

Природоподобные решения некоторых проблем горного производства

Д.И. Борисенко✉

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация

✉ dima-luxinzhi@mail.ru

Резюме: Убыль запасов урана и тория в разведанных месторождениях и на складах может быть компенсирована за счёт извлечения их из угля. Поскольку чем больше урана в угле, тем более он склонен к самовозгоранию, важная проблема на пути разработки таких углей – подземные (эндогенные) пожары в угольных пластах. Однако, используя принципы природоподобия, можно рассмотреть эти пожары не как проблему, а как процесс обогащения ураном содержащей его среды. При сгорании угля в образующейся золе увеличивается концентрация радиоактивных элементов. В связи с этим интерес представляют очаги пожара и максимально точное определение пространственно-временного положения их границ. Для этого представляется перспективным применение акустической диагностики. Для упрощения технологии извлечения радиоактивных элементов из содержания очагов пожара в угольных пластах предлагается использовать неметаллические анкерные крепи. Цель настоящей работы – рассмотреть пожары в угольных пластах не как проблему угольной промышленности, а как возможность для получения урана.

Ключевые слова: уголь, уран, истощение запасов, дефицит урана, содержание урана в угле, очаги пожара в угольных пластах, природоподобие, акустическая диагностика, анкерная крепь

Благодарности: Автор выражает глубокую признательность сотрудникам Курчатовского института В.Ю. Бландинскому, В.М. Вершинину, А.В. Гролю, М.В. Кормилицыну, В.А. Невинице, Е.В. Родионовой, П.А. Фомиченко, В.Ф. Шикалову и Т.Д. Щепетиной за ценные консультации и предоставление литературы, а также М.Р. Сарухановой и М.В. Цапкиной за поиск информации и Е.Г. Байрактар за корректуру рукописи.

Для цитирования: Борисенко Д.И. Природоподобные решения некоторых проблем горного производства. *Горная промышленность*. 2025;(4):86–90. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-86-90>

Nature-like solutions to some mining issues

D.I. Borisenko✉

National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation

✉ dima-luxinzhi@mail.ru

Abstract: It is possible to compensate for the depletion of uranium and thorium reserves in the explored deposits and storages by extracting them from coal. A critical challenge concerned with the development of such coals is underground (spontaneous) fires in coal seams, since the more uranium is contained in coal, the more such coals are prone to spontaneous combustion. However, using the principles of nature-similarity, these fires can be considered not as a problem, but as a process of increasing the uranium content in the environment. When coal burns, concentration of the radioactive elements in the resulting ash increases. In this regard, fire sources and the most accurate determination of the spatiotemporal position of their boundaries are of interest. The use of acoustic diagnostics seems promising for this purpose. Non-metallic rock bolt supports are proposed to be used to simplify the technology of extracting radioactive elements from the content of fire sources in coal seams. The objective of this paper is to examine coal seam fires not as a problem for the coal industry, but as an opportunity for uranium production.

Keywords: coal, uranium, depletion of reserves, uranium deficit, uranium content in coal, coal seam fires, nature-likeness, acoustic diagnostics, rock bolting, anchor support

Благодарности: The author expresses profound gratitude to the staff of the Kurchatov Institute including V.Yu. Blandinsky, V.M. Vershinin, A.V. Grol, M.V. Kormilitsyn, V.A. Nevinita, E.V. Rodionova, P.A. Fomichenko, V.F. Shikalov, and T.D. Shchepetina for valuable advice and providing literature, as well as to M.R. Sarukhanova and M.V. Tsapakina for search and to E.G. Bayraktar for correction of the manuscript.

For citation: Borisenko D.I. Nature-like solutions to some mining issues. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):86–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-86-90>

Введение

Общемировые тенденции добычи и потребления урана развиваются так, что в течение ближайших лет начнётся его дефицит [1, с. 45–46], причём это с учётом разработки считающихся на данный момент нерентабельных место-

рождений¹ и использования оружейного урана со складов [2, с. 14].

1 Supply of Uranium. Nuclear Fuel Report. 2024. World Nuclear Association. Supply of Uranium. London: WNA; 2024m pp. 8. Available at: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium> (accessed: 15.02.2025).

В Российской Федерации ситуация такова, что в настоящее время осуществляется добыча урана при его содержании 0,002%, т.е. 20 г/т (Далматовское месторождение в Курганской области)², а в течение ближайших десяти лет планируется разработка месторождений с содержанием урана в сотни грамм на тонну шахтным способом. В соответствии с согласованным в 2017 г. техническим проектом в 2034–2055 гг. планируется освоение подземным способом Жерлового месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкальском крае, на котором содержание урана составляет 0,08%, т.е. 800 г/т³.

Это же подтверждается независимыми исследованиями [3, с. 47–48]: в последние годы пополнение запасов урана (за счёт разведки новых месторождений и переоценки известных) на порядок отстаёт от их выбытия из-за добычи, потери в недрах и переоценки.

Одним из возможных направлений может стать добыча урана из углей. Как указано в работе [4, с. 216], вмещающие уголь песчаники выступают в роли зон пластового окисления, а угли – в роли восстановительного барьера, на котором осаждается уран. В работе [5, с. 182] говорится, что одни из основных источников поступления радиоактивных элементов в угли – месторождения-спутники. Это угольные бассейны, образовавшиеся в обрамлениях и складчатостях метаморфических и магматических горных пород, обогащенных радиоактивными элементами. Миграция урана и тория в осадочные толщи угольного бассейна обеспечивает обогащение углей и вмещающих пород до промышленных масштабов.

Содержание урана в угле в среднем – кларки – единицы грамм на тонну, но, во-первых, существует определённая бимодальность [6, с. 15], а во-вторых, от месторождения к месторождению этот показатель может меняться в 1000 раз и более [7, с. 76]. Причём наличие урана в угле является проблемой для угольной промышленности и для угольной энергетики. Например, в работе [8, с. 57–59] говорится про кратное увеличение концентрации урана в продуктах сжигания углей по отношению к исходному топливу, т.е. увеличивается радиоактивность выбросов с объектов, сжигающих уголь.

Кроме этого, в угольных пластах есть большая неприятность – эндогенные пожары, которые несмотря на все меры безопасности довольно часто возникают и создают массу проблем в безопасности, экологии и экономике. Ежегодно на борьбу с пожарами и их последствиями тратятся большие средства, по некоторым оценкам [9] в одном Китае только из-за потерь угля, вызванных эндогенными пожарами, убытки составляют сотни миллиардов долларов ежегодно.

Целью настоящей работы является рассмотреть пожары в угольных пластах не как проблему угольной промышленности, а как возможность для получения урана.

Методы

Рассмотрим совместно проблемы получения дополнительного источника урана и эндогенных пожаров в углях, опираясь на литературные данные, качественные оценки и здравый смысл. Недаром Д.И. Менделеев отмечал, что банально – для получения теплоты – сжигать углеводороды (не только нефть) – то же самое, что топить печку ассигнациями [10].

Природа, миллионы лет существующая в рамках замкнутого самосогласованного ресурсооборота, не знает ресурсных кризисов и энергетического голода [11, с. 456]. Подобно тому, как в живой природе существуют организмы, питающиеся отходами других организмов, так и в неживой природе одни явления и процессы связаны с другими. Причём как накопление различных элементов (в т.ч. U), так и эндогенные пожары в угле, происходят (и происходили раньше) независимо от деятельности человека. Известны случаи, когда возникшие эндогенные пожары наблюдались тысячелетиями, например, подземное горение угля в урочище Кухи Малик в долине реки Ягноб на территории Таджикистана упоминается ещё в «Естественной истории» Плиния Старшего⁴, жившего в 23–79 гг. н.э.

Результаты

Важным вопросом в добыче урана из угля является рентабельность. Например, содержание урана в угле на разрезе «Итатский» достигает 139 г/т [5, с. 183], что соответствует значению наиболее крупного Улуг-Танзекского месторождения (0,014%), где сосредоточено примерно 15% всего российского урана⁵. Следует отметить, что в Улуг-Танзекском месторождении уран находится в щелочных метасоматитах в качестве попутного компонента редких металлов, т.е. плотность вмещающих породкратно больше, чем плотность угля. Соответственно, объём горной массы, которую надо обработать на единицу урана, для угля больше. В Курчатовском институте сохранены и развиты компетенции по выявлению содержания радиоактивных и редких элементов в горных породах с точностью для урана в десятки миллиграмм на тонну [12, с. 89]. Кроме этого, имеется опыт применения дистанционной диагностики содержания указанных элементов в завалах из камней, бетона и строительного мусора с помощью мобильных автоматических средств [12, с. 38–39, 80–104].

Как отмечено в работе [8, с. 61], процессы угольного метаморфизма ведут к потере органическим веществом угля радиоактивных элементов. При этом известно, что эндогенные пожары в России связаны не с объёмом добычи, а в числе прочего со степенью метаморфизма углей [13, с. 21]. Причём склонность углей к самонагреванию увеличивается с понижением степени их метаморфизма [14, с. 164]. При этом специальным исследованием [15, с. 72] установлено, что радиоактивность прямо пропорциональна зольности. А повышенная зольность является признаком склонности к самовозгоранию – в работе [16, с. 196] даже указывается на возможность дифференцировать угольные пласты по степени склонности их к самовозгоранию в пределах угольной залежи по этому фактору.

То есть чем более уголь склонен к самовозгоранию, тем больше в нём урана и тория.

При этом, как было указано выше, при сгорании угля концентрация урана в его золекратно увеличивается. А в работе [17, с. 375] и вовсе указывается, что при сжигании кузнечных углей на ТЭС в их золах происходит концентрирование радиоактивных элементов до 15 раз и зависит от полноты озоления угля, марочного состава и зольности угля.

Интереснее обстоит дело при сгорании угля в пласте. В работе [6, с. 40] упоминается весьма необычный тип эпи-

² О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году: государственный доклад. М.: 2021. С. 100. Режим доступа: <https://rosnedra.gov.ru/data/Files/File/7992.pdf> (дата обращения: 15.02.2025).

³ Там же. С. 98.

⁴ Горная энциклопедия: в 5 т. Т. 4. (Ортин – Социосфера). М.: Советская энциклопедия; 1989. С. 439.

⁵ О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году: государственный доклад. М.: 2021. С. 99. Режим доступа: <https://rosnedra.gov.ru/data/Files/File/7992.pdf> (дата обращения: 15.02.2025).

генетического обогащения ураном нижнеюрских бурых углей Канско-Ачинского бассейна – *под влиянием природного горения угля*. При фоновых содержаниях урана в этих углях не выше 4 г/т, в верхней части пласта сажистого угля, залегающего под пестроцветными глинами с муллитом и кристобалитом (продукты обжига), содержание U достигает 500–800 г/т.

Попробуем оценить целесообразность добывания урана из угля или из его золы вместо добычи самого угля. Будем исходить из сегодняшних цен. Цена тонны угля составляет 95,05 долл. США за тонну⁶. Цена урана составляет 65,05 долл. США за фунт⁷, т.е. за тонну 143 410,53 долл. США. То есть уран в полторы тысячи раз дороже абстрактного угля по Trading Economics. Если смотреть цены на конкретные угли, то в зависимости от марки и месторождения цена варьируется больше, чем на порядок. Так, цена бурого угля марки БО при покупке от 1000 т составляет 800 руб/т⁸, а цена антрацита марки АО – 22 000 руб/т⁹. Как отмечено выше, чем ниже степень метаморфизма, тем больше содержание урана, т.е. если проводить сопоставление не с абстрактным углём, а конкретно с бурым, то соотношение цен угля и урана увеличится ещё на порядок. Указанная выше цена на уран при переводе в рубли по курсу ММВБ на 18.04.2025 (1 долл. США = 82,02 руб.) составляет $143\,410,53 \cdot 82,02 = 11\,762\,531,67$ руб. Если это значение поделить на оптовую цену для бурого угля, то получим $11\,762\,531,67 / 800 = 14\,703$ раза.

Теперь надо определиться с коэффициентом содержания U в угле. Отметим, что данные по отечественным месторождениям с высокими значениями содержания урана и тория в углях являются закрытыми. Но для качественной оценки можно отталкиваться от данных для других регионов. Например, содержание U в угленосной толще карбона Верхнесилезского бассейна (Польша) – до 2660 г/т (0,27%); в олигоцене месторождения Драма в Северной Греции – до 5064 г/т (0,51%) [8, с. 35–36]; в эрозионных останцах на столовой горе Ла-Вентана – свита Мезаверде (США, штат Нью-Мексико) местами содержание U достигает 0,62% (или 1,84% на золу) [6, с. 47]. Безусловно, величины распределены и ориентироваться на максимальные значения при рассмотрении промышленной добычи не стоит. Но отметим, что максимальные значения имеют другой порядок (например, в работе [6, с. 38] приводится фантастическая цифра – более 56%). Поэтому для оценок с запасом примем концентрацию урана в перспективном с точки зрения получения U угле 0,1% (1000 г/т), т.е. одна тысячная. Если выше, то ещё выгоднее.

Если исходить из приведенных выше цен, то урана в тонне угля при концентрации в 0,1% содержится на $11\,762\,531,67 \cdot 0,001 = 11\,762,53$ руб. То есть содержащийся в одной тонне угля уран в $11\,762,53 / 800 = 14,7$ раза больше по стоимости, чем сам вмещающий его уголь.

Обсуждение результатов

Как следует из полученных выше значений, стоимость урана, содержащегося в угле, превышает стоимость этого угля. Понятно, что при учёте стоимости дальнейшего

обогащения и мероприятий на поддержание безопасности, соотношение может измениться, но тем не менее. Главное – и в этом один из принципов природоподобия – уран можно извлекать не из добытого угля, а из того, что осталось на месте очагов пожара – золы и обгоревшего штыба. Для угольной промышленности эти зоны уже представляют не интерес, а проблему. Их наличие требует проведения специальных мероприятий при борьбе с активной фазой пожара (возведения перемычек, инертизации рудничной атмосферы, иногда затопления выработки), а также непрерывного поддержания состава воздуха (подачи азота), когда пожар подавлен. Однако с точки зрения получения урана эти места весьма перспективны.

Отметим, что для дальнейшего использования содержимого зон очагов пожара нужно не просто констатировать их наличие, но и знать их точные координаты [18; 19]. Для этого нужно отслеживать пространственно-временное положение их границ. Наиболее подходящей для этого представляется акустическая диагностика. Акустическая диагностика включает в себя пассивные [20; 21], активные [22; 23] и комбинированные [24; 25] способы.

Отметим также, что в средах (горных породах, углях), содержащих радиоактивные элементы, металлические объекты загрязняются в радиоактивном смысле [26, с. 257]. Соответственно, для пластов угля, склонных к самовозгоранию и из которых в будущем может быть осуществлено извлечение радиоактивных элементов, следует минимизировать применение металлических объектов. Или заменить их такими, в которых содержатся преимущественно атомы углерода и водорода. Безусловно, такие объекты, как рельсы или силовые кабели, во-первых, заменить на неметаллические нетривиально, а во-вторых, в силу особенностей геометрических характеристик (протяжённые тонкие объекты, локализованные на одной линии) непринципиально. Другое дело – анкерные крепи, выполнение их неметаллическими очень желательно. Это позволит сократить количество технологических процедур при дальнейшей переработке того, что будет извлекаться из зон, где были очаги пожара. То есть если анкеры будут не сильно отличаться по составу от вмещающего угля, то могут быть перерабатываемы вместе с этим углем без предварительного удаления и отдельной обработки.

Технология выемки обогащённых радиоактивными элементами продуктов горения из мест бывших очагов пожара в угольных пластах составляет отдельную задачу и является предметом дальнейших изысканий.

Заключение

Можно сделать следующие выводы:

- в очагах пожара в угольных пластах повышается концентрация радиоактивных элементов;
- определение пространственно-временного положения границ очагов пожара в угольных пластах предлагается осуществлять с помощью акустической диагностики;
- для удобства дальнейших действий по выемке содержания очагов пожара в угольных пластах и извлечения из него радиоактивных элементов предлагается минимизировать использование металлических изделий в склонных к самовозгоранию пластах угля, в частности, применять неметаллические анкерные крепи в горных выработках.

⁶ Trading Economics. Available at: <https://tradingeconomics.com> (accessed: 18.04.2025).

⁷ Ibid.

⁸ Prom Portal. Режим доступа: <https://promportal.ru> (дата обращения: 18.04.2025).

⁹ ООО «Сухогруз». Режим доступа: <https://sukhogruz.ru> (дата обращения: 18.04.2025).

Список литературы / References

1. Weiss R., Gandolfi S. Nuclear three-body short-range correlations in coordinate space. arXiv:2301.09605. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.09605>
2. Егорова И.В. Перспективы мирового рынка природного урана. *Руды и металлы*. 2023;(1):6–16. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2023-10001>
Egorova I.V. Prospects for the natural uranium world market. *Ores and Metals*. 2023;(1):6–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2023-10001>
3. Сендеров С.М. Воспроизводство минерально-сырьевой базы ТЭК как важнейшая составляющая обеспечения энергетической безопасности России. В кн.: *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 96-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко, г. Архангельск, 15–19 июля 2024 г.* Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН; 2024. С. 40–50.
4. Ибламинов Р.Г. *Геолого-промышленные типы месторождений полезных ископаемых. Рудные месторождения*. Пермь: ПГНИУ; 2021. 278 с. Режим доступа: <https://elis.psu.ru/node/642780> (дата обращения: 21.04.2025).
5. Никитенко С.М., Патраков Ю.Ф., Никитенко М.С., Кизиллов С.А., Харлампенкова Ю.А. Геотехнологические перспективы использования радиационных свойств угля и породы. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021;(6):181–189. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20210617>
Nikitenko S.M., Patrakov Y.F., Nikitenko M.S., Kizilov S.A., Kharlampenkova Y.A. Radiation properties of coal and barren rocks: geotechnical applications. *Journal of Mining Science*. 2021;57(6):1041–1048. <https://doi.org/10.1134/S106273912106017X>
6. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. *Уран в углях*. Сыктывкар; 2001. 84 с.
7. Сидорова Г.П., Крылов Д.А. Радионуклиды в углях и продуктах их сжигания. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2016;61(2):75–78. Режим доступа: <https://medradiol.fmbafmbc.ru/issues?id=328> (дата обращения: 21.04.2025).
Sidorova G.P., Krylov D.A. Radioactive elements in coals and their combustion products. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2016;61(2):75–78. Available at: <https://medradiol.fmbafmbc.ru/issues?id=328> (accessed: 21.04.2025).
8. Арбузов С.И., Ильенко С.С., Чекрыжов И.Ю. Радиоактивные элементы (U, Th) в углях Северной Азии. В кн.: *Языков Е.Г. (ред.) Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы 4-й Международной конференции, г. Томск, 20–24 сент. 2021 г.* Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет; 2021. С. 55–62.
9. Борисенко Д.И., Семенов Е.В. Экономический ущерб от подземных пожаров в Китае и России. В кн.: *Наука и общество 2019: материалы Национальной научной конференции с международным участием, г. Кърджали (Болгария), 2-3 окт. 2019 г.* Кърджали: Издава «РКР Принт» ООД; 2019. Т. 7. С. 495–500.
10. Менделеев Д.И. *Нефтяная промышленность в Северо-Американском штате Пенсильвании и на Кавказе*. СПб.: тип. т-ва «Обществ. польза»; 1877. 304 с.
11. Ковальчук М.В., Нарайкин О.С., Яцишина Е.Б. Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы. *Вестник Российской академии наук*. 2019;89(5):455–465. <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895455-465>
Kovalchuk M.V., Naraikin O.S., Yatsishina E.B. Nature-like technologies: new opportunities and new challenges. *Vestnik Rossiiskoy akademii nauk*. 2019;89(5):455–465. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895455-465>
12. Волков В.Г., Чесноков А.В.; Пономарев-Степной Н.Н. (ред.) *Реабилитация радиационного наследия. Научно-технический опыт Курчатовского института*. М.: ИздАТ; 2008. 119 с.
13. Новоселов С.В., Попов В.Б., Голик А.С. Оценка риска возникновения эндогенных пожаров в угольных шахтах. *Уголь*. 2020;(5):21–25. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-5-21-25>
Novoselov S.V., Popov V.B., Golik A.S. Risk assessment of endogenous fires in coal mines. *Ugol'*. 2020;(5):21–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-5-21-25>
14. Голынская Ф.А. Степень метаморфизма как главный генетический признак самовозгорающихся углей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(7):164–169. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2013/7/164-169-Golinskaya_-6_str.pdf (дата обращения: 21.04.2025).
Golynskaya F.A. Metamorphism intensity as the main genetic trait of self-combustion coal. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013;(7):164–169. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2013/7/164-169-Golinskaya_-6_str.pdf (accessed: 21.04.2025).
15. Сидорова Г.П., Маниковский П.М., Якимов А.А., Овчаренко Н.В. Оценка потенциальной опасности углей и отходов их переработки на угольных месторождениях Приаргунской группы Забайкальского края. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(12):62–77. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2024/12/12_2024_62-77.pdf (дата обращения: 21.04.2025).
Sidorova G.P., Manikovskiy P.M., Yakimov A.A., Ovcharenko N.V. Hazard assessment of coals and processing waste in the Argun area in Transbaikalia. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(12):62–77. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2024/12/12_2024_62-77.pdf (accessed: 21.04.2025).

16. Голынская Ф.А. Оценка геологических факторов самовозгорания углей ведущих угольных бассейнов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(11):193–203. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2010/11/Golynskaya_11_2010.pdf (дата обращения: 21.04.2025).
Golynskaya F.A. The evaluation of coal ignitability factors at the largest coal basins. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010;(11):193–203. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2010/11/Golynskaya_11_2010.pdf (accessed: 21.04.2025).
17. Крылов Д.А., Сидорова Г.П. Оценка содержания радиоактивных элементов в углях и продуктах их сжигания. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(7):369–376.
Krylov D.A., Sidorova G.P. Evaluation of the content of radioactive elements in coals and products of combustion. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(7):369–376. (In Russ.)
18. Anghelescu L., Diaconu B.M. Advances in detection and monitoring of coal spontaneous combustion: techniques, challenges, and future directions. *Fire*. 2024;7(10):354. <https://doi.org/10.3390/fire7100354>
19. Коршунов Г.И., Мироненкова Н.А., Полещук А.А. Актуальные методы определения очагов самовозгорания на угольных шахтах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(5):169–180. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/5/04_2025_169-180.pdf (дата обращения: 21.04.2025).
Korshunov G.I., Mironenkova N.A., Poleshchuk A.A. The topical methods of detecting spontaneous combustion sources in coal mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(5):169–180. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/5/04_2025_169-180.pdf (accessed: 21.04.2025).
20. Борисенко Д.И. Акустический способ диагностики очагов пожаров в угольных пластах. *Уголь*. 2013;(9):44–45.
Borisenko D.I. Acoustic method of the fire centers diagnostics in coal layers. *Ugol'*. 2013;(9):44–45. (In Russ.)
21. Kong B., Zhong J., Lu W., Hu X., Gao L., Zhuang Z. et al. Progress in the study of acoustic effects and precursor characteristics during spontaneous combustion of coal. *Coal Science and Technology*. 2025;53(2):211–221. (In Chinese) <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0157>
22. Lee M.R. et al. Vibroseis application becoming world-wide. *World Petroleum*. 1963;34(3):85.
23. Pietsch K., Slusarczyk R., Dec J. O możliwości lokalizowania stref bezpokładowych przy zastosowaniu sejsmiki węglowej. *Zeszyty naukowe politechniki slaskiej. Serie: Gornictwo*. 1987;155(1021):157–170.
24. Потапов С.Л. Контроль перемещения фронта горения и состояния кровли при подземном сжигании угля с использованием взрывных сигнализаторов [дис. ... канд. техн. наук]. М.; 1990. 164 с.
25. Гладун Ю.В. Разработка сейсмоакустических методов контроля границ выработанного пространства при подземном сжигании угля [автореф. дис. ... канд. техн. наук]. М.; 1990. 19 с.
26. Лебедев В.А., Карабута В.С. Проблемы обеспечения радиационной безопасности в нефтедобывающей промышленности России. *Молодой ученый*. 2016;(1):257–261. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/105/24728/> (дата обращения: 21.04.2025).
Lebedev V.A., Karabuta V.S. Problems of the provision of the radiation safety in the oil industry of Russia. *Molodoi Uchenyi*. 2016;(1):257–261. (In Russ.) Available at: <https://moluch.ru/archive/105/24728/> (accessed: 21.04.2025).

Информация об авторе

Борисенко Дмитрий Иванович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: dima-luxinzh@mail.ru

Information about the author

Dmitry I. Borisenko – Cand. Sci. (Eng.), Leading Research Associate, National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation; e-mail: dima-luxinzh@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.05.2025
Поступила после рецензирования: 10.06.2025
Принята к публикации: 20.06.2025

Article info

Received: 11.05.2025
Revised: 10.06.2025
Accepted: 20.06.2025