залечиваются» минеральными аутигенными включениями, что согласуется с выводами, полученными нами при других видах исследований (см. рис. 6-9).

Для большинства образцов коллекции характерно, что трещины распространяются в пределах микрокомпонентов группы витринита и затухают в микропрослоях, сложенных другими мацералами или обогащенных седиментационными минеральными примесями (рис. 10а). Трещины извилистые, образуют системы, перпендикулярные напластованию, имеют практически неизменную аперттуру на всем протяжении. Подобный характер отмечается и на макроуровне. В изученных аншлифах в пределах бесструктурного витринита средних и высоких стадий преобразования вещества углей (марки ДГ, А) трещины тонкие, извилистые (рис. 10б). Характер распределения трещин существенно меняется в зависимости от степени метаморфизма углей. Наиболее извилистые, соединяющиеся между собой, образующие



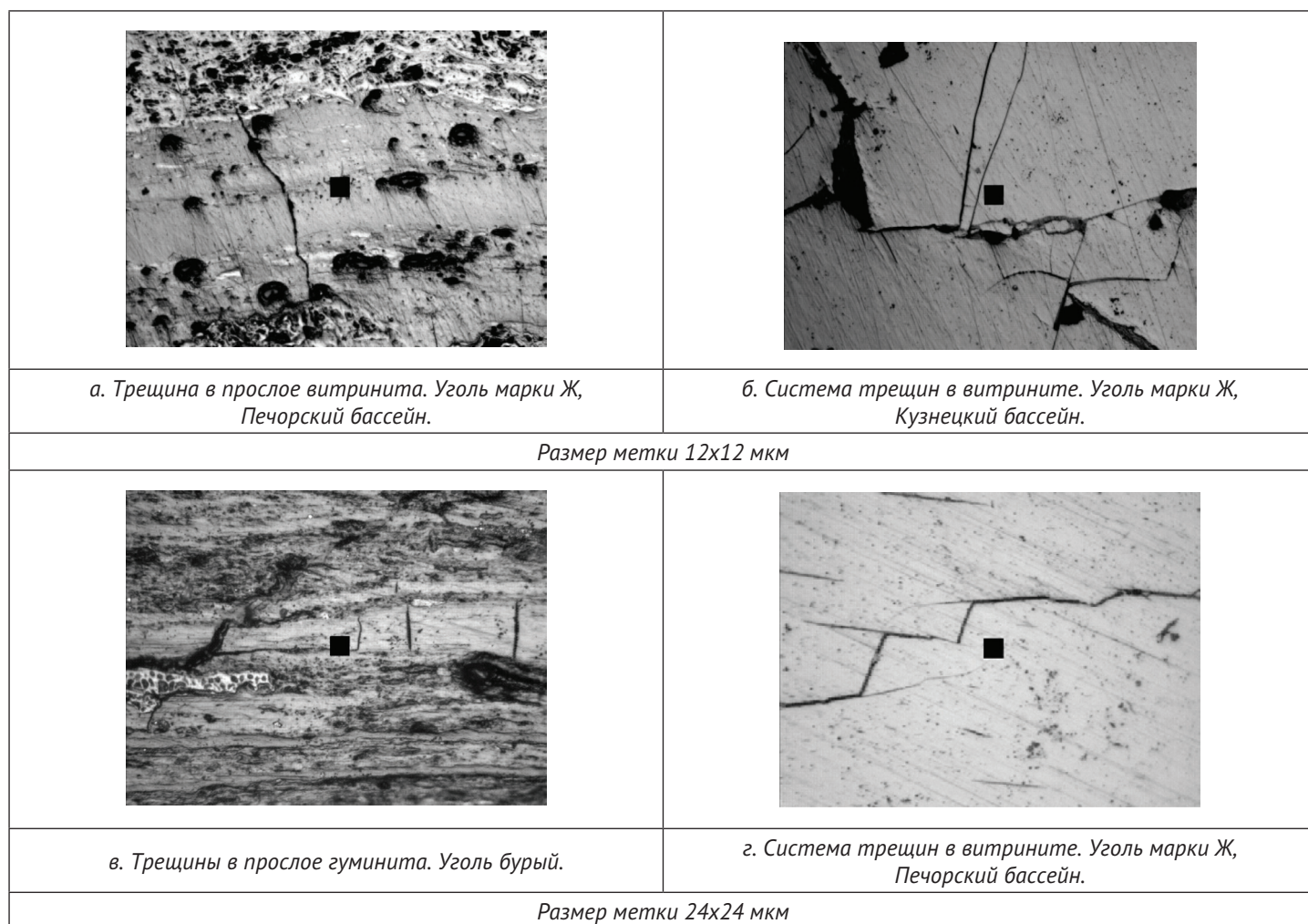


Рис. 10. Фотографии аншлифов углей (угли каменные, бурые)

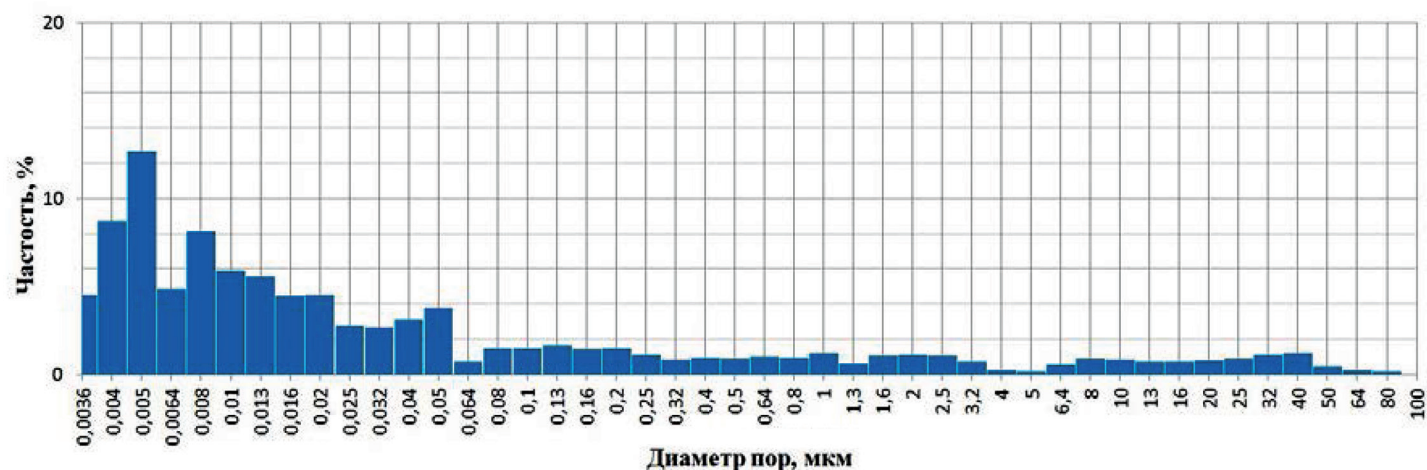


Рис. 11. Пример результатов ртутной порометрии. Уголь марки Ж Печорского бассейна

густую сеть (рис. 10 б, г) трещины представлены в образцах средних стадий (марки Ж, ЖК). Микроскопические исследования подтверждают повышенную трещиноватость коксующихся марок углей, что является хорошей предпосылкой для создания дополнительных трещин при ГРП.

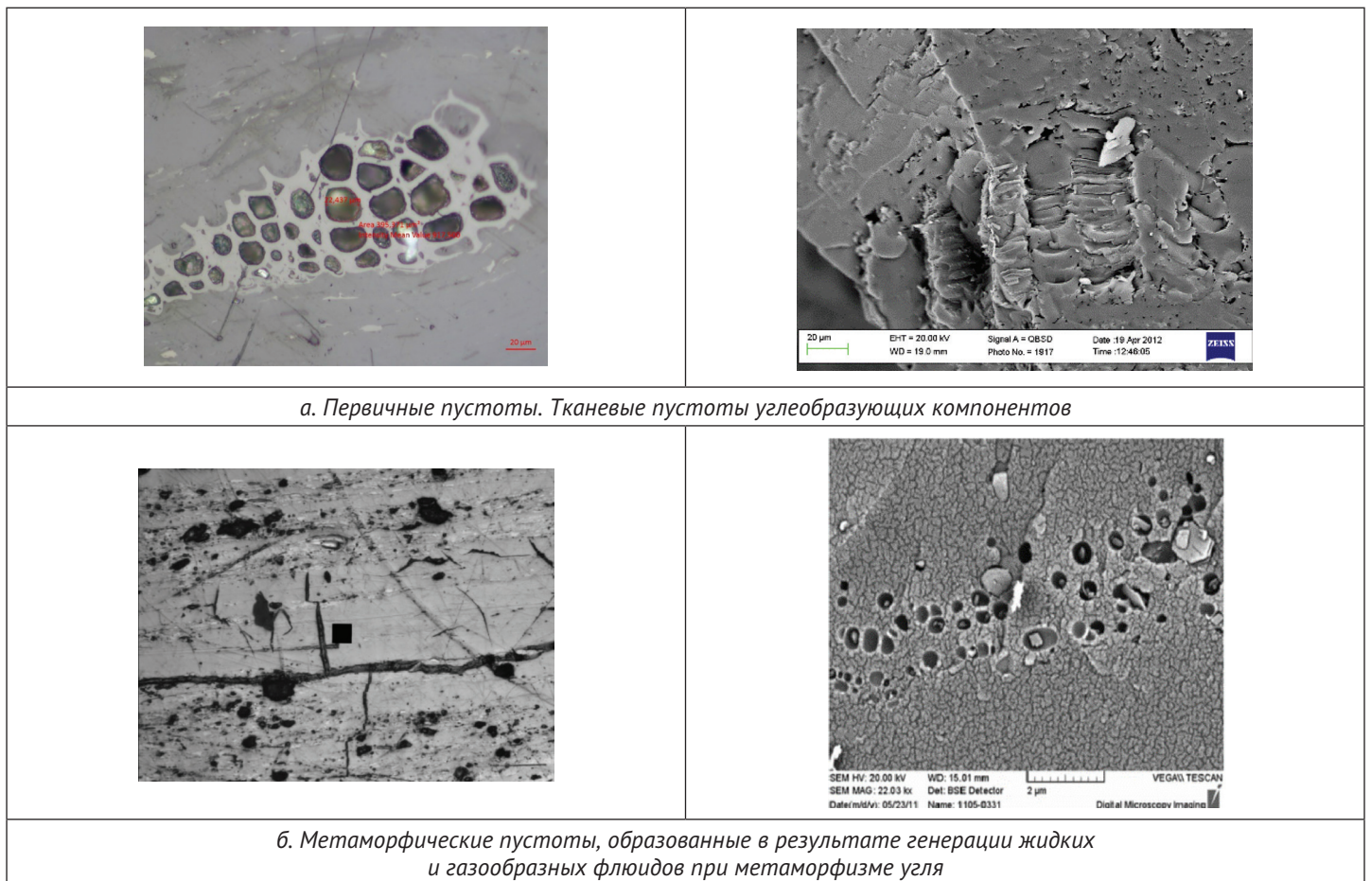
Проведенный комплекс исследований не охватывает большинство кнудсеновских, фольмеровских и молекулярных пор (Эттингер и др, 1975, 1980), принимающих

наибольшее участие в содержании сорбированного в углях метана. По отдельным образцам (марка Д Зашуланского месторождения, марка Ж Печорского бассейна, антрациты бассейна Циньшуй (КНР)) были получены результаты ртутной порометрии. Особенностью пробоподготовки является необходимость получения пробы длиной 10 см, диаметром 1 см. Ее можно заменить измерениями на подготовленной дробленой пробе фракции 0,3см. Эти огра-



**Рис. 12.**  
Генетическая классификация пустот в угле (по Luo Jinling, 2011)

Тип		Происхождение
<b>Первичные пустоты</b>	Тканевые пустоты	Тканевые пустоты углеобразующих компонентов
	Газовые пустоты	Пустоты, образованные в результате генерации жидких и газообразных флюидов при метаморфизме угля
<b>Вторичные пустоты</b>	Пустоты брекчий	Образуются при тектоических напряжениях
	Пустоты обломков	
	Пустоты трения	
<b>Минеральные пустоты</b>	Пустоты отпечатков	Ямы, образованные минералами в органическом веществе, вызваны разницей твердости
	Межкристаллические пустоты	Пустоты между минеральными кристаллами
	Коррозионные пустоты	Пустоты образованные за счет коррозии минералов



**Рис. 13.** Примеры генетических типов пустот по данным микроскопических исследований (отраженный свет, оптический микроскоп – левая сторона, электронная микроскопия – правая сторона)

ничения пробоподготовки и выполнения анализа с использованием ртути ограничивают широкое применение этого информативного метода. В процессе отбора из углей фракции 0,3 см выяснилось, что наиболее «чистые» витринитовые прослои дробятся до получения пыли, а фракцию составляют более зольные пропластки, часто обогащенные пиритом, что было определено нами аналитически. Таким образом, второй способ пробоподготовки не может быть

признан корректным для подобных исследований.

Результатом полученных данных по ртутной порометрии являются гистограммы распределения размеров «входных отверстий» пустот в исследуемых образцах (рис. 11). Все полученные гистограммы свидетельствуют о наличии наибольшего количества пустот с размерами менее 0,5 – 0,05 мкм. Рассмотренные ранее методы исследования пустотного пространства углей не могли выявить эти пу-

стоты. При этом метод ртутной порометрии не позволяет создать пространственную модель пустотного пространства углей, а дает лишь его количественную оценку.

Для выявления пустот малых размерностей (менее 0,5 – 0,05 мкм) следует обратиться к генетической классификации пустотного пространства углей (рис. 12). Клеточное строение самого органического вещества углей содержит первичные пустоты, является наиболее малоизученным и поддается выявлению только специальными методами (например, электронная микроскопия). Микрокомпоненты группы инертинита часто имеют хорошо сохранившееся клеточное строение исходных растений, могут изучаться и в петрографических аншлифах (рис. 13а лев.). К метаморфическим пустотам (рис. 13 б) следует относить газовые пустоты и катагенетическую трещиноватость, что было показано в результате проведенных экспериментов.

Вторичные пустоты в предложенной классификации имеют отношение к тектоническому воздействию на горный массив в целом и в связи с этим, по нашему мнению, должны иметь очень широкий диапазон размерности образующихся трещин. Необходима постановка специальных работ по изучению образцов углей из зон дробления, связанных с разрывными нарушениями различного происхождения. Подобные зоны могут быть областями разгрузки сорбированного метана из угольного пласта, или наоборот – тектоническими экранами, влияющими на сохранность газа в пласте.

Минеральные пустоты, выделенные авторами рассматриваемой генетической классификации (см. рис. 12), разнообразны и требуют отдельного детального подхода в изучении, что частично было рассмотрено в наших исследованиях.

## Выводы

Разработка метаноугольных месторождений с целью добычи метана как самостоятельного полезного ископаемого возможна только с применением специализированных технологий, разработанных и опробованных для добычи углеводородов из нетрадиционных коллекторов.

Для снижения рисков, связанных с формированием дополнительных техногенных трещин в угольном пласте (группе пластов) при добыче метана следует проводить исследования структуры природного пустотного пространства углей. В настоящее время изучению угольного кливажа уделяется большое внимание (Rodrigues, C.F. et al, 2014; Martin S. Brook et al, 2016), применяется сочетание макротомографии керн и данных ГИС (геофизических исследований скважин).

Нами проведен комплекс аналитических исследований структуры пустотного пространства углей разной степени преобразованности, который выявил особенности и чувствительность разных примененных методов. Только комплексный подход к изучению пустотности углей позволит создать наиболее достоверную объемную модель трещиноватости с учетом самых мелких пустот.

При пробоподготовке и интерпретации результатов исследований нужно учитывать неоднородность угольного пласта как природного объекта. Необходимо предварительно проводить макроописание образцов с выделением макролитотипов угля и учитывать их площадное распространение.

Учет пространственных неоднородностей, связанных с процессами седиментогенеза и дальнейшей геологической историей развития региона, позволит экстраполировать результаты аналитических исследований, выполненные с различной степенью детальности, на весь угольный пласт (промышленную часть пласта).

## Литература

1. Алексеев А.Д. Физическое состояние метана в ископаемом угле в аспекте его извлечения // Неделя горняка. 2010.
2. Аммосов И.И. и Ерёмин И.В. Трещиноватость углей. Изд-во академии наук СССР. 1960. – 110 с.
3. Газоносность угольных бассейнов и месторождений СССР: в 3 т. / Гл.ред. А.И.Кравцов. М.: Недра, 1979-1980 – 3 т.
4. Голицын М.В., Богомолов А.Х. и др. Метаноугольные бассейны и месторождения России. Пути решения проблем добычи метана из угольных пластов // Геология нефти и газа. - 2013. - № 3. - С. 88-95.
5. Руководство по наилучшей практике эффективной дегазации источников метановыделения и утилизации метана на угольных шахтах. Серия публикаций ЕЭК по энергетике. – Нью-Йорк, Женева: Изд-во ООН, 2010. – № 31. – 87 с.
6. Макарова Е.Ю., Пискунов А.Р. Изучение пустотного пространства углей // Наука и техника в газовой промышленности – 2018. - №1. – С. 93-101.
7. Сорбционные процессы в природном угле и его структура / В. А. Бобин. – М.: ИПКОН АН СССР, 1987. – 135 с.
8. Эттингер И.Л., Шульман Н.В. Распределение метана в порах ископаемых углей. – М.: Недра, 1975. – 112с.

## Bibliography

1. Alekseev A.D. "Physical state of methane in the mineral coal and it's extraction aspect" // Miner's week.2010.
2. Ammosov I.I., Eremin V.I. Fracture of the coal. Publishing house of the USSR Academy of Sciences. 1960. – 110 p.
3. "Presence of gas in coal basins and deposits of the USSR" vol 3 / Chief editor A.I.Kravtsov:Depths,1979-1980-3 vol.
4. Golitsyn M.V., Bogomolov A.Kh. and others. Methane-coal basins and deposits of Russia. Ways of problem solving of methane extraction from coal rakes // Geology of oil and gas. - 2013. - № 3. - p. 88-95.
5. Guidelines on best practices for methane sources efficient degassing and utilization of methane at coal mines. ECE publications series of energy. New York, Geneva: United Nations Publishing House, 2010. No. 31. - 87 p.
6. Makarova E. Yu., Piskunov A. R. Study of the void space of coal // Science and technology in the gas industry – 2018. - №1. – Pp. 93-101.
7. Sorption processes in natural coal and its structure / V. A. Bobin. – М.: - IPKON an SSSR, 1987. 135 p.
8. Ettinger I.L., Shulman N.V. Methane distribution in the pores of mineral coals. - М.: Depths, 1975. - 112p.

9. Эттингер И.Л., Еремин И.В. Пористость и пустотность каменных углей // Изв. АН СССР.: Серия геологич. – 1980. – №5. – С.124-129.

10. Luo Jinling. The Analysis of Coal Reservoir Physical Properties and Geological Factors in Southern Qinshui Basin. (2011).

11. Martin S. Brook, Bruce W. Hebblewhite, Rudrajit Mitra “Cleat aperture-size distributions: A cause study from the Late Permian Rangal Coal Measures, Bowen Basin, Australia” / International Journal of Coal Geology 168 (2016) P. 186-192

12. Rodrigues, C.F., Laiginhas, C, Fernandes, M. at all “The coal system: A new approach to its study” / Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 6 (2014) P.208-218

13. Rogers, R. E., Kumar Ramurthy, Gary Rodvelt, Mike Mullen. 2007. Coalbed Methane: Principles and Practices Second Edition. Halliburton. Oktibbeha Publishing, LLC, Starkville. 518p.

14. Saulsberry, J.L., Schafer, P.S. A Guide to Coalbed Methane Reservoir Engineering, Gas Research Institute, Report GRI-94/0397, Chicago, Illinois (1996).

9. Ettinger I.L., Eremin I.V. Porosity and voidness of hard coals, Izv. AN USSR.: A series of geological. - 1980. - №5. - P.124-129.

10. Luo Jinling. The Analysis of Coal Reservoir Physical Properties and Geological Factors in Southern Qinshui Basin. (2011).

11. Martin S. Brook, Bruce W. Hebblewhite, Rudrajit Mitra “Cleat aperture-size distributions: A cause study from the Late Permian Rangal Coal Measures, Bowen Basin, Australia” / International Journal of Coal Geology 168 (2016) P. 186-192.

12. Rodrigues, C.F., Laiginhas, C, Fernandes, M. at all “The coal system: A new approach to its study” / Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 6 (2014) P.208-218.

13. Rogers, R. E., Kumar Ramurthy, Gary Rodvelt, Mike Mullen. 2007. Coalbed Methane: Principles and Practices Second Edition. Halliburton. Oktibbeha Publishing, LLC, Starkville. 518p.

14. Saulsberry, J.L., Schafer, P.S. A Guide to Coalbed Methane Reservoir Engineering, Gas Research Institute, Report GRI-94/0397, Chicago, Illinois (1996).

---

**Елена Юрьевна Макарова**, канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета

**Хань Цзиньсюань**, аспирантка кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета

**Андрей Романович Пискунов**, магистр геологии, выпускник кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета

**Кувинов Игорь Владимирович**, бакалавр геологии кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета

**Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова**

119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

**E.Yu. Makarova**, PhD, senior researcher of Petroleum Geology Department of Geological Faculty

**Han Jinxuan**, postgraduate of Petroleum Geology Department of Geological Faculty

**A.R. Piskunov**, master of Geology, graduate of Petroleum Geology Department of Geological Faculty

**I.V. Kuvinov**, bachelor of Geology, graduate of Petroleum Geology Department of Geological Faculty

**Lomonosov Moscow State University**

Moscow State University named after MV Lomonosov, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

---