УДК 622.33:622.02 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-3-79-85

Способы экранирования при хранении энергетического угля в условиях Крайнего Севера

Владислав Игоревич ФЕДОРОВ*

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия

Аннотация

Цель работы – исследовать качество энергетического угля при хранении под экранирующими материалами в условиях Крайнего Севера и дать оценку предлагаемым способам.

Актуальность. В угольной продукции при длительном хранении и транспортировке к удаленным потребителям арктических районов Якутии наблюдаются необратимые разрушительные процессы, обусловленные выветриванием и ветровой эрозией в условиях экстремального климата Крайнего Севера. Данные процессы приводят к существенной трансформации морфометрических характеристик угля, выражающейся в прогрессирующем изменении гранулометрического состава с увеличением доли мелких классов крупности. Использование такого топлива приводит к значительным количественно-качественным потерям и перерасходу топлива при слоевом способе сжигания.

Методы исследований – научное обобщение, систематизация и анализ научно-технической литературы и полученных результатов; наблюдение за экспериментом путем определения гранулометрического состава угля методом ситового анализа для исследования качества сохранности.

Результаты исследований. Предлагаются способы экранирования для повышения сохранности качества и сроков хранения угля при транспортировке и хранении добытого твердого топлива, которые основаны на проведении дополнительных мероприятий по защите поверхностного слоя угля от негативного воздействия окружающей среды. Дана оценка предлагаемым экранирующим материалам по эффективности защиты угольной продукции от воздействия разрушительного влияния окружающей среды Крайнего Севера.

Заключение и выводы. Использование правильных защитных покрытий позволяет значительно снизить трансформацию угольной продукции под воздействием атмосферных факторов в процессе складирования и транспортировки. В результате уменьшается доля мелких классов крупности менее 10 мм, обладающих низкой эффективностью сгорания в слоевых топочных системах.

***Ключевые слова*:** бурый уголь, качество, упаковка, гранулометрический состав, эффективность, Крайний Север, защита и экранирование угля, сроки хранения угля, окисление твердого топлива.

Введение

Во многих регионах нашей страны уголь остается жизненно важным топливно-энергетическим ресурсом, значение которого возрастает, особенно для удаленных и труднодоступных территорий республики Саха (Якутия). Одной из сложных и важных задач в сфере жилищно-коммунального хозяйства региона является обеспечение бесперебойной тепловой энергией в холодный период года потребителей удаленных районов [1]. Сжигание твердого топлива несоответствующего качества приводит к потерям, что впоследствии является причиной дефицита сырья в отопительный период года [2]. Для бесперебойной и эффективной работы угольных котельных в отопительный сезон на Крайнем Севере необходимы решения по улучшению работы угольных потоков, в том числе организация длительного хранения топлива. Это обуславливается не только дальностью перевозок топлива, периодичностью его отгрузок, но в значительной мере сезонной неравномерностью его потребления. При слоевом сжигании частицы угля менее 8–10 мм в процессе горения фактически часто не участвуют, так как их часть проваливается в зольное отделение, часть с потоком горячего воздуха вылетает в дымоход. Утилизация угля с высоким содержанием мелких фракций вместо сортового ведет к снижению КПД котлов и перерасходу угля. При сжигании в котлах с колосниковой решеткой для производства одного и того же количества тепловой энергии рядового угля необходимо до 1,5–2 раз больше, чем сортового [3].

Механическая добыча угля с применением буровзрывных работ, а также долгосрочное хранение рядового угля на открытых складах в условиях Севера приводит к большому содержанию мелких и пылевидных фракций. Практика показывает, что надлежащая организация добычи, хранения и транспортировки углей может значительно уменьшить потери топлива [4]. Вот почему предотвращение потерь топлива на всех этапах цепочек поставок в районах Крайнего Севера приобретает актуальное значение.

✉fonariwe@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-7138-495

Таблица 1. Качественные характеристики кангалассских углей
Table 1. Quality Parameters of Kangalas Coal

Массовая доля общей влаги W^r_t, % (среднее/предельное значения)	Зольность пласта A^d, % (среднее/предельное значения)	Выход летучих веществ V^{daf}, %	Высшая теплота сгорания топлива, Q_s^{daf}/ Q_r^i, ккал/кг	Массовая доля, % (не более)
30,7 / 33,0	Пласт Верхний – 17,0 / 18,0 Пласт Нижний – 14,0 / 16,0,	49,0	6700 / 3490	Порода в угле – 2,5 Общая сера S^d_t – 0,4

Необходимо разработать такие способы длительного хранения углей, учитывающие климатические особенности Севера, при которых качественные и количественные потери были бы минимальны. Однако нельзя не отметить, что внешние природно-климатические факторы, сложная природа углей и сложность механизма процессов их окисления являются пока препятствием для решения изложенных проблем и задач.

Основные понятия выветривания и ветровой эрозии угля

Окисление углей связано с присоединением к ним кислорода и является сложным физико-химическим процессом, который сопровождается образованием продуктов окисления и распадом перекисных комплексов. При этом происходят качественные и количественные изменения органической и минеральной составных частей угля [5–7].

В начальной стадии окисление угля происходит с поверхности и тем интенсивнее, чем больше его поверхность, т. е. чем мельче уголь. Окисление углей при низких температурах протекает сравнительно медленно. При повышении температуры скорость окислительных реакций увеличивается на каждые 10 °С в 2–3 раза [8].

Процесс медленного окисления углей обычно называют выветриванием. Выветривание угля при хранении сопровождается главным образом разрушением кусков, увеличением количества трещин, уменьшением механической прочности и возрастанием количества мелочи. При этом происходит также изменение как органической, так и минеральной составных частей угля. Поверхность свежедобытого угля интенсивно поглощает кислород воздуха, и на ней образуется окислительный слой. В кусках угля имеются многочисленные микротрещины и поры, которые облегчают приток кислорода и влаги внутрь куска. Чем плотнее уголь и меньше диаметр пор, тем ниже коэффициент диффузии кислорода. Влага, попадая в трещины и поры угля, разрушает его. Бурые угли с повышенным содержанием влаги более подвержены механическому выветриванию, чем угли высокой стадии углефикации [9].

В теплое время года поверхность открытого угольного склада быстро теряет влагу и легко поддается ветровой эрозии. Обезвоженные участки штабеля при скорости ветра 4–5 м/с и более становятся интенсивными источниками угольной пыли. Ветровая эрозия открытой поверхности мелкофракционного угля, особенно при хранении и транспортировании, приводит к его потерям [10, 11].

Степень склонности углей к окислению (выветриванию) определяется в первую очередь их происхождением, составом исходного материала углеобразования, строением угольного вещества, наличием и характером минеральных примесей, петрографическим составом, влажностью и условиями хранения. С увеличением степени углефикации понижается склонность углей к окислению [12–14].

Методика проведения исследований

Объектом изучения послужил бурый уголь с низкой стадией углефикации Кангалассского месторождения (табл. 1). Объект выбран с учетом широкого распространения углей в регионе, качество которых соответствует марке 2БР, данные угли сильно подвержены окислению и, следовательно, имеется возможность наблюдения данного процесса за короткие сроки хранения.

На угольном разрезе до наступления положительных температур ($t_{сред}$ < 0 °С) по трем вертикальным осям вкрест линии простирания из недавно вскрытого угольного пласта Верхний по всей его мощности произведен по ГОСТ 10742–71 механизированным способом отбор пробы. Уголь доставлялся на опытно-экспериментальный полигон, где была произведена первичная оценка гранулометрического состава и технических характеристик.

Критическая масса кангалассского угля, в которой может начаться процесс, приводящий к самовозгоранию, равна 1,6 т с толщиной угольного слоя более 1,1 м [15]. Для устранения риска самовозгорания угля все варианты его хранения предусматривали формирование по порциям. Количество угля в пробах 30–45 кг, чтобы масса была в несколько раз меньше граничных значений для самовозгорания. Для анализа процесса выветривания угля путем наблюдения за изменчивостью гранулометрического состава топлива под воздействием окружающей среды уголь предварительно рассеивался по классам крупности: +40; –40+20; –20+10; –10+5 и –5+0 мм при устойчивых отрицательных температурах воздуха и поверхности земли. После проведения гранулометрического анализа все классы вновь смешивались с минимальным механическим воздействием, и формировались пробы по 40 г. Чтобы обеспечить высокую точность сравнения данных, все пробы были подготовлены с близкими значениями по массе и геометрии, с разницей не более 5 %. Далее порции размещались в естественных климатических условиях Крайнего Севера с соблюдением правил пожарной безопасности на определенных местах хранения согласно плану. Период хранения проб угля с 1 апреля до 1 октября.

В теплый период года на Крайнем Севере были предложены следующие доступные способы и материалы экранирования проб угля марки 2Б: 1. *Навес (железобетонный);* 2. *Мягкие контейнеры (двойные мешки);* 3. *Мягкие контейнеры (двойные мешки) + навес (железобетонный);* 4. *Органический материал (навоз);* 5. *Отработанные моторные масла;* 6. *Водоэмульсионная краска (эмульсия из*

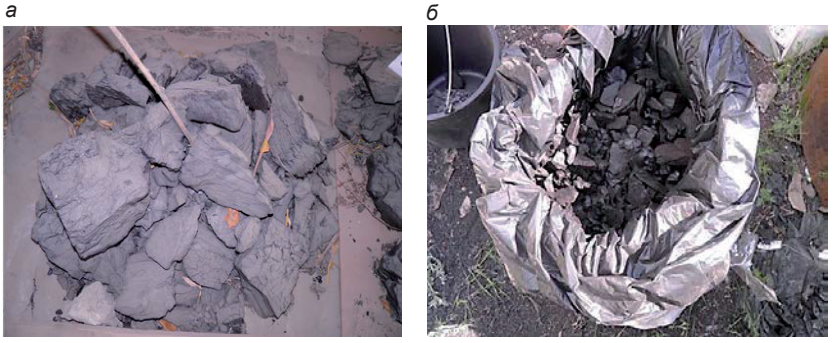

Рисунок 1. Уголь рядовой без мелочи после периода хранения 6 мес.: *а* – под навесом; *б* – в мешках под навесом
Figure 1. Sized coal (excluding fines) after 6 months of storage: *а* – sheltered storage; *б* – bagged storage under a shed

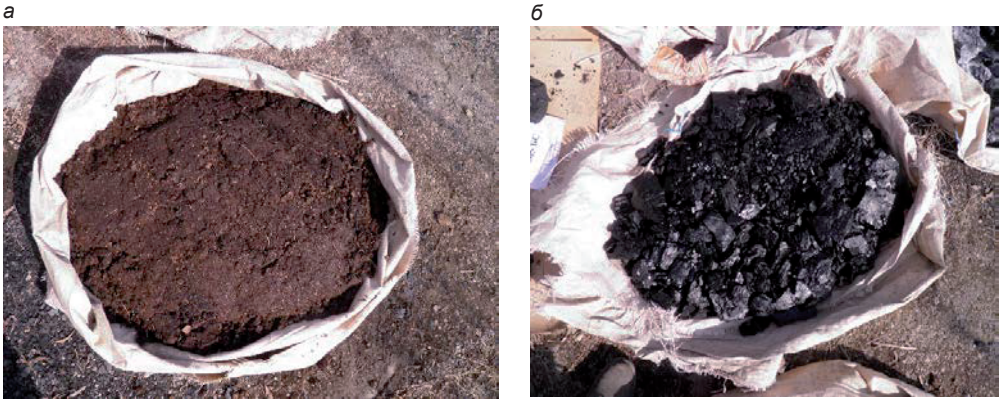

Рисунок 2. Экранирование: *а* – органический материал (навоз)**;** *б* **–** отработанное моторное масло; *в* – эмульсия из латекса, акрила, силикона и прочих полимеров; *г* – полипропиленовый материал
Figure 2. Shielding materials: *а* – organic material (manure); *б* – waste motor oil; *в* – emulsion of latex, acrylic, silicone, and other polymers; *г* – polypropylene material

латекса, акрила, силикона и прочих полимеров); 7. *Клей ПВА (поливинилацетат);* 8. *Полипропиленовый материал;* 9. *Без защиты (уголь навалом на открытой площадке).*

В ходе эксперимента для хранения угля *под навесом с естественной вентиляцией* были подготовлены пробы в навал с известными гранулометрическими характеристиками. Аналогичные пробы были упакованы в двойные *полипропиленовые мешки* для последующего размещения под железобетонным навесом (рис. 1).

На открытой площадке при строгом соблюдении противопожарных требований сформированы эквивалентные порции угля, где использовались различные средства защиты: *органическое покрытие, отработанное моторное масло, водоэмульсионная краска, клей ПВА и полипропиленовая ткань* (рис. 2).

С учетом физико-механических характеристик выбранных материалов были реализованы следующие подходы к экранированию, направленные на повышение устойчивости к разрушительным воздействиям климатических факторов Крайнего Севера:

1) герметизация в полипропиленовую тару: пробы угля подвергались плотной упаковке в двухслойные полипропиленовые мешки, что обеспечивало изоляцию, аналогичную технологии мягких контейнеров типа «БИГ-БЭГ»;

2) нанесение жидких экранирующих композиций: методом пневматического распыления на поверхность проб угля наносились 3–5 последовательных слоев жидкого экранирующего состава толщиной 0,2–1,0 мм каждый, формируя многослойный барьер;

3) применение полутвердых органических покрытий: способом ручного нанесения биосубстанции шпателем создавался сплошной защитный слой толщиной 20–30 мм из полутвердого органического материала с адгезионными свойствами;

4) использование эластичного полипропиленового текстиля: однослойное покрытие из эластичной полипропиленовой ткани монтировалось с обеспечением плотного контакта с защищаемой поверхностью.

Срок хранения проб угля под экранами истекает с наступлением устойчивых отрицательных температур, примерно через 6 мес. после закладки (с апреля по октябрь). По окончании этого срока все пробы извлекаются, анализируются (ситовой и технический анализ), результаты фиксируются фотографией и заносятся в журнал. После проверок на наличие ошибок на основе этих данных формируется база данных эксперимента в электронных таблицах с гистограммами изменения гранулометрического состава и технического анализа угля за период хранения.

Результаты исследований

На протяжении всего периода хранения проводилось наблюдение за внешними изменениями проб угля. По окончании срока эксперимента для определения грану-

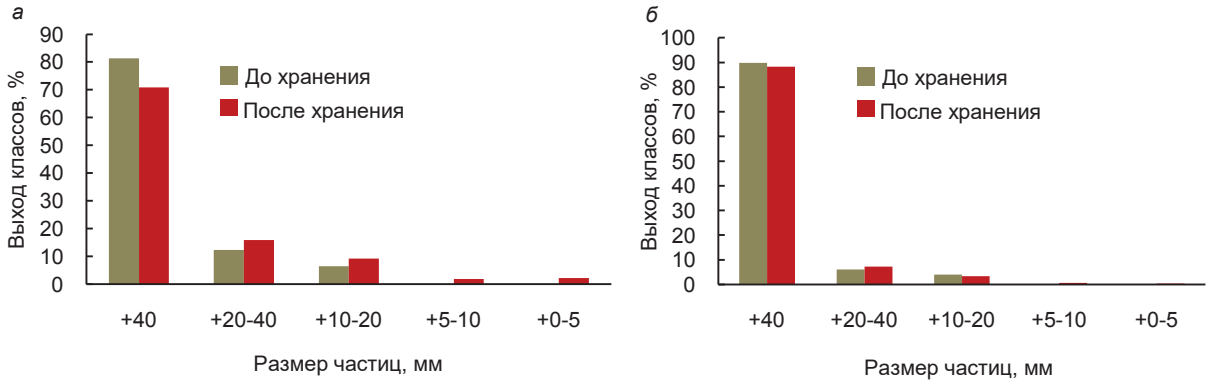

Рисунок 3. Гистограммы гранулометрического состава угля до и после хранения (6 мес.): *а* – под навесом; *б* – в мешках на открытой площадке

Figure 3. Particle size distribution histograms of coal before and after storage (6 months): *а* **–** under a shed; *б* – in bags on an open platform

Таблица 2. Анализ результатов измерений гранулометрического состава рядового угля навалом под экранами после периода хранения

Table 2. Analysis of particle size distribution measurement results for unscreened coal stored in bulk under shielding materials after the storage period

Способы и средства экранирования бурого угля	Изменение гранулометрического состава, %		Группа
	Снижение класса +40 мм	Повышение класса –10+0 мм	
1. Полипропиленовые мешки (двойные)	2	1	I
2. Полипропиленовые мешки (двойные) + навес	2	1	
3. Навес (железобетонный)	10	4	II
4. Биоматериал (навоз)	15	4	
5. ГСМ (отработанное моторное масло)	24	13	III
6. Полипропиленовый материал	39	16	
7. Клей ПВА (поливинилацетат)	46	20	IV
8. Водоэмульсионная краска (эмульсия из латекса, акрила, силикона и т. д.)	51	23	
9. Без экранирования	54	24	–

лометрического состава и основных технических характеристик уголь отбирался с открытой площадки, из-под навеса, а также из-под других видов укрытий. Осмотр проб, хранящихся *навалом под навесом и в мешках*, показал, что уголь сохранил свой бурый глянцевый цвет с тусклым смоляным блеском, кусковатость практически не изменилась, структура осталась слоистая связанная (рис. 3). На поверхности кусков угля были замечены новые трещины, геометрия которых не нарушает целостность кусков.

Пробы угля, изолированные *отработанным маслом, биоматериалом и полипропиленовым материалом,* визуально разрушились незначительно, в отличие от покрытий *водоэмульсионной краской* и *клеем ПВА,* где куски угля стали хрупкими с появлением большего числа новых трещин и сколов, оттенок изменился с глянцевого на глубоко матовый, текстура стала полосчатая слоистая.

Технический анализ проб угля показал, что за период хранения с 1 апреля по 1 октября в условиях Крайнего Севера показатели качества практически не изменились и соответствовали исходным значениям. Показатели влажности проб в различных условиях хранения варьировалась в пределах 13,6–29 %, самые низкие показатели были у угля под навесом. Остальные технические характеристики угля не претерпевали значимых изменений во всех условиях хранения: зольность 9,2–15,8 %, выход летучих веществ 47,9–52,0 %, теплотворная способность 20,2–23,4 мДж/кг.

Показатели изменения гранулометрического состава угля в зависимости от используемых материалов представлены в табл. 2. Наибольшая дезинтеграция исходного угля прослеживалась в пробах, покрытых *эмульсионной краской*, такое экранирование сравнимо с показателями в пробах без защиты, где прирост мелких классов –10+0 мм составил около 25 % при суммировании исходных значений 30–40 %. При использовании *мягкой полипропиленовой тары* кусковатое топливо сохраняет свою исходную гранулометрию и практически не разрушается при хранении, общее изменение в пробах 1–3 % по основным классам крупности.

По итогам оценки гранулометрического состава угольной продукции под экранами были сгруппированы выбранные защитные материалы от выветривания по эффективности использования в условиях Крайнего Севера

в теплый период года (табл. 2): группа I – высокоэффективная защита; группа II – среднеэффективная защита; группа III – слабоэффективная защита; группа IV – неэффективная защита.

Заключение

Исследование результатов экранирования проб угля после периода хранения посредством сравнительного анализа гранулометрического состава показало, что в условиях Крайнего Севера для повышения сохранности и увеличения сроков хранения кускового твердого топлива марки 2БР целесообразно применение доступных экранирующих материалов, таких как отработанное моторное масло, биоматериалы, а также мягкие полипропиленовые мешки и навесы. Установлено, что использование данных материалов существенно снижает деструктивное воздействие факторов окружающей среды (выветривание и ветровую эрозию) на угольную продукцию в процессе хранения и транспортировки, что приводит к значительному уменьшению доли мелких фракций (–10+0 мм), практически не участвующих в процессе горения в слоевых топочных устройствах.

Применение экранирования возможно в течение теплого периода года на всех этапах хранения угля – от складских помещений на разрезе до котельных.

С технологической точки зрения, наиболее сложным и затратным, но при этом максимально эффективным методом экранирования, обеспечивающим минимальные потери угля (особенно при транспортировке на значительные расстояния), является тарирование твердого топлива в мягкие контейнеры (биг-бэги).

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР № 122022800086-1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическая стратегия Республики Саха (Якутия) на период до 2030 года / отв. ред. Н. А. Петров. Якутск; Иркутск: Медиа-холдинг «Якутия», 2010. 334 с.
2. Захаров В. Е., Козлов А. Н., Донской И. Г. Моделирование изменения теплоты сгорания угля при транспортировке до районов Крайнего Севера, на примере Республики Саха (Якутия) // Известия РАН. Энергетика. 2018. № 6. С. 132–141. https://doi.org/10.31857/S000233100003526-2
3. Переясловский И. В., Степаненко С. А., Осокин С. Е. Выбор энергоэффективного угольного топлива // Новости теплоснабжения. 2010. № 12 (124). С. 35–37.
4. Федоров В. И., Гаврилов В. Л. Оценка изменения гранулометрического состава низкометаморфизированных углей при длительном хранении // ГИАБ. 2021. № 12-1. С. 223–232. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_121_0_223; https://elibrary.ru/qhgvnf
5. Li X., Jin Z., Bai G., Wang J., Linghu J. Experimental study of the influence of water on spontaneous combustion of coal containing pyrite // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2022. Vol. 42. Issue 5. P. 1357–1372. https://doi.org/10.1080/19392699.2020.1713766
6. Zhao X., Dai G., Qin R., Zhou L., Li J., Li J. Study On oxidation kinetics of low-rank coal during the spontaneous combustion latency // Fuel. 2023. Vol. 339. Article number 127441. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127441
7. Захаров В. Н., Докучаева А. И., Малинникова О. Н. Адекватность применимости критериев оценки склонности к самовозгораемости углей Печорского и Кузнецкого бассейнов // ГИАБ. 2023. № 12. С. 5–15. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_12_0_5
8. Ульянова Е. В., Малинникова О. Н., Пашичев Б. Н. Влияние неоднородности структуры угля на особенности его термического разложения // ГИАБ. 2020. № 2. С. 71–81. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-2-0-71-81
9. Wang X. Laboratory experiment for evaluating characteristics of spontaneous combustion // Spontaneous Combustion of Coal. Cham: Springer, 2019. P. 73–128. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33691-2_3
10. Окисление и выветривание ископаемых углей / отв. ред. Н. Г. Титов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 151 с.
11. Семенова С. А., Патраков Ю. Ф. Влияние выветривания на изменение состава и технологических свойств углей // Кокс и химия. 2017. № 3. С. 8–14.
12. Подображин С. Н. Предотвращение пылевыделения в атмосферу разрезов при ветровой эрозии // Безопасность труда в промышленности. 2011. № 6. С. 16–22.
13. Гаврилова Д. И. Применение пленкообразующих полимерных веществ для пылеподавления и снижения окисляемости углей при их хранении и транспортировке: дис. … канд. техн. наук. М.: НИТУ МИСиС, 2020. 111 с.
14. Подображин С. Н. Методы снижения выделений пыли и газа при добыче угля. М.: Изд. дом НИТУ «МИСиС», 2020. 354 с.
15. Чемезов Е. Н., Федорова С. Е. Результаты исследования склонности углей к самовозгоранию в условиях многолетней мерзлоты // Народное хозяйство Республики Коми. 1998. № 1. С. 218–221.

Статья поступила в редакцию 30 июля 2025 года

UDC 622.33:622.02 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2025-3-79-85

Methods of shielding for storing thermal coal in the Far North conditions

Vladislav Igorevich FEDOROV*

N. V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of RAS, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

Abstract

The purpose of this work – to investigate the quality of thermal coal stored under shielding materials in the Extreme North conditions and evaluate the proposed protection methods.

Relevance. During long-term storage and transportation to remote consumers in the Arctic regions of Yakutia, coal undergoes irreversible destructive processes caused by weathering and wind erosion in the harsh climate of the Extreme North. These processes lead to significant transformations in the coal's morphometric characteristics, manifesting as progressive changes in particle size distribution with an increasing proportion of fine fractions. The use of such fuel results in substantial quantitative and qualitative losses, as well as excessive fuel consumption in layer combustion systems.

Research methods. Scientific generalization, systematization, and analysis of technical literature and obtained results. Experimental monitoring via sieve analysis of coal particle size distribution to assess preservation quality.

Results. Shielding methods are proposed to enhance coal quality preservation and extend storage duration during transportation and stockpiling. These methods involve additional protective measures for the coal surface layer against environmental damage. The effectiveness of various shielding materials in safeguarding coal from the Extreme North's destructive conditions is evaluated.

Conclusion. Proper protective coatings significantly reduce coal degradation due to atmospheric exposure during storage and transportation. As a result, the proportion of fine fractions (< 10 mm), which exhibit low combustion efficiency in layer-fired systems, is reduced.

***Keywords*:** brown coal, quality, packaging, particle size distribution, efficiency, Extreme North, coal shielding and protection, coal storage duration, solid fuel oxidation.

Acknowledgements

This work was performed as part of a state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 0297-2021-0020, Unified State Information System for Research and Development (EGISU R&D) registration number 122011800086-1).

REFERENCES

1. 2010, Energy Strategy of the Republic of Sakha (Yakutia) for the period up to 2030. Ed. by N. A. Petrov. Yakutsk; Irkutsk, 334 p. (*In Russ.*).
2. Zaharov V. E., Kozlov A. N., Donskoi I. G. 2018, Modeling of changes in the heating value of coal transported to Russia's Far North regions on the example of the Republic of Sakha (Yakutia). *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of RAS. Power Engineering], no. 6, pp. 132–141. https://doi.org/10.31857/S000233100003526-2 (*In Russ.*).
3. Pereyaslovskiy I. V., Stepanenko S. A., Osokin S. E. 2010, Choice of an energy-efficient coal fuel. *Novosti teplosnabzheniya* [Heat supply news], no 12 (124), pp. 35–37. (*In Russ.*)
4. Fedorov V. I., Gavrilov V. L. 2021, Change in particle size distribution of low-rank coal in long-term storage. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 12-1, pp. 223–232. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_121_0_223; https://elibrary.ru/qhgvnf
5. Li X., Jin Z., Bai G., Wang J., Linghu J. 2022, Experimental study of the influence of water on spontaneous combustion of coal containing pyrite. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, vol. 42, issue 5, pp. 1357–1372. https://doi.org/10.1080/19392699.2020.1713766
6. Zhao X., Dai G., Qin R., Zhou L., Li J., Li J. 2023, Study On oxidation kinetics of low-rank coal during the spontaneous combustion latency. *Fuel*, vol. 339, article number 127441. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127441
7. Zakharov V. N., Dokuchaeva A. I., Malinnikova O. N. 2023, Fidelity of evaluation criteria for spontaneous combustion liability of coal from Pechora and Kuznetsk fields. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 12, pp. 5–15. (*In Russ.*). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_12_0_5
8. Ulyanova E. V., Malinnikova O. N., Pashichev B. N. 2020, Influence of structural nonuniformity on features of thermal decomposition in coal. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 2, pp. 71–81. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-2-0-71-81
9. Wang X. 2019, Laboratory experiment for evaluating characteristics of spontaneous combustion. Spontaneous Combustion of Coal. Cham: Springer, pp. 73–128. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33691-2_3
10. 1960, Oxidation and Weathering of Fossil Coals. Ed. by N. G. Titov. Moscow, 151 p. (*In Russ.*)
11. Semenova S. A., Patrakov Y. F. 2017, The influence of weathering on changes in the composition and technological properties of coals. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], no. 3, pp. 8–14. (*In Russ.*)

✉fonariwe@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-7138-495

12. Podobrazhin S. N. 2011, Prevention of Dust Emissions to the Mine Atmosphere during Wild Erosion. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Industrial Safety], no. 6, pp. 16–22. (*In Russ*.)
13. Gavrilova D. I. 2020, Application of film-forming polymer substances for dust suppression and reduction of the oxidability of coals during their storage and transportation: PhD thesis. Moscow, 111 p. (*In Russ*.)
14. Podobrazhin S. N. 2020, Methods for reducing dust and gas emissions during coal mining. Moscow, 354 p. (*In Russ*.)
15. Chemezov E. N., Fedorova S. E. 1998, Results of a study on the propensity of coals to spontaneous combustion in permafrost. *Narodnoe khozyaistvo Respubliki Komi* [National Economy of the Komi Republic], no. 1, pp. 218–221. (*In Russ*.)

The article was received on July 30, 2025