

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.82.68.012

УДК 622.861

© В.А. Портола, А.А. Бобровникова, Е.А. Серегин, Д.Е. Скударнов,  
И.А. Бобровников, 2023

**В.А. ПОРТОЛА**

д-р техн. наук, профессор,  
КузГТУ, г. Кемерово  
e-mail: portola2@yandex.ru

**А.А. БОБРОВНИКОВА**

канд. хим. наук,  
заведующая кафедрой  
КузГТУ, г. Кемерово  
e-mail: bobrownickowa.al@yandex.ru

**Е.А. СЕРЕГИН**

аспирант  
КузГТУ, г. Кемерово  
e-mail: eugene\_s1976@mail.ru

**Е.Д. СКУДАРНОВ**

аспирант  
КузГТУ, г. Кемерово  
e-mail: promlad@inbox.ru

**И.А. БОБРОВНИКОВ**

аспирант  
КузГТУ, г. Кемерово  
e-mail: ivanleto888@mail.ru

## ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ ОПАСНЫХ ГАЗОВ ИЗ УГЛЯ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ АВТОТРАНСПОРТОМ

*Рассмотрено влияние перевозки угля и углесодержащих пород в самосвалах, кузова которых подогреваются выхлопными газами. Замеры на разрезах показали, что температура поверхности кузова самосвала может достигать до 150–180 °С. Лабораторные исследования позволили установить интенсивность выделения оксида углерода, метана и углекислого газа из угля при нагревании.*

Ключевые слова: ОТКРЫТЫЕ ГОРНЫЕ РАБОТЫ, АВТОТРАНСПОРТ, ТЕМПЕРАТУРА, ОКИСЛЕНИЕ УГЛЯ, ВЫДЕЛЕНИЕ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ, ОКСИД УГЛЕРОДА, УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ, МЕТАН.

## ВВЕДЕНИЕ

Добыча угля открытым способом сопровождается возникновением ряда опасных и вредных факторов, негативно действующих на здоровье сотрудников горных предприятий. Последствием такого воздействия является высокий уровень травматизма на разрезах [1]. Учитывая, что существенная доля травмированных сотрудников при ведении горных работ открытым способом приходится на автотранспорт, для повышения безопасности работ предложена многофункциональная система безопасности [2].

Одним из факторов, негативно влияющих на состояние здоровья работников разрезов, является выделение опасных газов в атмосферу. Концентрация таких газов в рабочих зонах разреза будут зависеть не только от интенсивности их образования, но и от погодных условий. Так, отсутствие ветра, температурная инверсия способствуют накоплению опасных газов в воздухе. Некоторые газы, образующиеся при добыче угля, способны наносить существенный вред и окружающей природе, подавляя жизнедеятельность растительности, микроорганизмов, а также приводить к изменению климата [3]. Одним из источников опасных газов являются двигатели внутреннего сгорания автотранспорта [4], используемого для перевозки угля и горных пород. Большое количество окислов азота, оксида углерода и других опасных газов выделяется на разрезах при ведении взрывных работ [5]. В ходе добычи угля происходит и значительный вынос в атмосферу метана [6, 7], образовавшегося в процессе метаморфизма полезного ископаемого и скопившегося в угольных пластах и вмещающих породах.

Нагрев угля может существенно интенсифицировать образование опасных газов. За счет окисления горючих компонентов угля кислородом образуется оксид углерода, углекислый газ, диоксид серы. Термическое разложение угля приводит к выделению

предельных и непредельных углеводородов. Причиной повышения температуры угля могут быть процессы самовозгорания [8–10]. Интенсивность выделения газов зависит не только от температуры угля, но и от размера его частиц. Так, для мелкой фракции концентрация выделившегося оксида углерода может достигать 8–10 % [11]. Источником тепла для угля и углесодержащих пород может быть и автомобильный транспорт. Подача выхлопных газов в кузов автомобиля приводит к нагреву угля во время транспортирования. Необходимо оценить интенсивность выделения различных газов из угля при транспортировке.

## ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Замер температуры кузовов автомобилей на разрезе осуществлялся тепловизором. Объектом исследования являлся автосамосвал БелАЗ-7530 грузоподъемностью 220 т. Температуру поверхности кузова определяли тепловизором Zenmuse XT2 ZXT2A13SR. Учитывая большие размеры кузова, съемка в инфракрасном и видимом диапазонах велась с беспилотного летательного аппарата DJI Matrice 200. Для замера боковой поверхности самосвала использовался тепловизор Testo 880-3 PRO.

Исследование состава газов, выделяющихся при нагревании угля, проводилось с использованием оборудования, приведенного на рис. 1. В состав установки входила электронагревательная печь 4, в которой находилась проба угля массой 60 г, помещаемая в емкость 3. Источником воздуха, подаваемого в нагреваемый уголь, являлся баллон 1. Расход воздуха измерялся ротаметром 2, а для контроля температуры угля использовался термометр. Регулировка скорости нагрева угля осуществлялась автотрансформатором. Пробы газа, прошедшего через нагреваемый уголь, очищались от пыли и жидкой фазы фильтром и отбирались в пипетки 5 для последующего анализа на хроматографе.

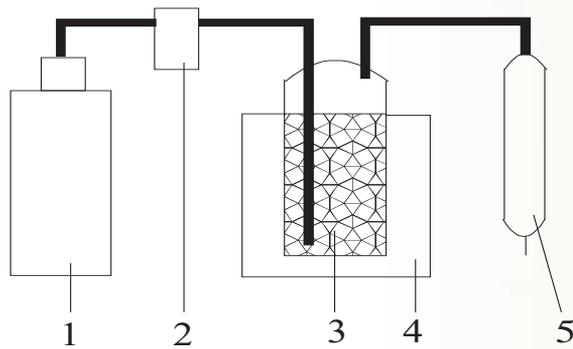


Рис. 1. Схема установки для изучения газообразных продуктов нагрева угля: 1 — баллон для подачи воздуха; 2 — ротаметр; 3 — емкость с пробой угля; 4 — электрическая печь; 5 — пипетка для отбора газа

Для исследования газовыделения из нагреваемого угля использовались пробы, отобранные в герметичные сосуды со свежеобнаженной поверхности забоя угольного пласта на разрезе. Время между набором пробы и исследованием в лабораторных условиях не превышало несколько часов. В лаборатории пробы измельчали до фракции 1–3 мм. Расход воздуха через нагреваемый уголь в течение опыта поддерживался постоянным, равным 0,5 л/мин. Интенсивность выделения отдель-

ных газов из угля при нагревании определяли по формуле:

$$q = \frac{v(C-C_0)}{M}, \quad (1)$$

где  $v$  — расход воздуха через пробу угля, л/мин;  $C$  — концентрация образовавшегося газа в прошедшем через уголь воздухе, доли ед.;  $C_0$  — начальная концентрация газа, доли ед.;  $M$  — масса исследуемой пробы угля, г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные замеры показали, что температура поверхности кузова самосвалов, на которую могут помещать углесодержащую породу и уголь, может достигать 180 °С. При холостом ходе двигателя максимальная замеренная тепловизором температура кузова равнялась 150 °С (рис. 2). Из сделанных в инфракрасном диапазоне снимков видно, что температуру части поверхности кузова, отполированной до блеска стружаемой горной породой, не удается измерить тепловизором. Боковая поверхность кузова также прогрета (рис. 3). Однако температура этой поверхности с внешней стороны составляет 50–100 °С.

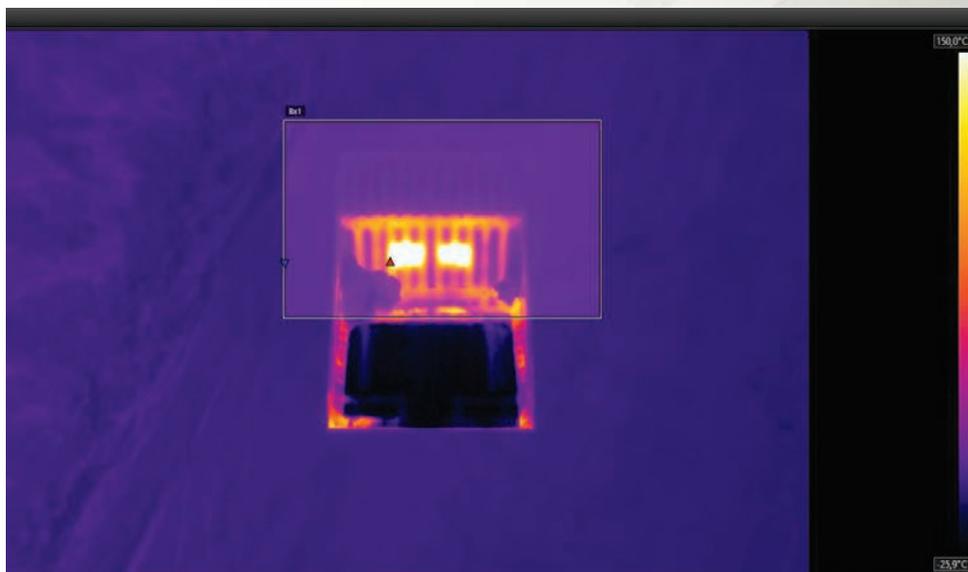


Рис. 2. Вид сверху на кузов автомобиля БелАЗ в инфракрасном диапазоне



Рис. 3. Вид сбоку на кузов автомобиля БелАЗ в инфракрасном диапазоне

Способность угля окисляться кислородом воздуха при естественной температуре окружающей атмосферы приводит к образованию оксида углерода, углекислого газа и некоторых углеводородов. Скорости химических реакций увеличиваются с повышением температуры исходных компонентов и определяются уравнением Аррениуса:

$$K = K_0 e^{-E/RT}, \quad (2)$$

где  $K_0$  — предэкспоненциальный множитель;  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $E$  — энергия активации;  $T$  — температура компонентов реакции.

Учитывая закономерность (2), следует ожидать увеличения выделения опасных газов из угля и углесодержащих масс из-за их нагрева как в процессе транспортирования в кузове самосвалов, так и после разгрузки. Перенос тепла от поверхности кузова в горную массу будет осуществляться за счет теплопроводности. Среди газов, выделяющихся из на-

греваемого угля, наиболее опасным для людей является оксид углерода. Предельно допустимая концентрация этого газа в воздухе рабочей зоны составляет 0,0017 % или 20 мг/м<sup>3</sup>.

Исследование интенсивности выделения газов при нагревании угля осуществлялось на установке, приведенной на рис. 1. Изменение концентрации оксида углерода и кислорода в воздухе, прошедшем через уголь марки ДГ, показано на рис. 4. Из полученных результатов следует, что с повышением температуры концентрация оксида углерода в окружающем воздухе возрастает по экспоненте, и уже при нагреве до 100 °С содержание оксида углерода в окружающем уголь воздухе достигает 0,01 %, что значительно превышает допустимые нормы. При 160 °С концентрация оксида углерода составляет 0,05 %, а при 200 °С превышает 0,35 %. Концентрация кислорода в прошедшем через уголь воздухе медленно снижается с ростом температуры угля, достигая 18,7 % при нагреве до 200 °С.

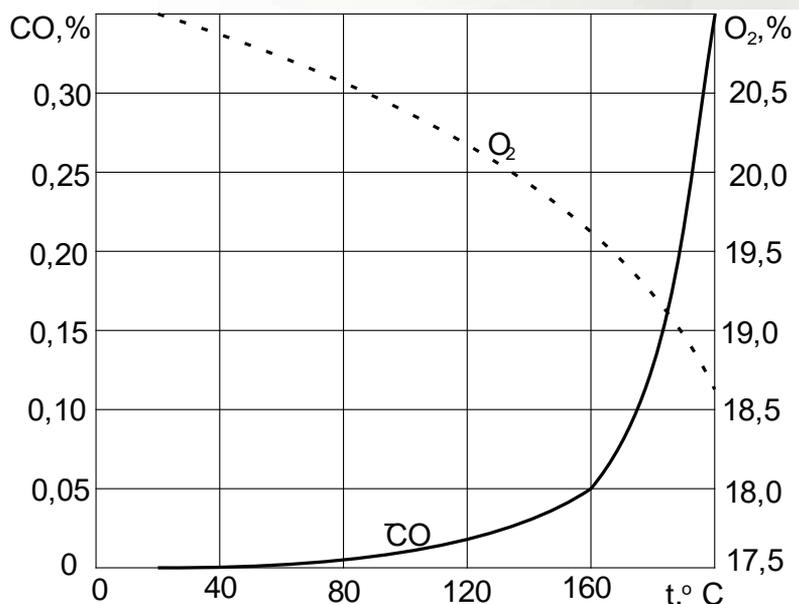


Рис. 4. Изменение концентрации оксида углерода и кислорода при нагревании угля

На рис. 5 показано изменение концентрации углекислого газа и метана, выделяющихся из угля при нагревании. Из полученных данных следует, что концентрация углекислого газа также возрастает с повышением температуры угля, достигая 0,5 % при температуре

200 °С. Концентрация метана вначале увеличивается при нагревании угля, а затем начинает снижаться. Максимальная концентрация метана, равная 0,2 %, зафиксирована при температуре 160 °С. Дальнейшее нагревание угля приводит к снижению выделения метана.

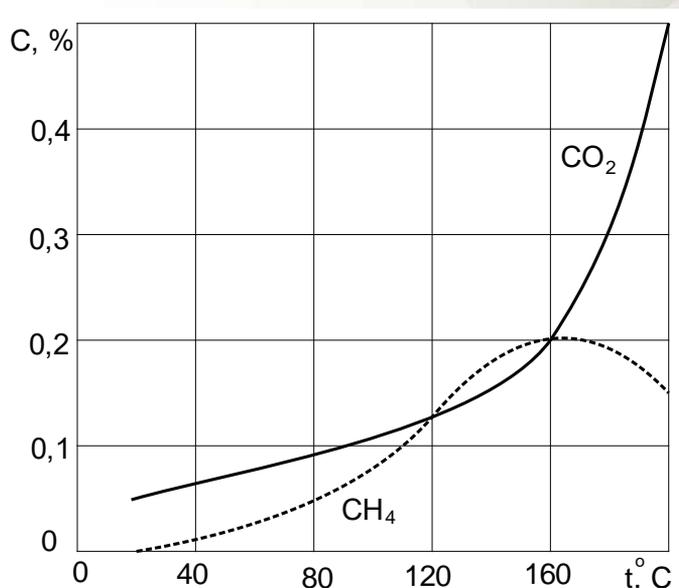


Рис. 5. Изменение концентрации углекислого газа и метана при нагревании угля

Расчет интенсивности выделения газов при нагреве отобранной пробы угля прово-

дился по формуле (1). Результаты исследований приведены в табл. 1.

Интенсивность выделения газов при нагревании угля

№	Температура угля, °С	Интенсивность выделения газов, л/(г·мин)		
		СО	СО <sub>2</sub>	СН <sub>4</sub>
1	23	8,33·10 <sup>-9</sup>	1,66·10 <sup>-6</sup>	1,91·10 <sup>-7</sup>
2	43	8,33·10 <sup>-9</sup>	2,50·10 <sup>-6</sup>	6,72·10 <sup>-7</sup>
3	63	2,50·10 <sup>-8</sup>	3,70·10 <sup>-6</sup>	2,44·10 <sup>-6</sup>
4	83	1,08·10 <sup>-7</sup>	4,40·10 <sup>-6</sup>	5,42·10 <sup>-6</sup>
5	103	3,25·10 <sup>-7</sup>	5,90·10 <sup>-6</sup>	8,62·10 <sup>-6</sup>
6	123	8,50·10 <sup>-7</sup>	6,10·10 <sup>-6</sup>	1,22·10 <sup>-5</sup>
7	143	2,20·10 <sup>-6</sup>	9,05·10 <sup>-6</sup>	1,41·10 <sup>-5</sup>
8	163	4,20·10 <sup>-6</sup>	1,24·10 <sup>-5</sup>	1,61·10 <sup>-5</sup>
9	183	9,61·10 <sup>-6</sup>	2,07·10 <sup>-5</sup>	1,48·10 <sup>-5</sup>
10	203	2,95·10 <sup>-5</sup>	3,73·10 <sup>-5</sup>	1,26·10 <sup>-5</sup>
11	223	2,97·10 <sup>-5</sup>	4,14·10 <sup>-5</sup>	7,78·10 <sup>-6</sup>

Полученные значения интенсивности выделения газов позволят оценить опасность образующихся газов из угля во время перевозки самосвалами. Так, из 1 тонны угля, прогретого до температуры 180 °С, за одну минуту будет поступать в окружающий воздух около 9,6 л оксида углерода, 20 л углекислого газа и 14 л метана. Определить количество выделившихся газов можно по формуле:

$$Q = q(t)m, \quad (3)$$

где  $Q$  — выделение газа из разогретого угля, м<sup>3</sup>/с;  $q$  — интенсивность выделения газа из разогретого угля при средней температуре  $t$ , м<sup>3</sup>/(кг·с);  $m$  — масса разогретого угля, кг.

Необходимо учесть, что после выгрузки угля или углесодержащей породы из самосвала прогретая масса окажется на поверхности скопления и начнет поглощать кислород из окружающего воздуха. Экзотермические реакции окисления горючих компонентов приведут к выделению тепла, что может вызвать дальнейшее повышение температуры горной массы и

развитие процесса самовозгорания с непрерывным увеличением выделения опасных газов до стабилизации температуры очага.

## ВЫВОДЫ

1. На основании проведенных исследований установлено, что температура поверхности кузова самосвалов, перевозящих углесодержащую горную породу, может разогреваться до 150–180 °С и нагревать горную массу.
2. Повышение температуры угля и углесодержащей породы интенсифицирует окислительные реакции и образование таких опасных газов, как оксид углерода, метан, углекислый газ.
3. Прогретые при перевозке скопления угля и породы после разгрузки могут запустить процесс самовозгорания и формировать очаги эндогенных пожаров.

*Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда и Кемеровской области-Кузбасса № 22-27-20004, <https://rscf.ru/project/22-27-20004/>*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скударнов Д.Е., Портола В.А., Квасова А.А., Сачков А.В. Анализ смертельного травматизма при добыче угля открытыми горными работами // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2018. № 1. С. 33–39.
2. Скударнов Д.Е., Портола В.А. Построение многофункциональной системы безопасности для обеспечения безопасных условий транспортировки горной массы карьерными автосамосвалами // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 4. С. 58–62.

3. Янин Е.П. Особенности воздействия на окружающую среду разработки угольных месторождений // Экологическая экспертиза. 2019. № 6. С. 2–59.
4. Скударнов Д.Е., Портола В.А., Бобровникова А.А. Влияние режима эксплуатации карьерных самосвалов на выбросы загрязняющих веществ // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2022. № 2. С. 93–104.
5. Шевцов Н.Р., Таранов П.Я., Левит В.В., Гудзь А.Г. Разрушение горных пород взрывом. Донецк, 2003. 253 с.
6. E.N. Kozyreva, E.S. Nepeina, M.V. Shinkevich Influence of Temperature on the Methane Content of Kuznetsk Basin Coking Coal // Coke and Chemistry. 2018. Vol. 61. No. 3. P. 112–115.
7. Шинкевич М.В. Газовыделение из отрабатываемого пласта с учётом геомеханических процессов во вмещающем массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013/ № S6. С. 278–285.
8. Скочинский А.А., Огиевский В.М. Рудничные пожары. М., 2011. 375 с.
9. Игишев В.Г. Борьба с самовозгоранием угля в шахтах. М., 1987. 176 с.
10. Тимофеева С.С., Смирнов Г.И. Риски самовозгорания угля и технологии их индикации XXI век // Техносферная безопасность. 2022. Т. 7. № 3 (27). С. 264–274.
11. Портола В.А., Бобровникова А.А., Син С.А., Игишев В.Г. Особенности выделения индикаторных пожарных газов при подаче азота в очаг самовозгорания угля // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 4. С. 47–52.

**DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.82.68.012**

**UDC 622.822.2**

**© V.A. Portola, A.A. Bobrovnikova, E.A. Seregin, D.E. Skudarnov, I.A. Bobrovnikov, 2023**

**V.A. PORTOLA**

Doctor of Engineering Sciences, Professor  
KuzSTU, Kemerovo  
e-mail: portola2@yandex.ru

**A.A. BOBROVNIKOVA**

Candidate of Chemical Sciences,  
Head of the Department  
KuzSTU, Kemerovo  
e-mail: bobrownickowa.al@yandex.ru

**E.A. SEREGIN**

Post-Graduate Student  
KuzSTU, Kemerovo  
e-mail: eugene\_s1976@mail.ru

**D.E. SKUDARNOV**

Post-Graduate Student  
KuzSTU, Kemerovo  
e-mail: promlad@inbox.ru

**I.A. BOBROVNIKOV**

Post-Graduate Student  
KuzSTU, Kemerovo  
e-mail: ivanleto888@mail.ru

## INTENSITY OF RELEASE OF HAZARDOUS GASES FROM COAL DURING TRANSPORTATION BY ROAD

*The impact of transportation of coal and coal-containing rocks in dump trucks, the bodies of which are heated by exhaust gases, is considered. Measurements in the sections showed that the surface temperature of the dump truck body can reach 150–180 °C. Laboratory studies have established the intensity of the release of carbon monoxide, methane and carbon dioxide from coal when heated.*

Keywords: OPEN MINING, MOTOR TRANSPORT, TEMPERATURE, COAL OXIDATION, EMISSION OF HARMFUL GASES, CARBON MONOXIDE, CARBON DIOXIDE, METHANE.

### REFERENCES

1. Skudarnov D.E., Portola V.A., Kvasova A.A., Sachkov A.V. Analysis of fatal injuries during coal mining by open-pit mining operations // Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugolnoj promyshlennosti]. 2018. No. 1. P. 33–39. [In Russ.].
2. Skudarnov D.E., Portola V.A. Construction of a multifunctional safety system to ensure safe conditions for transporting rock mass by dump trucks // Industrial safety [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2019. No. 4. P. 58–62. [In Russ.].
3. Yanin E.P. Features of the environmental impact of the development of coal deposits // Environmental expertise [Ekologicheskaya ekspertiza]. 2019. No. 6. P. 2–59. [In Russ.].
4. Skudarnov D.E., Portola V.A., Bobrovnikova A.A. Influence of the operation mode of quarry dump trucks on emissions of pollutants // Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugolnoj promyshlennosti]. 2022. No. 2. P. 93–104. [In Russ.].
5. Shevtsov N.R., Taranov P.Ya., Levit V.V., Gudz A.G. Destruction of rocks by explosion. Donetsk, 2003. 253 p. [In Russ.].
6. Kozyreva E.N., Nepeina E.S., Shinkevich M.V. Influence of Temperature on the Methane Content of Kuznetsk Basin Coking Coal // Coke and Chemistry. 2018. Vol. 61. No. 3. P. 112–115.
7. Shinkevich M.V. Gas release from the worked formation taking into account geomechanical processes in the host array // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal) [Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)]. 2013. No. S6. P. 278–285. [In Russ.].
8. Skochinsky A.A., Ogievsky V.M. Mine fires. M., 2011. 375 p. [In Russ.].
9. Igishev V.G. The fight against spontaneous combustion of coal in mines. M., 1987. 176 p. [In Russ.].
10. Timofeeva S.S., Smirnov G.I. Risks of spontaneous combustion of coal and technologies of their indication XXI century // Technosphere safety [Tekhnosfernaya bezopasnost]. 2022. Vol. 7. No. 3 (27). P. 264–274. [In Russ.].
11. Portola V.A., Bobrovnikova A.A., Son S.A., Igishev V.G. Features of the release of indicator fire gases when nitrogen is supplied to the coal spontaneous combustion center // Industrial safety [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2022. No. 4. P. 47–52. [In Russ.].

**Оформление подписки на журнал «Вестник Научного центра  
ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности»  
осуществляется через Агентство подписки «Урал-Пресс Сибирь»**

**Подписной индекс 80814**