

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СВОЙСТВ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ АПАТИТСКОЙ ТЭЦ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Е. А. Красавцева^{1,2}, Л. А. Иванова^{2,3}

¹ Центр наноматериаловедения Кольского научного центра РАН (Апатиты, Российская Федерация)

² Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (Апатиты, Российская Федерация)

³ Полярно-альпийский ботанический сад-институт имени Н. А. Аврорина Кольского научного центра РАН (Апатиты, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 19 мая 2025 г.

Для цитирования

Красавцева Е. А., Иванова Л. А. Особенности состава и свойств золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ (Мурманская область) // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 4. — С. 619—627 — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-619-627.

Представлены результаты исследования состава и свойств золошлаковой смеси Апатитской ТЭЦ (Мурманская область). Складированные отходы объектов угольной энергетики оказывают негативное воздействие на компоненты окружающей среды. Отобраны и изучены образцы отходов сжигания угля. Определены инженерно-геологические характеристики и гранулометрический состав проб. Проведен рентгенофазовый анализ образцов. Определен химический состав отходов. Результаты исследования указывают на вероятность пылеобразования на поверхности золошлакоотвала в бесснежный сезон. Установленное содержание редкоземельных элементов предполагает возможность рассмотрения накопленных отходов в качестве техногенного сырья для последующего извлечения ценных компонентов.

Ключевые слова: золошлакоотвалы, инженерно-геологические характеристики, рентгенофазовый анализ, вещественный состав, редкоземельные элементы.

Введение

Угольные электростанции обеспечивают получение свыше 38% электроэнергии в мире. В России эксплуатируются 172 теплоэлектростанции, из них 15 расположены в Арктической зоне Российской Федерации [1; 2].

После сжигания углей образуется огромное количество твердых отходов (золы и шлаков). По разным оценкам, их объем в отвалах теплоэлектростанций на территории страны составляет от 1,4 до 1,8 млрд т, а ежегодный прирост — около 22 млн т [3; 4].

Накопление и складирование золошлаковых отходов в отвалах приводит к серьезным экологическим проблемам в зонах их расположения [3; 5] и в первую очередь к возникновению техногенно

трансформированных ландшафтов. Под золоотвалами крупнейших теплоэлектростанций в России находится свыше 28 тыс. га земли, выведенной из сельскохозяйственного оборота, и каждый год это число увеличивается примерно на 4%. Помимо отчуждения значительных территорий в зонах воздействия золоотвалов формируются неблагоприятные экологические ситуации из-за пылеобразования. Пылевые частицы золы, содержащие разные токсические компоненты и химические вещества, легко переносятся ветровыми потоками на значительные расстояния, выветриваются и выщелачиваются в окружающую среду [5; 6] и оказывают негативное воздействие на растительность, животных и человека [1; 7; 8].

Возможным решением экологических проблем размещения отходов угольных электростанций является их вовлечение в переработку. За рубежом



Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб. Составлено авторами
Fig. 1. Layout of sampling points. Compiled by the authors

значительная часть золошлаков утилизируется: в Японии — свыше 80%, в США — 50%, в Европе — 30% [9]. По другим данным, в США, Индии, Китае и Европе вовлекается в переработку 50%, 60%, 67% и 90% золошлаковых отходов (ЗШО) соответственно [10; 11]. В России 90% золошлаков складировается для последующего хранения [9; 12].

В последние годы разработкой технологий переработки ЗШО активно занимаются ученые по всему миру. Сообщается о производстве ячеистого стекла на основе золы и шлака [13], бетонов [14; 15], о применении золы и шлаков в дорожном строительстве [16]. ЗШО рассматриваются как техногенное сырье для получения геополимеров [3] и цеолитов [17; 18]. Зола сжигания угля находит применение и в сельском хозяйстве [19; 20].

Сорбционные свойства ЗШО, обусловленные высокоразвитой поверхностью и химическим составом, позволяют найти применение отходам и материалам на их основе в области очистки сточных вод [21; 22]. Золошлаки также рассматриваются как техногенное сырье для извлечения редкоземельных и благородных металлов [23—25].

Однако многие разработанные технологии переработки ЗШО не получили широкого распространения, поэтому экологические проблемы хранения отходов остаются актуальными [2]. Разрабатываются почвосмеси и подбираются растения для рекультивации отвалов, оценивается возможность применения водорослей для ускорения восстановления нарушенных земель [5; 26; 27].

Для разработки мероприятий по снижению негативного воздействия и подбора наиболее эффективного способа стабилизации пылящих поверхностей золошлакоотвалов важно определение состава и свойств складированных отходов.

Цель исследования — изучение складированных отходов сжигания угля на отвале Апатитской тепло-

электроцентрали (ТЭЦ) для оценки ресурсного потенциала и экологической опасности.

Материалы и методы

Объекты исследования. Объектом исследования являлась территория складирования золы сжигания угля Апатитской ТЭЦ. Предприятие является крупнейшей угольной электростанцией Мурманской области, работает с 1959 г. [26]. Основным топливом на ТЭЦ является каменный уголь Канско-Ачинского, Кузнецкого и Хакасского месторождений.

За годы работы образовалось значительное количество отходов — свыше 7,5 млн т, а объекты складирования занимают площадь более 40 га [28]. Объекты размещения золошлаковой смеси расположены в черте города Апатиты, на берегу реки Белой [29].

Отбор проб ($n = 20$) проводили на выведенном из эксплуатации в 1990 г. участке. На космоснимке (рис. 1) видно, что за годы консервации золошлакоотвала по периферии наблюдается активное зарастание, в том числе кустарниками и деревьями, однако центральная часть отвала по-прежнему характеризуется практически полным отсутствием растительности. Образцы техногрунта с поверхностного слоя 0—8 см и с глубины 30—38 см отбирали пробоотборником «режущее кольцо» (см. рис. 1).

Определение инженерно-геологических характеристик. Для каждого образца определяли инженерно-геологические характеристики в соответствии со стандартом [30; 31]: влажность, плотность, истинную плотность. Рассчитывали значения пористости и коэффициента пористости. Гранулометрический состав золошлаковой смеси определяли с помощью ударного ситового анализатора АС200-У с использованием сит размером 1,0, 0,5, 0,25, 0,1, 0,05 мм и поддона. Дополнительно проводили анализ размеров частиц в Аналитическом центре Ин-

Таблица 1. Инженерно-геологические характеристики образцов золошлаковых отходов

Table 1. Engineering and geological characteristics of ash and slag waste samples

| Глубина отбора образцов, см | Влажность, % | Плотность, г/см ³ | Истинная плотность, г/см ³ | Пористость, % | Коэффициент пористости |
|-----------------------------|--------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------|------------------------|
| 0—8 | 11,10±1,19 | 0,82±0,14 | 2,44±0,03 | 70,50±4,81 | 2,76±0,61 |
| 30—38 | 16,76±2,89 | 0,85±0,13 | 2,42±0,05 | 70,01±4,24 | 2,64±0,60 |

Примечание. Приведены средние значения ± стандартная ошибка.

Note. The average values of ± standard error are given.

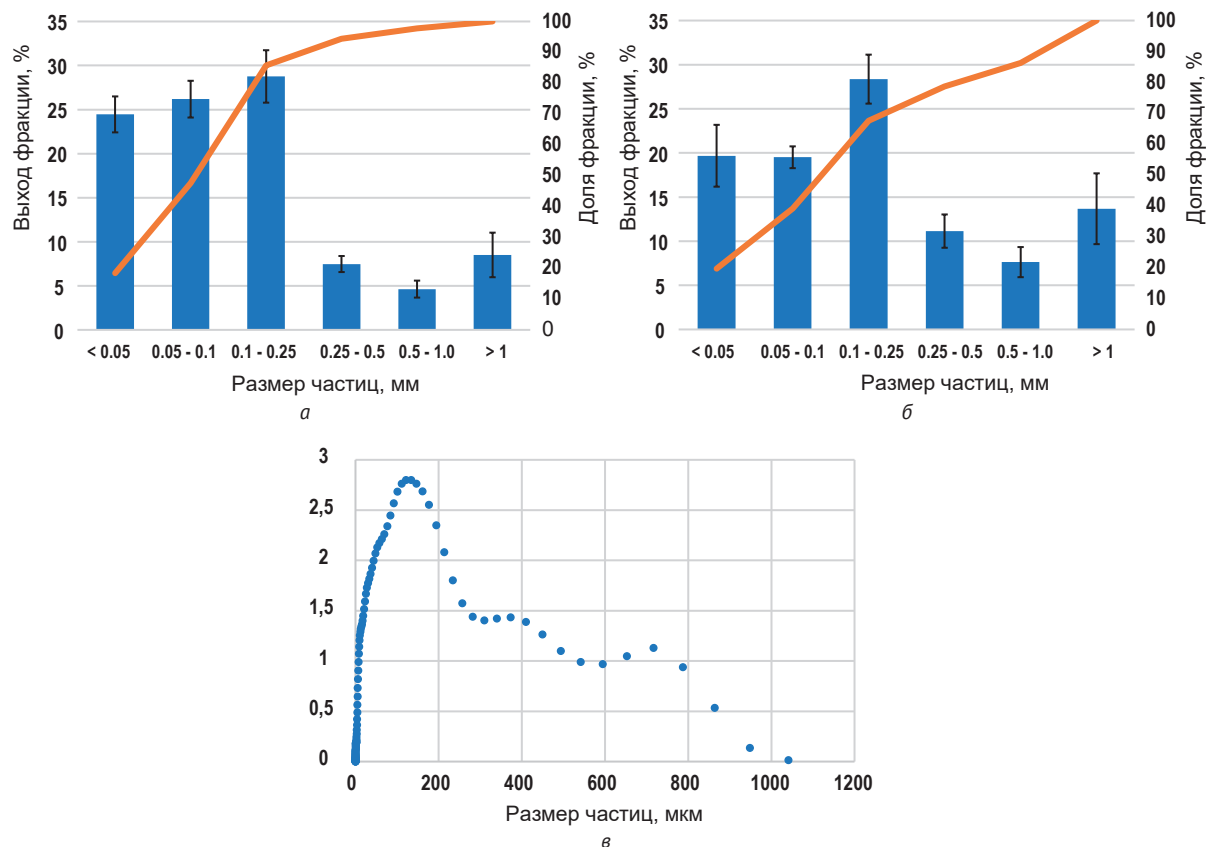


Рис. 2. Гранулометрический состав образцов золошлаковых отходов: а – поверхностный слой, б – слой 30–38 см, в – распределение размеров частиц в одном из образцов поверхностного слоя, определено лазерным анализатором размера частиц. Составлено авторами на основе результатов проведенного анализа

Fig. 2. Granulometric composition of ash and slag waste samples: а – surface layer, б – 30–38 cm layer, в – particle size distribution in one of the surface layer samples, determined by a laser particle size analyzer. Compiled by the authors based on the analysis results

ститута геологии Карельского научного центра РАН на лазерном анализаторе размеров частиц Beckman Coulter LS 13 320XR с модулем ALM и приставкой PIDS для измерения частиц размером от 40 нм до 2000 мкм.

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на дифрактометре Rigaku SmartLab Miniflex II в Центре коллективного пользования Карельского научного центра РАН. Во всех измерениях использовали медный анод, излучение $\text{CuK}\alpha_{1,2}$. Съемку образцов осуществляли при напряжении на рентгеновской трубке 40 кВ, токе 15 мА, углах отражения 2θ 3–70° с шагом 0,02°, скорость съемки 3°/мин.

Управление экспериментом, включая сбор данных, проводили с помощью программного обеспечения PDXL. Перед съемкой образец перетирали в агатовой ступке, полученный порошок помещали в стеклянную кювету. Фазовый анализ выполняли с использованием базы порошковых данных PDF-4. На основании количества совпадающих рефлексов и соотношения их интенсивностей определяли соответствующие соединения из базы данных. Количественный анализ проводили методом Ритвельда с использованием программного комплекса RietveldToThensor, а также международной базы структурных данных ICSD [31].

Химический анализ. Силикатный анализ усредненной пробы ЗШО проведен в Кольском геолого-информационном лабораторном центре (Апатиты). Содержание редкоземельных металлов (РЗМ) определено в Центре коллективного пользования Института проблем промышленной экологии Севера Карельского научного центра РАН. Пробоподготовка заключалась в истирании образцов техногрунта до пудрообразного состояния. Образцы разлагали открытым кислотным способом и анализировали методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре ELAN 9000 (PerkinElmer, США).

Статистическая обработка данных заключалась в расчете средних значений и стандартной ошибки в Microsoft Excel 2016.

Результаты и их обсуждение

Инженерно-геологические характеристики отобранных образцов золошлаков представлены в табл. 1, гранулометрического состава — на рис. 2.

Выявлено достаточно значительное изменение влажности изученных образцов. Опробование проводилось после окончания снеготаяния, поэтому в поверхностном слое среднее содержание влаги составило $11,10 \pm 1,19\%$. В то же время для образцов, отобранных с глубины 30 см, этот показатель был значительно выше — $16,76 \pm 2,89\%$. По величине коэффициента пористости техногрунт относится к рыхлым грунтам [32].

В материале золошлаков преобладают частицы размером менее 0,25 мм (их доля составляет более 70%). Отмечено значительное содержание пылевых частиц (менее 0,05 мм) в образцах поверхностного слоя складированных отходов — $24,45 \pm 2,04\%$. Схожие результаты были получены в исследовании [33].

Анализ результатов определения гранулометрического состава и плотности образцов (в естественном залегании и истинной) указывает на большую долю золы уноса в золошлаковой смеси [5].

В совокупности быстрая потеря влаги при высыхании грунта, легкие частицы (плотность $0,82 \pm 0,14$ г/см³), высокое содержание тонкодисперсного материала — особенности, которые по-

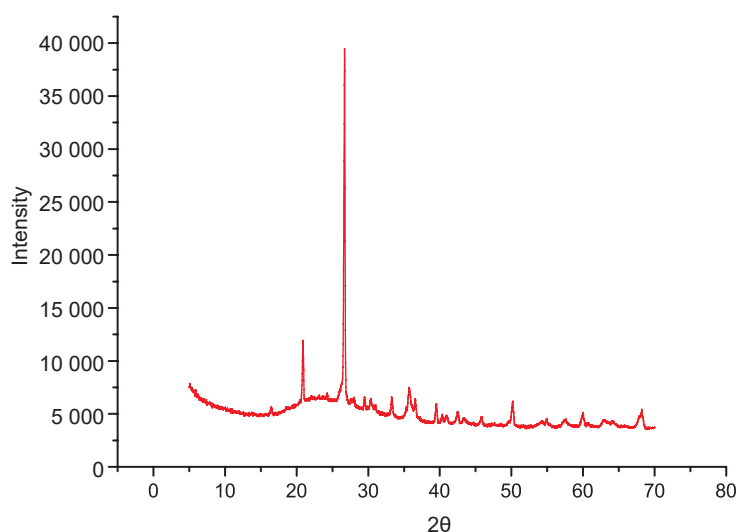


Рис. 3. Дифрактограмма образца золошлаковых отходов. Рефлексы: 1 — кварц, 2 — магнетит, 3 — гематит, 4 — хармунит. Составлено авторами на основе результатов проведенного анализа

Fig. 3. Diffractogram of a sample of ash and slag waste. Reflexes: 1 — quartz, 2 — magnetite, 3 — hematite, 4 — harmunite. Compiled by the authors based on the analysis results

зволяют прогнозировать высокую вероятность пылеобразования на поверхности золошлакоотвала в условиях сухой ветреной погоды после схода снега весной.

Рентгенофазовый анализ. Дифрактограмма усредненного образца поверхностного слоя золошлакоотвала представлена на рис. 3. РФА диагностированы основные минеральные фазы: кварц, магнетит, гематит и хармунит.

По методу Ритвельда рассчитаны средние содержания диагностированных фаз, %: 75,6 — кварц SiO_2 , 16,8 — магнийсодержащий магнетит $(\text{Fe}_{0,92}\text{Mg}_{0,08})(\text{Fe}_{1,08}\text{Ni}_{0,2}\text{Mg}_{0,72})\text{O}_4$, 3,8 — гематит Fe_2O_3 и 3,7 — хармунит CaFe_2O_4 . Высокое содержание кварца в исследуемом материале ЗШО ранее было обнаружено исследователями [33]. Однако в образцах отходов других ТЭЦ могут встречаться как полевые шпаты и карбонаты, так и частицы не сгоревшего угля и рудные минералы. Так, в ЗШО ТЭЦ Хабаровского и Приморского краев рудная минерализация была представлена мельчайшими частицами магнетита, гетита, шпинели, пирротина, мелкими включениями циркона и касситерита [34].

Химический состав усредненной пробы ЗШО представлен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав образцов золошлаковых отходов, масс. %

Table 2. Chemical composition of ash and slag waste samples, mass. %

| SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | CaO | MgO | K_2O | TiO_2 | SO_3 | P_2O_5 | Na_2O | MnO | ППП * |
|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|----------------------|----------------|---------------|------------------------|-----------------------|--------------|-------|
| 51,28 | 23,05 | 7,65 | 3,09 | 2,83 | 1,94 | 1,15 | 0,85 | 0,75 | 0,58 | 0,07 | 6,05 |

* Потери при прокаливании.

Таблица 3. Содержание РЗМ в ЗШО, масс. %

Table 3. REE content in ASW, mass %

| Элемент | Апатитская ТЭЦ | Кумертауская ТЭЦ * | Каширская ГРЭС * | Северская ТЭЦ * |
|---------|----------------|--------------------|------------------|-----------------|
| La | 0,004 | 0,003 | 0,005 | 0,005 |
| Ce | 0,008 | 0,006 | 0,009 | 0,008 |
| Pr | 0,001 | 0,0001 | 0,0003 | 0,0003 |
| Nd | 0,004 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Sm | 0,001 | 0,0008 | 0,001 | 0,0005 |
| Eu | 0,0002 | 0,00007 | 0,00008 | 0,00008 |
| Gd | 0,001 | 0,0006 | 0,0004 | 0,0007 |
| Tb | 0,0001 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 |
| Dy | 0,001 | 0,0004 | 0,0005 | 0,0005 |
| Ho | 0,0001 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 |
| Er | 0,0004 | 0,0005 | 0,0004 | 0,0004 |
| Tm | 0,0001 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 |
| Yb | 0,0003 | 0,0003 | 0,0004 | 0,0004 |
| Lu | 0,0001 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0002 |
| Y | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,004 |
| Sc | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 |

* По данным [36].

ТВ химическом составе образца ЗШО преобладают оксиды кремния и алюминия (суммарно более 70 масс. %), отмечены значительные содержания оксидов железа, кальция и магния. Похожие результаты были получены авторами исследований [2; 33; 35] и в принципе согласуются с результатами РФА.

Содержание РЗМ в изученных образцах ЗШО представлено в табл. 3. Дополнительно приведены данные о содержании ценных компонентов в отходах некоторых ТЭЦ по данным [36].

Как видно, содержание РЗМ в образцах ЗШО Апатитской ТЭЦ сопоставимо с отходами других тепловых станций, извлечение ценных компонентов из которых, по мнению авторов, представляет практический интерес. Также следует отметить, что содержание иттрия и лантана в изученных образцах превышает таковые в отходах Читинской ТЭЦ по данным [1]. В этом же исследовании было обнаружено значительное обогащение материала ЗШО РЗМ в сравнении с используемым на станции углем до десяти раз.

Химический состав и свойства определяют дальнейшие направления использования отходов. Так, авторы [2; 35] сделали вывод, что ЗШО Апатитской

ТЭЦ относятся к кислым отходам (содержание CaO + MgO не превышает 12%) и не обладают вяжущими свойствами, однако могут приобретать их при добавлении интенсификаторов твердения. Таким образом, исследователи доказали возможность использования ЗШО в качестве основного сырья для синтеза пористых геополимерных материалов. Необходимость модификации стабилизирующими добавками различной природы была выявлена и в экспериментах, посвященных изучению ЗШО Забайкальского края для установления возможности их утилизации в строительной индустрии [5].

Авторы [22; 33; 37] отобрали и проанализировали образцы ЗШО Апатитской ТЭЦ с целью получения мелиоранта пролонгированного действия. Исследования показали, что золошлаковая смесь может быть использована для сорбции катионных форм биогенных элементов, в частности ионов аммония, а отработанный сорбент — для формирования насыпных грунтов при восстановлении антропогенно нарушенных территорий.

Выводы

Объекты размещения отходов угольных электростанций являются источником негативного воздействия на окружающую среду. В ходе исследования были отобраны и изучены образцы золошлаков, складированных в отвале Апатитской ТЭЦ (Мурманская область). Опробование проводилось методом «режущего кольца» с поверхностного слоя (0—8 см) и глубины 30 см (слой 30—38 см). Определены инженерно-геологические характеристики образцов, гранулометрический и вещественный состав.

1. Анализ результатов ситового анализа указывает на вероятность пылеобразования на поверхности золошлакоотвала в условиях сухой ветреной погоды в бесснежный сезон.

2. Рентгенофазовым анализом диагностированы основные минеральные фазы в материале отходов: кварц, гематит, магнетит, хармунит.

3. Материал ЗШО Апатитской ТЭЦ сопоставим по содержанию ценных компонентов (РЗМ) с другими ЗШО (Кумертауской ТЭЦ, Каширской ГРЭС, Северской ТЭЦ).

Несмотря на возросший в последние годы интерес к ЗШО как техногенному сырью, большая часть разрабатываемых технологий переработки пока не

находит применения на реальных объектах хранения отходов. В этой связи актуальной научно-практической задачей является разработка стратегии минимизации негативного воздействия, оказываемого пылящими золошлакоотвалами на окружающую среду.

Цель наших дальнейших исследований — подбор мелиорантов на основе побочных продуктов регионального селитебного комплекса для ускоренного создания устойчивых фитоценозов на поверхности накопленных отходов в условиях кольской субарктики.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00094 «Экологическое обоснование технологии стабилизации пылящих поверхностей золошлакоотвалов с использованием нетрадиционных мелиорантов на основе осадка сточных вод в условиях Кольского Севера» (<https://rscf.ru/project/25-27-00094/>).

Благодарность

Авторы выражают признательность сотрудникам Карельского научного центра РАН, Геологического института и Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН за проведение аналитических процедур.

Литература/References

1. Шумилова Л. В., Хаткова А. Н., Размахнин К. К., Номоконова Т. Г. Применение наилучших доступных технологий для повышения экологической безопасности при утилизации золошлаковых отходов // Вестн. Забайк. гос. ун-та. — 2022. — Т. 28, № 8. — С. 23—34. — DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-8-23-34. Shumilova L., Khatkova A., Razmakhnin K., Nomokono T. Application of the best available technologies to improve environmental safety in the disposal of ash and slag waste. Transbaikal State University J., 2021, vol. 28, no. 8, pp. 23—34. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-8-23-34. (In Russian).
2. Yatsenko E. A., Smolii V. A., Klimova L. V. et al. Solid Fuel Combustion Wastes at CHPP in the Arctic Zone of the Russian Federation: Utility in Eco-Geopolymer Technology. Glass Ceram., 2022, vol. 78., pp. 374—377. DOI: 10.1007/s10717-022-00414-3.
3. Yatsenko E. A., Goltsman B. M., Novikov Y. V. et al. Study into the Possibilities of Synthesis of Foamed Geopolymer Materials Based on Ash and Slag Waste from Thermal Power Plants of the Russian Federation's Arctic Zone. Glass Phys. Chem., 2022, vol. 48, pp. 429—435. DOI: 10.1134/S1087659622600260.
4. Черенцова А. А., Олесик С. М. Оценка золошлаковых отходов как источник загрязнения окружающей среды и как источник вторичного сырья // Гор. информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). — 2013. — Т. 3. — С. 230—243.

Cherentsova A. A., Olesik S. M. Assessment of ash and slag waste as a source of environmental pollution and as a source of secondary raw materials. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2013, vol. 3, pp. 230—243. (In Russian).

5. Худякова Л. И., Гаркушева Н. М., Котова И. Ю., Палеев П. Л. Возможность рекультивации золоотвалов // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. — 2024. — Т. 335, № 2. — С. 37—47. — DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4196.

Khudyakova L. I., Garkusheva N. M., Kotova I. Yu., Paleev P. L. Possibility of reclamation of ash dumps. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 37—47. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4196. (In Russian).

6. Kravchenko J., Lyrly H. K. The impact of coal-powered electrical plants and coal ash impoundments on the health of residential communities. North Carolina Medical J., 2018, vol. 79, pp. 289—300. DOI: 10.18043/ncm.79.5.289.

7. Пичугин Е. А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // Проблемы регион. экологии. — 2019. — № 4. — С. 77—87. — DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077.

Pichugin E. A. Analytical review of the accumulated experience in the Russian Federation of involving ash and slag waste from thermal power plants in economic circulation. Problems of regional ecology, 2019, no. 4, pp. 77—87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077. (In Russian).

8. Slukovskii Z., Dauvalter V., Guzeva A. et al. The Hydrochemistry and Recent Sediment Geochemistry of Small Lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia. Water, 2020, vol. 12, p. 1130. DOI: 10.3390/w12041130.

9. Бесполитов Д. В., Шаванов Н. Д., Панков П. П. и др. Изучение состава и свойств золошлаковых отходов с целью их утилизации в строительной индустрии // Вопр. соврем. науки и практики / Ун-т им. В. И. Вернадского. — 2022. — № 3 (85). — С. 23—31. — DOI: 10.17277/voprosy.2022.03.pp.023-031.

Bespolotov D. V., Shavanov N. D., Pankov P. P. et al. Study of the composition and properties of ash and slag waste for the purpose of their utilization in the construction industry. Issues of modern science and practice. Vernadsky University, 2022, no. 3 (85), pp. 23—31. DOI: 10.17277/voprosy.2022.03.pp.023-031. (In Russian).

10. Yao Z. T., Ji X. S., Sarker P. K. et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. Earth-Science Reviews, 2015, vol. 141., pp. 105—121. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.11.016.

11. Asl S. M. H., Javadian H., Khavarpour M. et al. Porous adsorbents derived from coal fly ash as cost-effective and environmentally-friendly sources of aluminosilicate for sequestration of aqueous and gaseous pollutants: A review. J. Clean. Prod., 2019, vol. 208, pp. 1131—1147. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.186.

12. Yatsenko E. A., Goltsman B. M., Parshukov V. I. Analysis of suitability of TPP ash-slag waste as materials for hydrogen fuel storage. *Intern. J. Hydrogen Energy*, 2022, vol. 47 (6), pp. 3906—3917. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.272.
13. Smolii V. A., Kosarev A. S., Yatsenko E. A. Ash-Slag Based Cellular Glass for Energy-Efficient 3-Ply Construction Panels. *Glass Ceram.*, 2019, vol. 76, pp. 105—108. DOI: 10.1007/s10717-019-00143-0.
14. Русина В. В., Соколов А. А., Рябинов В. М. Бетон с использованием топливных отходов // *Строительство: новые технологии — новое оборудование*. — 2019. — № 4. — С. 35—37.
15. Rusina V. V., Sokolov A. A., Ryabikov V. M. Concrete using fuel waste. *Construction: new technologies — new equipment*, 2019, no. 4, pp. 35—37. (In Russian).
16. Hanif A., Lu Z., Li Z. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites — A review. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 144, pp. 373—384. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.188.
17. Шубов Л. Я., Скобелев К. Д., Доронкина И. Г., Дубровин К. Е. Об использовании золы и шлаковых отходов ТЭЦ в дорожном строительстве // *Экология. Промышленность. Производство*. — 2020. — № 1 (109). — С. 6—9.
18. Shubov L. Ya., Skobelev K. D., Doronkina I. G., Dubrovinn K. E. On the use of ash and slag waste from thermal power plants in road construction. *Ecology. Industry. Production*, 2020, no. 1 (109), pp. 6—9. (In Russian).
19. Collins F., Rozhkovskaya A., Outram J. G., Millar G. J. A critical review of waste resources, synthesis, and applications for Zeolite LTA. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, vol. 291, p. 109667. DOI: 10.1016/j.micromeso.2019.109667.
20. Muriithi G. N., Petrik L. F., Doucet F. J. Synthesis, characterisation and CO₂ adsorption potential of NaA and NaX zeolites and hydrotalcite obtained from the same coal fly ash. *J. of CO₂ Utilization*, 2020, vol. 36, pp. 220—230. DOI: 10.1016/j.jcou.2019.11.016.
21. Ram L., Masto R. Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments. *Earth-Science Reviews*, 2013, vol. 128, pp. 52—74. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.10.003.
22. Dahiya H. S., Budania Y. K. Prospects of Fly Ash Application in Agriculture: A Global Review. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 2018, vol. 7 (10), pp. 397—409. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.710.043.
23. Mushtaq F., Zahid M., Bhatti I. A. et al. Possible applications of coal fly ash in wastewater treatment. *J. Environ. Manage.*, 2019, vol. 240, pp. 27—46. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.03.054.
24. Горбачева Т. Т., Майоров Д. В. Сорбция ионов аммония из водных растворов на золошлаках ТЭЦ // *Химия твердого топлива*. — 2022. — № 4. — С. 45—53. — DOI: 10.31857/S0023117722040041.
25. Горбачева Т. Т., Майоров Д. В. Sorption of ammonium ions from aqueous solutions on ash and slag of thermal power plants. *Chemistry of solid fuel*, 2022, no. 4, pp. 45—53. DOI: 10.31857/S0023117722040041. (In Russian).
26. Черкасова Е. В., Тихомирова А. В., Черкасова Т. Г., Головачев А. А. Выделение концентратов редких и редкоземельных элементов из золошлаковых отходов Кузбасса // *Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та*. — 2021. — № 2. — С. 35—39.
27. Cherkasova E. V., Tikhomirova A. V., Cherkasova T. G., Golovachev A. A. Isolation of concentrates of rare and rare earth elements from ash and slag waste of Kuzbass. *Bull. of the Kuzbass State Technical University*, 2021, no. 2, pp. 35—39. (In Russian).
28. Таскин А. В. Анализ химического состава золошлаковых отходов ТЭС Дальневосточного региона как техногенных месторождений благородных металлов // *Гор. информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.)*. — 2014. — № S4. — С. 259—271.
29. Taskin A. V. Analysis of the chemical composition of ash and slag waste from thermal power plants in the Far Eastern region as technogenic deposits of precious metals. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2014, no. S4, pp. 259—271. (In Russian).
30. Zhang W., Noble A., Yang X., Honaker R. A Comprehensive Review of Rare Earth Elements Recovery from Coal-Related Materials. *Minerals*, 2020, vol. 10, p. 451. DOI: 10.3390/min10050451.
31. Давыдов Д. А., Редькина В. В. Водоросли и цианопрокариоты на участках самозарастания золошлакоотвалов ТЭЦ города Апатиты (Мурманская область) // *Тр. Карел. науч. центра РАН*. — 2021. — № 1. — С. 51—68.
32. Davydov D. A., Redkina V. V. Algae and cyanoprokaryotes in the areas of self-overgrowing of ash dumps of the thermal power plant of the city of Apatity (Murmansk region). *Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2021, no. 1, pp. 51—68. (In Russian).
33. Maiti D., Prasad B. Revegetation of fly ash — a review with emphasis on grass-legume plantation and bioaccumulation of metals. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 2016, vol. 14 (2), pp. 185—212. DOI: 10.15666/aeer/1402_185212.
34. Кожухова Н. И., Жерновский И. В., Фомина Е. В. Фазаобразование в геополимерных системах на основе золы-уноса Апатитской ТЭЦ // *Строит. материалы*. — 2015. — № 12. — С. 85—88.
35. Kozhukhova N. I., Zhernovsky I. V., Fomina E. V. Phase formation in geopolymer systems based on fly ash from Apatity TPP. *Construction materials*, 2015, no. 12, pp. 85—88. (In Russian).
36. Архипов А. В., Решетняк С. П. Техногенные месторождения. Разработка и формирование: Монография. — Апатиты: КНЦ РАН, 2017. — 175 с.

Arkhipov A. V., Reshetnyak S. P. Technogenic deposits. Development and formation: Monograph. Apatity, KSC RAS, 2017, 175 p. (In Russian).

30. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М.: Стандартиформ, 2016. — 19 с.

GOST 5180-2015. Soils. Laboratory methods for determining physical characteristics. Moscow, Standartinform, 2016, 19 p. (In Russian).

31. Krasavtseva E. A., Maksimova V. V. Specificity of Composition and Properties of Umbozero Loparite Concentration Tailings. J. of Mining Science, 2024, vol. 60, no. 4, pp. 639—648. DOI: 10.1134/S1062739124040100.

32. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. — М.: Стандартиформ, 2020. — 38 с.

GOST 25100-2020. Soils. Classification. Moscow, Standartinform, 2020, 38 p. (In Russian).

33. Mayorov D. V., Gorbacheva T. T. Structural and surface and acid-base properties of thermal power plant ash and slag. Theoretical and Applied Ecology, 2022, no. 4, pp. 104—110. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-4-104-110.

34. Александрова Т. Н., Прохоров К. В. Комплексная переработка золошлаковых отходов как фактор обеспечения экологической без-

опасности // Гор. информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). — 2012. — Т. 10. — С. 283—288.

Aleksandrova T. N., Prokhorov K. V. Complex processing of ash and slag waste as a factor in ensuring environmental safety. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2012, vol. 10, pp. 283—288. (In Russian).

35. Ксенофонтов Б., Буторова И., Козодаев А. и др. Проблемы токсичности золошлаковых отходов // Экология и пром-сть России. — 2017. — Т. 21, № 2. — С. 4—9. — DOI: 10.18412/1816-0395-2017-2-4-9.

Ksenofontov B., Butorova I., Kozodaev A. et al. Problems of ash and slag waste toxicity. Ecology and Industry of Russia, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 4—9. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-2-4-9. (In Russian).

36. Yatsenko E. A., Goltsman B. M., Trofimov S. V. et al. Processing of Ash and Slag Waste from Coal Fuel Combustion at CHPPs in the Arctic Zone of Russia with Obtaining Porous Geopolymer Materials. Therm. Eng., 2022, vol. 69, pp. 615—623. DOI: 10.1134/S0040601522070102.

37. Gorbacheva T. T., Mayorov D. V. TPP Ashes as a Sorbent for Waste Water Purification from Ammonium Ions. Therm. Eng., 2022, vol. 69, pp. 210—216. DOI: 10.1134/S0040363622030043.

Информация об авторах

Красавцева Евгения Андреевна, кандидат технических наук, научный сотрудник, Центр наноматериаловедения Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты, мкр. Академгородок, д. 4а), научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а), e-mail: e.krasavtseva@ksc.ru.

Иванова Любовь Андреевна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина Кольского научного центра РАН (184256, Россия, Кировск, ул. Ботанический сад), ведущий научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а).

PECULIARITIES OF THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF ASH AND SLAG WASTE FROM THE APATITY THERMAL POWER PLANT, MURMANSK REGION

Krasavtseva, E. A.^{1,2}, Ivanova, L. A.^{2,3}

¹ Center for Nanomaterials Science, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Apatity, Russian Federation)

² Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Apatity, Russian Federation)

³ Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N. A. Avrorin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Kirovsk, Russian Federation)

The article was received on May 19, 2025

For citing

Krasavtseva E. A., Ivanova L. A. Peculiarities of the composition and properties of ash and slag waste from the Apatity Thermal Power Plant, Murmansk Region. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 4, pp. 619—627. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-619-627. (In Russian).

Abstract

The stored waste of coal power facilities has a negative impact on the components of the environment. The article presents the results of the study of the composition and properties of the ash and slag mixture of the Apatity TPP, Murmansk Region. Samples of coal combustion waste were collected and studied. Engineering and geological characteristics and granulometric composition of the samples were determined. X-ray phase analysis of the samples was carried out. The chemical composition of the waste was determined. The results of the study indicate the likelihood of dust formation on the surface of the ash and slag dump during the snowless season. The established content of rare earth elements suggests the possibility of considering the accumulated waste as a technogenic raw material for the subsequent extraction of valuable components.

Keywords: *ash dumps, engineering-geological characteristics, X-ray phase analysis, material composition, rare earth elements.*

Funding

The study was carried out with the support of the Russian Science Foundation grant No. 25-27-00094 “Ecological substantiation of the technology for stabilizing dusty surfaces of ash dumps using non-traditional ameliorants based on sewage sludge in the conditions of the Kola North”, <https://rscf.ru/project/25-27-00094/>.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the staff of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, the Geological Institute and the Institute of Industrial Ecology of the North of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences for conducting analytical procedures.

Information about the authors

Krasavtseva, Evgeniya Andreevna, PhD of Engineering Science, Researcher, Center for Nanomaterials Science, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Industrial Ecology Problems of the North (14a, Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209), Researcher, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (4a, Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209), e-mail: e.krasavtseva@ksc.ru.

Ivanova, Lyubov Andreevna, Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N. A. Avrorin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (184256, Russia, Kirovsk, Botanichesky Sad St.), Leading Researcher, Institute of Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (4a, Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209).

© Krasavtseva E. A., Ivanova L. A., 2025