

Алгоритмическое обеспечение цифровой платформы мониторинга фугитивных выбросов парниковых газов при угледобыче*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-84-89>

ТАЙЛАКОВ О.В.

Доктор техн. наук, профессор,
заведующий лабораторией ресурсов
и технологий извлечения угольного метана
ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр
угля и углехимии Сибирского отделения
Российской академии наук», Институт угля,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: oleg2579@gmail.com

СОКОЛОВ С.В.

Канд. техн. наук, научный сотрудник
ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр
угля и углехимии Сибирского отделения
Российской академии наук», Институт угля,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: sokolovsviui@bk.ru

УТКАЕВ Е.А.

Канд. техн. наук, старший научный сотрудник
ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр
угля и углехимии Сибирского отделения
Российской академии наук», Институт угля,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: utkaev@mail.ru

МИХАЛЕВ Д.С.

Лаборант
ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр
угля и углехимии Сибирского отделения
Российской академии наук», Институт угля,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: mikhalev@mail.ru

Рассмотрены методологические подходы к контролю эмиссии метана и повышению достоверности ее количественного учета в угледобывающей промышленности Кузбасса. Представлено алгоритмическое обеспечение оценки фугитивных выбросов метана и углекислого газа при добыче угля открытым и подземным способами, а также выбросов метана при последующем обращении с углем, добытым подземным способом. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности мониторинга выбросов парниковых газов в регионе и внедрения технологий улавливания и переработки угольного метана.

Ключевые слова: добыча угля, метан угольных пластов, углекислый газ, эмиссия, парниковые газы, цифровая платформа, фугитивные выбросы.

Для цитирования: Алгоритмическое обеспечение цифровой платформы мониторинга фугитивных выбросов парниковых газов при угледобыче / О.В. Тайлаков, С.В. Соколов, Е.А. Уткаев и др. // Уголь. 2023. № 5. С. 84-89. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-84-89.

ВВЕДЕНИЕ

Выбросы метана в атмосферу при угледобыче оказывают заметное влияние на изменение климата. По укрупненным оценкам, при использовании усредненных значений коэффициентов метановыделения (15,1 м³/т – при добыче угля подземным способом, 3 м³/т – при последующем обращении с углем, добытым этим способом, 5,5 м³/т – при добыче угля открытым способом) ежегодная эмиссия шахтного метана в Кузбассе превышает 2 млрд куб. м [1]. Ожидается, что с увеличе-

* Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 № 1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1196).



нием глубины ведения горных работ и переходом к отработке угольных пластов с большей газоносностью выбросы метана в угольной промышленности Кузбасса увеличатся до 2,58 млрд куб. м в год. Эмиссии шахтного метана и углекислого газа, который может содержаться в угольных пластах [2], относятся к категории фугитивных выбросов парниковых газов [3, 4].

Различными международными профессиональными сообществами разрабатываются специализированные программные средства для унификации и автоматизации учета и подготовки отчетности о выбросах парниковых газов. Так, например, Международной ассоциацией аэропортов (Airports Council International) разработан специализированный продукт Airport Carbon Emission Reporting Tool (ACERT), предназначенный для учета выбросов парниковых газов в процессе функционирования технических средств аэропортов, который включает такие источники эмиссий, как движение технологического транспорта, руление самолетов при движении по территории аэропорта, доставка пассажиров и грузов в аэропорт, противообледенительная обработка воздушных судов. Однако подобные общедоступные программные продукты инвентаризации выбросов парниковых газов при угледобыче и угольной генерации тепло- и электроэнергии отсутствуют. В связи с этим актуальным является совершенствование подходов к количественному учету эмиссий углекислого газа и метана в угледобывающей промышленности [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] для разработки и обоснования унифицированной цифровой платформы, обеспечивающей возможность контроля выбросов парниковых газов до и после применения чистых угольных технологий, направленных на снижение углеродного следа в этом секторе промышленного производства.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПРИ УГЛЕДОБЫЧЕ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ОБРАЩЕНИИ С УГЛЕМ

Для разработки цифровой платформы мониторинга фугитивных выбросов парниковых газов при угледобыче на основе анализа и обобщения материалов «Методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации», утвержденных приказом Минприроды России от 30.06.2015 № 300, разработано алгоритмическое обеспечение расчета эмиссий парниковых газов при угледобыче и последующем обращении с углем, которое содержит категории: фугитивные выбросы, выбросы от сжигания топлива на стационарных объектах, выбросы от сжигания транспортного топлива.

Алгоритм расчета выбросов CO_2 и CH_4 при добыче угля подземным способом

При добыче угля подземным способом шахтный метан и углекислый газ, содержащийся в угольных пластах, выводятся на поверхность через дегазационные скважины и вентиляционные стволы, которые можно рассматривать

как точечные источники. При этом выбросы CO_2 и CH_4 определяются как [5]:

$$E_{i,y} = \sum_{j=1}^n (FC_{j,y} \times W_{i,j,y} \times \rho_i \times 10^{-2}), \quad (1)$$

где $E_{i,y}$ – фугитивные выбросы i -парникового газа (CO_2 либо CH_4) за период y , т; $FC_{j,y}$ – расход j -углеводородной смеси на технологические операции (объем отведения без сжигания) за период y , тыс. м^3 ; $W_{i,j,y}$ – содержание i -парникового газа в j -углеводородной смеси за период y , % об.; ρ_i – плотность i -парникового газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; i – CO_2 , CH_4 ; j – вид углеводородной смеси; n – количество видов углеводородных смесей, используемых на технологические операции (отводимых без сжигания).

Граф-схема алгоритма расчета выбросов углекислого газа и метана представлена на рис. 1, а.

Алгоритм расчета выбросов CH_4 после добычи угля подземным способом

При последующем обращении с добытым подземным способом углем, включающим его переработку, хранение и транспортировку, эмиссия метана, сопровождающая эти технологические процессы, рассчитывается по формуле [9]:

$$E_{\text{пCH}_4} = k_{\text{пCH}_4} \times Q_{\text{п}} \times K_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{пCH}_4}$ – выбросы метана при подземной добыче угля, тыс. т; $Q_{\text{п}}$ – объем угля, добытого подземным способом, т; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент преобразования (плотность метана при 20°C и давлении в 1 атмосферу) – $0,67 \cdot 10^{-3} \text{ т}/\text{м}^3$; $k_{\text{пCH}_4}$ – коэффициент выбросов метана после подземной добычи угля, $\text{м}^3/\text{т}$.

Граф-схема алгоритма расчета выбросов метана после добычи угля подземным способом представлена на рис. 1, б.

Алгоритм расчета выбросов CH_4 при добыче угля открытым способом

Эмиссии CH_4 при добыче угля открытым способом обусловлены выбросами метана, высвобождающегося из рабочих пластов и пластов-спутников при выполнении технологических операций по выемке угля. Расчет выбросов метана выполняется на основе информации об объемах угля, добытого за рассматриваемый период, и коэффициентов выбросов метана, которые выбираются в зависимости от толщины вскрышных пород. Минимальное значение коэффициента принимается при толщине вскрышных пород менее 25 м, максимальное – при превышении толщины 50 м, в остальных случаях, а также при отсутствии информации по мощности вскрышных пород применяется среднее значение коэффициента выбросов.

Эмиссии метана при добыче угля открытым способом рассчитываются по формуле [9]:

$$E_{\text{оCH}_4} = k_{\text{оCH}_4} \times Q_{\text{о}} \times K_{\text{пр}}, \quad (3)$$

где $E_{\text{оCH}_4}$ – выбросы метана при открытой добыче угля, тыс. т; $Q_{\text{о}}$ – объем угля, добытого открытым способом, т; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент преобразования (плотность метана при 20°C и давлении в 1 атмосферу) – $0,67 \cdot 10^{-3} \text{ т}/\text{м}^3$; $k_{\text{оCH}_4}$ – коэффициент выбросов метана при открытой добыче угля, $\text{м}^3/\text{т}$.

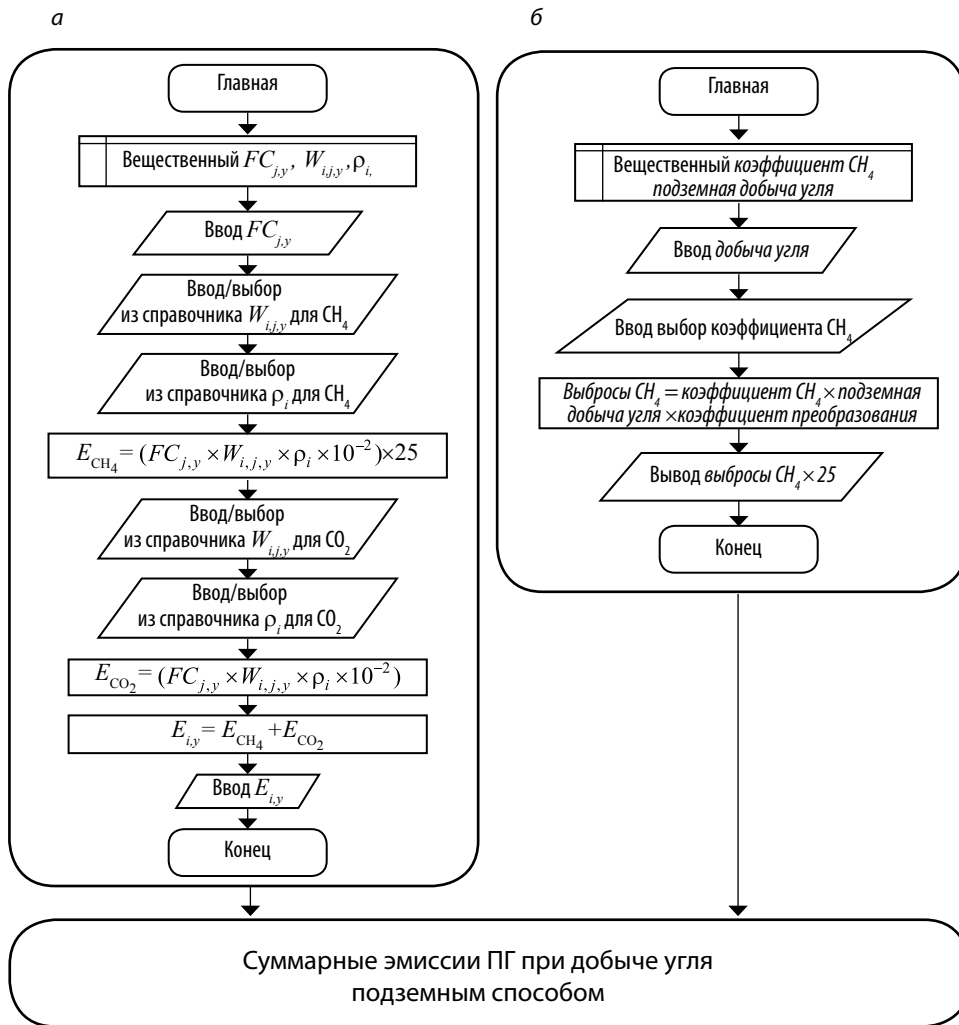


Рис. 1. Граф-схема алгоритма расчета фугитивных выбросов при добыче угля подземным способом

Fig. 1. A flow chart of the calculation algorithm for fugitive emissions in underground coal mining

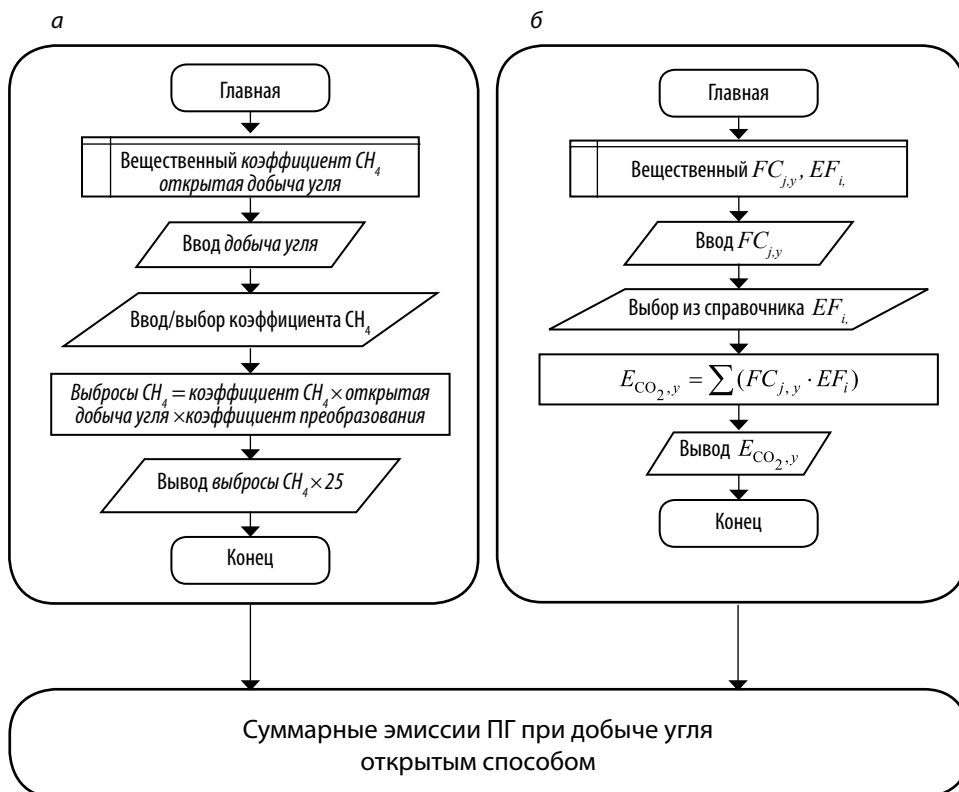


Рис. 2. Граф-схема алгоритма расчета выбросов CH₄ при добыче угля открытым способом

Fig. 2. A flow chart of the calculation algorithm for CH₄ emissions in open-cast coal mining

Граф-схема алгоритма расчета выбросов метана при добыче угля открытым способом представлена на *рис. 2, а*.

Алгоритм расчета выбросов CO₂ при добыче угля открытым способом (выбросы от транспорта)

На угледобывающих предприятиях, использующих открытый способ добычи угля, эмиссии углекислого газа обусловлены применением горнотранспортного оборудования и рассчитываются по формуле [5]:

$$E_{CO_2,y} = \sum (FC_{j,b,y} \cdot EF_{i,b}), \quad (4)$$

где $E_{CO_2,y}$ – выбросы CO₂ от сжигания топлива в двигателях автотранспортных средств за период y , т CO₂-экв; $FC_{j,b,y}$ – расход топлива вида j транспортным средством за период y , т; $EF_{i,b}$ – коэффициент выбросов CO₂ при использовании в транспортном средстве топлива i , т CO₂-экв/т; i – вид топлива.

Граф-схема алгоритма расчета выбросов CO₂ при добыче угля открытым способом (выбросы от транспорта) представлена на *рис. 2, б*.

КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ

Для обобщенной оценки эмиссий метана и углекислого газа на предприятиях угольной промышленности предложено использовать цифровую платформу мониторинга фугитивных выбросов парниковых газов и их сокращений при внедрении чистых угольных технологий на основе современных цифровых решений, обеспечивающих клиент-серверное взаимодействие для обработки запросов угледобывающих компаний на выполнение расчетов (*рис. 3*).

Существенным преимуществом такого подхода являются возможность выполнения облачных вычислений и квалифицированная экспертная поддержка подготовки отчетности об инвентаризации выбросов парниковых газов.

Разработанная цифровая платформа представляет собой настольное приложение, устанавливаемое на пользовательском устройстве, которое обеспечивает выполнение расчетов, визуализацию их результатов, составление

и хранение отчетов. Платформа содержит блоки логических и расчетных модулей. Расчетные модули представляют собой программную реализацию алгоритмов (1-4) и могут в последующем дополняться новыми модулями при изменении нормативной базы количественного учета выбросов парниковых газов.

Клиентское приложение размещается на вычислительной машине пользователя, серверное приложение и база данных – на удаленной вычислительной машине. Серверная часть помимо расчетных модулей содержит базу данных со справочной информацией, необходимой для выполнения расчетов, и позволяет осуществлять поиск, выбор, модификацию, а также удаление данных. Клиентское приложение включает основные процедуры обработки данных и визуализации полученных результатов [13, 14].

Для ввода данных, выполнения расчетов, вывода из результатов разработан интерфейс цифровой платформы мониторинга фугитивных выбросов парниковых газов и их сокращений при использовании чистых угольных технологий (*рис. 4*).

Интерфейс цифровой платформы является интуитивно понятным, его элементы обеспечивают возможность: авторизации и регистрации пользователей, создания новых проектов и управления созданными проектами, ввода исходных данных, перемещения между разделами платформы (объекты – ключевые объекты компании; проекты – все проекты компании; справочники – справочные материалы, используемые в платформе; настройки – параметры платформы, которые могут гибко настраиваться), выбора методик расчета, визуализации полученных результатов, использования дополнительных инструментов, позволяющих упростить отдельную работу с данными без обращения к сторонним сервисам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровая платформа будет использована для оценки выбросов парниковых газов, сопровождающих процессы добычи угля подземным и открытым способами, а также операции последующего обращения с углем, добытого подземным способом. Это позволит повысить качество

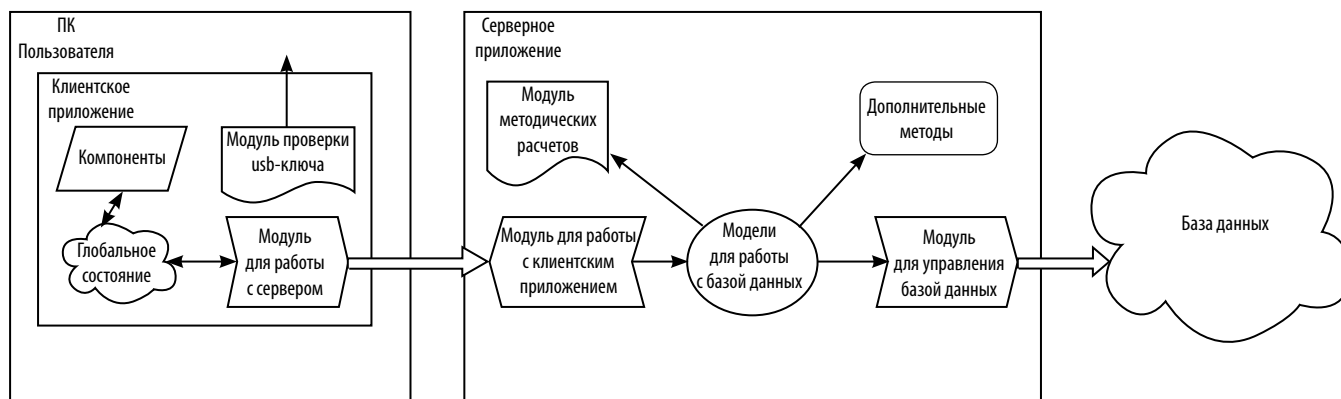


Рис. 3. Диаграмма размещения цифровой платформы

Fig. 3. A location diagram of the digital platform

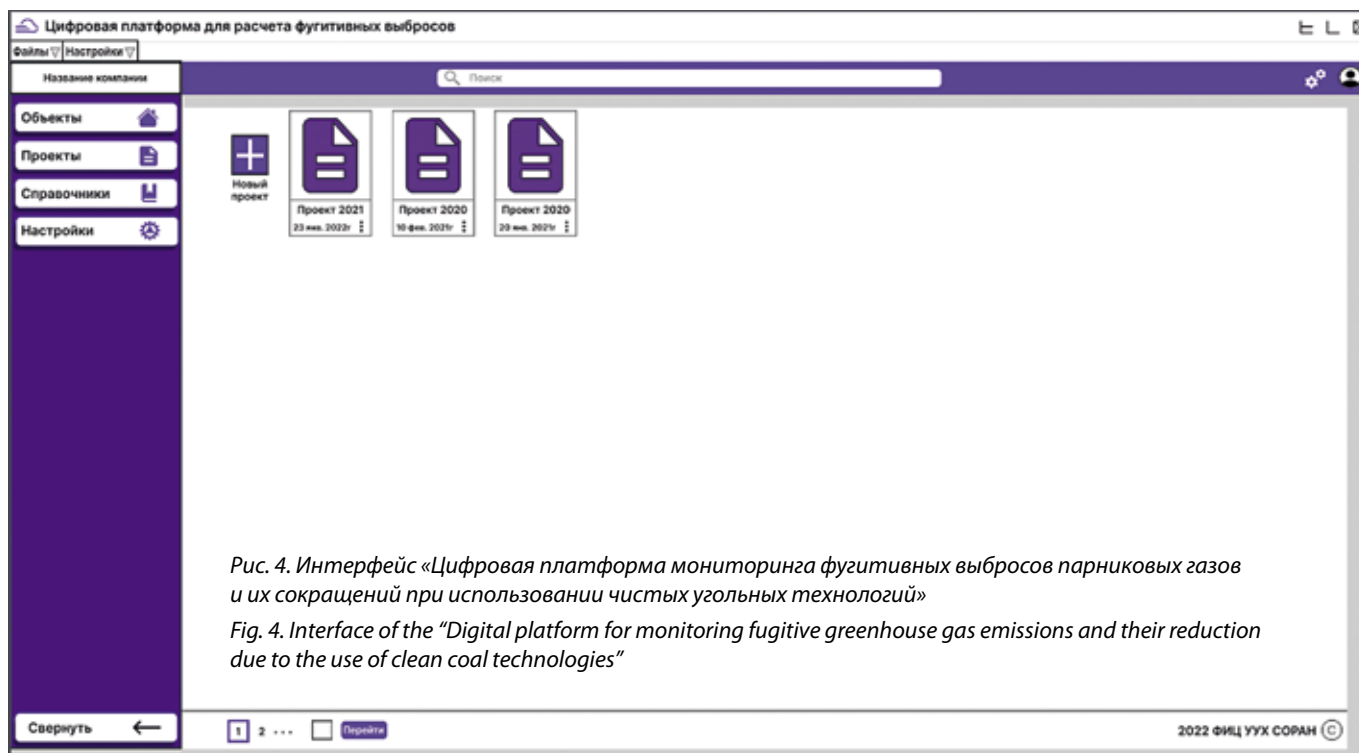


Рис. 4. Интерфейс «Цифровая платформа мониторинга fugitive greenhouse gas emissions and their reduction due to the use of clean coal technologies»

Fig. 4. Interface of the "Digital platform for monitoring fugitive greenhouse gas emissions and their reduction due to the use of clean coal technologies"

подготовки отчетов угольных компаний об инвентаризации выбросов парниковых газов, тиражировать положительный опыт применения чистых угольных технологий, направленных на утилизацию шахтного метана и снижение техногенного воздействия на окружающую среду. В перспективе цифровая платформа будет дополнена функциональными возможностями обмена данными с внутрикорпоративными специализированными цифровыми платформами угледобывающих компаний на основе общеметодологических подходов к разработке цифровых платформ и унифицированных протоколов обмена данными.

Список литературы

- Петренко И.Е., Шинкин В.К. Итоги работы угольной промышленности России за январь-март 2022 года // Уголь. 2022. № 6. С. 6-16. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-6-16.
- CH₄ and CO₂ monitoring in the air of underground coal mines in Southern Brazil and GHG emission estimation Revista Escola de Minas / В. Bonetti, R.C. Abruzzi, C.P. Peglow et al. // Gomes. 2019. № 72. P. 635-642.
- Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production / N. Kholod, M. Evans, Raymond C. et al. // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 256. 120489.
- Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Уткаев Е.А. Извлечение и переработка угольного метана / В.Б. Артемьев, В.Н. Костеренко, А.П. Садов и др. М.: Горное дело, 2016. 208 с.
- Приказ Минприроды России от 27 мая 2022 г. № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (дата обращения: 15.04.2023).
- ГОСТ Р ИСО 14064-1-2007 «Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и удалении парниковых газов на уровне организации». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200077407> (дата обращения: 15.04.2023).
- ГОСТ Р ИСО 14064-2-2007 «Газы парниковые. Часть 2. Требования и руководство по количественной оценке, мониторингу и составлению отчетной документации на проекты сокращения выбросов парниковых газов или увеличения их удаления на уровне проекта». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200077680> (дата обращения: 15.04.2023).
- ГОСТ Р ИСО 14064-3-2007 «Газы парниковые. Часть 3. Требования и руководство по валидации и верификации утверждений, касающихся парниковых газов» Охрана атмосферного воздуха. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200077410> (дата обращения: 15.04.2023).
- МГЭИК. Руководящие принципы МГЭИК 2006 года для национальных кадастров парниковых газов. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. МГЭИК-ИГЭС-ОЭСР-МЭА, ИГЭС. Япония, 2006.
- Mehdi N., Rafiee R. Development of a new index for methane drainageability of a coal seam using the fuzzy rock engineering system // Rud. Geol. Naft. Zb. 2019. No 34. P. 33-44.
- Qingdong Qu, Hua Guo, Rao Balusu. Methane emissions and dynamics from adjacent coal seams in a high permeability multi-seam mining environment // Int. J. Coal Geol. 2022. 253. 103969.
- Reservoir characteristics and coalbed methane resource evaluation of deep-buried coals: A case study of the No.13-1 coal seam from the Panji Deep Area in Huainan Coalfield, Southern North China / Qiang Wei, Xianqing Li, Baolin Hu et al. // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 179. P. 867-884.
- Richardson L., Amundsen M. RESTful Web APIs. O'REILLY, 2013. 404 p.
- Тайлаков О.В., Уткаев Е.А., Макеев М.П. Фугитивные выбросы метана и технологии их сокращения при угледобыче в Кузбассе // Горная промышленность. 2022. № 6. С. 54-59.

Original Paper

UDC 551.583; 662.764; 504.054 © O.V. Tailakov, S.V. Sokolov, E.A. Utkaev, D.S. Mikhalev, 2023
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 5, pp. 84-89
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-84-89>

Title**ALGORITHMIC SUPPORT OF THE DIGITAL PLATFORM FOR MONITORING FUGITIVE GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM COAL MINING****Authors**Tailakov O.V.¹, Sokolov S.V.¹, Utkaev E.A.¹, Mikhalev D.S.¹¹ Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650000, Russian Federation**Authors Information****Tailakov O.V.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Laboratory of Coal methane extraction resources and technologies, Institute of coal, e-mail: oleg2579@gmail.com**Sokolov S.V.**, PhD (Engineering), Researcher, Institute of coal, e-mail: sokolovsvuu@bk.ru**Utkaev E.A.**, PhD (Engineering), Senior researcher, Institute of coal, e-mail: utkaev@mail.ru**Mikhalev D.S.**, Laboratory Assistant, Institute of coal, e-mail: mikhalev@mail.ru**Abstract**

The methodological approaches to the control of methane emission and increasing the reliability of its quantitative accounting in the coal mining industry of Kuzbass are considered. Algorithmic support of the estimation of the fugitive emissions of methane and carbon dioxide in surface and underground coal mining, as well as methane emissions from subsequent handling of underground coal is presented. The obtained results can be used to improve the efficiency of greenhouse gas emissions monitoring in the region and for the applying of the technologies for coal methane capturing and processing.

Keywords

Coal mining, Coalmine methane, Carbon dioxide, Emission, Greenhouse gases, Digital platform, Fugitive emissions.

References

- Petrenko I.E. & Shinkin V.K. Russia's coal industry performance for January-March, 2022. *Ugol'*, 2022, (6), pp. 6-16. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-6-16.
- Bonetti B., Abruzzi R.C., Peglow C.P., Pires M.J.R. & Gomes C.J.B. CH₄ and CO₂ monitoring in the air of underground coal mines in Southern Brazil and GHG emission estimation. *Revista Escola de Minas*, 2019, (72), pp. 635-642.
- Kholod N., Evans M., Raymond C., Pilcher V., Roshchanka F., Ruiz M. & Coté R. Collings Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production. *Journal of Cleaner Production*, 2020, (256), 120489.
- Artemiev V.B., Kosterenko V.N., Sadov A.P., Tailakov O.V., Zastrelov D.N. & Utkaev E.A. Coalbed methane recovery and utilization, Moscow, Gornoe Delo Publ., 2016, 208 p. (In Russ.).
- Order No. 371 of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation as of May 27, 2022, "On Approval of Methods of Quantitative Determination of Greenhouse Gas Emissions and Greenhouse Gas Absorption". Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (accessed 15.04.2023).
- GOST R ISO 14064-1-2007 'Greenhouse gases. Part 1. Specification with guidance at the organizational level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals'. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200077407> (accessed 15.04.2023).

- GOST R ISO 14064-2-2007 'Greenhouse gases. Part 2. Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements'. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200077680> (accessed 15.04.2023).
- GOST R ISO 14064-3-2007 'Greenhouse gases. Part 3. Specification with guidance for the validation and verification of greenhouse gas assertions'. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200077410> (accessed 15.04.2023).
- IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. IPCC/IGES/OECD/IEA, IGES, Japan 2006.
- Mehdi N. & Rafiee R. Development of a new index for methane drainageability of a coal seam using the fuzzy rock engineering system. *Rud. Geol. Naft. Zb.*, 2019, (34), pp. 33-44.
- Qingdong Qu, Hua Guo & Rao Balusu. Methane emissions and dynamics from adjacent coal seams in a high permeability multi-seam mining environment. *Int. J. Coal Geol.*, 2022, (253), 103969.
- Qiang Wei, Xianqing Li, Baolin Hu, Xueqing Zhang, Jizhen Zhang, Yukai He, Yachao Zhang & Wenwei Zhu. Reservoir characteristics and coalbed methane resource evaluation of deep-buried coals: A case study of the No.13-1 coal seam from the Panji Deep Area in Huainan Coalfield, Southern North China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, (179), pp. 867-884.
- Richardson L. & Amundsen M. RESTful Web APIs. O'REILLY, 2013, 404 p.
- Tailakov O.V., Utkaev E.A. & Makeev M.P. Fugitive methane emissions and technologies for their reduction in Kuzbass coal mining. *Gornaya promyshlennost'*, 2022, (6), pp. 54-59. (In Russ.).

Acknowledgements

The research was carried out as part of the 'Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life' Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle, approved by Order No. 1144-p of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022 (Agreement No. 075-15-2022-1196).

For citation

Tailakov O.V., Sokolov S.V., Utkaev E.A. & Mikhalev D.S. Algorithmic support of the digital platform for monitoring fugitive greenhouse gas emissions from coal mining. *Ugol'*, 2023, (5), pp. 84-89. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-84-89.

Paper info

Received April 4, 2023

Reviewed April 15, 2023

Accepted April 27, 2023