

Обнаружение техногенных коллекторов и оценка фильтрационных свойств барьерных целиков ликвидированных шахт

О.В. Тайлаков✉, Е.А. Салтымаков, Д.Н. Застрелов, М.П. Makeev, Е.А. Уткаев

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Кемерово, Российская Федерация

✉tailakov@uglemetan.ru

Резюме: Предложен и опробован комплексный подход к выявлению на горных отводах ликвидированных угольных шахт техногенных коллекторов и определению содержащегося в них метана, основанный на совместном применении методов электроразведки, измерения приземных концентраций атмосферных газов и изучения изотопии шахтного метана. Установлены границы техногенного газового коллектора, образованного выработанным пространством двух закрытых угольных шахт. Показано существенное отличие содержания легких изотопов углерода шахтного метана в техногенном коллекторе и нижележащих угольных пластах. Обсуждается влияние изменения атмосферного давления на повышение приземных концентраций метана. Для ограничения выделения метана из техногенного коллектора в здания и сооружения, расположенные на горном отводе ликвидированных шахт, рекомендуется бурение газодренажных скважин в зонах разуплотнения угленородного массива с последующим подключением к вакуумным насосным станциям, обеспечивающих дегазацию коллектора метана.

Ключевые слова: выработанное пространство, угольный пласт, метан, техногенный коллектор, электротомография, геоэлектрический разрез, изотопия, барометрическое давление

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0001 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений» (рег. №АААА-А21-121012290020-4).

Для цитирования: Тайлаков О.В., Салтымаков Е.А., Застрелов Д.Н., Makeev М.П., Уткаев Е.А. Обнаружение техногенных коллекторов и оценка фильтрационных свойств барьерных целиков ликвидированных шахт. *Горная промышленность*. 2023;(S2):6–10. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-6-10>

Detection of man-made reservoirs and assessment of filtration properties of barrier pillars in abandoned mines

O.V. Tailakov✉, E.A. Saltymakov, D.N. Zastrelov, M.P. Makeev, E.A. Utkaeв

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo,
Russian Federation

✉tailakov@uglemetan.ru

Abstract: An integrated approach to identification of man-made reservoirs within mining allotments of abandoned coal mines is proposed and tested, as well as determination of their methane content, which is based on the combined application of electrical exploration methods, measurement of ground-level concentrations of atmospheric gases and studies of mine methane isotopy. The boundaries of a man-made gas reservoir formed by the mined-out space of two abandoned coal mines were identified. A significant difference has been demonstrated between the content of light carbon isotopes of coal mine methane in the man-made reservoir and underlying coal seams. The paper discusses the impact of atmospheric pressure changes on the increase of ground-level methane concentrations. Drilling of gas-drainage boreholes in the decompression zones of the coal mass with subsequent connection to vacuum pumping stations providing methane collector degassing is recommended to limit methane release from the man-made collector into buildings and facilities located within the mining allotment of the abandoned mines.

Keywords: mined-out space, coal seam, methane, man-made reservoir, electrotomography, geoelectric cross-section, isotopy, barometric pressure

Acknowledgments: The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2021-0001 'Creation of multipurpose systems for monitoring and forecasting of gas-dynamic phenomena, control of the stress state, development of methods for their prevention and efficiency assessment during underground development of coal deposits' (Reg. No.АААА-А21-121012290020-4).

For citation: Tailakov O.V., Saltymakov E.A., Zastrelov D.N., Makeev M.P., Utkaeв E.A. Detection of man-made reservoirs and assessment of filtration properties of barrier pillars in abandoned mines. *Russian Mining Industry*. 2023;(S2):6–10. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-6-10>

Введение

В регионах с интенсивной угледобычей после закрытия угольных шахт в техногенных коллекторах, образованных выработанными пространствами, содержится метан. При изменении гидрологического режима подземных и поверхностных вод, барометрического давления метан может вытесняться на поверхность и накапливаться во взрывоопасных концентрациях в приповерхностных слоях атмосферы, представляя угрозу для зданий и сооружений, оборудования и населения [1–3]. Для предотвращения загазования промышленных и жилых зданий необходимо обеспечивать контроль содержания метана в техногенных коллекторах и выполнение мероприятий по управляемому выводу этого газа на поверхность. Для выявления на горных отводах ликвидированных угольных шахт техногенных коллекторов и определения содержащегося в них метана предложен комплексный подход, заключающийся в совместном применении методов электроразведки, измерения приземных концентраций атмосферных газов и изучения изотопии шахтного метана.

Результаты

Комплексный подход использован для выявления потенциально опасных зон по выходу метана на поверхность в пределах горного отвода двух ликвидированных шахт, расположенных в Ленинском геолого-экономическом районе Кузбасса. На основе измерений приземных концентраций шахтного метана с использованием газоанализаторов АХТ-ТИ и «Спутник-1М» определено пространственное распределение приземных концентраций метана, которые изменялись от 0 до 45,83% (рис. 1). Установлено, что наибольшие концентрации метана сосредоточены на юге – юго-западе исследуемой области в границах участка, относящегося к ликвидированной «Шахте №2», с локальным максимумом концентрации метана в области скважины, пробуренной в выработанное пространство «Шахты №1». Шахтные поля этих предприятий разделены барьерным целиком, который, предположительно, частично сдерживает возможные перетоки метана между ними.

Локализация зон с измененными электропроводящими свойствами выполнена на основе инженерно-гидрогеологического картирования техногенного коллектора с применением электротомографии [4; 5] вдоль пятнадцати геофизических профилей общей протяженностью более 6700 м (рис. 2). Количество, размещение и геометрия профилей выбраны с учетом горно-геологических условий рассматриваемого угольного месторождения, особенностей рельефа местности и расположенных на ней зданий. Построены результирующие геоэлектрические разрезы и зарегистрированы участки массива с измененными физико-механическими свойствами в результате ведения горных работ (рис. 3). При этом по контрастным электрическим свойствам зарегистрированы области «I», предположительно характеризующиеся как области горных пород с высокой степенью трещиноватости или системой трещин, заполненных флюидом. Мощность областей вдоль отдельных профилей превышает глубину исследований 45 м, что свидетельствует об изменениях физико-механических свойств рассматриваемой среды на данных участках, возможно, в результате ведения горных работ или естественных геологических проявлений.

Для оценки состояния барьерного целика, сформированного между двумя ликвидированными шахтами, выполнен

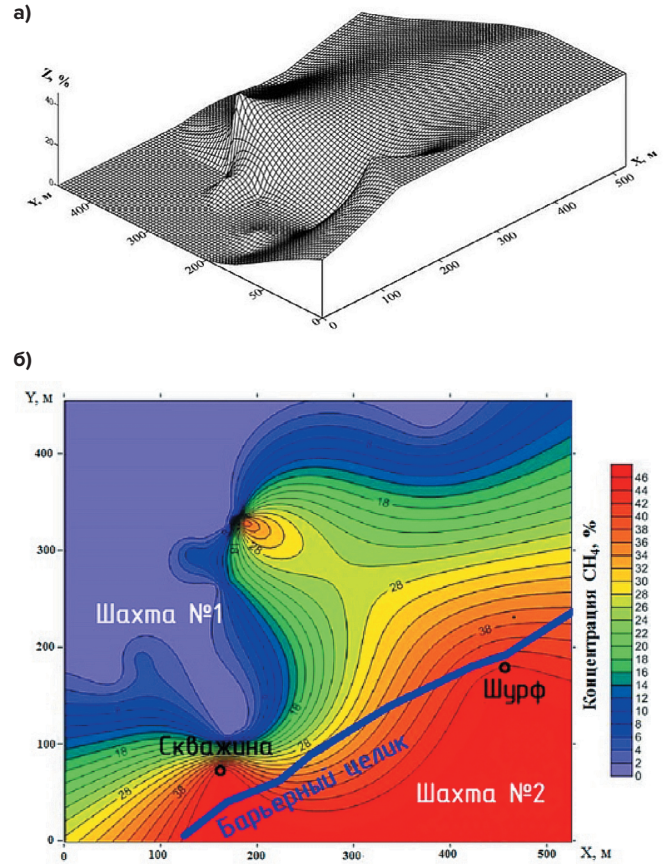


Рис. 1
Пространственное распределение приземных концентраций метана на горном отводе ликвидированной шахты:
а – трехмерное представление;
б – двумерное представление

Fig. 1
Spatial distribution of ground level methane concentrations with in the mining allotment of the abandoned mine:
a – a 3D visualization;
b – a 2D visualization

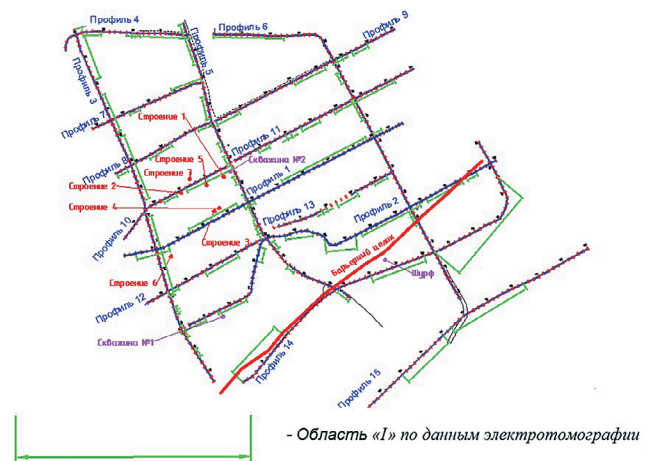


Рис. 2
Схема геофизических профилей

Fig. 2
Schematic map of geophysical profiles

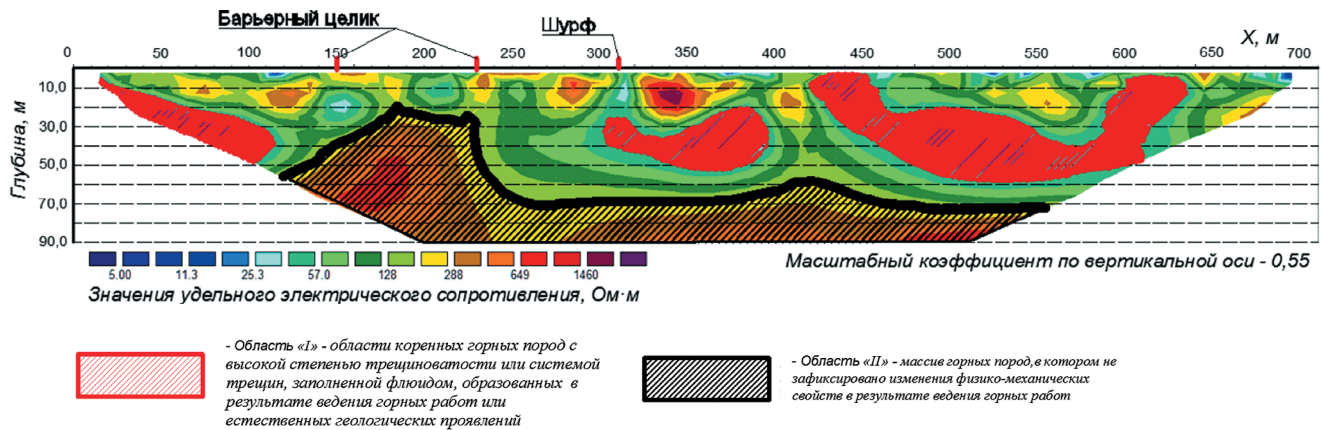


Рис. 3
Результирующий геоэлектрический разрез по профилю №14

Fig. 3
Resulting geoelectric cross-section along Profile 14

анализ результатов применения электротомографии вдоль профиля №14 (рис. 3). При приближении профиля к границе барьерного целика (отметки 150–220 м вдоль профиля) наблюдается изменение глубины (от 20 до 30 м) расположения контура «А», соответствующего области горных пород с высокой степенью трещиноватости или системой трещин, которые заполнены флюидом. При этом отчетливо прослеживается массив коренных горных пород, в границах которого не зафиксировано изменение физико-механических свойств горных пород в результате техногенного воздействия. Это подтверждает гипотезу частичного ограничения перемещения метана барьерным целиком. Однако области с повышенной трещиноватостью, заполненные флюидом, в районе целика с мощностью меньшей в 2–2,5 раза, чем на других участках электроразведочных профилей, обеспечивают связь газовых коллекторов шахт, который может рассматриваться как единый техногенный коллектор. Для определения фильтрационных свойств [6; 7] из барьерного целика отобрано 12 кернов с последующим определением их абсолютной проницаемости¹. Установлено, что области барьерного целика преимущественно характеризуются как слабопроницаемые с абсолютной проницаемостью от 0 до 48 мД.

Определение источников метана, выделяющегося на дневную поверхность, выполнено на основе метода прямой абсорбционной спектроскопии [8–10] с применением анализатора DLT-100 для изучения стабильных изотопов углерода-12 и углерода-13 метана, содержащегося в 121 пробе грунта, угля нижележащих рабочих угольных

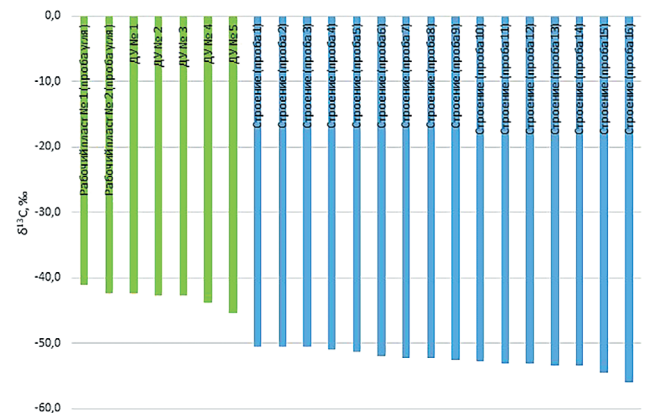


Рис. 4
Смещение изотопного состава в точках отбора проб газа

Fig. 4
A shift in isotope composition at the gas sampling points

пластов, метановоздушных смесей изыскательских скважин, шурфа ликвидированной шахты, воздуха подвальных помещениях зданий. На основе анализа результатов исследования проб газа залегающих под ликвидированной шахтой рабочих угольных пластов, а также на участках севернее барьерного целика установлено, что метан, отобранный непосредственно из рабочих угольных пластов, характеризуются $\delta^{13}C$ от $-41,0$ до $-42,3\%$, что свидетельствует об их условном термогенном происхождении (рис. 4). Пробы газа, отобранные из призмных газопро-

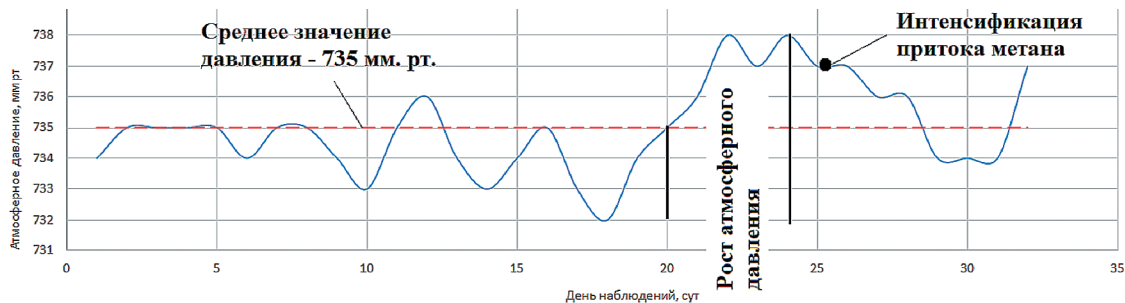


Рис. 5
Изменение барометрического давления на исследуемом участке

Fig. 5
Change in barometric pressure within the surveyed area

1 ГОСТ 26450.0–85. Породы горные. Отбор и подготовка образцов для определения коллекторских свойств. Общие требования. М.; 1985. 16 с.

явлений, из шурфа ликвидированной шахты и объектов строений и зданий, расположенных на дневной поверхности, имеют облегченный изотопный состав ($\delta^{13}\text{C}$ от $-50,5$ до $-56,0$ ‰) и, условно, относятся к метану биогенного происхождения. Полученные смещения изотопного состава в образцах газа, отобранных из рабочих угольных пластов, существенно отличаются от смещения изотопного состава углерода метана, выделяющегося на поверхность, что свидетельствует о различном происхождении этих газов. Результаты изотопного анализа подтверждают предположение, сделанное на основе обобщения результатов измерений приземных концентраций и инженерных изысканий средствами электротомографии, о наличии в области исследования единого газового коллектора, участки которого соединены между собой системой трещин, пор и пустот.

Известно, что изменение атмосферного давления оказывает влияние на метановыделение из техногенных газовых коллекторов [11; 12]. При этом наибольшее газовыделение из них наблюдается при резком снижении атмосферного давления после его продолжительного роста. На основе анализа метеорологических данных установлено, что на исследуемом участке за сутки до интенсивного газовыделения наблюдалось снижение атмосферного давления, которому предшествовал период его повышения в течение пяти суток (рис. 5). Такое интенсивное неравномерное

изменение атмосферного давления могло стать одним из влияющих факторов стимулирования движения газовых масс.

Заключение

Комплекс выполненных исследований позволил определить геометрические размеры и местоположение техногенного коллектора шахтного метана, разделенного барьерным целиком. Установлено, что метан, содержащийся в коллекторе, характеризуется облегченным составом изотопов углерода и отличается по этому показателю от метана, сосредоточенного в нижележащих угольных пластах. Показано, что изменение атмосферного давления и гидрологического режима, предположительно, оказало влияние на увеличение выхода метана на дневную поверхность с превышением приземных концентраций фоновых значений этого газа. Для ограничения выделения метана из техногенного коллектора в здания и сооружения, расположенные на горном отводе ликвидированных шахт, рекомендуется бурение газодренажных скважин в зонах разуплотнения углепородного массива с последующим подключением к вакуумным насосным станциям, обеспечивающих дегазацию коллектора метана. При устойчивых дебите скважин и концентрации извлекаемого метана возможно его использование для получения электрической и тепловой энергии [13].

Список литературы

1. Баранник Л.П., Счастливцев Е.Л., Быков А.А., Овденко В.И., Потапов В.П., Лермонтов Ю.С. и др. *Экологические проблемы угледобывающих районов при закрытии шахт*. Кемерово: АЗИЯ; 2001. 240 с.
2. Петров И.В., Стоянова И.А., Харченко В.А. Эколого-экономические проблемы использования земельных ресурсов при закрытии угледобывающих предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(12):293–296.
3. Навитный А.М., Певзнер М.Е. Правовые основы ликвидации угольных шахт и обязанности маркшейдерской службы. *Маркшейдерский вестник*. 2001;(4):23–26.
4. Тайлаков О.В., Салтымаков Е.А., Застрелов Д.Н., Соколов С.В., Макеев М.П., Ярош А.С. Определение глубин залегания водоносных горизонтов методом электротомографии в условиях Кузбасса. *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2016;(1):30–34.
5. Фаге А.Н., Яркова Н.М., Ельцов И.Н. Применение электротомографии для разведки угольных пластов и контролирующих их водоносных горизонтов. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2013;2(2):52–57.
6. Тайлаков О.В., Кормин А.Н., Уткаев Е.А. Оценка газоносности и проницаемости угольных пластов в шахтных условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(S49):148–157. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-49-148-157>
7. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С., Кашапов К.С. Газодинамическое состояние и фильтрационные свойства угольного пласта в зонах заблаговременной дегазации. *Наука и техника в газовой промышленности*. 2009;(3):63–67.
8. Макасы А.Л., Кудрявцев А.С., Трошков М.Л. Новый подход к измерению комбинированного изотопного состава метана с целью его генетической характеристики. *Гео-Сибирь*. 2010;2(2):76–79.
9. Тайлаков О.В., Макеев М.П., Герасимов А.В., Коровин Д.С. Определение источников газовыделения в атмосферу выемочного участка на основе измерений изотопного состава углерода метана. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2017;(5):73–79. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2017-5-73-78>
10. Лебедев В.С. Углеводородный состав и изотопный состав углерода метана угольных пластов и газовых скоплений, сформировавшихся за счет «угольных» газов (на примере Донбасса). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(S4):212–219.
11. Качурин Н.М., Корчагина Т.В., Качурин А.Н., Сидоров Р.В. Оценка газообмена подработанных территорий угольных бассейнов России с атмосферой. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021;(1):290–302.
12. Качурин А.Н., Афанасьев О.А., Шкурятский Д.Н. Прогноз динамики газообмена выработанных пространств с шахтным воздухом и приземным слоем атмосферы. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(3):253–262.
13. Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Уткаев Е.А., Соколов С.В., Кормин А.Н., Смыслов А.И. Направления утилизации шахтного метана. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2015;(6):62–67. Режим доступа: <https://journals.kuzstu.ru/article/2977.pdf>

References

1. Barannik L.P., Schastlivtsev E.L., Bykov A.A., Ovdenko V.I., Potapov V.P., Lermontov Yu.S. et al. *Environmental challenges of coal-mining areas during the mine closures*. Kemerovo: AZIYA; 2001. 240 p. (In Russ.)
2. Petrov I.V., Stoyanova I.A., Kharchenko V.A. Environmental and economic challenges in land resources utilization at coal mine closure. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012;(12):293–296. (In Russ.)
3. Navitny A.M., Pevzner M.E. The legal bases of coal mine closure and responsibilities of the mine surveying service. *Mine Surveying Bulletin*. 2001; (4):23–26. (In Russ.)
4. Tailakov O.V., Zastrelov D.N., Saltymakov Ye.A., Makeev M.P., Sokolov S.V., Yarosh A.S. Aquifers depth detection by electron tomography method in Kuzbass conditions. *Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2016;(1):30–34. (In Russ.)
5. Fague A.N., Yarkova N.M., Yeltsov I.N. Use of electrical resistivity tomography method for allocating coal-beds and adjacent governing aquifers. *Interekspo Geo-Sibir*. 2013;2(2):52–57. (In Russ.)
6. Tailakov O.V., Kormin A.N., Utkaev E.A. Estimation of gas content and permeability of in coal seams in mine conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(S49):148–157. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-49-148-157>
7. Slastunov S.V., Karkashadze G.G., Kolikov K.S., Kashapov K.S. Gas-dynamic state and filtration properties of coal seams in zones of advance degassing. *Nauka i Tekhnika v Gazovoi Promyshlennosti*. 2009;(3):63–67. (In Russ.)
8. Makas A.L., Kudryavtsev A.S., Troshkov M.L. The new approach to determination of the combined isotopic composition of methane for its genetic characterization. *Geo-Sibir*. 2010;2(2):76–79. (In Russ.)
9. Tailakov O.V., Makeev M.P., Gerasimov A.V., Korovin D.S. Defining of the sources of gas emissions into the atmosphere of longwall on the basis of the measurements of the isotopic composition of the methane carbon. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017;(5):73–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2017-5-73-78>
10. Lebedev V.S. Hydrocarbon and carbon isotope composition of coal bed methane and gas accumulations formed due to coal gases (as exemplified by the Donbass region). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008;(S4):212–219. (In Russ.)
11. Kachurin N.M., Korchagina T.V., Kachurin A.N., Sidorov R.V. Estimation of gas exchanging developed areas of coal basins of Russia with atmosphere. *Izvestija Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(1):290–302. (In Russ.)
12. Kachurin A.N., Afanasiev O.A., Shkuratcky D.N. Forecasting gas exchange dynamics of gobbs with mining air and surface layer of atmosphere. *Izvestija Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2020;(3):253–262. (In Russ.)
13. Tailakov O.V., Zastrelov D.N., Utkaev E.A., Sokolov S.V., Kormin A.N., Smyslov A.I. Prospects of the coal mine methane utilization. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2015;(6):62–67. (In Russ.) Available at: <https://journals.kuzstu.ru/article/2977.pdf>

Информация об авторах

Тайлаков Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: tailakov@uglemetan.ru

Салтымаков Евгений Алексеевич – ведущий инженер, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: saltymakov@uglemetan.ru

Застрелов Денис Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: zastrelov@uglemetan.ru

Макеев Максим Павлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: makeev@uglemetan.ru

Уткаев Евгений Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: utkaev@uglemetan.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.07.2023

Поступила после рецензирования: 23.08.2023

Принята к публикации: 26.08.2023

Information about the authors

Oleg V. Tailakov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Re-searcher, Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: tailakov@uglemetan.ru

Evgeny A. Saltymakov – Lead Engineer, Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation

Denis N. Zastrelov – Cand. Sci. (Eng.), Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation

Maxim P. Makeev – Cand. Sci. (Eng.), Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation

Evgeny A. Utkaev – Cand. Sci. (Eng.), Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation

Article info

Received: 14.07.2023

Revised: 23.08.2023

Accepted: 26.08.2023