

ОЦЕНКА ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЕЙ, ТЕРМОМОНИТОРИНГ ШТАБЕЛЕЙ И ОТВАЛОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КАЗАХСТАНА

Д.Р. Ахматнуров¹, Р.А. Мусин¹, Н.А. Немова^{2,3}, Н.М. Замалиев¹, А.В. Резник²

¹ Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова,
Караганда, Казахстан, e-mail: R.A.Mussin@mail.ru

² Институт горного дела Сибирское отделение РАН, Новосибирск, Россия

³ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Аннотация: Рассмотрены закономерности самонагрева и самовозгорания углей Шубаркольского месторождения в Казахстане при их хранении, транспортировке и переработке. Угли данного месторождения характеризуются склонностью к самовозгоранию и низкой стойкостью при хранении, причем термическая опасность возрастает с увеличением сорбционной активности и длительности хранения окисляющегося материала. Проведен анализ влияния гранулометрического состава, влажности и условий складирования на интенсивность окислительных процессов и развитие очагов самовозгорания. Цель исследования – определение геотехнических факторов самовозгорания углей для последующей разработки технологии сохранения их потребительских свойств и продуктов переработки в период добычи и хранения. Представлены результаты тепловизионных и лабораторных исследований, подтверждающих наличие критических температурных порогов перехода от стадии медленного окисления к активному горению. Визуальный материал включает схемы стадий самовозгорания, примеры тепловых аномалий штабелей. Полученные результаты могут быть применены при проектировании систем хранения и транспортировки углей, а также в системах промышленной безопасности угольных предприятий Казахстана.

Ключевые слова: самовозгорание угля, термомониторинг, тепловизионная съемка, фенолформальдегидные смолы, антипирогенные покрытия, Шубаркольское месторождение, штабели угля, геотехническая безопасность, тепловые поля, отвалы.

Благодарность: Исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования по реализации научной, научно-технической программы ИРН № BR24993009.

Для цитирования: Ахматнуров Д. Р., Мусин Р. А., Немова Н. А., Замалиев Н. М., Резник А. В. Оценка геотехнических факторов самовозгорания углей, термомониторинг штабелей и отвалов на месторождениях Казахстана // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 8. – С. 140-156. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_140.

Assessment of geotechnical factors in spontaneous combustion of coal, and thermal monitoring of coal piles and waste dumps in Kazakhstan

D.R. Akhmatnurov¹, R.A. Musin¹, N.A. Nemova^{2,3}, N.M. Zamaliyev¹, A.V. Reznik²

¹ Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan,
e-mail: R.A.Mussin@mail.ru

² N.A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

³ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

Abstract: The study addresses mechanisms of spontaneous heating and combustion of coal during storage, haulage and preparation at the Shubarkol deposit in Kazakhstan. Coal from the mentioned deposit features a tendency for spontaneous combustion and low sturdiness in storage, and its thermal hazard grows with increasing sorption activity and duration of storage of the oxidizable material. The influence of grain-size composition, moisture content and storage conditions on the intensity of oxidation and expansion of the spontaneous combustion sources was analyzed. The study objective was to determine geotechnical factors in spontaneous combustion of coal for the further development of a technology for preserving the useful quality of coal and coal products in the period of mining and storage. The presented results of infrared imaging and laboratory tests proved the critical temperature thresholds in transition from slow oxidation to active combustion. The visual material includes the schemes of spontaneous combustion stages, and the examples of thermal anomalies in coal piles. The results are applicable in engineering coal storage and haulage, and in the systems of industrial safety of coal mines in Kazakhstan.

Key words: spontaneous combustion of coal, thermal monitoring, thermal imaging, phenol-formaldehyde resins, antipyrogen coating, Shubarkol deposit, coal piles, geotechnical safety, heat fields, waste dumps.

Acknowledgements: The study was supported by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan within the framework of the program-target budgeting, Scientific-and-Technical Program IRN No. BR24993009.

For citation: Akhmatnurov D. R., Musin R. A., Nemova N. A., Zamaliyev N. M., Reznik A. V. Assessment of geotechnical factors in spontaneous combustion of coal, and thermal monitoring of coal piles and waste dumps in Kazakhstan. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(8):140-156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_140.

Введение

Проблема самовозгорания углей остается одной из ключевых угроз при добыче, транспортировке и хранении угольной продукции. Наиболее опасные проявления наблюдаются на месторождениях с высокими показателями влажности, газоносности и дисперсности угольной массы, а также при длительном хранении угля в штабелях и отвалах [1 – 3]. В угольной промышленно-

сти Казахстана эта проблема особенно актуальна: ежегодно фиксируются десятки очагов тления, возникающих как в открытых штабелях, так и в подземных выработках [4].

Согласно результатам многолетних наблюдений, процесс самовозгорания имеет сложную термохимическую природу и включает последовательные стадии адсорбции кислорода, медленного окисления, самонагревания и перехода к

активному горению [5]. На ранних стадиях хранения температура угля повышается незначительно, однако по мере накопления тепла и при ограниченном теплоотводе скорость реакции резко возрастает, формируя очаги локального самонагрева.

Таким образом, для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- изучить геологические и горнотехнические условия, факторы окисления и самовозгорания угольной продукции, механизмы окислительных процессов и мировой опыт мер предупреждения ухудшения свойств угля;
- установить закономерности самовозгорания угля в зависимости от фракции на разрезах «Центральный», «Западный» АО «Шубарколь Комир», а также спецкокса на базе Актюбинского завода ферросплавов;
- провести полевые экспериментальные исследования эффективности антипирогенных материалов для предупреждения окисления угля и спецкокса в условиях хранения на производственной площадке Шубаркольского месторождения;
- исследовать качественные характеристики угля и выявить компоненты, катализирующие окислительные процессы, приводящие к самовозгоранию угля и продуктов его переработки.

Основная часть

К числу потенциально пожароопасных объектов относятся промышленные участки добычи и хранения угля, на которых создаются условия, способствующие возникновению очагов самонагрева и последующему развитию эндогенных пожаров.

Самовозгорание угля представляет собой процесс постепенного повышения температуры в массиве или скоплении разрыхленного угля, приводящий в итоге к его воспламенению [4, 6].

В работах [4, 7] проведен анализ и схематически обозначены зоны возможных очагов самовозгорания при различных технологических схемах. В зависимости от типа применяемого оборудования и горно-геологических условий, такие зоны могут локализоваться в следующих участках: в осыпи угля, образующейся на откосе борта карьера при отработке забоя экскаватором; в трещинах, возникающих при работе экскаватора-мехлопаты; в осыпи угля на полке и почве забоя при отработке забоя роторным экскаватором; в трещинах, образующихся в результате оползней сближенных подступов; в скоплениях угольной мелочи, образующейся после выветривания кондиционных или некондиционных целиков угля, находящихся на дневной поверхности; в трещинах, вызванных выветриванием либо проведением буровзрывных работ; на участках контакта угля с вмещающими породами; в просыпях угля, возникающих во время погрузки в автомобильный или железнодорожный транспорт.

Исследования [8] показывают, что интенсивность самонагрева определяется рядом факторов: гранулометрическим составом угля, влажностью, доступом кислорода, содержанием пиритных соединений, степенью метаморфизма и условиями складирования [9]. Наиболее восприимчивыми к самовозгоранию являются бурые и длиннопламенные угли, содержащие до 10% влаги, и мелкие фракции 0 – 6 мм, обладающие развитой поверхностью взаимодействия [10, 11].

Самопроизвольное возгорание угля возникает из-за окисления угольной массы. Процесс начинается при низких температурах и быстро ускоряется под воздействием выделяющегося тепла. Химические изменения приводят к изменению характера химических реакций. Геолого-технические особенности угольного месторождения и технологии горных ра-

бот влияют на стадии самонагрева, делая их цепными и необратимыми в естественных условиях (рис. 1) [4, 5].

В лабораторных и промышленных условиях было установлено, что при достижении критической температуры T_1 начинается стадия самонагрева, переходящая при T_2 в интенсивное окисление и при T_3 — в воспламенение [12, 13]. Эти температуры зависят от теплопроводности, влажности и степени уплотнения угольной массы (рис. 2).

Самовозгорание углей представляет собой энергоактивный процесс, связанный с перераспределением тепловых и газодинамических потоков в породном массиве и в штабелях складирования. Повышение температуры приводит к изменению физико-механических свойств угольной массы: снижению прочности, появлению трещин, увеличению проницаемости и скорости диффузии кислорода — все это ускоряет развитие окислительных реакций и способствует распространению огня [12, 13].

Для оценки устойчивости угольных штабелей применяются тепловизионные, акустические и георадарные методы. Тепловизионная съемка позволяет регистрировать аномалии температурных



Рис. 1 Схема самонагрева и ускорения окислительных процессов

Fig. 1. Schematic representation of self-heating and accelerated oxidation processes

полей и выявлять скрытые очаги нагревания задолго до их перехода в активную стадию горения [14–17], а использование беспилотных авиационных систем (БАС) инфракрасными датчиками существенно расширяет возможности контроля больших площадей отвалов и штабелей [18, 19].

В Казахстане внедрение систем термомониторинга активно развивается на объектах АО «Шубарколь Комир» и ТОО «Богатырь Комир», где интегрируются технологии дистанционного теплового контроля и антипирогенные методы стабилизации штабелей. Опыт этих предприятий показал, что применение полимерных и органоминеральных покрытий

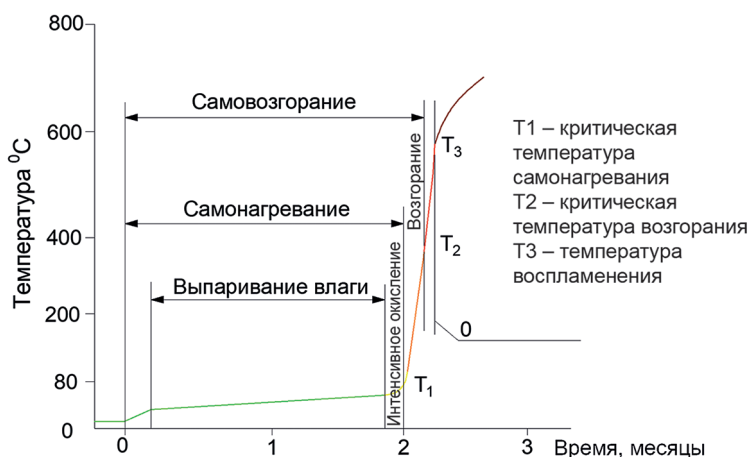


Рис. 2. Схема развития процессов самовозгорания и горения углей

Fig. 2. Diagram of the development of coal self-heating and combustion processes

(в частности, на основе фенолформальдегидных смол) позволяет продлить инкубационный период самовозгорания в 1,5–2 раза.

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью разработки комплексной геотехнической методики ранней диагностики самонагрева углей и внедрения инженерных мер для предотвращения самовозгорания в условиях открытых и подземных объектов угледобычи Казахстана.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены на объектах Шубаркольского угольного месторождения — одного из крупнейших карбоновых бассейнов Центрального Казахстана, где широко представлены бурые и энергетические угли различной степени метаморфизма. Район характеризуется резко континентальным климатом, большими сезонными колебаниями температуры воздуха и низкой влажностью, что создает благоприятные условия для процессов окисления и самовозгорания угольных штабелей.

Для анализа использовались данные тепловизионных съемок штабелей и отвалов, лабораторные испытания проб угля различной крупности, а также натурные наблюдения за изменением температуры внутри штабелей в процессе длительного хранения [20].

Геотехническая характеристика района исследований

Шубаркольское месторождение расположено в пределах Центрально-Казахстанской синеклизы и характеризуется сложным строением угленосной толщи, представленной чередованием песчаников, алевролитов и бурых углей. Средняя мощность пластов составляет 6–12 м, глубина залегания варьирует от 30 до 150 м.

На месторождении выделены участки с различными условиями хранения угольной продукции:

- открытые штабеля на промплощадках с естественным воздухообменом;
- закрытые склады с контролируемой вентиляцией;
- отложения горных пород на внутренних и внешних отвалах.

Каждый тип площадки имеет свои особенности температурного режима и взаимодействия угля с кислородом, что учитывалось при последующем анализе термодинамических данных.

Тепловизионные наблюдения и аэромониторинг

Первый этап включал применение БАС, оснащенных тепловизионными камерами, для регистрации температурных аномалий на поверхности штабелей. Съемка велась с высот 30–100 м при температуре окружающего воздуха от –10 до +35 °С. Температурная чувстви-

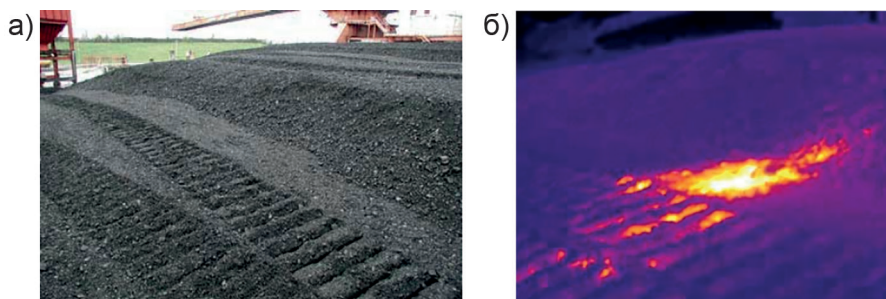


Рис. 3. Штабель угля: съемка обычной камерой (а); съемка тепловизионной камерой (б)
Fig. 3. Survey of a coal stockpile: (a) visible image; (b) thermal imaging camera view

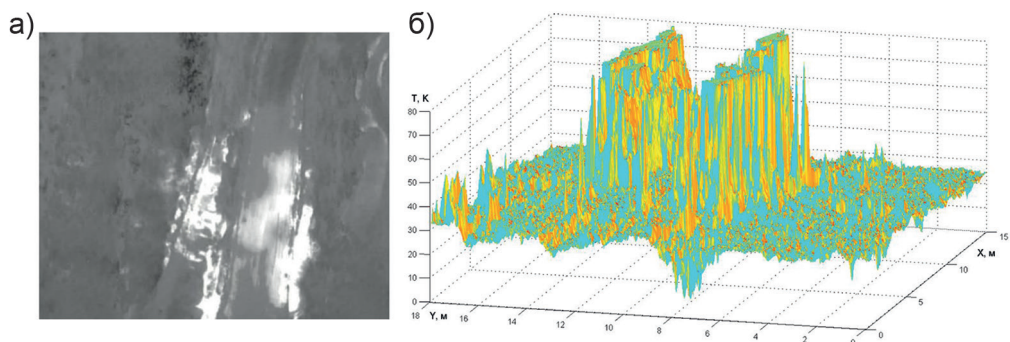


Рис. 4. Аэромониторинг: термомониторинг беспилотным летательным аппаратом (а) с обработкой данных тепловизионной съемки в 3-мерном представлении температурного поля (б)

Fig. 4. Thermal monitoring using an unmanned aerial vehicle: (a) survey process; (b) processing of thermal imaging data in a three-dimensional representation of the temperature field

тельность датчиков составляла $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволило зафиксировать участки локального перегрева даже на ранней стадии самонагрева (рис. 3, 4).

Для трехмерной визуализации температурных полей использовалось специализированное программное обеспечение, что позволило сформировать изотермические карты распределения температуры по объему штабеля и выявить зоны с превышением пороговых значений (до $80\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$). Такие зоны рассматривались как потенциальные очаги самовозгорания.

Лабораторные исследования и моделирование

В лабораторных условиях выполнены испытания проб угля различной крупности ($0\text{--}6\text{ мм}$, $10\text{--}25\text{ мм}$, $50\text{--}300\text{ мм}$) с целью определения пределов самонагрева, влажности и зольности. Для

термогравиметрических испытаний использовались приборы Eltra Thermostep и Petr-Graph, позволяющие измерять изменение массы образца при нагреве до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в среде кислорода.

На заключительном этапе проведено сравнение тепловых аномалий с фактическими очагами возгорания, зафиксированными на поверхности отвалов и в технологических закромах. Регистрировались случаи тления угольной массы при температуре $150\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при $200\text{--}230\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходил переход к активному горению. Для визуального подтверждения этих процессов были выполнены тепловизионные съемки действующих разрезов.

Вопросы хранения спецкокса, его безопасной транспортировки с сохранением его потребительских свойств оказались сложной задачей для некоторых потребителей [4]. Так, Актюбинский за-



Рис. 5. Технологическая схема производства и использования спецкокса

Fig. 5. Technological scheme for the production and use of special coke

вод ферросплавов испытывает затруднения с сохранностью спецкокса на своих производственных объектах, и, по наблюдениям, применяемая технология осушения и хранения сырья приводит к случаям его самонагрева и самовозгорания и, как следствие, к нарушению технологического процесса и убыткам. На рис. 5 показана технологическая схема производства и использования спецкокса.

Производство спецкокса на базе АО «Шубарколь Комир» составляет 300 000 т/год (в пересчете на сухой продукт). Товарной продукцией являются (табл. 1):

- спецкокс фракции >5 мм в количестве 255 269 т/год по сухому весу;
- спецкокс фракции <5 мм в количестве 45 048 т/год по сухому весу;
- смола в количестве 32 046 т/год.

Сырьем для производства спецкокса является каменный уголь Шубаркольского разреза, что, соответственно, также входит в объекты интересов исследования.

Поступающий на АктЗФ спецкокс разгружается в два бункера под вагоноопрокидывателем общей вместимостью 98 т или разгружается в бункеры участка ручной выгрузки, где имеются два бункера вместимостью 158 т. Затем спецкокс по галерее поступает на склад влажных сырьевых материалов, где размещается в трех закромах, куда помещается 21 772 т, тогда как недельная потребность предприятия составляет 10 920 т [4].

Таблица 1

Общая характеристика спецкокса «Сарыарка Спецкокс»
General Characteristics of Saryarka Spetskoks Special Coke

Показатель	Крупность, мм	Сернистость, %	Зольность, %	Выход летучих веществ, %	Реакционная способность, см ³ /г·с	Структурная прочность, %	Влажность, %	Удельная поверхность, м ² /г	Пористость, %	Доля рексифицируемого углерода C _{тв} , %
Значения	5,0–40,0	<1,0	6,0–10,0	4,0–7,0	1,0–1,5	67,4	15,0–20,0	3,0	22,0–25,0	88,0

Основная масса спецкокса хранится в условиях отсутствия теплообмена с окружающей средой, из-за чего происходит самонагревание. Зарождению очагов самовозгорания способствует также высота штабеля (около 10 м), несменяемость его нижних слоев при абсолютном отсутствии теплового контроля.

При выгрузке сырья из закромов используется верхний забор с помощью подвижного реклеймера, который, в силу конструктивных особенностей закрома, не способен производить полную выемку спецкокса, что приводит к образованию мертвой зоны невыбранного сырья высотой 0,5 м. Данный слой засыпается сверху вновь поступившим влажным спецкоksom и остается источником повышенного окисления [4].

Таким образом, комплекс полевых, лабораторных и дистанционных наблюдений позволил создать достоверную модель процессов самонагрева и оценить термическую устойчивость углей в реальных производственных условиях.

Обсуждение результатов исследования

Проведенные исследования позволили установить последовательность стадий термической активности углей при их хранении, а также выявить критические факторы, определяющие скорость перехода от самонагрева к возгоранию. Основное внимание уделено условиям складирования на открытых и

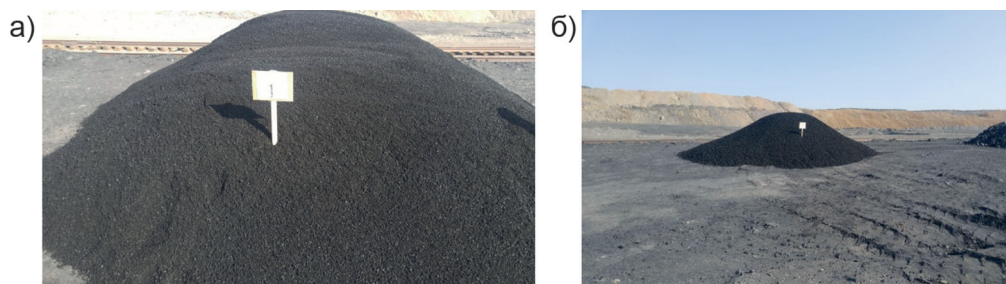


Рис. 6. Исследовательские штабелы угля и спецкокса на железнодорожном тупике №7 Шубаркольского месторождения: № 1 со спецкоksom с крупностью фракции 0–10 мм (а); № 2 со спецкоksom с крупностью фракции 10–25 мм (б)

Fig. 6. Experimental stockpiles of coal and special coke at railway siding No. 7 of the Shubarkol deposit: No. 1 containing special coke with a particle size of 0–10 mm (a); No. 2 containing special coke with a particle size of 10–25 mm (b)

закрытых площадках Шубаркольского месторождения и влиянию крупности, влажности и доступа кислорода на интенсивность процессов.

Тепловизионное наблюдение и контроль температурных аномалий

Анализ тепловизионных съемок штабелей угля и спецкокса показал (рис. 6), что локальные аномалии температуры наблюдаются уже через 15–30 дней после формирования штабелей. Температурные поля характеризуются неравномерным распределением — зоны перегрева фиксировались на высоте 1,5–2,5 м от поверхности штабеля, где обеспечивается наибольшая фильтрация воздуха.

Средняя температура поверхности в зоне стабильного состояния составляла 28–35 °С, при этом локальные очаги самонагревания достигали 80–110 °С. Такие значения соответствуют стадии активного окисления, предшествующей воспламенению. Выявленные зоны были подтверждены последующими вскрытиями штабелей, где наблюдалось изменение цвета, оплавление и дегазация угля.

Для подтверждения достоверности термомониторинга проводились лабораторные испытания с применением петрографического комплекса и термо-

гравиметрического анализатора. Результаты показали линейную зависимость между увеличением температуры и потерей массы образцов в диапазоне 80–180 °С, что согласуется с тепловыми измерениями в полевых условиях. Проведенные исследования позволили комплексно оценить динамику изменения качества угля в зависимости от условий и длительности хранения.

Изменение показателей качества угля при хранении

Параллельно с термоконтролем изучались изменения основных технологических показателей — содержания фиксированного углерода (рис. 7) и зольности (рис. 8) на закрытых и открытых складах. При хранении в закрытых складах уголь сохранял стабильность в течение 120 дней, тогда как при открытом хранении (до 60 сут) отмечалось снижение доли фиксированного углерода на 3–5% и рост зольности на 2–3% (рис. 7–10).

Для угля с повышенным содержанием мелочи (0–6 мм) динамика деградации была наиболее выраженной: содержание углерода снижалось до 6–8%, а зольность возрастала более чем на 4%. Эти процессы объясняются активным кислородным обменом на поверхности частиц (см. рис. 9, 10) [7, 14].

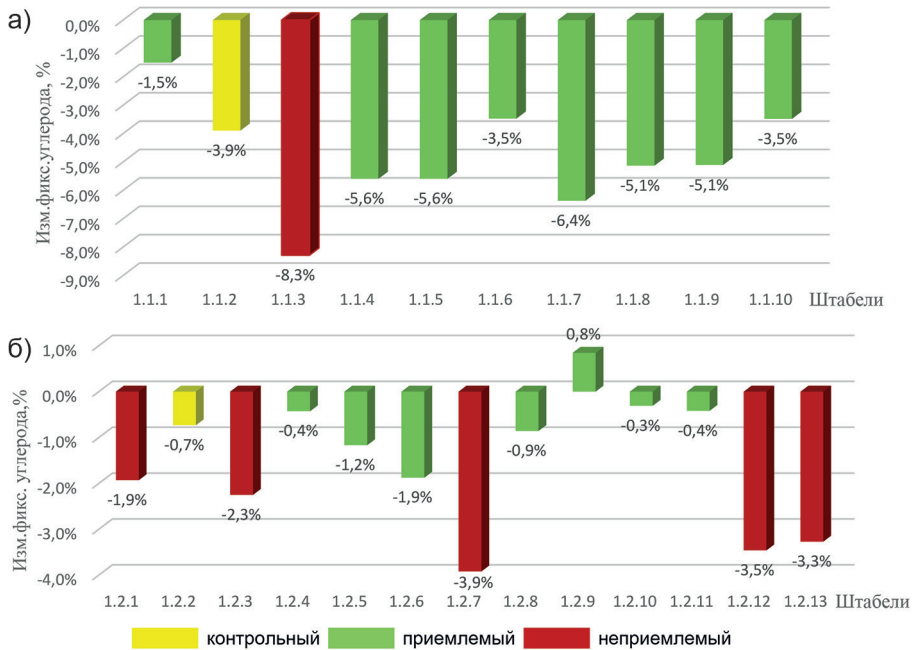


Рис. 7. Изменение уровня фиксированного углерода рядового угля повышенной крупности в закрытом (а) и открытом (б) складах

Fig. 7. Changes in the fixed carbon content of run-of-mine coarse coal in closed (a) and open (b) storage facilities

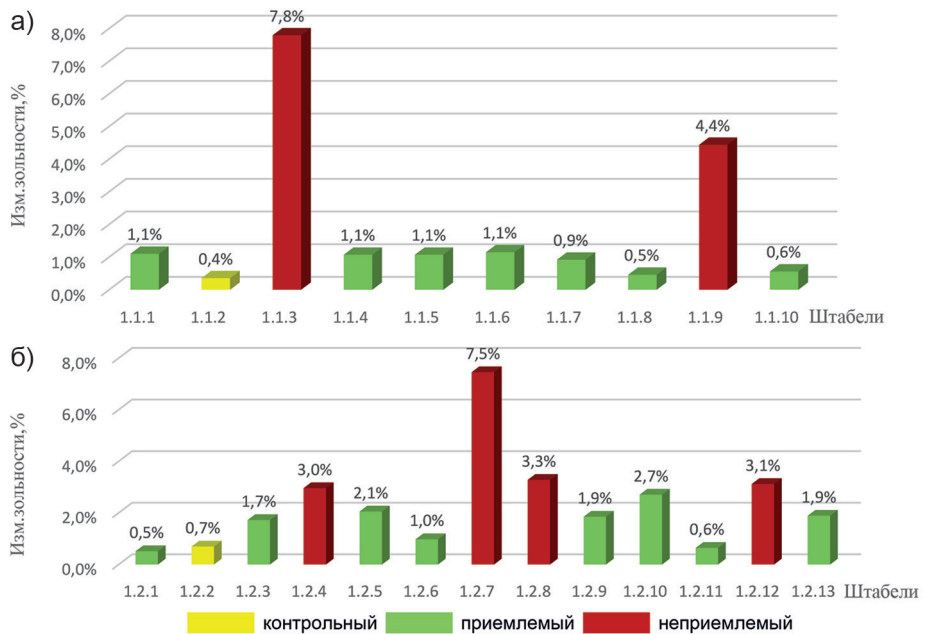


Рис. 8. Изменение уровня зольности в рядовом угле повышенной крупности в закрытом (а) и открытом (б) складах

Fig. 8. Changes in the ash content of run-of-mine coarse coal in closed (a) and open (b) storage facilities

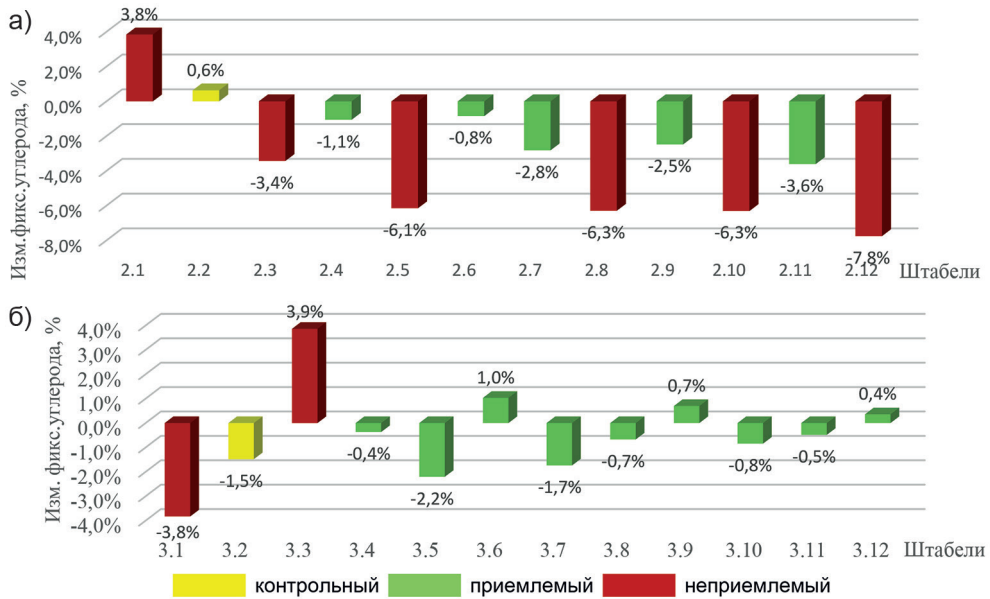


Рис. 9. Изменение уровня фиксированного углерода в рядовом угле с повышенным содержанием мелочи (а) и в рядовом энергетическом угле (б)

Fig. 9. Changes in the fixed carbon content of run-of-mine coal with an increased fine fraction content (а) and run-of-mine thermal coal (б)

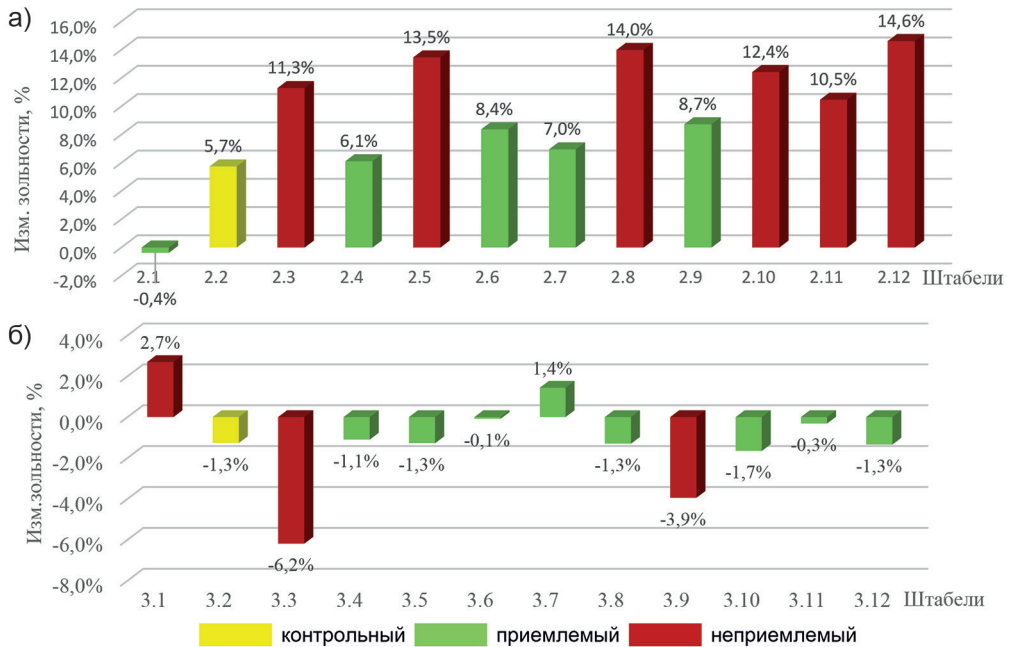


Рис. 10. Изменение уровня зольности в рядовом угле с повышенным содержанием мелочи (а) и в рядовом энергетическом угле (б)

Fig. 10. Changes in the ash content of run-of-mine coal with an increased fine fraction content (а) and run-of-mine thermal coal (б)

Сравнение пар графиков для угля повышенной крупности (рис. 7, 8) и угля с повышенным содержанием мелочи (рис. 9, 10) подтверждает определяющую роль удельной поверхности. Наличие фракции 0–6 мм интенсифицирует окисление в 1,5–2 раза: рост зольности в «мелочи» достигает 5–6% против 2–3% у крупных фракций за тот же период.

Анализ графиков изменения фиксированного углерода (рис. 7, 9) и зольности (рис. 8, 10) выявил два принципиально разных сценария. В закрытых складах (рис. 7, а, 8, а) процессы деструкции протекают линейно с минимальным градиентом: потеря углерода за 90 сут не превышает 2–3%. В открытых складах (рис. 7, б, 8, б) зависимость приобретает экспоненциальный характер с перегибом после 45–60 сут, что коррелирует с накоплением критической массы окисленных частиц и ускорением экзотермических реакций. Дополнительно установлено, что при нагревании свыше 160 °С происходит частичное разложение органической массы с выделением летучих компонентов, что усиливает экзотермический эффект и ускоряет переход к самовозгоранию.

Фракционный анализ и прогнозирование потерь

Для анализа устойчивости гранулометрического состава применялся метод фракционного моделирования [10], основанный на статистическом сопоставлении изменения фракций (0–6 мм и 50–300 мм) во времени: для открытого склада до 60 сут, для закрытого – до 120 сут. Выявлено, что увеличение доли мелочи коррелирует с ростом температуры и потерь массы – каждый прирост мелких фракций на 1% повышает температуру самонагрева на 3–5 °С (рис. 11–14).

Динамика гранулометрического состава (рис. 11–14) показывает, что про-

цесс самовозгорания имеет автокаталитический характер. Увеличение доли мелких фракций (0–6 мм) – не только следствие, но и причина ускорения нагрева. Установлено, что прирост содержания мелочи на 1% повышает температуру самонагрева на 3–5 °С.

Комплексный анализ графического материала, включающего термограммы штабелей (см. рис. 3, 4, 6), диаграммы изменения фиксированного углерода (см. рис. 7, 9), зольности (см. рис. 8, 10) и фракционного состава (см. рис. 11–14), позволил установить основные закономерности самовозгорания углей Шубаркольского месторождения.

Полученные данные сведены в блок-схему, отражающую взаимосвязь ключевых факторов (см. рис. 15).

Выявленные закономерности изменения гранулометрического состава угля во времени позволили построить прогнозную модель сроков сохранности, основой которой стали результаты лабораторного и тепловизионного мониторинга проб угля крупностью 50–300 мм и 0–6 мм, хранившихся в закрытых и открытых складах в течение 120 и 60 сут соответственно. Было установлено, что критическое снижение потребительских свойств (увеличение содержания мелких фракций >15% от исходной массы) наступает через 60 сут хранения в открытых складах вследствие интенсивного выветривания, увлажнения и циклических температурных перепадов; через 120 сут хранения в закрытых складах при более медленном развитии окислительных процессов (см. рис. 15). Таким образом, сроки 60 и 120 дней являются экспериментально подтвержденными пороговыми значениями, после которых эксплуатационная пригодность угля существенно снижается.

Установлено, что безопасный период хранения для открытых штабелей ограничен 60 сут, после чего необходимо

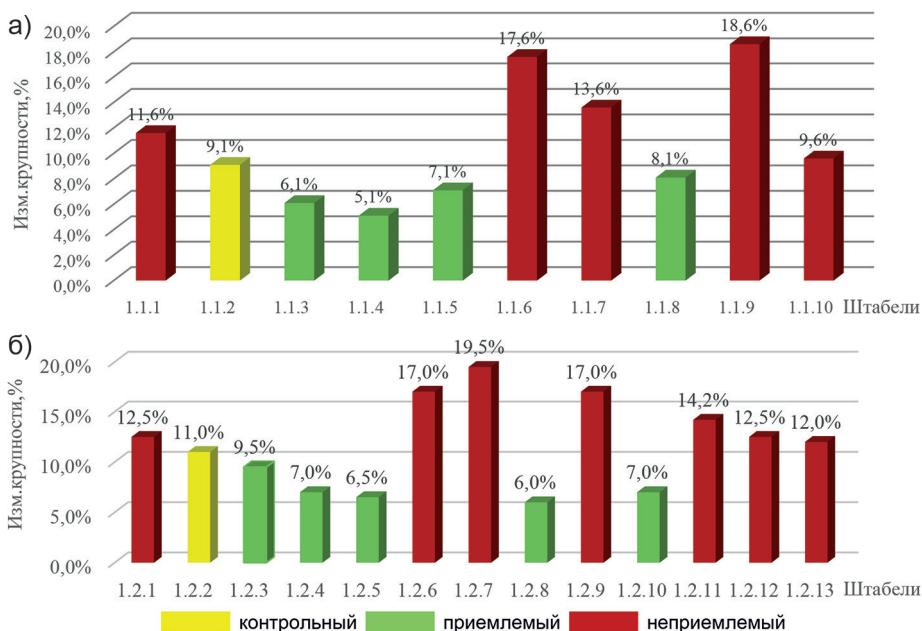


Рис. 11. Изменения фракционного состава рядового угля с повышенным содержанием мелочи (фракция 0–6 мм) во времени в закрытом (а) и открытом (б) складах

Fig. 11. Changes in the fractional composition of run-of-mine coal with an increased fines content over time, fraction 0–6 mm, in closed (a) and open (b) warehouses

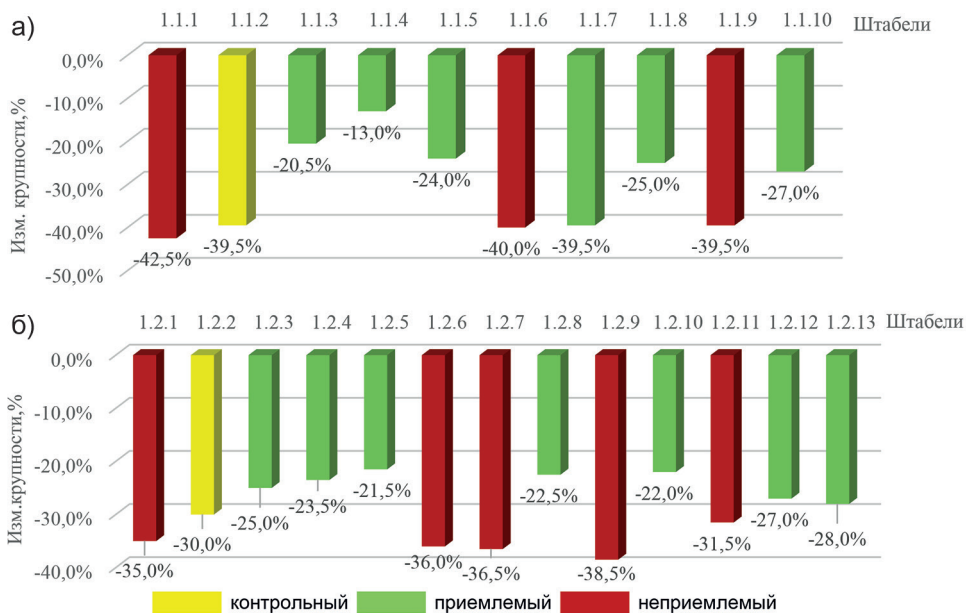


Рис. 12. Изменения фракционного состава рядового угля повышенной крупности (фракция 50–300 мм) во времени в закрытом (а) и открытом (б) складах

Fig. 12. Changes in the fractional composition of large-size run-of-mine coal over time (fraction 50–300 mm) in closed (a) and open (b) warehouses

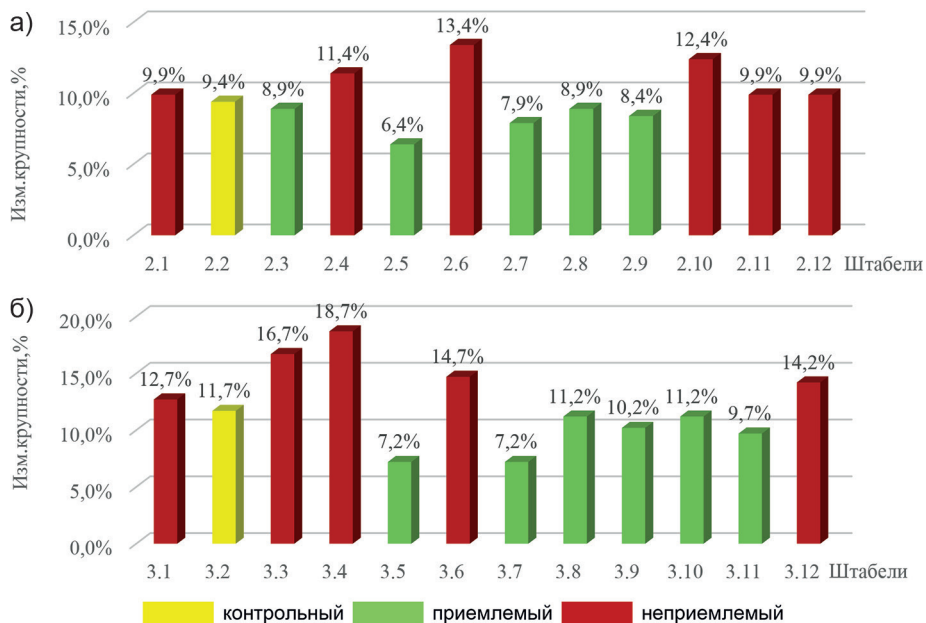


Рис. 13. Изменение фракционного состава (фракция 0–6 мм) рядового угля с повышенным содержанием мелочи (а) и энергетического угля (б) во времени

Fig. 13. Changes in the particle-size distribution (0–6 mm fraction) of run-of-mine coal with an increased fine fraction content (a) and thermal coal (b) over time

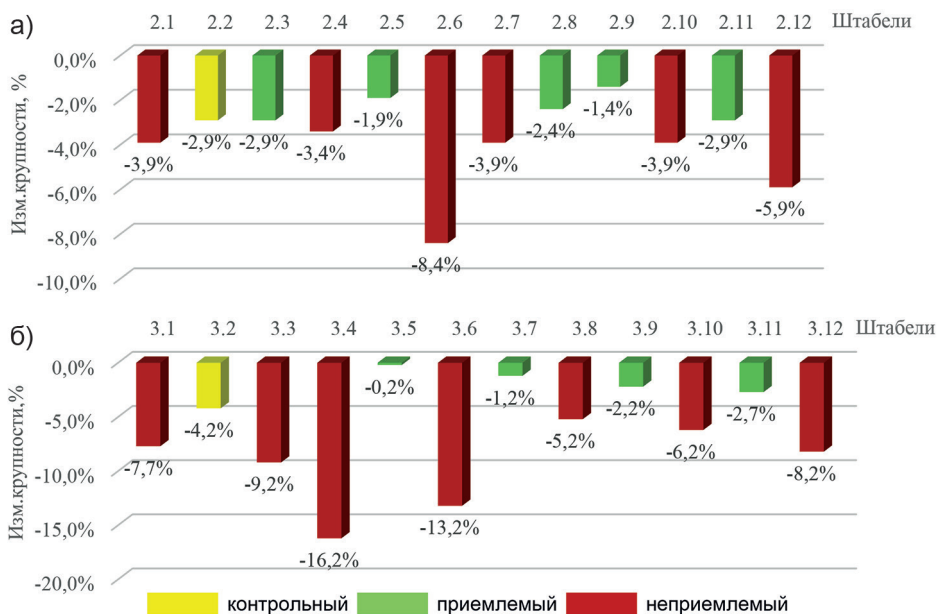


Рис. 14. Изменение фракционного состава (фракция 50–300 мм) рядового угля с повышенным содержанием мелочи (а) и рядового энергетического угля (б) во времени

Fig. 14. Changes in the particle-size distribution (50–300 mm fraction) of run-of-mine coal with an increased fine fraction content (a) and run-of-mine thermal coal (b) over time

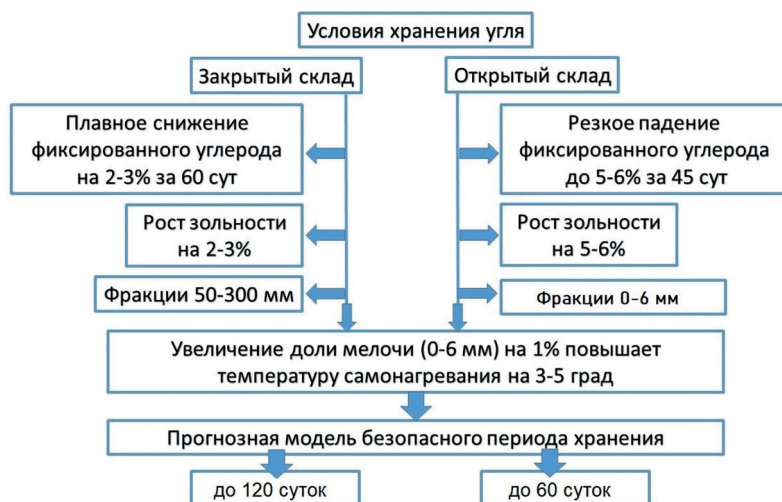


Рис. 15. Закономерность влияния фракционного состава на возгорание
 Fig. 15. Relationship between particle-size distribution and ignition propensity

применение антипирогенных составов или перевалка угля. Полученные результаты обосновывают необходимость внедрения систем непрерывного термомониторинга с использованием БАС.

Таким образом, данные и уравнения кривых позволяют спрогнозировать как изменение качества угольной продукции в заданный срок хранения или консервации разрабатываемого участка, так и сроки сохранности угля по заданным критериям качества.

Заключение

В результате исследования установлены геотехнические факторы, влияющие на самовозгорание углей Шубаркольского месторождения, среди которых определяющую роль играют грануло-

метрический состав, влажность и длительность хранения. Экспериментально подтверждено существование критических температурных порогов, инициирующих переход от медленного окисления к активной фазе горения. На основе выявленных закономерностей предложен комплекс мониторинговых решений, включающий применение беспилотных авиационных систем и тепловизионного мониторинга.

Полученные зависимости содержания углерода и зольности от фракционного состава могут служить основой для совершенствования мер хранения и транспортировки угольной продукции на предприятиях Казахстана, а также для сохранения потребительских свойств угля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гендлер С. Г., Степанцова А. Ю., Попов М. М. Обоснование безопасной эксплуатации закрытого угольного склада по газовому фактору // Записки Горного института. – 2025. – Т. 272. – С. 72–82.
2. Суксова С. А., Тимофеева Ю. В., Долган А. А., Попов Е. В. Обзор методов идентификации процессов самовозгорания углей // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13. – № 1. – С. 19.
3. Onifade M., Genc B. A review of research on spontaneous combustion of coal // International Journal of Mining Science and Technology. 2020, vol. 30, no. 3, pp. 303–311. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.03.001.

4. Дрижд Н. А., Даулетжанов А. Ж., Замалиев Н. М., Даулетжанова Ж. Т. Профилактика самовозгорания в горных выработках при подземной угледобыче // Горный журнал Казахстана. — 2020. — № 8. — С. 47–52.
5. Anghelescu L., Diaconu B. M. Advances in detection and monitoring of coal spontaneous combustion: Techniques, challenges, and future directions // Fire. 2024, vol. 7, no. 10, article 354. DOI: 10.3390/fire7100354.
6. Лабинский К. Н., Головченко Е. А., Мамаев В. В., Калякин С. А. Зависимость температуры самовоспламенения угольного аэрозоля от химической активности поверхности пыли // Научный вестник НИИГД Респиратор. — 2023. — № 4 (60). — С. 7–16.
7. Rui Wu, Xiangyu Liu, Shi Wang, Xuepeng Song, Haigen Yu, Zhiguo Guo Study on the fire prevention and extinguishing performance of ammonium polyphosphate-reinforced coal gangue slurry for goaf grouting and filling // Fire, 2025, vol. 8, no. 6, article 213. DOI: 10.3390/fire8060213.
8. Protasov S. I., Portola V. A., Seregin E. A. Effect of seasonal variations in air temperature on spontaneous combustion of waste dumps // Journal of Mining Science. 2025, vol. 61, no. 2. DOI: 10.1134/S1062739125020012.
9. Родионов В. А., Скрипник И. Л., Ивахнюк С. Г. Исследование характеристик самовозгорания каменного угля // Безопасность труда в промышленности. — 2025. — № 4. — С. 7–13.
10. Докучаева А. И., Малинникова О. Н., Палкин А. Б. Усовершенствованный метод оценки химической активности углей при определении их склонности к самовозгоранию // Химия в интересах устойчивого развития. — 2022. — № 30. — С. 483–487.
11. Вогман Л. П., Ильичев А. В. Обеспечение пожаровзрывобезопасности при рекультивации отработанных угольных месторождений // Актуальные вопросы пожарной безопасности. — 2020. — № 1(3). — С. 12–25.
12. Голынская Ф. А. Применение метода многомерной классификации по эталонным точкам для определения степени самовозгораемости бурых углей // Новые идеи в геологии нефти и газа. — 2017. — № 1. — С. 67–70.
13. Jin Y., Shang H., Guo J., Wang K., Cai G., Li S. Research status and prospect of coal spontaneous combustion source location determination technology // Processes. 2025, vol. 13, no. 7, article 2305. DOI: 10.3390/pr13072305.
14. Xuebin Wu, Jinming Dong, Runzhe Hu, Boxue Pang CFD modelling of prevention and mitigation of coal spontaneous combustion in longwall goaf — A comprehensive review and future outlook // Archives of Computational Methods in Engineering. 2025. DOI: 10.1007/s11831-025-10420-7.
15. Калайгорода В. В., Простов С. М., Шабанов Е. А. Инструментальный мониторинг при локации очагов эндогенных пожаров в борту угольного разреза // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2023. — № 2. — С. 124–135.
16. Ерастов А. Ю. Опыт применения геофизической съемки и тепловизионного контроля для выявления очагов самонагрева на угольных складах и выбора способа их тушения // Вестник. — 2012. — № 2. — С. 152–156.
17. Portola V. A., Cherskikh O. I., Protasov S. I., Seregin E. A., Shvakov I. A. Specific features of thermal imaging surveys for detecting spontaneous combustion sources in coal strip mines // Mining Industry. 2023, no. 1, pp. 95–100. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-1-95-100.
18. Коршунов Н. А., Савченкова В. А., Перминов А. В., Конюшенков М. Е. Перспективные направления применения беспилотных авиационных систем в лесном комплексе // Лесохозяйственная информация. — 2022. — № 2. — С. 34–46. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.03.
19. Xiao W., Ren H., Zhao Y., Wang Q., Hu Z. Monitoring and early warning the spontaneous combustion of coal waste dumps supported by unmanned aerial vehicle remote sensing // Coal Science and Technology. 2023, vol. 51, no. 2, pp. 412–421. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1901.
20. Guo J., Wen H., Zheng X., Liu Y., Cheng X. A method for evaluating the spontaneous combustion of coal by monitoring various gases // Process Safety and Environmental Protection. 2019, vol. 126, pp. 223–231. DOI: 10.1016/j.psep.2019.04.014. **PLoS**

REFERENCES

1. Gendler S. G., Stepanstsova A. Yu., Popov M. M. Justification of safe operation of a closed coal storage facility by the gas factor. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 272, pp. 72–82. [In Russ].

2. Suksova S. A., Timofeeva Yu. V., Dolkan A. A., Popov E. V. Review of methods for identifying coal spontaneous combustion processes. *Bulletin of Eurasian Science*. 2021, vol. 13, no. 1, pp. 19. [In Russ].
3. Onifade M., Genc B. A review of research on spontaneous combustion of coal. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 3, pp. 303–311. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.03.001.
4. Dridzh N. A., Daultzhanov A. Zh., Zamaliyev N. M., Daultzhanova Zh. T. Prevention of spontaneous combustion in mine workings during underground coal mining. *Mining Journal of Kazakhstan*. 2020, no. 8, pp. 47–52. [In Russ].
5. Anghelescu L., Diaconu B. M. Advances in detection and monitoring of coal spontaneous combustion: Techniques, challenges, and future directions. *Fire*. 2024, vol. 7, no. 10, article 354. DOI: 10.3390/fire7100354.
6. Labinsky K. N., Golovchenko E. A., Mamaev V. V., Kalyakin S. A. Dependence of the Self-Ignition Temperature of Coal Aerosol on the Chemical Activity of the Dust Surface. *Scientific Bulletin of NIIGD Respirator*. 2023, no. 4 (60), pp. 7–16. [In Russ].
7. Rui Wu, Xiangyu Liu, Shi Wang, Xuepeng Song, Haigen Yu, Zhiguo Guo Study on the fire prevention and extinguishing performance of ammonium polyphosphate-reinforced coal gangue slurry for goaf grouting and filling. *Fire*. 2025, vol. 8, no. 6, article 213. DOI: 10.3390/fire8060213.
8. Protasov S. I., Portola V. A., Seregin E. A. Effect of seasonal variations in air temperature on spontaneous combustion of waste dumps. *Journal of Mining Science*. 2025, vol. 61, no. 2. DOI: 10.1134/S1062739125020012.
9. Rodionov V. A., Skripnik I. L., Ivakhnyuk S. G. Study of the characteristics of bituminous coal spontaneous combustion. *Occupational Safety in Industry*. 2025, no. 4, pp. 7–13. [In Russ].
10. Dokuchaeva A. I., Malinnikova O. N., Palkin A. B. Improved method for assessing the chemical activity of coals in determining their propensity for spontaneous combustion. *Chemistry for Sustainable Development*. 2022, no. 30, pp. 483–487. [In Russ].
11. Vogman L. P., Ilyichev A. V. Ensuring fire and explosion safety during reclamation of worked-out coal deposits. *Current Issues of Fire Safety*. 2020, no. 1(3), pp. 12–25. [In Russ].
12. Golynskaya F. A. Application of the multidimensional classification method based on reference points to determine the degree of spontaneous combustibility of brown coals. *New Ideas in Oil and Gas Geology*. 2017, no. 1, pp. 67–70. [In Russ].
13. Jin Y., Shang H., Guo J., Wang K., Cai G., Li S. Research status and prospect of coal spontaneous combustion source location determination technology. *Processes*. 2025, vol. 13, no. 7, article 2305. DOI: 10.3390/pr13072305.
14. Xuebin Wu, Jinming Dong, Runzhe Hu, Boxue Pang CFD modelling of prevention and mitigation of coal spontaneous combustion in longwall goaf – A comprehensive review and future outlook. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2025. DOI: 10.1007/s11831-025-10420-7.
15. Kalaygoroda V. V., Prostov S. M., Shabanov E. A. Instrumental monitoring in locating endogenous fire sources in the wall of a coal open pit. *Minerals and Mining Engineering*. 2023, no. 2, pp. 124–135. [In Russ].
16. Erastov A. Yu. Experience in using geophysical survey and thermal imaging monitoring to detect self-heating sources in coal storages and select methods for their extinguishing. *Vestnik*. 2012, no. 2, pp. 152–156. [In Russ].
17. Portola V. A., Cherskikh O. I., Protasov S. I., Seregin E. A., Shvakov I. A. Specific features of thermal imaging surveys for detecting spontaneous combustion sources in coal strip mines. *Mining Industry*. 2023, no. 1, pp. 95–100. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-1-95-100.
18. Korshunov N. A., Savchenkova V. A., Perminov A. V., Konyushenkov M. E. Promising areas of application of unmanned aerial systems in the forestry sector. *Forestry Information*. 2022, no. 2, pp. 34–46. [In Russ]. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.03.
19. Xiao W., Ren H., Zhao Y., Wang Q., Hu Z. Monitoring and early warning the spontaneous combustion of coal waste dumps supported by unmanned aerial vehicle remote sensing. *Coal Science and Technology*. 2023, vol. 51, no. 2, pp. 412–421. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1901.
20. Guo J., Wen H., Zheng X., Liu Y., Cheng X. A method for evaluating the spontaneous combustion of coal by monitoring various gases. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019, vol. 126, pp. 223–231. DOI: 10.1016/j.psep.2019.04.014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Ахматнуров Денис Рамильевич*¹ — доктор PhD,

руководитель лаборатории,

e-mail: d.akhmatnurov@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-9485-3669,

*Мусин Равиль Альтавович*¹ — доктор PhD,

ассоциированный профессор, e-mail R.A.Mussin@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1206-6889,

*Немова Наталья Анатольевна*² — канд. техн. наук,

старший научный сотрудник; доцент,

Сибирский государственный университет геосистем

и технологий, e-mail nemova-nataly@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5050-611X,

*Замалиев Наиль Мансурович*¹ — доктор PhD,

ассоциированный профессор,

e-mail zamaliyevnail@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-0628-2654,

*Резник Александр Владиславович*² — канд. техн. наук,

старший научный сотрудник, e-mail a-reznik@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0077-3404,

¹ Карагандинский технический университет

имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Республика Казахстан,

² Институт горного дела имени Н.А. Чинакала СО РАН.

Для контактов: Мусин Р.А., e-mail: R.A.Mussin@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*D.R. Akhmatnurov*¹, PhD, Head of Laboratory,

e-mail: d.akhmatnurov@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-9485-3669,

*R.A. Musin*¹, PhD, Associate Professor,

e-mail R.A.Mussin@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1206-6889,

*N.A. Nemova*², Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher;

Assistant Professor, Siberian State University

of Geosystems and Technologies, 630091, Novosibirsk,

Russia, e-mail nemova-nataly@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5050-611X,

*N.M. Zamaliyev*¹, PhD, Associate Professor,

e-mail zamaliyevnail@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-0628-2654,

*A.V. Reznik*², Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,

e-mail a-reznik@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0077-3404,

¹ Abylkas Saginov Karaganda Technical University,

100012, Karaganda, Republic of Kazakhstan,

² N.A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch

of the Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia.

Corresponding author: R.A. Musin, e-mail: R.A.Mussin@mail.ru.

Получена редакцией 02.03.2026; получена после рецензии 27.04.2026; принята к печати 10.07.2026.

Received by the editors 02.03.2026; received after the review 27.04.2026; accepted for printing 10.07.2026.