Геоэкология

DOI: 10.35634/UdSU.2026.70.51.007

УДК 666.952

Р.Р. Романов, М.В. Успенская, Т.Н. Грибиниченко, А.О. Носова

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ, НАКОПЛЕНИЯ И УТИЛИЗАЦИИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ УГОЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ И МИРЕ

Аннотация. В статье рассмотрено современное состояние проблемы образования, накопления и утилизации золошлаковых отходов, формирующихся при сжигании угля на тепловых электростанциях. Показано, что при сохраняющейся значимости угольной генерации в мировой энергетике вопросы обращения с золой-уноса, топливным шлаком и золошлаковыми смесями продолжают носить глобальный характер. На основе анализа научной литературы и актуальных статистических материалов рассмотрены подходы к утилизации золошлаковых отходов в различных странах мира. Выявлены различия между регионами по объемам образования отходов, уровню их вовлечения в хозяйственный оборот и приоритетным направлениям применения. Показано, что в странах с развитой системой обращения с золошлаками основными факторами высокой утилизации выступают: стабильный спрос со стороны строительной отрасли; развитое нормативное регулирование и наличие институтов мониторинга. Отдельное внимание уделено российской практике: механизмы регулирования, системы мониторинга, региональная структура образования золошлаковых отходов. Установлено, что наибольшая концентрация ЗШО на территории РФ характерна для Сибири и части Дальнего Востока, что определяет приоритетность этих регионов для программ утилизации и дальнейшего вовлечения отходов в качестве вторичных материалов.
Ключевые слова: летучая зола, шлак, утилизация, отходы, электростанции, энергетика, уголь.

Для цитирования: Современное состояние проблемы образования, накопления и утилизации золошлаковаых отходов угольной энергетики в России и мире / Р.Р. Романов, М.В. Успенская, Т.Н. Грибиниченко, А.О. Носова // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т. 9. Вып. 3. С. 676 –691. DOI: 10.35634/UdSU.2026.70.51.007.

Введение

На сегодняшний день проблема накопления, складирования и захоронения отходов различных промышленных производств по-прежнему остается актуальной. Промышленность все еще играет центральную роль в экономике

современного общества и является ключевой движущей силой ее роста. Эти процессы неразрывно связаны с воздействием на окружающую среду, которое в последние годы кратно увеличилось, как и возросла общая нагрузка на всех этапах производственного цикла. Все это сопровождается отчуждением земель и переиспользованием ее под нужны производств, потреблением как восполняемых, так и невосполняемых ресурсов [1]. Для выработки тепла и энергии на ТЭЦ и ГРЭС сжигаются ископаемые виды топлива, которые в свою очередь, негативно сказываются на атмосфере за счет выделения диоксида углерода, летучих зол и других соединений, на литосфере за счет осаждения твердых частиц и инфильтрации в почвы, на гидросфере за счет загрязнения и переноса загрязняющих веществ по системам рек и каналов.

Целью настоящей работы является анализ современного состояния проблемы образования, накопления и утилизации золошлаковых отходов в России и мире. Среди задач можно выделить сопоставление международных подходов к утилизации ЗШО, анализ российского подхода и выявление регионов с наибольшей концентрацией золошлаковых отходов для более предметного анализа в дальнейшем.

В мировом энергопотреблении доля угля составляет около 30 %, при этом она может сильно различаться в отдельно взятых регионах. В это же время ощутимые сокращения объемов его использования и переход на экологичные источники по прогнозам должны произойти на рубеже 2040 годов [2–3]. Так или иначе вопросы утилизации отходов, образующихся в процессе сжигания угля, носят глобальный характер и остаются на повестке во многих регионах по всей планете.

Одним из таких отходов принято считать золошлаки (ЗШО). Традиционно их разделяют на золу-унос (75–80 %), топливный шлак (10–20 %) и золошлаковую смесь [4–5], называемую в отдельных источниках «недожогом». Традиционно

в зависимости от применяемых систем золошлакоудаления отвалы делятся на намывные (гидравлические) и насыпные (сухие). Постепенно свободные площади и емкости существующих мест складирования сокращаются, в то время как объемы накопленных золошлаков непрерывно растут.

Международный опыт обращения с ЗШО

США обычно рассматриваются как один из наиболее развитых рынков утилизации золошлаковых отходов, где высокий уровень вовлечения обеспечивается устойчивым спросом со стороны цементной, бетонной и дорожной отраслей [6]. В отчете за 2024 год *American Coal Ash Association* указано, что на территории страны было образовано 63,6 млн. т новых золошлаковых отходов, из которых 46,0 млн. т было вовлечено в полезное использование; тем самым уровень утилизации достиг 72 %, увеличившись по сравнению с 69 % в 2023 году [7]. Наиболее крупным сектором использования оставалось применение золы-уноса в бетонах и цементных производных. Важно отметить, что американская модель в большей степени опирается не на текущий поток образования отходов, а на извлечение ранее складированной золы из золоотвалов и шламонакопителей.

Китай описывается как один из наиболее показательных примеров системного вовлечения золошлаковых отходов в хозяйственный оборот за счет сочетания государственной промышленной политики, технологической переработки и интеграции с потребляющими отраслями [6, 8]. Российские публикации подчеркивают, что в китайской практике значимую роль сыграли нормативное стимулирование, поддержка комплексного использования золы и ориентация на массовое вовлечение отхода в производственные цепочки [9]. В одном из обзоров говорится, что к концу 2023 года на Китай приходилось около 899 млн. т золы-уноса, а уровень переработки оценивался примерно в 80 %; с учетом сохранения очень высокой угольной генерации этот вывод

остается актуальным и сегодня [10]. В действующем законодательстве Китая установлены принципы управления твердыми отходами, включающие снижение объемов образования, ресурсосбережение и безвредную переработку. В соответствии с этими принципами властями КНР последовательно на протяжении нескольких десятилетий издаются положения политики, стандарты и законы, описывающие комплексное использование золы-уноса, несмотря на отсутствие актов непосредственного регулирования обращения [8]. Основной фокус при этом сделан на извлечении ценных компонентов, которые изначально содержатся в небольших количествах, но при правильном подходе значительно влияют на развитие экономики и новых технологий.

Другая страна Восточно-Азиатского региона, Япония, традиционно приводится в качестве примера с полным вовлечением золошлаковых отходов в хозяйственный оборот и устойчивым спросом на них со стороны цементной промышленности [6, 11]. Официальный национальный отчет одной из организаций страны по исследованию выбросов углерода (JCOAL) по итогам 2023 финансового года показывает образование 11,096 млн т каменноугольной золы, из которых вовлечено 10,653 млн т с фактическим уровнем утилизации около 96,0 % [12]. При этом основной фокус вовлечения приходится на использование в строительном секторе. Более того, в данном примере речь идет не только об утилизации, но и о потенциальном дефиците золы как ресурса из-за снижения угольной генерации и изменения состава используемого топлива.

Отдельно стоит отметить Индию, как одного из мировых лидеров по вовлечению золошлаковых отходов в дорожное строительство, производство кирпича и цементных материалов [6, 11]. По данным отчета государственной организации при министерстве энергетики страны (CEA), объем полезного использования золы-уноса в стране вырос с 6,64 млн т в 1996–97 финансовом году до 307,14 млн т в 2024–25 [13–14]. Отдельно указывается, что в 2024–25

финансовом году в Индии было образовано около 340,11 млн т золы, из которых утилизировано 332,63 млн т, то есть порядка 98 %. По структуре применения преобладают инфраструктурные направления: дороги и путепроводы, цементная промышленность, кирпич и плитка, а также обратная засыпка и заполнение выработанного пространства [14].

В публикациях различных авторов Европа обычно описывается как зрелый рынок, где высокий уровень утилизации золошлаковых отходов обеспечивается сочетанием стандартов качества, развитой нормативной среды и встроенности золы-уноса в производственные цепочки [6, 11]. Есть целый ряд стран, которые полностью реализовали свои программы по отказу от угольной генерации и сопутствующих видов деятельности (Австрия, Бельгия, Швеция), помимо которых есть страны, которые пока только заявили о таком намерении (Германия) [9]. К концу 2025 года открытая статистика Европейской ассоциации производителей продуктов сжигания угля (ECOBA) показала, что в строительном секторе стран ЕС используется около 43 % золы-уноса и 46 % донной золы, тогда как котельный шлак практически полностью вовлечен в применение. Вместе с этим существуют и кардинальные отличия от восточноазиатского подхода: ключевой тенденцией здесь становится не рост объемов образования, а сокращение самой ресурсной базы вследствие ускоренного вывода угольной генерации и перехода к управлению ранее накопленными либо импортируемыми минеральными ресурсами. Смешанный подход присущ группе стран Северной Европы, где основной фокус делается на управлении дефицитирующим ресурсом в рамках общей политики экономики замкнутого цикла.

Сводная информация по ключевым регионам с некоторыми дополнительными территориями представлена в табл. 1.

Таблица 1

Объемы образования и утилизации ЗШО в мире

Страна/ регион	**Объемы образования, млн т/год**	**Доля утили-зации, %**	**Сферы применения**
Россия	25-30	~ 25	Дорожное строительство, рекультивация, цемент и бетон, строительные материалы и заполнители
США	63,6	72	Бетон и цемент, гипсовые продукты, дорожные работы, заполнители, стройматериалы
Китай	~ 899	~ 80	Цемент и бетон, кирпич и стеновые изделия, дорожные смеси, извлечение алюминия, галлия, редкоземельных и других ценных элементов
Индия	~ 340,1	~ 96–98	Дороги и эстакады, цемент, кирпич и плитка, засыпка и заполнение выработанного пространства, рекультивация
Япония	~ 11,1	96–100	Цементная промышленность: бетоны, строительные материалы, внешние поставки
ЮАР	~ 25	~ 7–11	Цемент и бетон, дорожные материалы, ремедиация кислых шахтных вод
Австралия	10,2	48	Гражданское и промышленное строительство, бетон и цемент, дорожные основания, рекультивация
Евросоюз	до 40	до 50	Цемент и бетон, дорожное строительство, минеральные наполнители, удобрения и горные работы; замещение природного минерального сырья

Представленный международный опыт показывает, что эффективность утилизации ЗШО определяется не только объемами образования отходов, но и наличием механизмов их вовлечения в хозяйственный оборот. В этой связи особый интерес представляет российская практика, где проблема накопления ЗШО сохраняет масштабный характер и постепенно появляются регулирующие программы и системы мониторинга текущего состояния.

Российская система обращения с ЗШО

В российской научной литературе обращение с золошлаковыми отходами все чаще интерпретируется как межотраслевая задача, затрагивающая

одновременно энергетику, экологическое регулирование, строительство, транспортную инфраструктуру и политику ресурсосбережения [11, 15–16]. Некоторые из авторов прямо отмечают, что существующая нормативно-техническая база обращения с золошлаками остается неполной, а одним из ключевых условий развития отрасли является создание единого центра ответственности федерального уровня [15]. В работах других подчеркивается, что вовлечение золошлаков в хозяйственный оборот должно рассматриваться не изолированно, а через синхронизацию с приоритетами строительной отрасли, сельского хозяйства, природоохранных мероприятий и промышленного производства [11].

На практике функцию такого координационного и информационного узла в последние годы в значительной степени выполняет АРВИС – Национальная ассоциация развития вторичного использования сырья. Именно на данной площадке сформирована и поддерживается информационно-аналитическая панель мониторинга региональных программ по золошлакам, что делает организацию одним из ключевых операторов отраслевого мониторинга. Так, на сегодняшний день уже запущены региональные программы в 17 субъектах РФ; в разработке еще 2 программы (для Магаданской и Омской областей); актуализируются сведения для Республики Саха (Якутия).

Нормативной отправной точкой современного этапа остается распоряжение Правительства РФ от 15.06.2022 № 1557-р, утвердившее Комплексный план по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности, с целевыми ориентирами по вовлечению золошлаков в хозяйственный оборот – 15 % от годового объема образования к 2024 г. и 50 % к 2035 г. По смыслу это хорошо согласуется с выводами авторов о необходимости постоянной координации и выстраивания сквозной системы сопровождения проектов по утилизации золошлаков [11, 15].

Масштаб проблемы ЗШО в России определяется самим размером тепловой энергетики, что также неоднократно подчеркивалось в работах российских авторов, связывающих объемы накопления золошлаков с сохранением высокой доли угольной и в целом тепловой генерации [8–9, 16]. По данным Системного оператора единой энергетической системы (ЕЭС России) и Министерства транспорта, на 1 января 2026 г., установленная мощность электростанций энергосистемы России составляет 270,3 тыс. МВт, а тепловые электростанции по-прежнему сохраняют доминирующее положение в структуре мощности и выработки. Исходя из этого тема утилизации ЗШО остается не побочной региональной, а следствием функционирования крупного парка тепловой генерации, включающего ТЭЦ, ГРЭС и другие ТЭС.

Так, в настоящее время на территории России объемы переработки ЗШО составляют около 27 %, а накопленные объемы уже занимают более 28 тыс. га площади и к 2045 году могут превысить 2 млрд тонн в количественном выражении.

Региональная структура образования и утилизации ЗШО в РФ

Если переходить к территориальной структуре, то в публикациях российских авторов наиболее последовательно выделяется Сибирь как главный макрорегион концентрации золошлаковых отходов (табл. 2), [8, 17–18]. Это объясняется сочетанием нескольких факторов: высокой долей угольной генерации, значительным числом крупных тепловых станций и исторически сложившейся ориентацией ряда регионов на уголь в топливном балансе.

В числе субъектов с наиболее значительными потоками ЗШО традиционно можно выделить Свердловскую область с Рефтинской ГРЭС, на которой количество образующихся ЗШО кратно больше, чем в любом другом регионе страны.

Таблица 2

Объемы накопления и вовлечения ЗШО по субъектам РФ

Субъект РФ	**Объем образования, тыс т/год**	**Доля утилизации, %**
Республика Бурятия	0	0
Республика Хакасия	65	27
Алтайский край	468	34
Забайкальский край	753	2
Красноярский край	1 226	49
Приморский край	2 751	1
Хабаровский край	519	2
Иркутская область	2 101	16
Кемеровская область	1 461	27
Новосибирская область	642	52
Ростовская область	850	15
Рязанская область	67	100
Сахалинская область	89	43
Свердловская область	5 260	12
Томская область	42	100
Тульская область	63	64

Приморский и Красноярский края, а также Иркутская и Кемеровская области также характеризуются повышенными объемами производства золошлаков, которые теоретически могут быть переиспользованы в дальнейшем как вторичные материалы. Если принять во внимание тот факт, что доля утилизации такого сырья является одной из самых низких также в Приморском крае, то после сопоставления материалов публикаций различных авторов и данных мониторинга можно прийти к следующему выводу: наибольшая концентрация ЗШО в России характерна прежде всего для Сибирского макрорегиона и части Дальнего Востока, а значит, именно эти территории должны рассматриваться как приоритетные для региональных программ утилизации, рекультивации и развития высокоемких направлений использования золошлаковых материалов в дальнейшем.

Заключение

Проведенный обзор показывает, что золошлаковые отходы угольной энергетики представляют собой одновременно один из наиболее масштабных видов техногенных отходов и значимый вторичный минеральный ресурс. Мировой опыт свидетельствует о существенной дифференциации подходов к обращению с ЗШО. В США и Индии достигнут высокий уровень вовлечения отходов в хозяйственный оборот за счет устойчивого спроса со стороны строительной и инфраструктурной отраслей. Китай демонстрирует крупномасштабную модель переработки, ориентированную как на массовое использование в строительстве, так и на извлечение ценных компонентов. В Японии и ряде европейских стран золошлаковые отходы уже рассматриваются не только как объект утилизации, но и как ограниченный ресурс, объемы которого сокращаются вслед за уменьшением угольной генерации.

Для России проблема накопления ЗШО сохраняет системный характер из-за значительной роли тепловой генерации в энергетическом балансе страны и неравномерного территориального распределения источников образования отходов. Анализ показал, что наибольшая концентрация золошлаков характерна прежде всего для Сибирского макрорегиона и части Дальнего Востока, где сочетание высокой доли угольной генерации и крупных тепловых электростанций формирует наибольшие потоки. Именно эти территории должны рассматриваться как приоритетные для развития региональных программ утилизации, рекультивации и расширения высокоемких направлений переиспользования подобных материалов. Так или иначе дальнейшее развитие системы обращения с ЗШО в России должно быть связано с совершенствованием нормативно-технической базы, усилением межотраслевой координации, развитием механизмов мониторинга и расширением рынков сбыта золошлаков как вторичного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Промышленная экология: учебник и практикум для вузов / Н.М. Ларионов, А.С. Рябышенков. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2026. 472 с.
2. Курилов К.Ю. Роль и будущее угля в мировой структуре энергопотребления // Уголь, 2025. Т. 1190. №. 3. С. 108–113.
3. Kuźnia M. A review of coal fly ash utilization: Environmental, energy, and material assessment , Energies, 2024, vol. 18, no. 1, p. 52.
4. Горунович С.Б. Использование золошлаков в строительстве в контексте продления сроков эксплуатации золоотвалов ТЭЦ // Новости теплоснабжения, 2016. №. 7. С. 190.
5. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // Проблемы региональной экологии, 2019. №. 4. С. 77–87.
6. Золотова И.Ю. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС // Инновации и инвестиции, 2020. №. 7. С. 123–128.
7. American Coal Ash Association. Coal Ash Recycling Rate Increased in 2024 as Ash Harvesting Continued Rapid Growth. Washington, DC, 2025. URL: https://acaa-usa.org/wp-content/uploads/2025/12/News-Release-Coal-Ash-Production-and-Use-2024.pdf. (Дата обращения: 20.03.2026).
8. Бембеев Д.Б. и др. Утилизация и переработка золошлаковых отходов в контексте реализации целей устойчивого развития: опыт России и Китая // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, 2025. №. 5. С. 117–127.
9. Соловьянов А.А. Золошлаки: ценный ресурс для экономики // Инноватика и экспертиза: научные труды, 2025. № 1(39). С. 70–109.
10. Liu T. et al. Recycling and resource utilization of coal fly ash: a review, Separation and Purification Technology, 2025, vol. 375, p. 133791.
11. Сниккарс П.Н., Золотова И.Ю., Осокин Н.А. Утилизация золошлаков ТЭС как новая кроссотраслевая задача // Энергетическая политика, 2020. №. 7 (149). С. 34–45.
12. Japan Carbon Frontier Organization. National Survey Report on Coal Ash (FY 2023 Results). Tokyo, 2024. URL: https://www.jcoal.or.jp/ashdb/upload/7a428fe019e8d37157155fa5f808316b88ecf2ab.pdf. (Дата обращения: 20.03.2026).

13. Central Electricity Authority. Ash Generation and Utilization at Coal/Lignite Based Grid Connected Thermal Power Stations for the Year 2024–25. New Delhi, 2025. URL: https://cea.nic.in/wp (дата обращения: 20.03.2026).
14. Government of India. Ministry of Environment, Forest and Climate Change. Annual Report 2024–25. New Delhi, 2025. URL: https://moef.gov.in/uploads/pdf-uploads/English_Annual_Report_2024-25.pdf (дата обращения: 20.03.2026).
15. Путилова И.В., Зройчиков Н.А. Обзор нормативно-технической документации в области обращения с золошлаками ТЭС // Теплоэнергетика, 2024. №. 6. С. 3.
16. Ганиева И.А., Шепелев Г.В. Экономические и технические аспекты утилизации золошлаковых отходов // Уголь, 2024. Т. 1179. №. 4. С. 22–26.
17. Подгородецкий Г.С. и др. Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ. Часть 1 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2018. Т. 61. №. 6. С. 439–446.
18. Подгородецкий Г.С. и др. Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ. Часть 2 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2018. Т. 61. №. 7. С. 557–563.

Поступила в редакцию: 12.06.2026

Сведения об авторах

Романов Роман Романович
Аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б. Россия.
E-mail: romanov.rr@edu.spbstu.ru

Успенская Майя Валерьевна
д.т.н., профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б; профессор Лаборатории биогибридных технологий Санкт-Петербургского государственного университета. 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9. Россия.
E-mail: uspenskaya_mv@spbstu.ru

Грибиниченко Татьяна Николаевна
Заместитель директора, преподаватель Центра химической инженерии Университета ИТМО. 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А. Россия.
E-mail: tngribinichenko@itmo.ru

Носова Анастасия Олеговна
к.т.н., ассистент Центра химической инженерии Университета ИТМО. 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А; инженер-исследователь Лаборатории биогибридных технологий Санкт-Петербургского государственного университета. 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9. Россия.
E-mail: aonosova@itmo.ru

R.R. Romanov, M.V. Uspenskaya, T.N. Gribinickenko, A.O. Nosova

CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF GENERATION, ACCUMULATION, AND UTILIZATION OF ASH AND SLAG WASTE FROM COAL POWER ENGINEERING IN RUSSIA AND THE WORLD

Annotation. The article examines the current state of the problem of generation, accumulation, and utilization of ash and slag waste formed during coal combustion at thermal power plants. It is shown that, with the continuing importance of coal power generation in the global energy sector, the issues of handling fly ash, fuel slag, and ash and slag mixtures continue to be global in nature. Based on an analysis of scientific literature and current statistical materials, approaches to the utilization of ash and slag waste in various countries of the world are considered. Differences between regions in terms of waste generation volumes, the level of their involvement in economic turnover, and priority areas of application are identified. It is shown that in countries with a developed ash and slag management system, the main factors of high utilization are stable demand from the construction industry, developed regulatory framework, and the presence of monitoring institutions. Separate attention is paid to Russian practice: regulatory mechanisms, monitoring systems, and the regional structure of ash and slag waste generation. It has been established that the greatest concentration of ASW on the territory of the Russian Federation is characteristic of Siberia and part of the Far East, which determines the priority of these regions for utilization programs and further involvement of waste as secondary materials.
Keywords: fly ash, slag, utilization, waste, power plants, energy, coal.

For citation: Romanov R.R., Uspenskaya M.V., Gribinichenko T.N., Nosova A.O. [Current state of the problem of generation, accumulation, and utilization of ash and slag waste from coal power engineering in Russia and the world]. *Upravlenie tekhnosferoi*, 2026, vol. 9, issue 3, pp. 676 –691. DOI: 10.35634/UdSU.2026.70.51.007.

REFERENCES

1. Larionov N.M., Ryabyshenkov A.S. *Promyshlennaya ekologiya: uchebnik i praktikum dlya vuzov* [Industrial ecology: textbook and practical course for universities]. 4th ed. Moscow, Yurait Publ., 2026, 472 p. Available at: https://www.urait.ru/bcode/582687/p.2. (Accessed: 15.03.2026). (In Russ.).

2. Kurilov K.Yu. *Rol' i budushchee uglya v mirovoi strukture energopotrebleniya* [The role and future of coal in the global energy consumption structure]. *Ugol'* [Russian Coal Journal], 2025. no. 3, pp. 108–113. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-108-113. (In Russ.).
3. Kuźnia M. A review of coal fly ash utilization: environmental, energy, and material assessment. Energies, 2024, vol. 18, no. 1. art. 52. DOI: 10.3390/en18010052.
4. Gorunovich S.B. *Ispol'zovanie zoloshlakov v stroitel'stve v kontekste prodleniya srokov ekspluatatsii zolootvalov TETs* [The use of ash and slag waste in construction in the context of extending the service life of TPP ash disposal sites]. *Novosti teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], 2016, no. 7(190), p. 190. (In Russ.).
5. Pichugin E.A. *Analiticheskii obzor nakoplennogo v Rossiiskoi Federatsii opyta vovlecheniya v khozyaistvennyi oborot zoloshlakovykh otkhodov teploelektrostantsii* [Analytical review of the accumulated experience in the Russian Federation of involving ash and slag waste from thermal power plants in economic circulation]. *Problemy regional'noi ekologii* [Problems of Regional Ecology], 2019, no. 4, pp. 77–87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077. (In Russ.).
6. Zolotova I.Yu. *Benchmarking zarubezhnogo opyta utilizatsii produktov szhiganiya tverdogo topliva ugol'nykh TES* [Benchmarking of foreign experience in utilization of solid fuel combustion products from coal-fired thermal power plants]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and Investments], 2020, no. 7, pp. 123–128. (In Russ.).
7. American Coal Ash Association. Coal Ash Recycling Rate Increased in 2024 as Ash Harvesting Continued Rapid Growth. Washington, DC, 2025. Available at: https://acaa-usa.org/wp-content/uploads/2025/12/News-Release-Coal-Ash-Production-and-Use-2024.pdf. (Accessed: 20.03.2026).
8. Bembeev D.B. et al. *Utilizatsiya i pererabotka zoloshlakovykh otkhodov v kontekste realizatsii tselei ustoichivogo razvitiya: opyt Rossii i Kitaya* [Utilization and processing of ash and slag waste in the context of achieving sustainable development goals: the experience of Russia and China]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya* [Moscow University Geology Bulletin. Series 4. Geology], 2025, no. 5, pp. 117–127. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-5-117-127. (In Russ.).
9. Solov'yanov A.A. *Zoloshlaki: tsennyi resurs dlya ekonomiki* [Ash and slag waste: a valuable resource for the economy]. *Innovatika i ekspertiza: nauchnye trudy* [Innovatics and Expertise: Scientific Works], 2025, no. 1(39), pp. 70–109. (In Russ.).

10. Liu T. et al. Recycling and resource utilization of coal fly ash: a review. Separation and Purification Technology, 2025, vol. 375. art. 133791. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.133791.
11. Snikkars P.N., Zolotova I.Yu., Osokin N.A. *Utilizatsiya zoloshlakov TES kak novaya krossotraslevaya zadacha* [Utilization of ash and slag waste from thermal power plants as a new cross-sectoral task]. *Energeticheskaya politika* [Energy Policy], 2020. no. 7(149), pp. 34–45. DOI: 10.46920/2409-5516_2020_7149_34. (In Russ.).
12. Japan Carbon Frontier Organization. National Survey Report on Coal Ash (FY 2023 Results). Tokyo, 2024. Available at: https://www.jcoal.or.jp/ashdb/upload/7a428fe019e8d3715 7155fa5f808316b88ecf2ab.pdf. (Accessed 20.03.2026).
13. Central Electricity Authority. Ash Generation and Utilization at Coal/Lignite Based Grid Connected Thermal Power Stations for the Year 2024–25. New Delhi, 2025. Available at: https://cea.nic.in/wp-content/uploads/2021/03/Fly_Ash_Report_2024_25_Final_Book_ compressed_1.pdf. (Accessed: 20.03.2026).
14. Government of India. Ministry of Environment, Forest and Climate Change. Annual Report 2024–25. New Delhi, 2025. Available at: https://moef.gov.in/uploads/pdf-uploads/English_Annual_Report_2024-25.pdf. (Accessed 20.03.2026).
15. Putilova I.V., Zroichikov N.A. *Obzor normativno-tekhnicheskoi dokumentatsii v oblasti obrashcheniya s zoloshlakami TES* [Review of regulatory and technical documentation in the field of handling ash and slag waste from thermal power plants]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2024, no. 6, p. 3. DOI: 10.56304/S0040363624060043. (In Russ.).
16. Ganieva I.A., Shepelev G.V. *Ekonomicheskie i tekhnicheskie aspekty utilizatsii zoloshlakovykh otkhodov* [Economic and technical aspects of ash and slag waste utilization]. *Ugol'* [Russian Coal Journal], 2024, no. 4, pp. 22–26. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-22-26. (In Russ.).
17. Podgorodetskii G.S. et al. *Problemy i perspektivy utilizatsii zoloshlakovykh otkhodov TETs. Chast' 1* [Problems and prospects of utilization of ash and slag waste from thermal power plants. Part 1]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*. [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2018, vol. 61, no. 6, pp. 439–446. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-439-446. (In Russ.).
18. Podgorodetskii G.S. et al. *Problemy i perspektivy utilizatsii zoloshlakovykh otkhodov TETs. Chast' 2* [Problems and prospects of utilization of ash and slag waste from thermal power plants. Part 2]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*. [Izvestiya. Ferrous

Metallurgy], 2018, vol. 61, no. 7, pp. 557–563. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-7-557-563. (In Russ.).

Received: 12.06.2026

About the Authors

Romanov Roman Romanovich
Postgraduate Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29B Polytechnicheskaya St., Municipal Okrug Akademicheskoe, St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: romanov.rr@edu.spbstu.ru

Uspenskaya Maya Valerievna
Doctor of Technical Sciences, Professor, Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29B Polytechnicheskaya St., Municipal Okrug Akademicheskoe, St. Petersburg, 195251, Russia; Professor, Laboratory of Biohybrid Technologies, St. Petersburg State University. 7/9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034, Russia.
E-mail: uspenskaya_mv@spbstu.ru

Gribinichenko Tatiana Nikolaevna
Deputy Director, Lecturer, Center for Chemical Engineering, ITMO University. 49A Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197101, Russia.
E-mail: tngribinichenko@itmo.ru

Nosova Anastasiya Olegovna
Candidate of Technical Sciences, Assistant, Center for Chemical Engineering, ITMO University. 49A Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197101, Russia; Research Engineer, Laboratory of Biohybrid Technologies, St. Petersburg State University. 7/9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034, Russia.
E-mail: aonosova@itmo.ru