



Утилизация низкосортных отходов углеобогащения совместно с растительными остатками

М.А. Пашкевич, Е.С. Казаков ✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ ekakazakov33@gmail.com

Резюме: Вовлечение отходов угледобывающей отрасли в хозяйственный оборот предприятия способствует не только снижению техногенной нагрузки на окружающую среду, но и получению положительного экономического эффекта. Настоящая работа направлена на исследование влияния добавок растительной биомассы (пшеничной соломы, лузги подсолнечника, сосновых опилок) на теплотворные характеристики вторичного топлива на основе угольного шлама – отхода обогащения антрацитов Донецкого угольного бассейна. Методология исследования включала приготовление топливных композиций в массовых соотношениях 7/3 и 8/2 растительных остатков к шламу с добавлением 5 масс. % кукурузного крахмала. Комплексные исследования состава и свойств отобранных образцов проводились на базе научного центра «Оценка техногенной трансформации экосистем» Санкт-Петербургского горного университета. Определение высшей теплоты сгорания осуществлялось методом калориметрической бомбы. Элементный анализ образующейся золы был определен с применением портативного рентгенофлуоресцентного анализатора. Установлено, что все изученные смеси превосходят по теплотворной способности угольный шлам в чистом виде (13 МДж/кг). Максимальные значения высшей теплоты сгорания (19,5 МДж/кг) и минимальная зольность (5,4%) зафиксированы для композиции опилок с угольным шламом в соотношении 7/3. Для данной смеси предложена технологическая схема утилизации отходов углеобогащения на базе автосамосвала КАМАЗ 6520, предназначенная для ликвидации накопленного шлама непосредственно на территории шламохранилища.

Ключевые слова: Донецкий угольный бассейн, антрацит, отходы обогащения, угольный шлам, топливная смесь, твердое биотопливо, топливные брикеты, зола

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSRW-2026-0003 «Исследование процессов комплексного освоения недр Земли и глубокой переработки георесурсов».

Для цитирования: Пашкевич М.А., Казаков Е.С. Утилизация низкосортных отходов углеобогащения совместно с растительными остатками. *Горная промышленность*. 2026;(4S):120–126. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-120-126>

Disposal of low-grade waste coal together with plant residues

M.A. Pashkevich, E.S. Kazakov ✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ ekakazakov33@gmail.com

Abstract: Introduction of coal mining waste in the economic activities of the mining company contributes not only to reducing the anthropogenic impact on the environment, but also to obtaining a positive economic effect. This work aims at studying the effects of additives made of plant biomass (wheat straw, sunflower husk, pine sawdust) on the calorific characteristics of secondary fuels based on silt coal, a waste from anthracite processing in the Donetsk coal basin. The research methodology included preparation of fuel compositions at the ratios of 7/3 and 8/2 of the plant residues to the silt coal by weight with addition of 5 wt. % of corn starch. Comprehensive studies of the composition and properties of the selected samples were conducted using the facilities of the Assessment of Anthropogenic Transformation of Ecosystems Research Center at St. Petersburg Mining University. Determination of the high heating value was carried out using the calorimetric bomb method. Elemental analysis of the resulting ash was made using a portable X-ray fluorescence analyzer. It was found that all the studied mixtures are superior in their calorific value to the silt coal in its pure form (13 MJ/kg). The maximum high heating values (19.5 MJ/kg) and the minimum ash content (5.4%) are recorded for a composition of sawdust with silt coal at the ratio of 7/3. A technological scheme for reclamation of waste coal based on a KAMAZ 6520 dump truck is proposed for this mixture, which is designed to dispose of the accumulated silt coal directly in the sludge storage area.

Keywords: Donetsk coal basin, anthracite, washery refuse, silt coal, blended fuel, solid biofuel, fuel pellets, ash



Acknowledgements: This work was carried out within the framework of a state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Study of the processes of integrated development of the Earth's interior and deep processing of geological resources, project No. FSRW-2026-0003).

For citation: Pashkevich M.A., Kazakov E.S. Disposal of low-grade waste coal together with plant residues. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):120–126. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-120-126>

Введение

Проблема накопления многотоннажных отходов добычи и обогащения угля носит глобальный характер и сопровождается увеличением антропогенной нагрузки на природные среды, формированием устойчивых источников экологического риска на десятках тысяч гектаров [1–3]. В результате происходит химическое загрязнение как водных объектов [4], так и почвенных ресурсов [5; 6].

Проблема носит особую значимость для Российской Федерации ввиду масштабов угледобывающей деятельности. Ежегодно в России добывается свыше 440 млн т угля, что приводит к образованию более 5,3 млрд т промышленных отходов – порядка 62% от общего объема отходов всех отраслей горной промышленности, причем из года в год данные показатели имеют тенденцию к росту [7]. Ежегодный объем отходов обогащения углей, руд и минерального сырья, складываемых на территории Российской Федерации, составляет порядка 15 млн т. Моральное и техническое старение оборудования обогатительных фабрик снижает эффективность процессов и не обеспечивает соответствия продукции международным стандартам. Вследствие этого содержание углеродсодержащих компонентов в отходах обогащения варьируется, как правило, в пределах 17–26%, однако в зависимости от марки угля может достигать 60%. Это, в свою очередь, обуславливает ежегодные значительные потери минерального сырья [8; 9].

При анализе отечественных и зарубежных научных источников были определены наиболее перспективные направления комплексной переработки углесодержащих отходов [10–12]. Наибольший интерес представляет их применение в гражданском строительстве [13–15] и при выполнении рекультивационных работ [16–18]. Отходы при этом рассматриваются как вторичный ресурс, способный обеспечить дополнительный экономический эффект для предприятия [19; 20].

Отходы углеобогащения обычно характеризуются высоким содержанием углерода в составе, что свидетельствует о наличии нереализованного ресурсного потенциала в качестве вторичного топлива. Одним из наиболее обоснованных подходов к утилизации подобных материалов является их использование в качестве вторичного топлива, например, в частности водоугольных суспензий [21; 22]. Однако реализация данного подхода требует существенных капитальных затрат, связанных с модернизацией и эксплуатацией специализированного котельного оборудования [23; 24]. В связи с этим более технологически простым и экономически доступным способом использования угольного шлама в качестве вторичного топлива является производство топливных брикетов [25; 26].

Научные исследования показывают, что эффективность брикетированных топлив может быть существенно повышена за счет их модификации и совместного использования с другими горючими компонентами. В качестве такой добавки могут служить различные отходы сельско- и лесо-

хозяйственной деятельности. Так, наличие органической биомассы приводит к повышению реакционной способности топлива и улучшению характеристик газификации за счет каталитического действия щелочных металлов, содержащихся в биомассе [27–29]. Данный вид топлива может служить экологически чистой альтернативой традиционным ископаемым топливам.

Уровень изученности данной возможности утилизации углеродсодержащих отходов совместно с различной органической биомассой в настоящее время достаточно высок как в отечественном, так и в иностранном научном сообществе [30–33].

Целью данного исследования являются изучение теплотворных характеристик топливных гранул на основе низкосортных угольных отходов и растительной биомассы и разработка технологической цепочки утилизации рассматриваемого угольного шлама с возвращением в хозяйственный оборот на примере одного из угледобывающих предприятий.

Материалы и методы

Материалы

Объектом исследования служили пробы, отобранные с шламохранилища шахты «Шерловская-Наклонная», находящегося в Ростовской области. Шахта разрабатывается кампанией АО «Донуголь». Отходы обогащения представлены смесью мелкодисперсных угольных частиц с частицами пустой породы, формирующейся в процессе водно-магнетитовой сепарации антрацита на обогатительной фабрике.

Отбор проб и пробоподготовка угольного шлама осуществлялись согласно ГОСТ Р 57758–2017 «Обращение с отходами. Подготовка аналитических навесок из лабораторной пробы» и ГОСТ 59248–2020 «Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и угольные брикеты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний».

Для обеспечения однородности пробы отходов подвергались измельчению с использованием керамической ступки и просеиванию через лабораторные сита различного диаметра ячеек для получения фракции частиц размером менее 0,1 мм.

Определение состава угольного шлама

Результаты определения состава угольного шлама представлены в табл. 1. Все параметры были определены согласно стандартным методикам. Определение влажности (рабочей W_r и аналитической W_a) осуществлялось с использованием термогравиметрического анализатора Sundry SDTGA6000A согласно ГОСТ Р 52911–2013 «Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги». Зольность A определялась в муфельной печи согласно ГОСТ Р 55661–2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности». Содержание углерода C_a устанавливалось инструментальным методом на элементном ана-



Таблица 1
Характеристика угольного
шлама

Характеристика	Значение
Влага рабочая W_p , %	14,57
Влага аналитическая W_a , %	3,1
Содержание углерода C_a , %	44,8
Содержание серы S_a , %	3,87
Зольность A , %	50,05

лизаторе LECO CHN628 (ГОСТ 32979–2014 «Топливо твердое минеральное. Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота»), а массовая доля общей серы S_a – методом Эшка (ГОСТ 8606–2015 «Топливо твердое минеральное. Определение общей серы. Метод Эшка»).

Теплотворные характеристики топливных смесей

Для изготовления топливных смесей в качестве растительных остатков были выбраны культуры, наиболее доступные и распространенные для рассматриваемого района угледобычи, а именно лузга подсолнечника П, пшеничная солома С и опилки О. Для проведения сравнительного анализа были изготовлены смеси в массовом соотношении 7/3 и 8/2 растительных остатков к шламу Ш путем механического смешения и измельчения в лабораторной мельнице ИКА А 11 basic [34; 35]. Данные соотношения были определены оптимальными с учетом аналогичных исследований, проведенных авторами работы [28].

Установление высшей теплоты сгорания проводилось с использованием бомбового калориметра ИКА С2000 basic в соответствии с ГОСТ 33106–2014 «Биотопливо твердое. Определение теплоты сгорания». Элементный состав золы был получен с использованием портативного рентгено-флуоресцентного анализатора.

Таблица 2
Результаты определения тепловых характеристик твердого
биотоплива и угольного шлама

Характеристика	Состав смеси						Шлам
	С/Ш		П/Ш		О/Ш		
	7/3	8/2	7/3	8/2	7/3	8/2	
Высшая теплота сгорания, МДж/кг	18	18,2	18,7	19	19,3	19,5	13
Зольность А, %	8,5	11,6	12,9	15,1	5,4	8	50,1
Содержание химических элементов в золе, мг/кг							
Mo	24,9	32,5	22,7	22,2	33,2	26,3	15,4
Zr	122,4	127,1	168,3	129,4	158,7	122,2	255,8
Sr	236,1	275,5	439,6	403,7	380,1	275,1	570,2
Rb	81,4	87,8	136,8	123,7	125,4	94,8	172
Pb	34,7	27,6	45,8	48	53	47,3	71,9
As	–	23,3	172	170,6	119,3	157,2	–
Zn	118,8	215	143,2	199,9	153,1	158,3	87,1
Cu	207,7	38,5	110,1	126,2	103,9	141,7	106,7
Fe	39200	41100	52000	48600	63400	58900	66500
Mn	643,1	761,7	898,5	771,1	1320	1207	893,6
Cr	486,7	505,7	391,6	472,5	451,2	572,9	461,5
Ti	3281	3049	3471	3349	5020	4699	4943
Ca	24700	18600	27600	30700	20400	22800	18500
K	56000	50800	60900	69700	36500	32800	33300

Table 1
Characteristics of the silt coal

Анализ полученных результатов показал, что добавление растительной биомассы приводит к увеличению теплотворной способности по сравнению с исходным угольным шламом, что подтверждает низкую эффективность его самостоятельного использования в качестве топлива. Наиболее высокие значения теплоты сгорания зафиксированы для смесей на основе опилок (О/Ш), особенно при соотношении 8/2, тогда как минимальные значения характерны для композиций с пшеничной соломой (С/Ш).

Отмечено, что зольность топливных смесей существенно зависит от типа биомассы: минимальные значения наблюдаются для составов с опилками, тогда как смеси с лузгой подсолнечника характеризуются повышенной зольностью. При этом зола последних содержит повышенные концентрации калия и кальция совместно с высокими содержаниями токсичных элементов, таких как мышьяк, хром, медь и марганец, что требует дополнительной оценки экологической безопасности и регламентации направлений дальнейшего применения минерального остатка.

Результаты

Для обеспечения удобства транспортировки и последующего использования в различных теплотехнических установках подготовленные топливные смеси подвергаются брикетированию. В рамках настоящей работы предлагается технологическая схема производства топливных брикетов, представленная на рис. 1, ориентированная на переработку угольного шлама и растительной биомассы в условиях мобильного технологического комплекса.

Предлагаемая технология предусматривает размещение необходимого оборудования на подвижной платформе на базе автосамосвала КАМАЗ 6520 грузоподъемностью 20 т. Такое решение позволяет отказаться от необходимости строительства транспортных путей для перемещения шлама, что актуально для труднодоступных районов либо для территорий со значительно нарушенным рельефом.

Table 2
Results of defining thermal characteristics of solid biofuels and silt coal



Рис. 1
Технологическая схема подготовки брикетированного вторичного топлива

Fig. 1
A technological scheme for preparation of pelletized secondary fuel

Технологический процесс изготовления топливных брикетов включает четыре взаимосвязанных блока: подготовку угольного шлака, подготовку растительной биомассы, формирование топливной смеси с последующим брикетированием, а также выполнение вспомогательных операций, обеспечивающих стабильность работы комплекса.

Подготовка компонентов к смешению

На первом этапе подготовки угольного шлака осуществляется его измельчение с использованием двухвального шредера, предназначенного для разрушения крупных кусков материала до фракции 40–80 мм. Далее шлак поступает в камеру диспергатора, где под действием вращающегося ротора и потока горячего воздуха с температурой 120–150 °C происходит его сушка и доизмельчение до фракции около 2 мм при влажности примерно 10%. Подготовленный шлак по трубопроводу с помощью насосной установки подается в бункер-дозатор, установленный над камерой смешения.

Подготовка растительной биомассы осуществляется по аналогичной схеме. Вышедшие из камеры диспергатора опилки фракцией около 2 мм при влажности порядка 10% по насосной системе направляются в групповой циклон для отделения опилок от примесных включений. После этого материал поступает в приемный бункер и по вертикальному шнековому транспортеру подается в бункер-дозатор, расположенный над камерой смешения.

Формирование топливных брикетов

После подготовки компонентов бункеры обеспечивают загрузку горизонтального смесителя топливной смесью в соотношении 8/2 с добавлением 5 масс.% крахмала, не требующего предварительной подготовки. Полученная смесь подается на вальцовый пресс, где осуществляется формирование топливных брикетов в форме «таблетки» диаметром 30 мм и высотой 15 мм. Далее готовые брикеты по сборочному лотку под действием гравитационных сил поступают в ящик для отгрузки.

Вспомогательные процессы

Вспомогательное оборудование предназначено для создания условий, необходимых для непрерывного и стабильного изготовления топливных брикетов. Для подачи и генерации горячего воздуха предлагается использовать

теплогенерирующую установку, работающую на твердом топливе. Электроснабжение всего комплекса будет обеспечиваться дизельной генераторной установкой (ДГУ), размещенной на шасси и перемещаемой совместно с подвижной платформой. Для оперативного управления всеми технологическими процессами предусматривается установка электронного шкафа управления.

Заключение

В работе рассмотрена возможность утилизации угольного шлака совместно с растительной биомассой с получением брикетированного топлива, а также предложено технологическое решение в виде мобильного перерабатывающего комплекса. Проведенный анализ показал, что исходный угольный шлак характеризуется высокой зольностью (около 50%) и сравнительно низкой теплотворной способностью (около 13 МДж/кг), что ограничивает его прямое энергетическое использование.

Установлено, что введение растительных компонентов (лузга подсолнечника, пшеничная солома, древесные опилки) существенно повышает теплотворные характеристики топливных смесей. Наиболее эффективными оказались композиции на основе древесных опилок, для которых при массовом соотношении 8/2 (биомасса/шлак) достигнуты максимальные значения теплоты сгорания (19,5 МДж/кг) при одновременном снижении зольности. Полученные результаты подтверждают целесообразность формирования композитных топлив для повышения энергетической ценности низкосортных углеродсодержащих отходов.

Предложенная технологическая схема производства брикетированного топлива реализована в формате мобильной установки на базе автосамосвала КАМАЗ-6520, что обеспечивает возможность переработки сырья непосредственно в местах его накопления. Такой подход позволяет снизить транспортные издержки, повысить степень вовлечения отходов в хозяйственный оборот и расширить область применения технологии, включая труднодоступные и удаленные объекты.

В рамках дальнейших научных исследований целесообразно провести детальный анализ долгосрочной экологической эффективности предлагаемой технологии, включая оценку снижения выбросов парниковых газов и восстановления биоразнообразия на рекультивируемых территориях.



Список литературы / References

1. Куманеева М.К., Шевелева О.Б., Зонов О.В. Управление отходами производства в угольной отрасли: ресурсно-экологический аспект. *Уголь*. 2024;(2):74–78. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-2-74-78>
Kumaneeva M.K., Sheveleva O.B., Zonova O.V. Production waste management in the coal industry: resource-ecological aspect. *Ugol'*. 2024;(2):74–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-2-74-78>
2. Зеньков И.В., Конде А.С., Беднаж В.А., Юронен Ю.П., Карачева Г.А., Маглинец Ю.А. и др. Оценка экологического ущерба от добычи угля в границах Донецкого угольного бассейна в регионах России по данным дистанционного зондирования земли из космоса. *Уголь*. 2026;(2):95–98. Режим доступа: <https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2602095.pdf> (дата обращения: 21.03.2026).
Zenkov I.V., Conde A.S., Bednazh V.A., Yuronen Yu.P., Karacheva G.A., Maglinets Yu.A. et al. Assessment of environmental damage caused by coal mining within the Donetsk coal basin within the territory of the Russian Federation based on earth's remote sensing data. *Ugol'*. 2026;(2):95–98. (In Russ.) Available at: <https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2602095.pdf> (accessed: 21.03.2026).
3. Исмагилов З.Р., Журавлева Н.В., Керженцев М.А., Яшник С.А., Матус Е.В., Подъячева О.Ю. и др. Экологические проблемы Кузнецкого угольного бассейна. Научные подходы и технологии для снижения загрязнений окружающей среды. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2018;26(3):241–260. <https://doi.org/10.15372/KhUR20180302>
Ismagilov Z.R., Zhuravleva N.V., Kerzhentsev M.A., Yashnik S.A., Matus E.V., Podyacheva O.Yu. et al. Environmental issues in Kuznetsk coal basin. Scientific approaches and technologies to reduce environmental pollution. *Chemistry for Sustainable Development*. 2018;26(3):221–239. <https://doi.org/10.15372/CSD20180302>
4. Kharko P., Matveeva V. Bottom sediments in a river under acid and alkaline wastewater discharge. *Ecological Engineering and Environmental Technology*. 2021;22(3):35–41. <https://doi.org/10.12912/27197050/134870>
5. Wang H., Cheng S., Wang H., He J., Fan L., Danilov A.S. Synthesis and properties of coal dust suppressant based on microalgae oil extraction. *Fuel*. 2023;338:127273. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127273>
6. Комарова А.Г., Чикишева Т.А., Прокопьев Е.С., Прокопьев С.А. Формы нахождения потенциально ценных компонентов в отходах углеобогащательной фабрики «Краснобродская-Коксовая». *Уголь*. 2023;(9):100–104. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-100-104>
Komarova A.G., Chikisheva T.A., Prokopiev E.S., Prokopiev S.A. Occurrence form of potentially valuable components in the Krasnobrodskaya-Koksovaya coal-processing plant waste. *Ugol'*. 2023;(9):100–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-100-104>
7. Fatkulina A.V., Konokotin D.N., Koroleva L.A., Salov S.M., Samoylenko D.V. Environmental problems in the coal mining industry in Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;867:012087. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012087>
8. Тихонов В.В., Тихомирова А.В., Пилин М.О., Гиниятуллина Ю.Р. Перспективы использования отходов углеобогащения для получения концентратов редких и редкоземельных элементов. *Уголь*. 2025;(12):30–33. Режим доступа: <https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2512030.pdf> (дата обращения: 21.03.2026).
Tikhonov V.V., Tikhomirova A.V., Pilin M.O., Giniyatullina Yu.R. Prospects of using coal preparation waste to produce concentrates of rare and rare earth elements. *Ugol'*. 2025;(12):30–33. (In Russ.) Available at: <https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2512030.pdf> (accessed: 21.03.2026).
9. Strizhenok A.V., Bykova M.V., Korotaeva A.E. Extractive Industries as a Source of Greenhouse Gas Emissions and the Possibility of its Natural Sequestration under the Climatic Conditions of Central and Northern Eurasia. *Journal of Ecological Engineering*. 2024;25(5):43–69. <https://doi.org/10.12911/22998993/185585>
10. Vo T.L., Nash W., Galdo M.D., Rezania M., Crane R., Nezhad M.M., Ferrara L. Coal mining wastes valorization as raw geomaterials in construction: A review with new perspectives. *Journal of Cleaner Production*. 2022;336:130213. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130213>
11. Кутепова Н.А., Мосейкин В.В., Кондакова В.Н., Поспехов Г.Б., Страупник И.А. Особенности инженерно-геологических свойств отходов углеобогащения в связи с их складированием. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(12):77–93. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_12_0_77
Kutepova N.A., Moseykin V.V., Kondakova V.N., Posphehov G.B., Straupnik I.A. Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(12):77–93. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_12_0_77
12. Александрова Т.Н., Кусков В.Б., Афанасова А.В., Кузнецов В.В. Совершенствование технологии флотационного обогащения тонких классов коксующихся углей. *Обогащение руд*. 2021;(3):9–13. <https://doi.org/10.17580/or.2021.03.02>
Alexandrova T.N., Kuskov V.B., Afanasova A.V., Kuznetsov V.V. Improvement of the fine coking coal flotation technology. *Obogashchenie Rud*. 2021;(3):9–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2021.03.02>
13. Верех-Белоусова Е.И., Харламова А.В. Применение отходов угледобычи в гражданском и дорожном строительстве. *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2024;10(3):390–400. <https://doi.org/10.17816/transsyst630095>
Verekh-Belousova E.I., Kharlamova A.V. Application of coal mining waste in civil and road construction. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(3):390–400. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/transsyst630095>
14. Lange I.Yu., Lebedeva Y.A., Kotiukov P.V. A study of water permeability of coal ash and slag to assess the possibility of their use as road pavement layers. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020;13(2):374–378. <https://doi.org/10.37624/IJERT/13.2.2020.374-378>



15. Bonczyk M., Rubin J. The application of coal mining waste to the production of construction ceramics: radiological and mechanical aspects. *Materiales De Construcción*. 2022;72(348):e300. <https://doi.org/10.3989/mc.2022.01822>
16. Lu Z., Wang H., Wang Z., Liu J., Li Y., Xia L., Song S. Critical steps in the restoration of coal mine soils: Microbial-accelerated soil reconstruction. *Journal of Environmental Management*. 2024;368:122200. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122200>
17. Nevskaya M.A., Seleznev S.G., Masloboev V.A., Klyuchnikova E.M., Makarov D.V. Environmental and business challenges presented by mining and mineral processing waste in the Russian Federation. *Minerals*. 2019;9(7):445. <https://doi.org/10.3390/min9070445>
18. Петрова Т.А., Рудзиш Э. Виды мелиорантов для рекультивации техногенно нарушенных территорий горной промышленности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(4):100–112. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_100
Petrova T.A., Rudzish E. Types of soil improvers for reclamation of mining-disturbed lands. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(4):100–112. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_100
19. Лавриненко А.Т., Килин А.Б., Остапова Н.А., Сафронова О.С., Евсеева И.Н., Моршнев Е.А. Реализация инновационных технологий рекультивации переуплотнённых автомобильных отвалов угледобывающих предприятий Хакасии. *Уголь*. 2021;(5):80–83. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-5-80-83>
Lavrinenko A.T., Kilin A.B., Ostapova N.A., Safronova O.S., Evseeva I.N., Morshnev E.A. Implementation of innovative technologies for reclamation of over consolidated dumps of coal mining enterprises in Khakassia. *Ugol'*. 2021;(5):80–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-5-80-83>
20. Чукаева М.А., Матвеева В.А., Сверчков И.П. Комплексная переработка высокоуглеродистых золошлаковых отходов. *Записки Горного института*. 2022;253:97–104. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.5>
Chukaeva M.A., Matveeva V.A., Sverchkov I.P. Complex processing of high-carbon ash and slag waste. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:97–104. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.5>
21. Малышев Д.Ю., Косторева Ж.А., Тамашевич М.С. Влияние древесной биомассы в составе водо-угольных суспензий на их транспортировку и сжигание. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024;335(7):71–80. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4646>
Malyshev D.Yu., Kostoreva Zh.A., Tamashevich M.S. Impact of woody biomass in the composition of coal-water suspensions on their transportation and combustion. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024;335(7):71–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4646>
22. Алдашева Н.Т. Разработка технологии получения водоугольного топлива и определение оптимальности его горения. *Бюллетень науки и практики*. 2021;7(6):124–128. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/67/17>
Aldasheva N.T. Development of technology for production of coal-water fuel and determination of the optimality of its combustion. *Bulletin of Science and Practice*. 2021;7(6):124–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.33619/2414-2948/67/17>
23. Aldasheva N.T. Development of technology for production of coal-water fuel and determination of the optimality of its combustion. *Bulletin of Science and Practice*. 2021;7(6):124–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.33619/2414-2948/67/17>
24. Мурко В.И., Карпенко В.И., Баранова М.П., Бухмиров В.В., Темлянцева Е.Н. Особенности сжигания композиционных водоугольных топлив. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2024;(3):5–12. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2024.3.005-012>
Murko V.I., Karpenok V.I., Baranova M.P., Bukhmirov V.V., Temlyantseva E.N. Features of combustion of composite coal-water fuel. *Vestnik Ivanovo State Power Engineering University*. 2024;(3):5–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2024.3.005-012>
25. Borowsk, G., Hyncar J.J. Utilization of fine coal waste as a fuel briquettes. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2013;33(4):194–204. <https://doi.org/10.1080/19392699.2013.787993>
26. Шевченко Т.В., Устинова Ю.В., Попов А.М., Файрушин Ш.А., Новикова Я.А. Научные и технологические основы производства топливных брикетов из угольных отходов. *Экология и промышленность России*. 2020;24(9):22–26. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-9-22-26>
Shevchenko T.V., Ustinova Yu.V., Popov A.M., Fairushin Sh.A., Novikov Ya.A. Scientific and technological basis for the production of fuel briquettes from coal waste. *Ecology and Industry of Russia*. 2020;24(9):22–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-9-22-26>
27. Guo F., Chen J., He Y., Gardy J., Sun Y., Jiang J., Jiang X. Upgrading agro-pellets by torrefaction and co-pelletization process using food waste as a pellet binder. *Renewable Energy*. 2022;191:213–224. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.012>
28. Кондратьев С.А., Хамзина Т.А. Повышение качества концентрата во флотационном обогащении низкосортного угля. *Записки Горного института*. 2024;265:65–77. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/15852> (дата обращения: 21.03.2026).
Kondratev S.A., Khamzina T.A. Improvement of concentrate quality in flotation of low-rank coal. *Journal of Mining Institute*. 2024;265:65–77. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/15852> (accessed: 21.03.2026).
29. Isemin R., Mikhalev A., Klimov D., Grammelis P., Margaritis N., Kourkoupas D.-S., Zaichenko V. Torrefaction and combustion of pellets made of a mixture of coal sludge and straw. *Fuel*. 2017;210:859–865. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.032>



30. Lv P., Cheng Y., Ma X., Zhao W., Li J., Bai Y. et al. Improving residual carbon recovery from coal gasification fine slag via biomass co-briquetting: Strength, reactivity, and ash behavior. *Chemical Engineering Science*. 2026;321:122778. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.122778>
31. Кусков В.Б., Бажин В.Ю. Использование различных видов углеродсодержащего сырья для получения тепловой энергии. Записки Горного института. 2016;220:582–586. <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.4.582>
Kuskov V.B., Bazhin V.Y. Use of various types of carbon-containing raw materials to produce thermal energy. *Journal of Mining Institute*. 2016;220:582–586. <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.4.582>
32. Khan A.U., Saleem M., Abas M., Ullah Z., Muhammad K., Anjum F. et al. Evaluating coal–Jatropha curcas composite briquettes as sustainable fuel alternatives. *International Journal of Energy Research*. 2025;2025:8847392. <https://doi.org/10.1155/er/8847392>
33. Дука А.А., Пашкевич М.А., Сверчков И.П. Повышение эффективности термической утилизации низкосортного угольного сырья путём внесения добавок карбонатов щелочных металлов. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025;(11-1):113–130. Режим доступа: <https://giab-online.ru/files/Data/2025/11-1/113.pdf> (дата обращения: 21.03.2026).
Duka A.A., Pashkevich M.A., Sverchkov I.P. Efficiency enhancement of thermal utilization of low-grade carbon-containing raw materials by adding alkali metal carbonates. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(11-1):113–130. (In Russ.) Available at: <https://giab-online.ru/files/Data/2025/11-1/113.pdf> (accessed: 21.03.2026).
34. Dong L., Huang X., Ren J., Deng L., Da Y. Thermogravimetric Assessment and differential thermal analysis of blended fuels of coal, biomass and oil sludge. *Applied Sciences*. 2023;13(19):11058. <https://doi.org/10.3390/app131911058>
35. Kijo-Kleczkowska A., Szumera M., Gnatowski A., Sadkowski D. Comparative thermal analysis of coal fuels, biomass, fly ash and polyamide. *Energy*. 2022;258:124840. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124840>

Информация об авторах

Информация об авторах

Пашкевич Мария Анатольевна – доктор технических наук, профессор кафедры геоэкологии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-7020-8219>; e-mail: mpash@spmi.ru

Казаков Егор Сергеевич – студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0007-6873-4448>; e-mail: ekakazakov33@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 18.05.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 14.08.2026

Information about the authors

Mariya A. Pashkevich – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Geoecology, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-7020-8219>; e-mail: mpash@spmi.ru

Egor S. Kazakov – Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0007-6873-4448>; e-mail: ekakazakov33@gmail.com

Article info

Received: 18.05.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 14.08.2026