

## АКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОЧАГОВ САМОВОЗГОРАНИЯ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Г.И. Коршунов<sup>1</sup>, Н.А. Мироненкова<sup>1</sup>, А.А. Полещук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: poleshuck.nas@yandex.ru

**Аннотация:** В настоящее время в угольной промышленности эндогенные пожары составляют более 40% аварий и инцидентов, что подчеркивает важность изучения причин их возникновения. Рассмотрены ключевые аспекты, способствующие самовозгоранию угля на шахтах, которые чаще всего приводят к эндогенным пожарам. К ним относятся химические реакции, происходящие в угольных пластах, термические процессы, включая физико-химические свойства угля, склонность угля к самовозгоранию, параметры окружающей среды. Показана важность методов контроля очагов самовозгорания, так как в следующих стадиях развития пожара ликвидация последствий аварии требует колоссальных человеческих и экономических ресурсов и представляет серьезную угрозу для безопасности персонала. Проанализированы методы определения и контроля эндогенных пожаров на угольных шахтах, включая применяемое оборудование, ход проведения рассмотренных методов, выявлены преимущества и недостатки. Описаны наиболее распространенные методы: акустическая диагностика, газоаналитический метод (измерение плотности потока радона), тепловизионный и термографический контроль, методы пассивного контроля. Универсальным в настоящее время является метод, основанный на радоновой съемке. Планируется в дальнейших исследованиях совершенствование выбранного газоаналитического метода, где индикаторным газом выступает радон.

**Ключевые слова:** самовозгорание угля, аварии, эндогенные пожары, газоанализаторы, плотность радона, газовая съемка, тепловизоры, тепловизионный контроль, методы пассивного контроля, промышленная и пожарная безопасность.

**Для цитирования:** Коршунов Г. И., Мироненкова Н. А., Полещук А. А. Актуальные методы определения очагов самовозгорания на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5. – С. 169–180. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_5\_0\_169.

### The topical methods of detecting spontaneous combustion sources in coal mines

G.I. Korshunov<sup>1</sup>, N.A. Mironenkova<sup>1</sup>, A.A. Poleshchuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,  
e-mail: poleshuck.nas@yandex.ru

**Abstract:** Endogenous fires total over 40% of all accidents and incidents in the present-day coal industry, which emphasizes urgency of studying their causes. This study focuses on the key factors that promote spontaneous combustion of coal, which often leads to endogenous

fires in mines. The range of such factors includes chemical reactions in coal seams, thermal processing, physical and mechanical properties of coal, proneness of coal to spontaneous combustion and parameters of the environment. It is important to control endogenous firing in coal mines as the subsequent accident management demands colossal human and economic resources and endangers lives of mine personnel. The methods of detecting and controlling endogenous fires in coal mines, including equipment, procedures, advantages and disadvantages are analyzed. The article describes the most common methods: acoustic diagnosis, gas analysis (radon flow density measurement), thermal imagery and thermography, methods of passive control. The radon method is currently an omnibus technique. Further, it is planned to improve the gas analysis method with radon used as a gas-indicator.

**Key words:** spontaneous combustion of coal, endogenous fires, gas analyzers, radon density, radon method, thermal imager, thermal imagery control, passive control techniques, industrial and fire safety.

**For citation:** Korshunov G. I., Mironenkova N. A., Poleshchuk A. A. The topical methods of detecting spontaneous combustion sources in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025; (5):169-180. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_5\_0\_169.

---

## Введение

Эндогенные пожары представляют собой одну из самых серьезных угроз на производственных объектах I класса опасности, к которым, согласно ФЗ № 116, относятся угольные шахты, поэтому мониторинг возникновения самовозгорания является актуальной задачей для повышения безопасности.

В последние годы разработаны и внедрены различные методы и технологии для раннего определения очагов самовозгорания, включая использование газоанализаторов, тепловизоров и методов газовой съемки. Эти инструменты позволяют идентифицировать потенциальные угрозы, что существенно снижает риск возникновения аварийных ситуаций.

В статье рассмотрены основные причины самовозгорания угля, а также проведен анализ современных методов и способов обнаружения и контроля, что позволит более оперативно и точно выявлять очаги возгорания на угольных шахтах. Чем точнее используемый метод, тем больше вероятность определения эндогенных пожаров на ранних стадиях,

что позволит повысить уровень пожарной и промышленной безопасности.

Российская Федерация в настоящее время является одним из мировых лидеров по производству и экспорту угля [1, 2]. В угольной промышленности, согласно статистическим данным Ростехнадзора, за период с 2014 по 2023 гг. произошло 232 аварии, в результате которых погибло более 50 чел. Несмотря на то, что в 2019 г. количество аварий на угольных шахтах сократилось на 25% по сравнению с 2014 г., количество погибших в результате аварий за тот же период увеличилось на 15%.

Исходя из вышеприведенных данных, можно сделать вывод, что при росте объема добычи и снижении количества аварий количество погибших работников остается на том же уровне за счет крупных аварий. Примером такой масштабной аварии стал взрыв на шахте «Листвяжная» (2021).

Анализ статистических данных за последние годы показал, что в России наиболее частой причиной аварий при подземных работах по добыче угля являются пожары (более 40% от общего числа

аварий). Похожая ситуация наблюдается и в Китае, являющемся ведущим мировым производителем угля, где подавляющее большинство крупных аварий на угольных шахтах составляют пожары и взрывы [3].

Количество случаев самовозгорания угля в период 2005–2019 гг. увеличилось с 17 до 26%, причем 18% из них произошли из-за самовоспламенения угля в выработанных пространствах [4]. В период с 2019 по 2024 гг. доля очагов самовозгорания угля не претерпела существенных изменений.

Эндогенные пожары вызваны сочетанием геологических, технических и организационных факторов, и их предотвращение требует комплексного подхода к безопасности на шахтах, так как они случаются ежегодно и нуждаются в большом количестве человеческих и экономических ресурсов в процессе ликвидации и устранения последствий аварии [5]. На формирование благоприятных условий для возникновения очагов самовозгорания оказывают влияние технологии добычи, условия хранения и транспортировки, а также процессы промышленной обработки.

В исследованиях [6–8] выявлена зависимость вероятности возникновения эндогенных пожаров от горно-геологических и горнотехнических факторов,

аналогичные исследования проводились зарубежными авторами [9–11]. Влияние природных факторов на эндогенную пожароопасность показано в табл. 1 [12, 13].

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что наиболее склонны к самовозгоранию химически активные угли, залегающие в крутых пластах мощностью более 3,5 м.

Согласно исследованию [14], угли с более пористой структурой сильнее подвержены самовозгоранию.

Процесс самовозгорания проходит 5 основных стадий [13, 14]:

- начало самовозгорания, которое характеризуется изменением влажности и температуры, появлением запахов;
- стадия тления I, при которой образуются частицы размером менее 0,1 мк и молекулы монооксида углерода;
- стадия тления II, при которой на субмикрометре (размерный диапазон меньше 1 мк, в котором могут быть различимы, например, наночастицы) видны частицы дыма, концентрация монооксида углерода увеличивается, а содержание кислорода снижается;
- стадия самовозгорания, характеризуется повышением температуры и выделением водорода, сероводорода и низкоуглеводородных газов, в частности метана;

Таблица 1

**Природные факторы, влияющие на эндогенную пожароопасность в угольных шахтах**  
**Natural factors affecting endogenous fire hazard in coal mines**

Фактор	Степень опасности		
	малоопасно	опасно	весьма опасно
Химическая активность угля, см <sup>3</sup> /(г·ч)	менее 0,025	0,025–0,050	более 0,050
Угол падения пласта, град	менее 35	35–55	более 55
Мощность пласта, м	менее 1,3	1,3–3,5	более 3,5
Геологические нарушения	нет	пликативные	дизъюнктивные
Пропластки во вмещающих породах суммарной мощностью более 0,2 м	нет	в почве в пределах одной мощности рабочего пласта	в кровле в пределах трех мощностей рабочего пласта

- стадия самовоспламенения, с появлением вспышек, видимых невооруженным глазом.

Перед тем, как выбрать метод выявления очага самовозгорания, необходимо проанализировать исследуемую территорию с целью экономии времени и снижения рисков аварии на угольных шахтах [9, 15]. Одним из подходов к обеспечению безопасности на угольных шахтах является использование превентивных мероприятий, с помощью которых можно выявить возникновение и развитие пожаров на ранних стадиях.

### Методы

В работе был выбран метод анализа и сравнения существующих способов обнаружения и контроля очагов самовозгорания в угольных шахтах. Перед выбором оптимального способа контроля были проанализированы причины возникновения эндогенных пожаров.

Согласно исследованиям, наиболее распространенными методами контроля очагов самовозгорания угля на шахтах являются:

- акустическая диагностика [16] (акустико-эмиссионные системы Лель /a-line 32d (DDM), акустический дефектоскоп АД-701М Ланфор);

- газоанализ (используются приборы: портативные газоанализаторы Gas Check, предназначенные для быстрой и точной оценки концентрации газов в воздухе на месте работы; датчики для измерения влажности и температуры; Камера-01) [17 – 19];

- тепловизионный контроль (используются приборы: телевизионные камеры Flir i3, способные обнаруживать изменения температуры на поверхности объектов, портативные тепловизоры BALTECH TR-0110 и iRay M6S-19 M6S, применяемые для обнаружения участков повышенной температуры и контроля за состоянием оборудования) [11, 20 – 21];

- методы пассивного контроля: принцип пассивной и активной адсорбции (прибор BELSORP-max).

Дополнительно к вышеописанным методам можно применять компьютерное моделирование (применяются программные пакеты общего и специального назначения (см. ниже), для оценки рисков используется программа RISKGATE) [22 – 24].

В настоящее время широко используются методы компьютерного моделирования, позволяющие определить поля концентраций выделяющихся при пожаре газов, температурные поля и их эволюцию с течением времени и при различных сценариях. Так, для решения задач вычислительной гидродинамики применяются программные пакеты общего назначения, такие как ANSYS и Flow Vision, а также специального, например, Fire Dynamics Simulator (FDS) [3]. Их использование позволяет получить подробные данные о скорости воздушного потока, давлении, концентрации газов, тепловом потоке в моделируемой области и позволяет визуализировать сложное поведение системы [24].

Для предотвращения эндогенных пожаров с помощью применения методов численного моделирования можно формировать оптимальный тепловой баланс процессов самонагрева угля путем определения горнотехнических решений по снижению параметров теплогенерации угольных пластов [24].

Также примером может служить RISKGATE, известная австралийская интерактивная онлайн-система. Она может быть использована для оценки рисков в угольной промышленности путем выявления ключевых событий, инициирующих аварии (когда контроль над ситуацией теряется), в частности, самовозгорания угля в шахтах, и создания списков причин и мер по контролю каждого инициирующего события. В системе RISKGATE ис-

пользуется модель ВТА, так как она является наиболее наглядной и позволяет изучить развитие нежелательных событий (как аварий, так и инцидентов) в системе и тщательно проанализировать, как их контролировать с целью предотвращения или минимизации их последствий.

При выборе метода оценки рисков специалисты по охране труда имеют возможность ознакомиться с RISKGATE на площадке самой системы (<http://www.riskgate.org/>) [23, 24].

Методы оценки рисков, применяемые в машиностроении, аналогично можно использовать и в угольной промышленности с целью повышения безопасности [25, 26].

### Результаты

Были проанализированы распространенные методы обнаружения и контроля очагов самовозгорания на угольных шахтах. Дополнительно были рассмотрены методы моделирования с целью визуализации и проверки данных, полу-

Таблица 2

#### **Актуальные методы контроля очагов самовозгорания** *Current methods of control of spontaneous combustion foci*

Метод	Достоинства	Недостатки
Акустическая диагностика	- обнаружение без визуального наблюдения [16]	- ограничения в точности идентификации источника звуковых сигналов, особенно в условиях шума и вибраций, характерных для шахтных выработок; - ложные срабатывания из-за других источников шума в окружающей среде; - используется крайне редко [16]
Методы пассивного контроля	- без прямого воздействия на объекты и процессы; - простота и удобство [27, 28]	- неточность [28, 29]
Газоаналитический метод (измерение плотности потока радона [30 – 32])	- раннее обнаружение; - высокая точность; - безопасный метод контроля [33 – 35]	- сложность интерпретации данных [34, 36]; - влияние окружающей среды [17 – 19]
Тепловизионный и термографический контроль	- простота и доступность; - возможность непрерывного мониторинга; - предсказательная способность [11, 20, 21]	- неточность измерений, так как температурные аномалии могут быть вызваны различными факторами, не связанными с самовозгоранием; - задержка реакции; - сложность интерпретации данных; - ограниченность области применения [11, 20, 21]
Компьютерное моделирование	- точность; - экономическая эффективность; - гибкость и масштабируемость; - безопасность; - исследовательский потенциал [23 – 25]	- большая продолжительность вычислений, возрастающая при расширении области моделирования и увеличении разрешения сетки; - дым и тепло представляются в виде однонаправленного потока; - низкая информативность касательно физики процесса [23 – 25]

ченных в ходе предыдущих методов. В табл. 2 приведены достоинства и недостатки рассмотренных методов.

### **Обсуждение результатов**

Учитывая многофакторность возникновения и развития эндогенных пожаров и особенность физико-химических процессов, рассматривались различные подходы к методам обнаружения и контроля очагов самовозгорания на угольных шахтах.

В исследованиях [3, 4, 14] к причинам эндогенных пожаров отнесли:

- наличие материала, способного окисляться (скопление раздробленного угля, руды и угольного сланца);
- приток кислорода к окисляющейся поверхности частиц скопления;
- затрудненный отток тепла из очага самонагревания.

Понимая причины и принцип протекания физико-химических процессов, в качестве наиболее показательного и точного метода выбран газоаналитический, а именно — измерение плотности потока радона.

В исследовании [16] акустический метод показал себя с положительной стороны в лабораторных условиях, но в условиях действующих шахт он теряет точность своих данных и не может объективно указать на очаги самовозгорания. На результаты при использовании этого метода в реальных условиях влияет множество факторов: работа технологического оборудования, внешние шумы и пр.

В исследованиях [17—19] по газоаналитическому методу есть несколько подходов. Ряд исследований посвящен обнаружению и контролю эндогенных пожаров по предельным и неопредельным углеводородам, включая оксиды азота, оксиды углерода, в частности угарный газ.

Использование пожарных газов в качестве индикаторных, в частности окиси

углерода (угарного газа), не всегда указывает на процесс самонагревания или самовозгорания, они могут образовываться и за счет других факторов, например, при буровзрывных работах, работе дизелей, внутри шахты или заноситься с поверхности, а их интенсивное выделение из нагретого угля происходит при достаточно высоких температурах — 100—150 °С. При более низких температурах все эти газы образуют некоторый фон рудничной атмосферы [30—32].

Ряд ученых предлагает в качестве индикаторного газа применять радон. Радон является продуктом распада радия, который в свою очередь образуется в процессе распада урана и тория, присутствующих в угольных пластах; за счет инертности, малого периода полураспада, наличия дочерних продуктов полураспада радон точно и эффективно определяет очаг самовозгорания [33—35].

Радон, как и пожарные газы, распространяется не только в горных выработках шахты, но и выносится на поверхность, образуя зоны повышенных концентраций радона (радоновые аномалии). Процесс распространения радона можно исследовать путем математического моделирования, что позволяет определить масштабы и направление развития эндогенных пожаров [36].

В исследованиях [11, 20, 21] внимание уделяется менее распространенному методу обнаружения и контроля эндогенных пожаров: тепловизионному и термографическому контролю. Тепловые съемки также могут выявить расположение очагов самовозгорания, однако их обнаружение требует большего количества времени, пока температура пород достигнет определенного значения.

Методы пассивного контроля применяются самостоятельно реже, практически их применяют совместно с газоаналитическим методом, например, исполь-

зуют угольные абсорбционные колонки [27–29].

Дополнительно к вышеописанным методам в настоящее время стали чаще применять компьютерное моделирование. Благодаря ему можно спрогнозировать развитие пожаров, установить определяющие факторы возникновения эндогенных пожаров, выявить зависимости между ними, определить направление распространения очагов самовозгорания [23–25].

### **Заключение**

Анализ данных, представленных в табл. 2, позволяет сделать вывод о том, что газоаналитический метод является наиболее эффективным инструментом для раннего выявления эндогенных пожаров. Этот метод обладает несколькими ключевыми преимуществами, которые делают его особенно ценным в условиях шахтной деятельности.

К преимуществам выбранного метода можно отнести следующее:

- быстрота и точность: метод измерения плотности потока радона позволяет быстро получать данные о состоянии очагов самовозгорания. Это особенно важно в условиях шахт, где время может сыграть решающую роль в предотвращении катастроф. Высокая точность измерений обеспечивает надежность получаемых данных, что важно для принятия оперативных решений;

- простота в использовании: оборудование для измерения плотности потока радона обычно не требует сложной настройки, что делает его доступным для широкого круга специалистов.

Акустический метод, несмотря на простоту его применения, подвержен влиянию различных факторов и не может дать объективной оценки развития эндоген-

ных пожаров. Тепловизионный и термографический контроль также не обладает высокой точностью определения очагов самовозгорания угля, что является важным критерием применения того или иного метода. Методы пассивного контроля рекомендуется применять совместно с вышеописанными методами.

Совместное использование газоаналитического метода и компьютерного моделирования позволяет значительно повысить точность определения очагов самовозгорания. Компьютерные модели могут учитывать различные факторы, такие как геологические условия, уровень влажности, температуры и другие параметры, что позволяет более точно прогнозировать возможные места возникновения пожаров.

Несмотря на свои преимущества, метод измерения плотности потока радона остается малоизученным и не имеет четкого нормативного закрепления в законодательстве Российской Федерации. Это создает определенные трудности для его широкого применения на практике.

Учитывая текущие тенденции в области охраны труда и безопасности на шахтах, газоаналитический метод имеет перспективы на ближайшее время. Принимая во внимание растущую потребность в эффективных методах предотвращения пожаров и обеспечения безопасности работников, дальнейшие исследования в этой области могут привести к значительным улучшениям в практике управления рисками на шахтах.

Таким образом, метод измерения плотности потока радона представляет собой важный шаг вперед в области радиационной безопасности и требует активного внимания со стороны исследователей и рабочего персонала.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Мешков Г. Б., Петренко И. Е., Губанов Д. А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. – 2024. – № 3. – С. 18–29. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29.

2. Baeza A., García-Paniagua J., Guillén J., Montalban B. Influence of architectural style on indoor radon concentration in a radon prone area. A case study // Science of The Total Environment. 2018, vol. 610 – 611, pp. 258 – 266. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.056.

3. Калайгорода В. В., Простов С. М., Шабанов Е. А. Инструментальный мониторинг при локализации очагов эндогенных пожаров в борту угольного разреза // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2023. – № 2. – С. 124 – 135. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-124-135.

4. Федоткин И. О., Федоткин Д. В. Проблемы пожаров в угольных шахтах и обзор современных подходов к их моделированию // Уголь. – 2024. – № 2. – С. 69 – 73. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-2-69-73.

5. Зубов В. П., Голубев Д. Д. Перспективы использования современных технологических решений при отработке пологих пластов угля с учетом опасности формирования очагов его самовозгорания // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250. – С. 534 – 541. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.6.

6. Казанин О. И., Ярошенко В. В. Снижение потерь угля при отработке сближенных пластов донной части Воркутского месторождения // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 395 – 401. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.1.

7. Злобина А. Н., Рихванов Л. П., Барановская Н. В., Фархутдинов И. М., Ванг Н. Радиоэкологическая опасность для населения в районах распространения высокорadioактивных гранитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 3 (330). – С. 111 – 125. DOI: 10.18799/24131830/2019/3/172.

8. Тимофеева С. С., Смирнов Г. И. Риски самовозгорания угля и технологии их индикации // XXI век. Техносферная безопасность. – 2022. – Т. 7. – № 3. – С. 264 – 274. DOI: 10.21285/2500-1582-2022-3-264-274.

9. Kong B., Li Z., Yang Y., Liu Zh., Yan D. A review on the mechanism, risk evaluation, and prevention of coal spontaneous combustion in China // Environmental Science and Pollution Research. 2017, vol. 24, no. 1, pp. 1 – 18. DOI: 10.1007/s11356-017-0209-6.

10. Deng J., Zhao J. U., Zhang Y. N., Wang C. P., Huang A. C. Thermal behavior and micro characterization analysis of second-oxidized coal // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2017, vol. 127, no. 1, pp. 439 – 448. DOI: 10.1007/s10973-016-5493-8.

11. Tao Xu, Qimiao Xie, Yutao Kang Heat effect of the oxygen-containing functional groups in coal during spontaneous combustion processes // Advanced Powder Technology. 2017, vol. 28, no. 8, pp. 1841 – 1848. DOI: 10.1016/j.apt.2017.01.015.

12. Myers T., Florio B. Spontaneous combustion of coal // Journal of the Franklin Institute. 2018, pp. 12 – 20. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.03.001.

13. Rudakov M. L., Rabota E. N., Kolvakh K. A. Assessment of the individual risk of fatal injury to coal mine workers during collapses // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho University. 2020, no. 4, pp. 88 – 93. DOI: 10.33271/nvngu/2020-4/088.

14. Родионов В. А., Турсенева С. А., Скрипник И. Л., Ксенофонов Ю. Г. Результаты исследования кинетических параметров самовозгорания каменноугольной пыли // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 617 – 622. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3.

15. Жихарев С. Я., Родионов В. А., Пихконен Л. В. Исследование технологических свойств и показателей взрывопожароопасности каменноугольной пыли инновационными методами // Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 45 – 49. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.09.

16. Kats V., Adamtsevich L. Method for extracting diagnostic features of the facilities technical condition in the system for monitoring // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022, vol. 18, no. 2, pp. 156 – 162. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-156-162.

17. Портола В. А., Тайлаков О. В., Ли Хи Ун, Соболев В. В., Бобровникова А. А. // Обнаружение, локация и оценка состояния очагов подземных пожаров по аномалиям радона на земной поверхности // Уголь. – 2021. – № 5. – С. 47 – 52. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-47-52.

18. Портола В. А., Бобровникова А. А., Палеев Д. Ю., Еременко А. А., Шапошник Ю. Н. Исследование скорости сорбции кислорода самовозгорающимися сульфидными рудами // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 1. – С. 57 – 62. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-57-62.

19. Лешуков Т. В., Легощин К. В., Ларионов А. В. Пространственная изменчивость плотности потока радона на территориях подземной добычи угля // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 4. – С. 93 – 97. DOI: 10.17513/use.37368.



20. Нарский В. А., Портола В. А. Применение тепловизоров для обнаружения и локации очагов самовозгорания, возникших в шахтах // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2021. — № 2. — С. 13–18.

21. Kumar S., Mishra P. K., Kumar M., Pratik, Kumar J. Coactive application of environmental sensors for detection and assessment of spontaneous combustion in underground coal mines / International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing. Chennai, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018, p. 631–636. DOI: 10.1109/ICECDS.2017.8389513.

22. Гендлер С. Г., Прохорова Е. А., Самаров Л. Ю., Хомяков Д. О. Развитие риск-ориентированного подхода для выбора приоритетных направлений снижения производственного травматизма в АО «СУЭК-КУЗБАСС» // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2021. — № 1. — С. 64–76. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_214.

23. Gawetek E., Drozdowska B., Fuchs A. Radon as a risk factor of lung cancer // Przegląd Epidemiologiczny. 2017, vol. 1, no. 71, pp. 90–98.

24. Friedmann H., Baumgartner A., Bernreiter M., Gräser J., Gruber V., Karl F., Kaineder H., Maringer F. J., Linger W., Seidel C., Wurm G. Indoor radon, geogenic radon surrogates and geology – Investigations on their correlation // Journal of Environmental Radioactivity. 2017, vol. 166, pp. 382–389. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.028.

25. Салимов А. Э., Шибанов Д. А., Иванов С. Л. Риски отказов карьерного экскаватора, связанные с его техническим обслуживанием и ремонтом // Горная промышленность. — 2024. — № 2. — С. 97–102. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-97-102.

26. Фомин А. И., Халявина М. Н. Методы управления охраной труда на горном предприятии / XVII Международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс–2018». Сборник материалов. — Кемерово: КузГТУ, 2018. — С. 122.1–122.8.

27. Ворошилов Я. С. Многоуровневая модель компетентности работников в сфере безопасности труда // Горная промышленность. — 2020. — № 2. — С. 125–129. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-2-125-129.

28. Myers T., Florio B., Fareo A. G., Kgate M., Mitchell S., Sithole H., Nchabeleng S. P., Mabasa R., Borole L., Born K., Mungwe S. Spontaneous combustion of coal // Journal of the Franklin Institute. 2018, pp. 12–20. DOI: 10.1016/s0016-0032(11)90445-1.

29. Kong B., Li Z., Yang Y., Liu Zh., Yan D. A review on the mechanism, risk evaluation, and prevention of coal spontaneous combustion in China // Environmental Science and Pollution Research. 2017, vol. 24, no. 1, pp. 23453–23470. DOI: 10.1007/s11356-017-0209-6.

30. Singh L. M., Kumar M., Sahoo B. K., Sapra B. K. Study of natural radioactivity, radon exhalation rate and radiation doses in coal and flyash samples from thermal power plants, India // Physics Procedia. 2015, vol. 80, pp. 120–124. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.11.070.

31. Сидорова Г. П., Крылов Д. А., Овчаренко Н. В. Радиационная обстановка в районах расположения угольных ТЭС России // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2017. — № 5 (23). — С. 36–44. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-5-36-44.

32. Легощин К. В., Лешуков Т. В. Радоновая опасность в жилых помещениях на территориях развития угледобывающей промышленности // Фундаментальные и прикладные аспекты устойчивого развития ресурсных регионов: Сборник научных статей. — Новокузнецк, 2020. — С. 225–230.

33. Титов А. В., Шандала Н. К., Маренный А. М., Остапчук Т. В., Нефедов Н. А., Исаев Д. В., Семенова М. П., Астафуров В. И., Старинский В. Г., Шлыгин В. В. Радиационная обстановка на объекте бывшего предприятия ЛПО «Алмаз» // Гигиена и санитария. — 2017. — № 9 (96). — С. 822–826. DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-9-822-826.

34. Chen J., Ford K. L. A study on the correlation between soil radon potential and average indoor radon potential in Canadian cities // Journal of Environmental Radioactivity. 2017, vol. 166, pp. 152–156. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.01.018.

35. Leshukov T., Larionov A., Legoshchin K. V., Yakovleva S. N. Radon hazard assessment in region with intense coal mining industry // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 543, no. 1, article 012026. DOI: 10.1088/1755-1315/543/1/012026.

36. Tchorz-Trzeciakiewicz D. E., Solecki A. T. Variations of radon concentration in the atmosphere. Gamma dose rate // Atmospheric Environment. 2018, vol. 174, pp. 54–65. 10.1016/j.atmosenv.2017.11.033. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Meshkov G. B., Petrenko I. E., Gubanov D. A. The results of the work of the Russian coal industry in 2023. *Ugol'*. 2024, no. 3, pp. 18–29. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29.
2. Baeza A., García-Paniagua J., Guillén J., Montalban B. Influence of architectural style on indoor radon concentration in a radon prone area. A case study. *Science of The Total Environment*. 2018, vol. 610–611, pp. 258–266. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.056.
3. Kalaigorod V. V., Prostov S. M., Shabanov E. A. Instrumental monitoring at locations of the foci of endogenous fires in the board of the coal mine. *Minerals and Mining Engineering*. 2023, no. 2, pp. 124–135. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-124-135.
4. Fedotkin I. O., Fedotkin D. V. Problems of fires in coal mines and a review of modern approaches to their modeling. *Ugol'*. 2024, no. 2, pp. 69–73. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-2-69-73.
5. Zubov V. P., Golubev D. D. Prospects of using modern technologies technological solutions for the development of shallow coal seams, taking into account the danger of the formation of foci of its spontaneous combustion. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 534–541. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.6.
6. Kazanin O. I., Yaroshenko V. V. Reduction of coal losses during mining of the converged layers of the bottom of the Vorkuta deposit. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 244, pp. 395–401. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.1.
7. Zlobina A. N., Rikhvanov L. P., Baranovskaya N. V., Farkhutdinov I. M., Wang N. Radioecological danger to the population in the areas of distribution of highly radioactive granites. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019, no. 3(330), pp. 111–125. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2019/3/172.
8. Timosheeva S. S., Smirnov G. I. Russian coal mining and technologies and innovations. *XXI century. Technosphere safety*. 2022, vol. 7, no. 3, pp. 264–274. [In Russ]. DOI: 10.21285/2500-1582-2022-3-264-274.
9. Kong B., Li Z., Yang Y., Liu Zh., Yan D. A review on the mechanism, risk evaluation, and prevention of coal spontaneous combustion in China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017, vol. 24, no. 1, pp. 1–18. DOI: 10.1007/s11356-017-0209-6.
10. Deng J., Zhao J. U., Zhang Y. N., Wang C. P., Huang A. C. Thermal behavior and micro characterization analysis of second-oxidized coal. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017, vol. 127, no. 1, pp. 439–448. DOI: 10.1007/s10973-016-5493-8.
11. Tao Xu, Qimiao Xie, Yutao Kang Heat effect of the oxygen-containing functional groups in coal during spontaneous combustion processes. *Advanced Powder Technology*. 2017, vol. 28, no. 8, pp. 1841–1848. DOI: 10.1016/j.apt.2017.01.015.
12. Myers T., Florio B. Spontaneous combustion of coal. *Journal of the Franklin Institute*. 2018, pp. 12–20. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.03.001.
13. Rudakov M. L., Rabota E. N., Kolvakh K. A. Assessment of the individual risk of fatal injury to coal mine workers during collapses. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho University*. 2020, no. 4, pp. 88–93. DOI: 10.33271/nvngu/2020-4/088.
14. Rodionov V. A., Tursenev S. A., Skripnik I. L., Ksenofontov Yu. G. Results studies of kinetic parameters of spontaneous combustion of coal dust. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 617–622. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3.
15. Zhikharev S. Ya., Rodionov V. A., Pikhkonen L. V. Investigation of technological properties and indicators of explosion and fire hazard of coal dust by innovative methods. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 6, pp. 45–49. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.09.
16. Kats V., Adamtsevich L. Method for extracting diagnostic features of the facilities technical condition in the system for monitoring. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022, vol. 18, no. 2, pp. 156–162. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-156-162.
17. Portola V. A., Tailakov O. V., Lee Hee Un, Sobolev V. V., Bobrovnikova A. A. Detection, location and assessment of the state of underground fires by radon anomalies on the Earth's surface. *Ugol'*. 2021, no. 5, pp. 47–52. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-47-52.
18. Portola V. A., Bobrovnikova A. A., Paleev D. Yu., Eremenko A. A., Shaposhnik Yu. N. Investigation of the rate of oxygen sorption by self-igniting sulfide ores. *Occupational Safety in Industry*. 2020, no. 1, pp. 57–62. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-57-62.

19. Leshukov T. V., Legoshchin K. V., Larionov A. V. Spatial variability of radon flux density in the territories of underground coal mining. *Advances in current natural sciences*. 2020, no. 4, pp. 93–97. [In Russ]. DOI: 10.17513/use.37368.
20. Narsky V. A., Portola V. A. Application of thermal imagers for detection and locations of spontaneous combustion foci that have arisen in mines. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2021, no. 2, pp. 13–18. [In Russ].
21. Kumar S., Mishra P. K., Kumar M., Pratik, Kumar J. Coactive application of environmental sensors for detection and assessment of spontaneous combustion in underground coal mines. *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing*. Chennai, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018, p. 631–636. DOI: 10.1109/ICECDS.2017.8389513.
22. Gendler S. G., Prokhorova E. A., Samarov L. Yu., Khomyakov D. O. Development of a risk-based approach for choosing priority areas for reducing occupational injuries in JSC SUEK-KUZBASS. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2021, no. 1, pp. 64–76. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_214.
23. Gawetek E., Drozdowska B., Fuchs A. Radon as a risk factor of lung cancer. *Przegląd Epidemiologiczny*. 2017, vol. 1, no. 71, pp. 90–98.
24. Friedmann H., Baumgartner A., Bernreiter M., Gräser J., Gruber V., Karl F., Kaineder H., Maringer F. J., Linger W., Seidel C., Wurm G. Indoor radon, geogenic radon surrogates and geology – Investigations on their correlation. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017, vol. 166, pp. 382–389. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.028.
25. Salimov A. E., Shibanov D. A., Ivanov S. L. The risks of failure of a quarry excavator associated with its maintenance and repair. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 2, pp. 97–102. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-97-102.
26. Fomin A. I., Khalyavina M. N. Methods of labor protection management at a mining enterprise. *XVII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri. Sibresurs–2018». Sbornik materialov* [Results and prospects of scientific and practical conferences «Sibresource–2018»], Kemerovo, KuzGTU, 2018, pp. 122.1–122.8. [In Russ].
27. Voroshilov Ya. S. Multilevel model of employee competence in the field of occupational safety. *Russian Mining Industry Journal*. 2020, no. 2, pp. 125–129. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-2-125-129.
28. Myers T., Florio B., Fareo A. G., Kgatle M., Mitchell S., Sithole H., Nchabeleng S. P., Mabaasa R., Borole L., Born K., Mungwe S. Spontaneous combustion of coal. *Journal of the Franklin Institute*. 2018, pp. 12–20. DOI: 10.1016/s0016-0032(11)90445-1.
29. Kong B., Li Z., Yang Y., Liu Zh., Yan D. A review on the mechanism, risk evaluation, and prevention of coal spontaneous combustion in China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017, vol. 24, no. 1, pp. 23453–23470. DOI: 10.1007/s11356-017-0209-6.
30. Singh L. M., Kumar M., Sahoo B. K., Sapra B. K. Study of natural radioactivity, radon exhalation rate and radiation doses in coal and flyash samples from thermal power plants, India. *Physics Procedia*. 2015, vol. 80, pp. 120–124. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.11.070.
31. Sidorova G. P., Krylov D. A., Ovcharenko N. V. Radiation situation in the areas of coal-fired thermal power plants of Russia. *Transbaikal state university journal*. 2017, no. 5 (23), pp. 36–44. [In Russ]. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-5-36-44.
32. Legoshchin K. V., Leshukov T. V. Radon hazard in residential premises on territories of coal mining industry development. *Fundamental'nye i prikladnye aspekty ustoychivogo razvitiya resursnykh regionov: Sbornik nauchnykh statey* [Fundamental and applied aspects of sustainable development of resource regions: collection of scientific articles], Novokuznetsk, 2020, pp. 225–230. [In Russ].
33. Titov A. V., Shandala N. K., Marenniy A. M., Ostapchuk T. V., Nefedov N. A., Isaev D. V., Semenova M. P., Astafurov V. I., Starinsky V. G., Shlygin V. V. Radiation situation at the facility of the former LPO Almaz enterprise. *Hygiene and Sanitation*. 2017, no. 9 (96), pp. 822–826. [In Russ]. DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-9-822-826.
34. Chen J., Ford K. L. A study on the correlation between soil radon potential and average indoor radon potential in Canadian cities. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017, vol. 166, pp. 152–156. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.01.018.
35. Leshukov T., Larionov A., Legoshchin K. V., Yakovleva S. N. Radon hazard assessment in region with intense coal mining industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 543, no. 1, article 012026. DOI: 10.1088/1755-1315/543/1/012026.

36. Tchorz-Trzeciakiewicz D. E., Solecki A. T. Variations of radon concentration in the atmosphere. Gamma dose rate. *Atmospheric Environment*. 2018, vol. 174, pp. 54–65. 10.1016/j.atmosenv.2017.11.033.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Коршунов Геннадий Иванович*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: korshunov\_gi@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-2074-9695,

*Мироненкова Наталья Александровна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, e-mail: Mironenkova\_NA@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-3543-1575,

*Полещук Анастасия Андреевна*<sup>1</sup> — аспирант, e-mail: poleshuck.nas@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0007-6842-9216,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

**Для контактов:** Полещук А.А., e-mail: poleshuck.nas@yandex.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*G.I. Korshunov*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng), Professor, e-mail: korshunov\_gi@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-2074-9695,

*N.A. Mironenkova*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng), Assistant Professor,

e-mail: Mironenkova\_NA@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-3543-1575,

*A.A. Poleshchuk*<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: poleshuck.nas@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0007-6842-9216,

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** A.A. Poleshchuk, e-mail: poleshuck.nas@yandex.ru.

Получена редакцией 10.10.2024; получена после рецензии 28.01.2025; принята к печати 10.04.2025.

Received by the editors 10.10.2024; received after the review 28.01.2025; accepted for printing 10.04.2025.

