

СТАТЬЯ

УДК 622.33:543.429.23
DOI 10.17513/use.38441

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЯДЕРНОГО
МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГАЗОНОСНОСТИ ТРЕЩИНОВАТЫХ УГЛЕЙ**

**Рыбалкин Л.А. ORCID ID 0000-0003-2648-1909,
Шилова Т.В. ORCID ID 0000-0001-5056-9279,
Азаров А.В., Шажко Я.В.**

*ФГБНУ Институт физики горных процессов, Россия, Донецк,
e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com*

Изучение метаноносности и фильтрационной способности ископаемых углей является актуальной задачей при разработке глубокозалегающих газоносных пластов в сложных горно-геологических условиях. Применение методов ядерного магнитного резонанса при исследовании газонасыщенных углей в сочетании с воздействием на внутреннюю структуру образцов перспективно для решения этих задач. Целью работы является оценка эффективности методов ядерного магнитного резонанса для исследования изменения общей пористости и метаноносности углей. Методы исследования включают анализ карт T1/T2 угольных образцов до и после воздействия на внутривещное пространство образцов импульсами сжатого газа, полученных с помощью релаксометрии ядерного магнитного резонанса и спектральных кривых угольных проб из зоны геологического нарушения до и после насыщения газом метаном после одноосного нагружения, полученных спектроскопией ядерного магнитного резонанса. Полученные результаты демонстрируют, что использование методов спектроскопии ядерного магнитного резонанса, как средства мониторинга при отработке глубокозалегающих углей в сложных горно-геологических условиях, эффективно и позволяет своевременно и качественно оценивать изменение водородсодержащих соединений и внутренней структуры углей. Вместе с тем в современных источниках приведено мало результатов изучения углей методами спектроскопии ядерного магнитного резонанса при внешних физических воздействиях. Необходимо развивать это направление, уделить особое внимание работе с насыщенными метаном образцами, что позволит прогнозировать результаты полевых работ при разработке газоносных пластов.

Ключевые слова: уголь, водородсодержащие компоненты, спектроскопия ядерного магнитного резонанса, температура, малоподвижный и подвижный водород

**APPLICATION OF NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE METHOD
FOR STUDYING GAS CONTENT IN FRACTURED COALS**

**Rybalkin L.A. ORCID ID 0000-0003-2648-1909,
Shilova T.V. ORCID ID 0000-0001-5056-9279,
Azarov A.V., Shazhko Ya.V.**

*Institute of Physics of Mining Processes, Russia, Donetsk,
e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com*

The research of methane content and filtration capacity of fossil coal is an important task in the development of deep-laying gas-bearing formations under complex geological conditions. In gaseous coal studies the application of nuclear magnetic resonance techniques, combined with effects on the internal structure of samples, is promising for these purposes. The aim of this work is to assess the effectiveness of nuclear magnetic resonance techniques in examining the change in total porosity and methane content of coal. The research methods include analysis of T1/T2 maps of coal samples before and after their interstitial space is exposed to the compressed gas impulses. The maps are obtained with nuclear magnetic resonance relaxometry. Also, the research methods include analysis of spectral curves of coal samples from the zone of geological disturbance before and after saturation with methane gas after uniaxial loading, the curves are obtained with nuclear magnetic resonance spectrometry. The obtained results demonstrate that nuclear magnetic resonance spectroscopy methods are effective for the monitoring of development of deep-settling coals in complex mining geological conditions, and they enable timely and high-quality evaluation of changes in hydrogen-containing compounds and the internal structure of coal. At the same time, modern works provide few results of coal research performed by nuclear resonance spectroscopy, the coal being under external physical influences. It is necessary and important to develop this trend and to pay special attention to works with saturated methane samples, which will provide the opportunity to predict the results of field works in the development of gas-bearing seams.

Keywords: coal, hydrogen-containing components, nuclear magnetic resonance spectroscopy, temperature, low-mobility and mobile hydrogen

Введение

В настоящее время рост масштабов подземной добычи угля напрямую связан с разработкой глубокозалегающих пластов. По мере увеличения глубины разработки месторождений горно-геологические условия непрерывно ухудшаются. Возрастание газонасыщенности угля с глубиной, а также проведение работ в областях тектонических разломов провоцирует выбросы горной породы и газа, сопровождаемые внезапными газодинамическими явлениями [1]. Все это повышает риски возникновения аварийных ситуаций, ухудшает условия труда в шахтах, вызывает непредвиденные остановки и снижает экономические показатели добычи [2]. Своевременно полученная информация о структурных особенностях угольного массива и о содержащихся в нем газообразных углеводородах необходима для повышения безопасности работ при подземной разработке месторождений на больших глубинах [3; 4], добычи метана в виде самостоятельного энергетического ресурса [5], определения качественных характеристик извлеченного сырья. Перспективными методами исследования петрофизических особенностей и свойств угольных пластов и содержащихся в них флюидов являются методы, основанные на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

Исследования, проводимые с помощью метода релаксометрии ядерного магнитного резонанса (ЯМР-релаксометрии), направлены на получение широкого спектра информации об угольном веществе. Большинство работ посвящено изучению адсорбции метана в углях [6; 7]. Ряд исследований направлен на установление соотношения открытых и закрытых пор [8; 9] и получение информации о характере фильтрационных каналов [10]. Другой областью применения данного подхода является получение информации о распределении газа в пустотном пространстве [11]. В то же время метод ЯМР-релаксометрии не позволяет дать оценку составных частей химических соединений, входящих в состав исследуемого образца и содержащихся в нем флюидов. Для этого используются методы ЯМР-спектроскопии.

Основной отличительной особенностью метода ^1H -спектроскопии ядерного магнитного резонанса (^1H ЯМР-спектроскопия) является возможность разделения водородсодержащих соединений, входящих в состав исследуемого образца [12; 13]. При исследовании углей данный метод активно используется для анализа и оценки содержания ме-

тана [14; 15]. Техническая реализация метода позволяет отделить адсорбированный газ от остальных соединений [16; 17], в том числе органического происхождения. Большое внимание уделяется изучению распределения основных химических элементов (углерод, водород, кислород с примесями азота, сера) в угольном веществе [18; 19].

В настоящее время в современных литературных источниках основной акцент в работах, посвященных анализу углей методами ЯМР, сделан на исследовании вещественного состава и петрофизических свойств. Однако данные методы могут быть использованы для анализа изменения способности угольного вещества к накоплению и последующей отдаче пластового газа, например, при ведении работ по дегазации пластов в зонах с нарушенной структурой массива. Традиционные методы исследования, включающие бурение дегазационных скважин для оценки газоотдачи и проведение детальной геологической съемки с целью выявления систем естественной трещиноватости в приразломной зоне, характеризуются значительной трудоемкостью и требуют продолжительных временных затрат на получение репрезентативных данных. Применение методов ЯМР предоставляет возможность оперативного получения количественных данных о содержании пластового газа в пробах угля, отобранных из различных зон геологических нарушений. Таким образом, внедрение ЯМР-технологий в практику исследования угольных пластов с нарушенной структурой представляет собой перспективное направление, позволяющее существенно повысить эффективность мониторинга газосодержания и деформационных процессов в угольном массиве.

Цель исследования – оценить изменение общей пористости и метаноносности углей методами ЯМР.

Материалы и методы исследования

Первый этап работы был посвящен исследованию изменения объема пор и системы естественной трещиноватости угольных образцов после циклического повышения внутрипорового давления. В качестве материала исследования использовался трещиноватый уголь. Резкий рост давления в системе трещин и пор создавали пневмоимпульсами сжатого газа. Исследование изменения пористости и трещиноватости угля проводилось методом ЯМР-релаксометрии.

Лабораторные эксперименты проведены на слоистом мелкопористом длиннопламен-

ном газовом (ДГ) угле из Моховского разреза (Кузбасс). Использовали цилиндрические образцы (керны) диаметром 30 мм, высотой 55–60 мм. Общее количество образцов составило 15, которые помещали в термоусадочную непроницаемую трубку, стягивающую боковую поверхность и способствующую сохранению их целостности. Пневматическое воздействие проводилось на лабораторной установке [20], обеспечивающей возможность расширенного регулирования среднего и отдельно от него дифференциального давлений газа в цилиндрическом образце угля, его осевого и бокового сжатия. Данная установка позволяет смоделировать природные условия на глубине примерно 100 м, где пластовое давление будет равняться 20–25 бар. Обрабатывались наименее проницаемые образцы плотного угля в условиях постоянного гидростатического сжатия $\sigma = 15$ бар. Обработка проводилась импульсами давления газа Р амплитудой от 5 до 10 бар. Был выполнен ряд серий воздействий (экспериментов), каждая из которых включала подачу 10 импульсов давления газа.

На втором этапе работы проводилось исследование изменения адсорбционной способности проб угля из зоны геологического нарушения после нагружения с последующим насыщением газом метаном. В качестве материала исследования выступали пробы угля марки Ж (жирный) шахты им. Скопинского (Донецкий угольный бассейн). Нагружение производили изменением осевого сжатия дробленого угольного материала. Изменение газоносности моделировали за счет насыщения проб в замкнутом объеме. Исследование содержания метана осуществляли методом ^1H ЯМР-спектроскопии.

Отбор проб осуществлялся из шахтного поля пласта h_6 шахты им. Скопинского в зоне сжатия с 1,6 до 1,1 м. Место отбора проб характеризуется нарушением целостности и однородности породного массива с развитой системой естественных трещин. Пробы подвергались дроблению и просеиванию на ситах с максимальной ячейкой решетки 2,5 мм. Проба номер 1 не подвергалась сжимающим нагрузкам, в пробах 2, 3 и 4 они составили 1, 3 и 5 кбар соответственно.

Пробы были разделены на две группы – до и после обработки газом. Для насыщения отобранных проб угля был разработан лабораторный стенд в составе баллона со сжатым газом метаном, линии контроля подачи сжатого газа, камеры насыщения и системы размещения образцов. Исследование содержания газа метана в отобранных

пробах угля осуществлялось с помощью метода ^1H ЯМР-спектроскопии. Работы были проведены с использованием спектрометра ЯМР высокого разрешения с резонансной частотой протонов 300 МГц. Использовался коммерческий радиочастотный датчик для образцов диаметром 10 мм. Спектры ЯМР ^1H были зарегистрированы с приложением предварительно откалиброванного 90-градусного радиочастотного импульса. Шкала химических сдвигов (δ ^1H) была предварительно откалибрована по сигналу остаточных протонов в дейтерированной воде. Каждый спектр был зарегистрирован с 256-кратным накоплением сигнала (время задержки между спектрами составляло 250 мс, количество точек при сборе ССИ – 8192, время между точками при сборе ССИ – 41,6 мкс, спектральный диапазон – 40 м.д., общее время записи одного спектра – 341 мс). Обработка спектров проводилась в программе MestReNova.

Результаты исследования и их обсуждение

Методом ЯМР-релаксометрии были получены спектры поперечной релаксации T_2 (использовалась CPMG последовательность) и карты продольной-поперечной релаксации T_1/T_2 (использовалась IR-CPMG последовательность). Измерения проводились до пневматического воздействия и после пневматического воздействия с донасыщением жидкостью. Исследования выполнены на ЯМР-анализаторе «Micro12-040V» (производство Niumag, Китай) с индукцией магнитного поля 0,28 Тл, рабочей частотой 12 МГц и расстоянием между эхо-импульсами 0,1 мс, температура магнитной системы 32 °С.

На рис. 1 представлены спектры поперечной релаксации T_2 до и после пневматического воздействия для образцов № 3 и 9 слоистого мелкопористого длиннопламенного газового (ДГ) угля. Спектры поперечной релаксации T_2 до пневматического воздействия имеют одномодальный вид с максимумом спектра на значении времени в среднем 0,57 мс. Средняя пористость образцов составляет 12,61 % с минимальным и максимальным значениями 11,7 и 13,76 % для образцов № 3 и 9 соответственно. Одномодальный вид спектра в зоне малых времен говорит о наличии флюида только в порах малого размера. После пневматического воздействия спектры поперечной релаксации T_2 приобретают бимодальный вид для всех исследованных образцов, что свидетельствует об изменении структуры порового пространства.

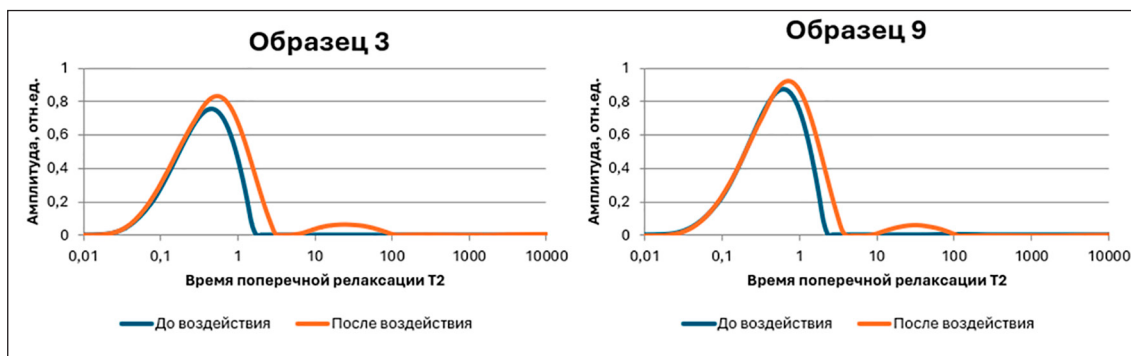


Рис. 1. Спектры поперечной релаксации T_2 образцов № 3 и 9 до и после пневматического воздействия
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

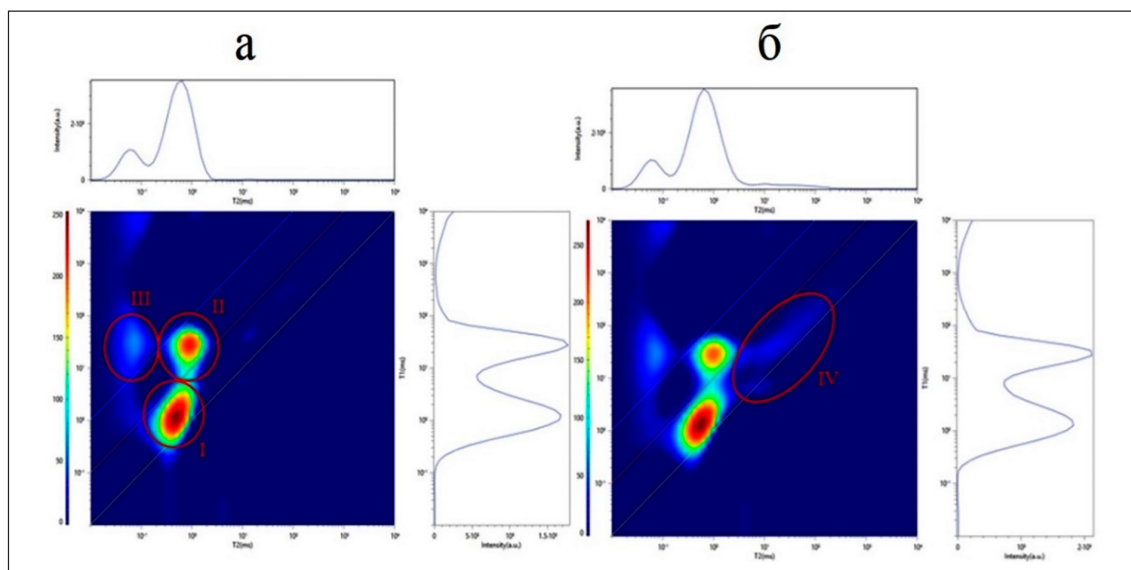


Рис. 2. Карты T_1/T_2 продольной и поперечной релаксации для образца № 9:
а – до воздействия, б – после циклического увеличения порового давления
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Максимум части спектра, соответствующего порам малого размера, смещается в сторону увеличения значений времен и в среднем составляет 0,68 мс. Помимо этого, ширина моды этой части спектра увеличена, что говорит о появлении пор большего размера. Появление моды на временах 10–100 мс со средним значением максимума 27,11 мс свидетельствует о появлении пор крупного размера. Средняя пористость образцов составляет 20,41% с минимальными и максимальными значениями 14,78 и 17,24% для образцов № 10 и 3 соответственно.

Анализ карт продольной и поперечной релаксации T_1/T_2 основывается на различии характеристик T_1 и T_2 для флюидов. Для воды отношение $T_1/T_2 \sim 1$, тогда как для метана это отношение больше. В каче-

стве методики интерпретации результатов была взята представленная в работе карта измерений T_1 и T_2 для насыщенных флюидами образцов [21].

При анализе карт T_1/T_2 до пневматического воздействия можно выделить три основные зоны. Зона I – это глинисто-связанная вода в порах малого размера. Зона II – это метан в порах, у которого значения T_1 больше, чем значения T_2 . Зона III – предположительно является битуминозной частью, так как значение T_2 для такого флюида гораздо меньше, чем T_1 . По значению амплитуды можно сказать, что битуминозной группы в образцах мало по сравнению с другими флюидами. Остальные низкоамплитудные возмущения являются артефактами математической обработки. После пневматического

воздействия для всех образцов можно выделить зону IV, что соответствует воде в более крупных порах, так как значение $T_1/T_2 \sim 1$. Зоны I–III так же выделяются. Для всех образцов амплитуда зоны, соответствующей глинисто-связанной воде, становится больше, чем для зоны метана, что говорит об увеличении количества воды в образце.

Исследование изменения содержания газа метана в пробах угля из зоны геологического нарушения после одноосного

нагружения осуществлялось с помощью метода ^1H ЯМР-спектроскопии. Работы были проведены с использованием спектрометра ЯМР высокого разрешения с резонансной частотой протонов 300 МГц. Обработка спектров проводилась в программе MestReNova. Результаты представляют собой набор спектральных линий для каждой пробы в исходном (без предварительного насыщения) и насыщенном газом метаном состоянии.

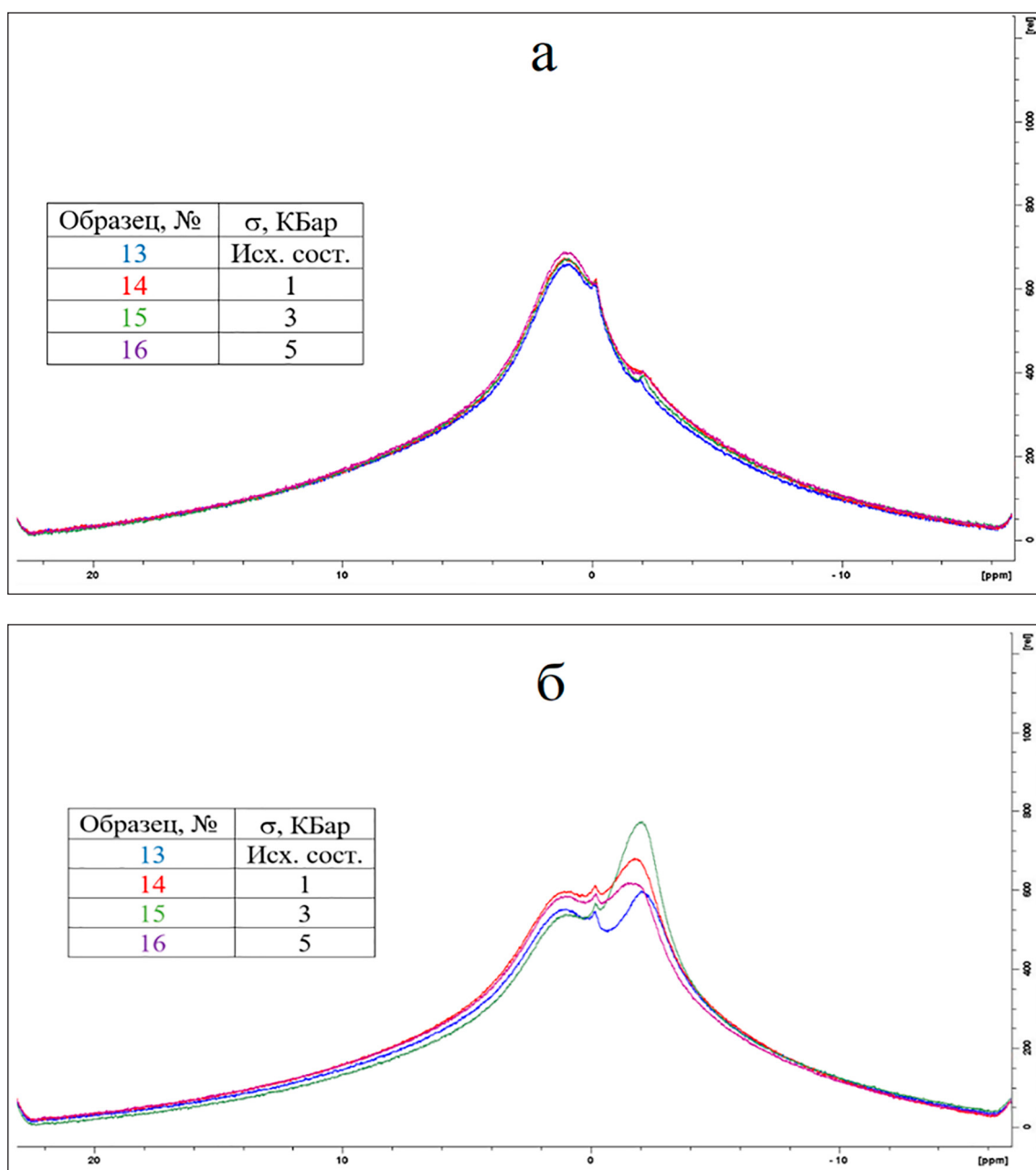


Рис. 3. ^1H ЯМР-спектры, полученные для проб углей из шахтного поля пласта h_6 в зоне сжатия с 1,6 до 1,1 м шахты им. Скопинского: а – до насыщения; б – после насыщения газом метаном
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

На рис. 3, а, представлены спектры проб 1–4 до насыщения газом метаном, которые представляют собой набор близкорасположенных линий с практически минимальной разницей в амплитуде сигнала. На спектральных линиях отчетливо выделяются два пика. Первый находится на отметке -1 горизонтальной шкалы и может расцениваться как остаточная вода в микропорах и пленках на берегах микротрещин мелкодисперсных гранул образцов. Второй пик на отметке -2 соответствует частоте соединений метана и может иллюстрировать долю остаточного газа метана в закрытых порах и скелете породы.

На рис. 3, б, представлены спектральные линии проб 1–4 после насыщения газом метаном. В данной спектральной картине отчетливо выделяются пики остаточной воды на отметке -1, а также значительное увеличение амплитуд пиков метана на отметке -2.

Изначальное содержание метана для каждого образца было практически одинаковым, с разницей менее 0,5 %, и составляло порядка 400 у.е. После операции насыщения значения составили 600, 620, 679, 775 для образцов 1–4 соответственно. Наименьшее значение содержания газа метана соответствует пробе в исходном, то есть состоянии без последующего одноосного нагружения. Пробы после обработки осевой нагрузкой в 1 и 3 КБар демонстрируют прирост адсорбированного газа с практически линейной зависимостью увеличения газосодержания. Пробе 4 соответствуют наиболее низкие показатели метаносности в серии осевого нагружения, однако она имеет самый широкий пик в серии, что говорит о большем количестве малоподвижных молекул метана. Подобная картина спектральных линий может свидетельствовать об увеличении несущей способности угля по газу метану после обработки вследствие развития микропроводящих каналов и перераспределения объемов открытой и закрытой пористости. Отчетливо выделяется зависимость изменения способности насыщения угля метаном от внешних воздействий в образцах из зон геологических нарушений.

Последующий анализ спектрограмм предполагает обработку в специализированных программных продуктах с последующим получением количественных характеристик полученных пиков спектрограмм ^1H ЯМР-спектроскопии, например, в программе MestReNova. Однако данный этап требует дополнительной подготовки в виде выделения реферативного измерения мета-

ноносности на известных концентрациях в жидкостной или газообразной формах. Другой важной особенностью работ является долгосрочная операция по насыщению образцов угля, ввиду различного состава и физических свойств отобранных проб может быть неравномерное насыщение образцов в одной группе. Данная задача может быть решена путем подбора отдельных соединений или же определенных концентраций газообразного метана с целью создания набора реферативных значений для последующего анализа количественного содержания газа метана для каждого набора проб.

Заключение

Проведены экспериментальные серии по исследованию угольных образцов методами ЯМР. Результаты анализа карт T1/T2, полученных методом ЯМР-релаксометрии, показали, что данный метод является перспективным инструментом исследования трещиноватости и порового пространства углей с целью определения способности угля к адсорбции и фильтрации газа метана, а также может быть использован при контроле проводящего объема в угле вследствие изменения геомеханической обстановки при разработке угольных пластов шахтным способом.

Серия экспериментальных исследований проб угля из зоны геологического нарушения методом ^1H ЯМР-спектроскопии позволила оценить изменение метаносности в пробах угля после одноосного нагружения. Дальнейшие исследования в данной области позволят разработать подход к определению метаносности отдельных областей угольных пластов, подверженных активной разработке или содержащих зоны геологических нарушений, как потенциально опасных по аккумулярованию аномально высоких объемов пластового газа с последующим риском негативных газодинамических явлений.

Дальнейшее развитие данного направления позволит разрабатывать новые методы и подходы лабораторных исследований газосодержащих углей. На основе данных, полученных с применением высокоразрешающей спектрометрической аппаратуры, предполагается создание библиотеки референтных спектральных профилей для анализа большого количества проб из областей геологических нарушений, пересекаемых горными выработками при отработке угольных пластов. Ключевой задачей в данном контексте выступает исследование сорбционно-десорбционных характеристик метана в на-

сыщенных им угольных образцах, что является критически важным для построения достоверных прогнозных моделей при освоении глубокозалегающих угольных пластов в сложных горно-геологических условиях.

Список литературы

1. Васильев А.Н., Шишляев В.В., Кузнецов Р.В. Методические подходы к построению геолого-гидродинамических моделей для оценки снижения газоносности угольных пластов при проектировании заблаговременной дегазации шахтных полей // Проблемы недропользования. 2022. № 2 (33). С. 5–22. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.02.005.
2. Pan Z., Connell L.D. Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data // International Journal of Coal Geology. March 2012. Vol. 92. P. 1–44. DOI: 10.1016/j.coal.2011.12.009.
3. Шилова Т.В., Рыбалкин Л.А., Яблоков А.В. Прогнозирование проницаемости трещиноватых углей в условиях естественного залегания // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 2. С. 75–85. DOI: 10.15372/FTPRPI20200209.
4. Черепанский М.М., Шишляев В.В. Моделирование эффектов изменения проницаемости угольных пластов при активных процессах десорбции метана и фильтрации пластового флюида // Горный журнал. 2019. № 10. С. 89–92. DOI: 10.17580/gzh.2019.10.13.
5. Мелехин Е.С., Кузина Е.С. Освоение невестрбованных месторождений углеводородов как фактор рационального недропользования // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2020. № 9 (189). С. 21–25. DOI: 10.33285/1999-6942-2020-9(189)-21-25.
6. Liu Z., Liu D., Cai Y., Yao Y., Pan Z., Zhou Y. Application of nuclear magnetic resonance (NMR) in coalbed methane and shale reservoirs: A review // International Journal of Coal Geology. February 2020. Vol. 218. P. 103261. DOI: 10.1016/j.coal.2019.103261.
7. Chen X., Yan T., Zeng F., Meng Y., Liu J. Application of a modified low-field NMR method on methane adsorption of medium-rank coals // Geofluids. 2021. Vol. 2021, Is. 1. P. 16. DOI: 10.1155/2021/6621819.
8. Zheng S., Sang S., Liu S., Jin Z., Wang M., Lu S., Feng G., Yang Y., Hou J. An NMR-Based Method for Multiphase Methane Characterization in Coals // Energies. January 2022. Vol. 15, Is. 4. P. 1532. DOI: 10.3390/en15041532.
9. Yingfeng S., Lin Q., Zhu S., Han C., Wang X., Zhao W. NMR investigation on gas desorption characteristics in CBM recovery during dewatering in deep and shallow coals // Journal of Geophysics and Engineering. January 2023. Vol. 20, Is. 1. P. 12–20. DOI: 10.1093/jge/gxac090.
10. Ji X., Song D., Zhao H., Li Y., He K. Experimental analysis of pore and permeability characteristics of coal by low-field NMR // Applied Sciences. February 2018. Vol. 8, Is. 8. P. 1374. DOI: 10.3390/app8081374.
11. Liu Y., Wang C. Determination of the absolute adsorption isotherms of CH₄ on shale with low-field nuclear magnetic resonance // Energy & Fuels. January 2018. Vol. 32, Is. 2. P. 1406–1415. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b03428.
12. Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X. Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption // International Journal of Coal Science & Technology. March 2017. Vol. 4, Is. 2. P. 129–146. DOI: 10.1007/s40789-017-0161-6.
13. Рыбалкин Л.А., Понамарева Е.А., Шилова Т.В., Сердюк И.М. Использование методов ядерного магнитного резонанса для исследования метана в углепородном массиве // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2024. Т. 11. № 3. С. 42–49. DOI: 10.15372/FPVGN2024110307.
14. Yan H., Nie B., Peng C., Liu P., Wang X., Yin F., Lin S. Molecular model construction of low-quality coal and molecular simulation of chemical bond energy combined with materials studio // Energy & Fuels. October 2021. Vol. 35, Is. 21. P. 17602–17616. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c02658.
15. Lin B., Song H., Zhao Y., Liu T., Kong J., Huang Z. Significance of gas flow in anisotropic coal seams to underground gas drainage // Journal of Petroleum Science and Engineering. September 2019. Vol. 180. P. 808–819. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.06.023.
16. Mohamed T., Mehana M. Coalbed methane characterization and modeling: review and outlook // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. November 2020. P. 1–23. DOI: 10.1080/15567036.2020.1845877.
17. Мусин Р.А., Асанова Ж.М., Халикова Э.Р., Джусупов Н.Д., Голик А.В. Разработка технологических критериев оценки для выбора перспективных участков добычи угольного метана // Уголь. 2024. Т. 1179. № 4. С. 102–108. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-102-108.
18. Smirnov V.G., Lyrschikov S.Y., Manakov A.Y., Rodionova T.V., Ismagilov Z.R. High-resolution 1H MAS NMR spectra of water sorbed by various types of coals // International Journal of Coal Preparation and Utilization. December 2024. P. 1–22. DOI: 10.1080/19392699.2024.2441841.
19. Li H., Xu C., Ni G., Lu J., Lu Y., Shi S., Ye Q. Spectroscopic (FTIR, 1H NMR) and SEM investigation of physicochemical structure changes of coal subjected to microwave-assisted oxidant stimulation // Fuel. June 2022. Vol. 317. P. 123473. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123473.
20. Рыбалкин Л.А., Сердюков С.В., Шилова Т.В., Сердюк И.М., Ефремов Р.А. Лабораторная установка и методика экспериментальных работ по циклическому пневмовоздействию на угольный материал // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2024. Т. 11. № 3. С. 50–56. DOI: 10.15372/FPVGN2024110308.
21. Elsayed M., Isah A., Hiba M., Hassan A., Al-Garadi K., Mahmoud M., El-Husseiny A., Radwan A. A review on the applications of nuclear magnetic resonance (NMR) in the oil and gas industry: laboratory and field-scale measurements // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. March 2022. Vol. 12, Is. 11. P. 2747–2784. DOI: 10.1007/s13202-022-01476-3.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках деятельности Молодежной лаборатории исследования электромагнитных свойств угля и горных пород Института физики горных процессов.

Financing: The work was carried out within the framework of the activities of the Youth Laboratory for the Study of Electromagnetic Properties of Coal and Rocks of the Institute of Physics of Mining Processes.