

УДК 631.618
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4196
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Возможность рекультивации золоотвалов

Л.И. Худякова[✉], Н.М. Гаркушева, И.Ю. Котова, П.Л. Палеев

*Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, г. Улан-Удэ*

[✉]lkhud@binm.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 г. Улан-Удэ, которые негативно воздействуют на окружающую среду. Перспективным способом устранения экологического вреда является биологическая рекультивация золоотвалов, результат которой проявляется в озеленении отвалов и снижении дефляции золы. **Цель:** изучить золошлаковые отходы теплоэлектроцентралей г. Улан-Удэ и установить возможность рекультивации золоотвалов для снижения негативного воздействия на окружающую среду. **Объекты:** золошлаковые отходы из золоотвалов ТЭЦ-1 (ЗШО-1) и ТЭЦ-2 (ЗШО-2) г. Улан-Удэ. **Методы:** химический, рентгенофазовый, гранулометрический, микроскопический методы анализа. **Результаты.** Определен химический, минералогический и зерновой составы золошлаковых отходов теплоэлектроцентралей. Установлено, что они имеют высокое содержание кремния, алюминия и низкое – кальция, магния. Отмечено, что золошлаки содержат стекловидные, кристаллические и органические составляющие. В отходах в большей степени присутствует кристаллическая фаза, содержащая кремнезем, муллит, гематит, магнетит и в меньшей – стеклофаза, представленная в основном минералами группы ортоклаза. По гранулометрическому составу в отходах ТЭЦ-1 преобладает более мелкая фракция по сравнению с ТЭЦ-2. Проведены лабораторные исследования почвенных смесей на основе золошлаковых отходов и местных мелиорантов (осадки сточных вод, лигнин и куриный помет). Определено оптимальное соотношение компонентов почвогрунта, равное 4:1:1:1. Выявлено благоприятное воздействие осадков сточных вод, а также негативное влияние высоких доз птичьего помета на рост и развитие растений. Отмечено, что чистые золошлаки ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 без внесения мелиорантов могут выступать в качестве самостоятельного субстрата для многолетних трав.

Ключевые слова: золоотвалы, золошлаковые отходы, рекультивация, фитомелиорация, многолетние травы

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук № АААА-А21-121011890003-4 с использованием приборов и оборудования Центров коллективного пользования Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук и Института общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения Российской академии наук.

Для цитирования: Возможность рекультивации золоотвалов / Л.И. Худякова, Н.М. Гаркушева, И.Ю. Котова, П.Л. Палеев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 37–47. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4196

UDC 631.618
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4196

Possibility of reclamation of ash dumps

L.I. Khudyakova[✉], N.M. Garkusheva, I.Yu. Kotova, P.L. Paleev

*Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, Russian Federation*

[✉]lkhud@binm.ru

Abstract. Relevance. The need to dispose ash and slag waste from CHPP-1 and CHPP-2 in Ulan-Ude, which have a negative impact on the environment. A promising way to eliminate environmental damage is the biological reclamation of ash dumps. Its result is manifested in greening dumps and reducing ash deflation. **Aim.** To study ash and slag wastes from thermal power plants in Ulan-Ude and establish the possibility of reclamation of ash dumps to reduce the negative impact on the environment. **Objects.** Ash and slag wastes from the ash dumps of CHPP-1 (ASW-1) and CHPP-2 (ASW-2) in Ulan-Ude. **Methods.** Chemical, X-ray phase, granulometric, microscopic methods of analysis. **Results.** The authors have determined chemical, mineralogical and grain compositions of ash and slag wastes from thermal power plants. It was established that they have a high content of silicon, aluminum and a low content of calcium and magnesium. Ash and slag contain vitreous, crystalline and organic components. In the waste, to a greater extent, there is a crystalline phase containing silica, mullite, hematite, magnetite and, to a lesser extent, a glass phase, represented mainly by minerals of the orthoclase group. In terms of granulometric composition, the waste from CHPP-1 is dominated by a finer fraction compared to CHPP-2. Laboratory studies of soil mixtures based on ash and slag waste and local ameliorants (sewage sludge, lignin and chicken manure) were carried out. The optimal ratio of soil components was determined, equal to 4:1:1:1. A beneficial effect of sewage sludge was revealed, as well as a negative effect of high doses of bird droppings on growth and development of plants. Pure ash and slag from CHPP-1 and CHPP-2 without introduction of ameliorants can act as an independent substrate for perennial grasses.

Keywords: ash dumps, ash and slag waste, reclamation, phytomelioration, perennial grasses

Acknowledgements: The research was carried out as part of state programs of Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences no. AAAA- A21-121011890003-4 using equipment of the Center of collective usage Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Khudyakova L.I., Garkusheva N.M., Kotova I.Yu., Paleev P.L. Possibility of reclamation of ash dumps. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 37–47. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4196

Введение

Угольная энергетика есть и будет одним из основных поставщиком электроэнергии в мире. Однако ее функционирование сопровождается образованием побочных продуктов (золы, шлака), негативно воздействующих на окружающую среду. Накопление огромного количества золошлаковых отходов стало глобальной проблемой мировой цивилизации. На это влияет и то, что золошлакоотвалы расположены преимущественно в границах муниципальных образований и занимают огромные территории. Находясь в них, отходы теплоэнергетики представляют серьезную угрозу не только для окружающей среды, но и для человека [1–6]. Одной из них является пыление отвалов. Частицы золошлаковых отходов потоками воздушных масс переносятся на дальние расстояния, загрязняя территории площадью в несколько сот квадратных километров, ухудшая их санитарное состояние. Они не только осаждаются на почвенно-растительном покрове, но и легко проникают в дыхательную систему животных и человека, вызывая заболевания органов дыхания [7–9]. В связи с этим утилизация золошлаковых отходов является актуальной задачей.

В научной литературе встречается достаточно много работ по применению отходов тепловых электростанций в различных отраслях промышленности [10–18], а также в качестве мелиорантов и удобрений в сельском хозяйстве, в лесном хозяйстве, для ремедиации почв, рекультивации земель и т. д. [19–23]. Однако степень их практического использования на сегодняшний день остается

на достаточно низком уровне. Они продолжают накапливаться в золоотвалах, что обуславливает необходимость снижения негативного воздействия на окружающую среду. Наиболее актуальным и перспективным способом устранения экологического вреда является рекультивация золоотвалов [24, 25]. Она включает в себя техническую и биологическую составляющие и выполняет разные функции.

Техническая рекультивация заключается в планировке и создании плодородного слоя почвы на поверхности золы [26]. Наиболее актуальной является биологическая рекультивация, результат которой проявляется в озеленении отвалов и снижении дефляции золы [27, 28]. Это достигается с помощью растительной мелиорации с использованием подобранных фитомелиорантов [29–31]. Выбор вида перспективных растений зависит как от природно-климатических условий в зоне нахождения золоотвалов, так и от характеристик самих растений, позволяющих произрастать на данной местности. Кроме того, учитывается возможность создания самоподдерживающихся растительных сообществ, не требующих дополнительного ухода и затрат, таких как дикорастущие виды растений [32, 33]. В качестве фитомелиорантов предлагается использовать культурные многолетние злаковые, бобовые травы, а также их смеси [34–36]. Например, эспарцет, пырей, кострец, колумбова трава имеют высокие показатели роста на золоотвалах, а смесь первых трех трав – наилучшие показатели биомассы [37].

Поскольку золоотвалы малопригодны для создания устойчивой растительности с целью улучшения их физико-химических свойств и возможностей для произрастания растений в субстрат вводят различные добавки. Их смешивают с почвенным слоем на глубину 5–10 см, вносят органические удобрения, вермикулит, биоуголь, осадки сточных вод и т. д. [38–40]. Так, кора хвойных деревьев, используемая при рекультивации, оказывает заметное влияние на флористическое своеобразие видов, предпочитающих местообитания с низкими значениями pH [41]. Добавка навоза в золошлаковые отходы влияет на рост корневой системы и способствует высокому выходу биомассы растений [42]. Смесь отходов с активным илом образует плодородный гумусовый слой для произрастания растений, корни которых на второй год после посева формируют плотную дернину, предотвращающую пыление отвалов [43].

Таким образом, вид используемых минеральных и органических субстратов и их качество являются основными факторами, влияющими на долгосрочное разнообразие растений, произрастающих на золоотвалах. Поэтому поиск новых направлений их рекультивации является актуальной задачей, требующей скорейшего решения.

В связи с этим целью настоящего исследования является изучение золошлаковых отходов теплоэлектростанции г. Улан-Удэ и установление возможности рекультивации золоотвалов для снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовались золошлаковые отходы (ЗШО) из золоотвалов ТЭЦ-1 (ЗШО-1) и ТЭЦ-2 (ЗШО-2) г. Улан-Удэ.

Определение химического состава выполнено с использованием фотометрического, титриметрического, гравиметрического, пламенно-фотометрического, атомно-адсорбционного и атомно-эмиссионного спектральных методов на спектрофотометре UNICO 1201 (США), анализаторе эмиссионных спектров «МАЭС» (Россия) и атомно-абсорбционном спектрофотометре SOLAAR-6M (Англия) с соответствующим программным обеспечением.

Рентгенофазовый анализ проводился на порошковом автоматическом дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker AXS (Германия) с соответствующим программным обеспечением со скоростью угломера 2° в минуту в интервале от 10 до 70° .

Для микроскопического анализа применялся сканирующий электронный микроскоп Hitachi TM-1000 (Япония).

При выполнении гранулометрического анализа использовался стандартный набор сит.

Результаты исследования и обсуждение

Сжигая уголь и вырабатывая тепловую энергию, теплоэлектростанции образуют большое количество отходов в виде летучей золы (зола уноса) и топливного шлака, которые при совместном мокром удалении транспортируются в золоотвалы. Каждая из ТЭЦ имеет свой золоотвал (рис. 1), и находящиеся там отходы различаются по своим свойствам.



Рис. 1. Золоотвал ТЭЦ-1 г. Улан-Удэ
Fig. 1. Ash dump of CHPP-1, Ulan-Ude

Золошлаки содержат стекловидные, кристаллические и органические составляющие, которые можно зафиксировать с помощью микроскопа. Количество их зависит от вида угля, технологических параметров его сжигания и удаления образуемых отходов.

Стекловидная составляющая является продуктом неполного сжигания угля, имеет четыре вида, различающихся цветом (бесцветная, желтая, бурая, черная). Она представлена преимущественно ферроалюмосиликатной стеклофазой, в которой основные стеклообразующие компоненты Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 составляют до 80–90 % [44]. Форма частиц данной фазы зависит от их размера. При размере до 10 мкм форма в виде шара, эллипса, капли, лепешки; при размере свыше 10 мкм – неправильная угловатая форма. Кроме того, встречаются частицы пластинчатой и нитевидной формы.

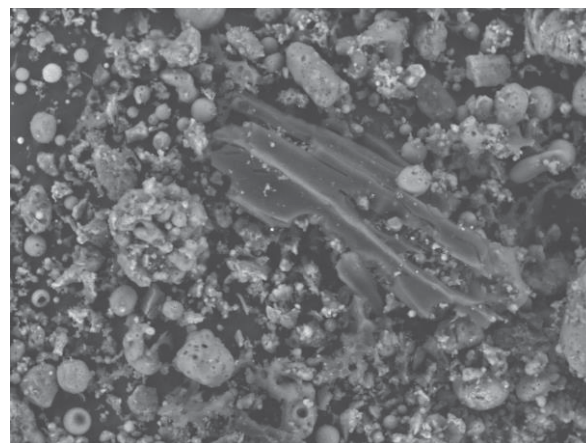
В состав кристаллической фазы входят как первичные минералы угля (кварц, муллит, гематит, магнетит), так и образовавшиеся в процессе его сжигания (силикаты, алюминаты и алюмоферриты кальция) [44].

Органическая составляющая представлена негоревшими частицами угля остроугольной формы с неровными краями, преобразованными в топке в полукокс и кокс [44]. Кроме того, имеются пористые частицы аморфизированного глинистого вещества неправильной формы. Встречаются неоднородные агрегаты, образованные в результате спекания множества мелких зерен.

Частицы всех видов фаз присутствуют в составе золошлаковых отходов теплоэлектростанций г. Улан-Удэ (рис. 2, 3).

Наличие различных фаз подтверждается результатами рентгенофазового анализа (РФА) (рис. 4).

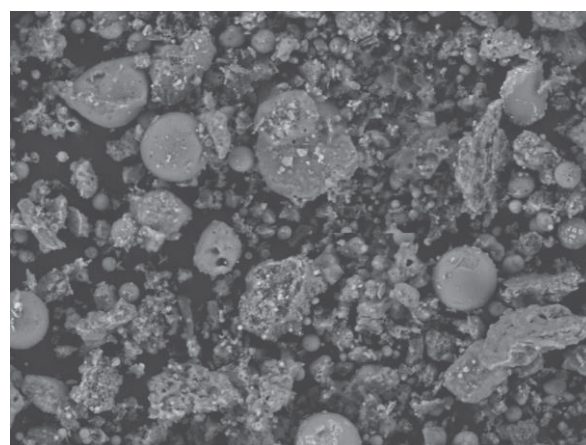
По результатам РФА на рентгенограммах золошлаковых отходов присутствуют интенсивные пики кварца. Кроме того, зафиксированы рефлексы небольшой интенсивности, относящиеся к соединениям железа (гематит и магнетит), муллиту, а также минералов группы ортоклаза. Надо отметить, что содержание фаз с железом немного больше в образцах ЗШО ТЭЦ-1.



TM-1000_0172 2023.04.07 L D2.0 x1.0k 100 um

Рис. 2. Микрофотография золошлаковых отходов ТЭЦ-1

Fig. 2. Microphotographs of ash and slag waste CHPP-1



TM-1000_0176 2023.04.07 L D2.0 x800 100 um

Рис. 3. Микрофотография золошлаковых отходов ТЭЦ-2

Fig. 3. Microphotographs of ash and slag waste CHPP-2

Как видно из представленных данных, минералогический состав ЗШО обеих ТЭЦ практически идентичен. В основном преобладает кристаллическая фаза, содержащая кремнезем, муллит, гематит, магнетит. В меньшем количестве наблюдается ферроалюмосиликатная стеклофаза.

Химический состав золошлаковых отходов теплоэлектростанций г. Улан-Удэ представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав золошлаковых отходов

Table 1. Chemical composition of ash and slag waste

Отходы Waste	Содержание основных компонентов, масс. % Content of the main components, wt %										
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ппп LOI
ЗШО ТЭЦ-1/ASW CHPP-1	52,9	0,92	21,4	8,1	0,11	1,03	2,51	0,52	1,56	0,46	10,54
ЗШО ТЭЦ-2/ASW CHPP-2	53,9	1,03	23,4	4,65	0,07	1,12	3,22	0,53	1,56	0,64	9,96

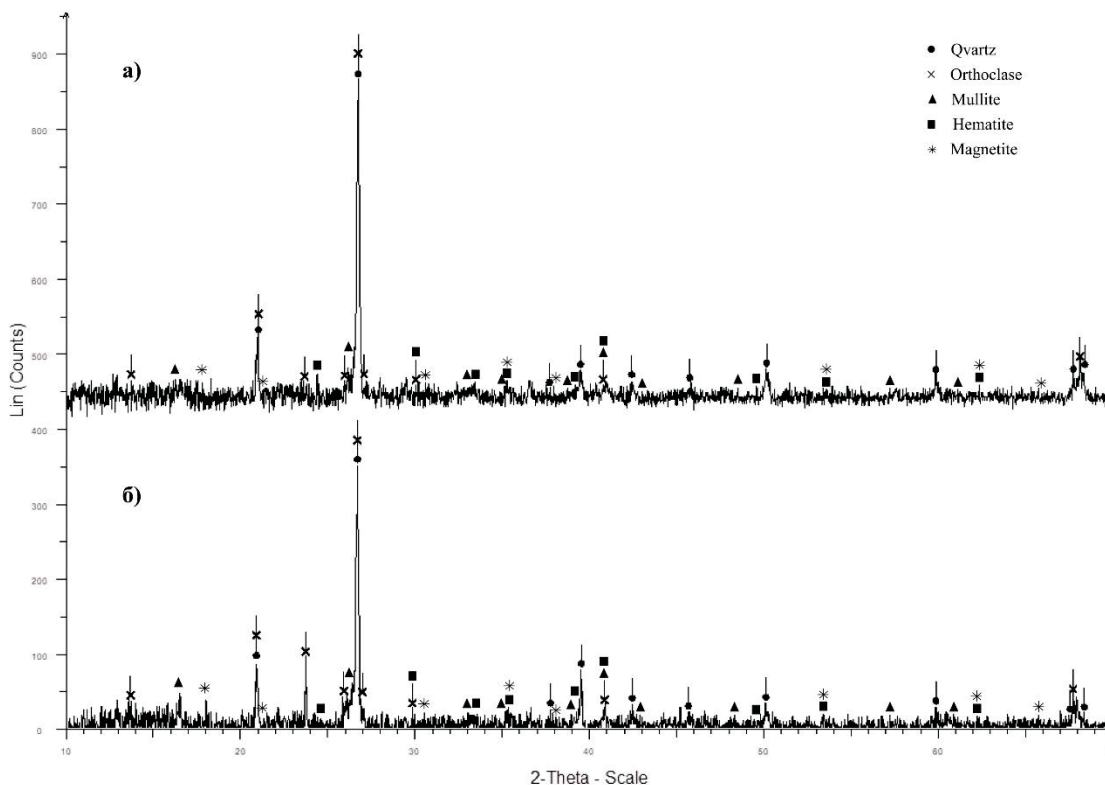


Рис. 4. Рентгенограммы золошлаковых отходов ТЭЦ-1 (а) и ТЭЦ-2 (б)
Fig. 4. X-ray diffraction pattern of ash and slag waste CHPP-1 (a) and CHPP-2 (б)

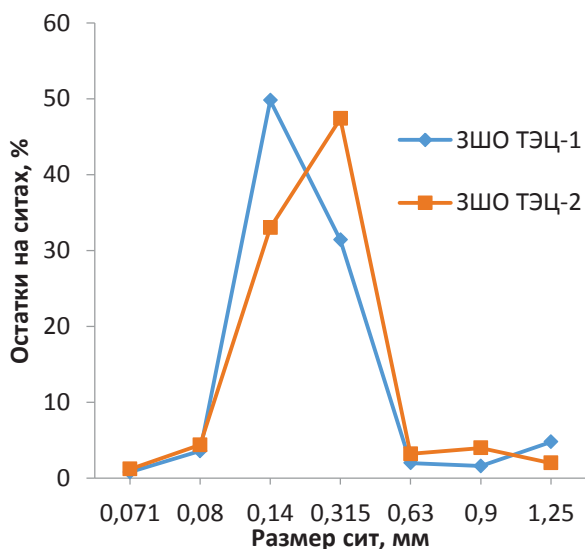


Рис. 5. Гранулометрический состав золошлаковых отходов
Fig. 5. Granulometric composition of ash and slag waste

Состав исследуемых материалов характеризуется высоким содержанием кремния, алюминия и низким – кальция, магния. По количеству основных оксидов они различаются незначительно. Исключение составляет оксид железа Fe_2O_3 , содержание которого в ЗШО-1 практически в два раза больше,

чем в ЗШО-2. Исходя из классификации по количеству $CaO_{общ}$ исследуемые золошлаки относятся к низкокальциевым.

Выполнен ситовой анализ золошлаковых отходов (рис. 5).

Гранулометрический состав показывает, что золошлаковые отходы ТЭЦ-1 более мелкие, чем отходы ТЭЦ-2. Частицы размером более 0,315 мм составляют в них 39,8 и 56,6 % соответственно. При этом ЗШО ТЭЦ-1 содержат большее количество частиц размером более 1,25 мм и менее 0,071 мм.

Наличие высокого содержания мелкой фракции способствует образованию пылевой структуры субстрата золошлаков, что вызывает их интенсивное пыление, которое негативно влияет на здоровье населения. Данную проблему можно решить рекультивацией золоотвалов посредством посева многолетних трав.

Для изучения возможности биологической рекультивации техногенных ландшафтов ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 были приготовлены почвенные смеси (почвосмеси) на основе золошлака и местных мелиорантов. В качестве составляющих использовались следующие отходы предприятий Республики Бурятия:

- золошлаковые отходы ТЭЦ-1 (ЗШО-I) и ТЭЦ-2 (ЗШО-II), г. Улан-Удэ;
- осадки сточных вод (ОСВ) очистных сооружений МУП «Водоканал», г. Улан-Удэ;

- лигнин (Л) ОАО «Селенгинский целлюлозно-картонный комбинат» (СЦКК) Кабанский район, п. Селенгинск;
- куриный помет (П) ОАО «Улан-Удэнская птицефабрика», г. Улан-Удэ.

Нами в течение года были проведены предварительные лабораторные исследования по определению фитотоксичности почвосмесей с использованием вегетационных сосудов с отверстиями в дне объемом 0,36 кг. Повторность трехкратная. В ходе работы наблюдали за ростом и развитием растений многолетних трав на разнокомпонентных почвосмесях и определяли оптимальные соотношения компонентов по схеме опыта, представленной в табл. 2. Основываясь на литературных данных [45–47], выявлены соотношения компонентов ЗШО:П:ОСВ:Л, равные 2:1:1:1 и 4:1:1:1 (в пересчете на сухую массу). В качестве контроля использованы ЗШО-I, ЗШО-II и каштановая почва (Почва) местности п. Тапхар (Республика Бурятия). Перед набивкой в сосуды многокомпонентный субстрат тщательно перемешивался.

Таблица 2. Схема лабораторного опыта

Table 2. Scheme of laboratory test

Состав почвосмеси/Soil mixture composition	
ЗШО-I – контроль I/ASW-I – control I	
ЗШО-II – контроль II/ASW-II – control II	
Почва – контроль III/Soil – control III	
Соотношение 2:1:1:1/Ratio 2:1:1:1	
ЗШО-I+П/ASW-I+ CM*	ЗШО-II+П/ASW-II+ CM
ЗШО-I+Л/ASW-I+L**	ЗШО-II+Л/ASW-II+L
ЗШО-I+ОСВ/ASW-I+SS***	ЗШО-II+ОСВ/ASW-II+SS
ЗШО-I+П+Л/ASW-I+ CM +L	ЗШО-II+П+Л/ASW-II+ CM +L
ЗШО-I+П+ОСВ/ASW-I+ CM +SS	ЗШО-II+П+ОСВ/ASW-II+ CM +SS
ЗШО-I+Л+ОСВ/ASW-I+L+SS	ЗШО-II+Л+ОСВ/ASW-II+L+SS
ЗШО-I+П+Л+ОСВ/ASW-I+CM+L+SS	ЗШО-II+П+Л+ОСВ/ASW-II+CM+L+SS
Соотношение 4:1:1:1/Ratio 4:1:1:1	
ЗШО-I+П/ASW-I+ CM	ЗШО-II+П/ASW-II+ CM
ЗШО-I+Л/ASW-I+L	ЗШО-II+Л/ASW-II+L
ЗШО-I+ОСВ/ASW-I+SS	ЗШО-II+ОСВ/ASW-II+SS
ЗШО-I+П+Л/ASW-I+ CM +L	ЗШО-II+П+Л/ASW-II+ CM +L
ЗШО-I+П+ОСВ/ASW-I+ CM +SS	ЗШО-II+П+ОСВ/ASW-II+ CM +SS
ЗШО-I+Л+ОСВ/ASW-I+L+SS	ЗШО-II+Л+ОСВ/ASW-II+L+SS
ЗШО-I+П+Л+ОСВ/ASW-I+CM+L+SS	ЗШО-II+П+Л+ОСВ/ASW-II+CM+L+SS

* – куриный помет (П)/chicken manure (CM); ** – лигнин (Л)/lignin (L); *** – осадки сточных вод (ОСВ)/sewage sludge (SS).

Для лабораторного опыта выбраны растения клевер красный (*Trifolium pretense*) и овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.), биологические особенности которых позволят создавать устойчивый фитоценоз на рекультивируемых нарушенных землях [48–52]. Как отмечено в работах [50, 52, 53], данные виды трав выдерживают стрессовые условия произрастания, менее требовательны к почвам и климатическим факторам. Злаковые травы, к которым относится овсяница луговая, благодаря

мощной корневой системе способны создавать прочный и устойчивый дерн, тем самым защищая поверхностный слой субстрата от ветровой дефляции. В свою очередь кормовые бобовые травы влияют на образование гумуса и накопление азота, уменьшают концентрацию тяжелых металлов, улучшают физические свойства почв, снижают почвенную эрозию [50, 54, 55].

Перед закладкой опыта определялась в многократной повторности всхожесть семян исследуемых культур. Норма высева из расчета 25 кг/га взята с учетом литературных данных [50, 56], что в среднем выше стандартной нормы примерно в 1,5–2 раза. Глубина заделки семян опытных культуры многолетних трав составила 1,5–2 см.

Полив растений проводился по мере необходимости водопроводной водой объемом 50 мл.

В ходе наблюдений за опытными культурами начало всходов отмечено на 4 день. Полная всхожесть наступила на 6 день от закладки опыта. Отсутствие всхожести зафиксировано для почвосмесей соотношением 2:1:1:1 с куриным пометом. Растения овсяницы луговой на протяжении всего периода наблюдений отличались более дружными всходами и силой роста. Всходы клевера красного были изреженны и на 13 день погибли, за исключением вариантов ЗШО-I, ЗШО-II и Почва. В оставшихся вариантах до конца эксперимента растения клевера красного характеризовались слабым ростом и тонкими вытянутыми стеблями.

На почвогрунтах, в состав которых входил птичий помет, наблюдали подавление роста и развития растений или же их полную гибель, что, вероятно, связано с завышенной дозой данного компонента. Так, в исследованиях по изучению фитотоксичности птичьего помета [57, 58] отмечено ингибирование роста растений при использовании свежего, не подвергнутого обработке, птичьего помета и повышенных концентраций вытяжки из него. Данной эффект наблюдается при внесении высоких доз птичьего помета и связан с содержанием азота в форме мочевой кислоты, которая подавляет рост молодых растений. Также свежий птичий помёт токсичен для растений из-за водорастворимых продуктов жизнедеятельности птицы, и прямой его контакт с растениями может привести к ожогам, заболеваниям и даже к их гибели. В вариантах, содержащих осадки сточных вод, зафиксирована повышенная продуктивность вегетативной массы овсяницы луговой в отличие от других составов.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований определен химический, минералогический и зерновой составы золошлаковых отходов ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 г. Улан-Удэ. Установлено, что они имеют

высокое содержание кремния, алюминия и низкое – кальция, магния. В отходах в большей степени преобладает кристаллическая фаза, содержащая кремнезем, муллит, гематит, магнетит. В меньшем количестве наблюдается стеклофаза, представленная в основном минералами группы ортоклаза. По гранулометрическому составу в отходах ТЭЦ-1 преобладает более мелкая фракция по сравнению с ТЭЦ-2.

Лабораторные исследования показали, что золошлаковые отходы можно использовать в получении почвосмесей для рекультивации нарушенных земель. Выявлено оптимальное соотношение компонентов 4:1:1 почвогрунта на основе золошлака. Отмечено благоприятное воздействие осадков сточ-

ных вод, а также негативное влияние высоких доз птичьего помета на рост и развитие растений. Кроме того, чистые золошлаки ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 без внесения мелиорантов могут выступать в качестве самостоятельного субстрата для многолетних трав. Надо отметить, что на почвосмесях, используемых в данной работе, растения овсяницы луговой отличались лучшим ростом и развитием вегетативной массы, в отличие от клевера красного, для которого представленные субстраты оказались неблагоприятными.

Работа по изучению возможности рекультивации золоотвалов будет продолжена как в лабораторных, так и в полевых условиях непосредственно на золоотвалах ТЭЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leachability and adverse effects of coal fly ash: a review / N.N. Wang, X.Y. Sun, Q. Zhao, Y. Yang, P. Wang // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 396. – № 122725. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122725.
2. Human exposure risks for metals in soil near a coal-fired power-generating plant / J. George, R.E. Mastro, L.C. Ram, T.B. Das, T.K. Rout, M. Mohan // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2015. – Vol. 68. – P. 451–461. DOI: 10.1007/s00244-014-0111-x.
3. Proximity to coal-fired power plants and neurobehavioral symptoms in children / C.H. Zhang, L. Sears, J.V. Myers, G.N. Brock, C.G. Sears, K.M. Zierold // *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. – 2022. – Vol. 32. – P. 124–134. DOI: 10.1038/s41370-021-00369-7.
4. Petrović M., Fiket Z. Environmental damage caused by coal combustion residue disposal: a critical review of risk assessment methodologies // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 299. – № 134410. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134410.
5. Chebanova S.A., Polyakov I.V., Strelyaeva A.B. On the dispersed composition of ash and slag waste from boiler-house // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 272. – № 022149. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022149.
6. Sears C.G., Zierold K.M. Health of children living near coal ash // *Global Pediatric Health*. – 2017. – Vol. 4. – P. 1–8. DOI: 10.1177/2333794X17720330.
7. Protocol for measuring indoor exposure to coal fly ash and heavy metals, and neurobehavioural symptoms in children aged 6 to 14 years old / K.M. Zierold, C.G. Sears, A.N. Hagemeyer, G.N. Brock, B.J. Polivka, C.H. Zhang, L. Sears // *BMJ Open*. – 2020. – Vol. 10. – № e038960. DOI: 10.1136/bmjopen-2020-038960.
8. Kravchenko J., Lyerly H.K. The impact of coal-powered electrical plants and coal ash impoundments on the health of residential communities // *North Carolina Medical Journal*. – 2018. – Vol. 79. – P. 289–300. DOI: 10.18043/ncm.79.5.289.
9. Modeling radionuclides dispersion and deposition downwind of a coal-fired power plant / M.L. Dinis, A. Fiúza, J. Góis, J.M.S. Carvalho, A.C.M. Castro // *Procedia Earth Planetary Science*. – 2014. – Vol. 8. – P. 59–63. DOI: 10.1016/j.proeps.2014.05.013.
10. Аникеев В., Силка Д. От отходов угольных электростанций к производству строительных материалов // *Энергетическая политика*. – 2021. – № 1 (155). – С. 48–55. DOI: 10.46920/2409-5516_2021_1155_48
11. Alterary S.S., Marei N.H. Fly ash properties, characterization, and applications: a review // *Journal of King Saud University – Science*. – 2021. – Vol. 33. – № 101536. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101536
12. Ram A.K., Mohanty S. State of the art review on physiochemical and engineering characteristics of fly ash and its applications // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2022. – Vol. 9. DOI: 10.1007/s40789-022-00472-6
13. Developing a model based on the radial basis function to predict the compressive strength of concrete containing fly ash / A.M. Mayet, A.A. Al-Qahtani, R.M.A. Qaisi, I. Ahmad, H.H. Alhashim, E. Eftekhari-Zadeh // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12. – № 1743. DOI: 10.3390/buildings12101743
14. High-End reclamation of coal fly ash focusing on elemental extraction and synthesis of porous materials / T. Ju, S. Han, Y. Meng, J. Jiang // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. – 2021. – Vol. 9 (20). – P. 6894–6911. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c00587
15. Liu H. Conversion of harmful fly ash residue to zeolites: innovative processes focusing on maximum activation, extraction, and utilization of aluminosilicate // *ACS Omega*. – 2022. – Vol. 7 (23). – P. 20347–20356. DOI: 10.1021/acsomega.2c02388
16. Ash as an example of an efficient circular economy: a stakeholder approach recycling of coal fly / O. Marinina, M. Nevskaya, I. Jonek-Kowalska, R. Wolniak, M. Marinin // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – № 3597. DOI: 10.3390/en14123597
17. Fux S.L., Devyaterikova S.V., Musikhina T.A. Geosorbent based on the combination of Kuznetsk-Basin coal fly ash with various kinds of lignin // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 272. – № 022053. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022053
18. Towards sustainable coal industry: turning coal bottom ash into wealth / H. Zhou, R. Bhattarai, Y. Li, B. Si, X. Dong, T. Wang, Z. Yao // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 804. – № 149985. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149985
19. Dahiya H.S., Budania Y.K. Prospects of fly ash application in agriculture: a global review // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. – 2018. – № 7 (10). – P. 397–409. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.710.043
20. Unexpectedly higher soil organic carbon accumulation in the evapotranspiration cover of a coal bottom ash mixed landfill / G.W. Kim, M.I. Khan, P.J. Kim, H.S. Gwon // *Journal of Environmental Management*. – 2020. – Vol. 268. – № 110659. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110659

21. Shaheen S.M., Hooda P.S., Tsadilas C.D. Opportunities and challenges in the use of coal fly ash for soil improvements – a review // *Journal of Environmental Management*. – 2014. – Vol. 145. – P. 249–267. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.07.005
22. Singh G., Kaur K. Influence of fly ash incorporation on soil properties and productivity of crops: review // *International Research Journal of Engineering and Technology*. – 2020. – № 7 (11). – P. 1563–1567.
23. Fly-ash pollution modulates growth, biochemical attributes, antioxidant activity and gene expression in *Pithecellobium Dulce* (Roxb) Benth / S.U. Qadir, V. Raja, W.A. Siddiqui, Mahmooduzzafar, E.F. Abd_Allah, A. Hashem, P. Alam, P. Ahmad // *Plants*. – 2019. – Vol. 8. – № 528. DOI: 10.3390/plants8120528
24. Delić D., Stajković-Srbinić O., Buntić A. Hazards and usability of coal fly ash // *Advances in Understanding Soil Degradation, Innovations in Landscape Research*. – Springer, 2022. – P. 571–608. DOI: 10.1007/978-3-030-85682-3_26
25. Абдусаламова Р.Р., Баламирзоева З.М. Преимущество и значимость рекультивированных земель // *Вестник Социально-Педагогического Института*. – 2022. – № 3 (43). – С. 14–24.
26. Haynes R.J. Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites – challenges and research needs // *Journal of Environmental Management*. – 2009. – Vol. 90. – P. 43–53. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.07.003
27. Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А. Оценка опыта биологической рекультивации золоотвалов // *Известия ОГАУ*. – 2012. – № 6 (38). – С. 213–215.
28. Szwalec A., Mundała P., Kedzior R. Suitability of selected plant species for phytoremediation: a case study of a coal combustion ash landfill // *Sustainability*. – 2022. – № 14. – P. 7083. DOI: 10.3390/su14127083
29. Гурина И.В., Иванова Н.А., Михеев П.А. Теоретическое обоснование биологической рекультивации золоотвалов методом растительной мелиорации // *Природообустройство*. – 2012. – № 4. – С. 26–29.
30. Pandey V.C. Assisted phytoremediation of fly ash dumps through naturally colonized plants // *Ecological Engineering*. – 2015. – № 82. – P. 1–5. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.002
31. Use of the grass *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash for detoxification and phytoremediation of soils contaminated with fly ash from thermal power plants / M. Ghosh, J. Paul, A. Jana, A. De, A. Mukherjee // *Ecological Engineering*. – 2015. – № 74. – P. 258–265. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.10.011
32. Meravi N., Prajapati S.K. Reclamation of fly ash dykes using naturally growing plant species // *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*. – 2019. – № 9 (4). – P. 137–148.
33. Rawat K., Pathak B., Fulekar M.H. Heavy metal accumulation by plant species at fly-ash dumpsites: thermal Power Plant, Gandhinagar, Gujarat // *International Journal of Plant and Environment*. – 2019. – № 5 (2). – P. 111–116. DOI: 10.18811/ijpen.v5i02.7
34. Ecological potential of plants for phytoremediation and ecorestoration of fly ash deposits and mine wastes / G. Gajić, L. Djurdjević, O. Kostić, S. Jarić, M. Mitrović, P. Pavlović // *Frontiers in Environmental Science*. – 2018. – № 6 (124). DOI: 10.3389/fenvs.2018.00124
35. Панова Е.Н., Стифеев А.И. Создание устойчивых фитоценозов на золоотвале теплоэлектроцентрали № 1 г. Курска // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2016. – № 3. – С. 66–72.
36. An appraisal of *Miscanthus x giganteus* cultivation for fly ash revegetation and soil restoration / D. Técher, P. Laval-Gilly, A. Bennisroune, S. Henry, C. Martinez-Chois, M. D’Innocenzo, J. Falla // *Industrial Crops and Products*. – 2012. – № 36 (1). – P. 427–433. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.10.009
37. Гурина И.В. Обоснование выбора культур для растительных мелиораций золоотвалов // *Вестник МичГАУ*. – 2011. – № 1. – Ч. 1. – С. 96–103.
38. Maiti D., Prasad B. Revegetation of fly ash – a review with emphasis on grass-legume plantation and bioaccumulation of metals // *Applied Ecology and Environmental Research*. – 2016. – № 14 (2). – P. 185–212. DOI: 10.15666/aeer/1402_185212
39. Dyguś K.H. The role of plants in experimental biological reclamation in a bed of furnace waste from coal-based energy // *Journal of Ecological Engineering*. – 2015. – № 16 (1). – P. 8–22. DOI: 10.12911/22998993/581
40. Relationships between waste physicochemical properties, microbial activity and vegetation at coal ash and sludge disposal sites / M.W. Woch, M. Radwańska, M. Stanek, B. Łopata, A.M. Stefanowicz // *Science of the Total Environment*. – 2018. – № 642. – P. 264–275. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.038
41. Impact of different reclamation modes of fly ash deposits on species richness of spontaneous flora / R. Gamrat, T. Tomaszewicz, M. Wróbel, T. Miller, J. Chudecka, S. Stankowski // *Polish Journal of Ecology*. – 2020. – № 67 (4). – P. 271–285. DOI: 10.3161/15052249PJE2019.67.4.001
42. Maiti D., Prasad B. Reclamation of fly ash waste dumps by biological means: a scientific approach // *NexGen Technologies for Mining and Fuel Industries*. – 2017. – № 2. – P. 1011–1022.
43. Миронов А.В. Опытная биологическая рекультивация золошлакового материала Читинской ТЭЦ-1 // *Природообустройство*. – 2019. – № 4. – С. 29–33. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-29-34
44. Косарев А.С. Исследование химического и фазового составов золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС // *Центральный Научный Вестник*. – 2018. – Т. 3. – № 21. – С. 41–44.
45. Способ приготовления техногенного почвогрунта БЭП на основе золошлаковых отходов (варианты) и техногенный почвогрунт БЭП: пат. Рос. Федерация, № 2688536, заявл. 20.09.2018; опубл. 21.05.2019. Бюл. № 15. – 18 с.
46. Фомина Н.В. Ферментативная активность почвогрунтов, созданных с добавлением золошлаковых отходов // *Вестник Государственного Аграрного Университета Северного Зауралья*. – 2015. – № 1 (28). – С. 37–42.
47. Белозёрова Т.И. Рекультивация золоотвалов тепловых электростанций в условиях Севера: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Архангельск, 2006. – 20 с.
48. Review of the global experience in reclamation of disturbed lands / I. Tymchuk, M. Malovanyy, O. Shkvirko, N. Chornomaz, O. Popovych, R. Grechanik, D. Symak // *Ecological Engineering and Environmental Technology*. – 2021. – Vol. 22 (1). – P. 24–30. DOI: 10.12912/27197050/132097
49. Banov M., Tsołova V., Kirilov I. Reclamation of heaps and industrial sites built in the region of Madjarovo mine (Bulgaria) // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. – 2020. – Vol. 26 – № 1. – P. 192–197.

50. Панова Е.Н. Влияние дефляции с поверхности техногенного ландшафта ТЭЦ-1 г. Курска на прилегающую территорию // Вестник Курской Государственной Сельскохозяйственной Академии. – 2018. – № 3. – С.44–49.
51. Белюченко И.С. Методы рекультивации нарушенных земель // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2019. – Т. 15. – № 1. – С. 4–13.
52. Structuring a database of remote sensing methods and GIS in reclamation of disturbed land / M. Banov, S. Rousseva, E. Markov, N. Miteva // Journal of Remote Sensing and GIS. – 2017. – Vol. 6. – № 1. – 1000192. DOI: 10.4172/2469-4134.1000192
53. Range grasses to improve soil properties, carbon sustainability, and fodder security in degraded lands of semi-arid regions / H.M. Halli, P. Govindasamy, M. Choudhary, R. Srinivasan, M. Prasad, V.K. Wasnik, V.K. Yadav, A.K. Singh, S. Kumar, D. Vijay, H. Pathak // Science of the Total Environment. – 2022. – Vol. 851. – 158211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158211
54. The impact of growing legume plants under conditions of biologization and soil cultivation on chernozem fertility and productivity of rotation crops / A. Mukhametov, N. Bekhorashvili, A. Avdeenko, A. Mikhaylov // Legume Research. – 2021. – Vol. 44. – № 10. – P. 1219–1225. DOI: 10.18805/LR-573
55. Multiple agroecosystem services of forage legumes towards agriculture sustainability: An overview / R. Kumar, M.R. Yadav, M. Arif, D.M. Mahala, D. Kumar, P.C. Ghasal, K.C. Yadav, R.K. Verma // Indian Journal of Agricultural Sciences. – 2020. – Vol. 90. – № 8. – P. 1367–1377. DOI: 10.56093/ijas.v90i8.105882
56. Васильченко А.В. Рекультивация нарушенных земель: в 2-х ч. – Оренбург: Изд-во ОГУ, 2017. – Ч. 1. – 214 с.
57. Трemasова А.М., Ерохондина М.А. Оценка фитотоксичности птичьего помета при применении биологического метода утилизации // Актуальные Вопросы Совершенствования Технологии Производства и Переработки Продукции Сельского Хозяйства. – 2019. – № 21. – С. 443–446.
58. Титова В.И., Белоусова Е.Г. Фитотоксичность куриного помета, полученного при разных способах содержания птицы // Пермский аграрный вестник. – 2022. – № 3 (39). – С. 12–19. DOI: 10.47737/2307-2873_2022_39_12

Информация об авторах

Людмила Ивановна Худякова, доктор технических наук, старший научный сотрудник лаборатории химии и технологии природного сырья Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. lkhud@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1423-410X>

Наталья Михайловна Гаркушева, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории химии и технологии природного сырья Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. garcusheva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6404-3021>

Ирина Юрьевна Котова, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории оксидных систем Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. ikotova@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3829-6516>

Павел Леонидович Палеев, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории химии и технологии природного сырья Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. palpavel@mail.ru

Поступила в редакцию: 19.04.2023

Поступила после рецензирования: 22.06.2023

Принята к публикации: 30.11.2023

REFERENCES

1. Wang N.N., Sun X.Y., Zhao Q., Yang Y., Wang P., Leachability and adverse effects of coal fly ash: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, vol. 396, no. 122725. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122725.
2. George J., Mastro R.E., Ram L.C., Das T.B., Rout T.K., Mohan M. Human exposure risks for metals in soil near a coal-fired power-generating plant. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, vol. 68, pp. 451–461. DOI: 10.1007/s00244-014-0111-x.
3. Zhang C.H., Sears L., Myers J.V., Brock G.N., Sears C.G., Zierold K.M. Proximity to coal-fired power plants and neurobehavioral symptoms in children. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2022, vol. 32, pp. 124–134. DOI: 10.1038/s41370-021-00369-7
4. Petrović M., Fiket Z. Environmental damage caused by coal combustion residue disposal: a critical review of risk assessment methodologies. *Chemosphere*, 2022, vol. 299, no. 134410. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134410
5. Chebanova S.A., Polyakov I.V., Strelyaeva A.B. On the dispersed composition of ash and slag waste from boiler-house. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 272, no. 022149. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022149
6. Sears C.G., Zierold K.M. Health of children living near coal ash. *Global Pediatric Health*, 2017, vol. 4, pp. 1–8. DOI: 10.1177/2333794X17720330
7. Zierold K.M., Sears C.G., Hagemeyer A.N., Brock G.N., Polivka B.J., Zhang C.H., Sears L. Protocol for measuring indoor exposure to coal fly ash and heavy metals, and neurobehavioural symptoms in children aged 6 to 14 years old. *BMJ Open*, 2020, vol. 10, no. 038960. DOI: 10.1136/bmjopen-2020-038960
8. Kravchenko J., Lyerly H.K. The impact of coal-powered electrical plants and coal ash impoundments on the health of residential communities. *North Carolina Medical Journal*, 2018, vol. 79, pp. 289–300. DOI: 10.18043/ncm.79.5.289.
9. Dinis M.L., Fiúza A., Góis J., Carvalho J.M.S., Castro A.C.M. Modeling radionuclides dispersion and deposition downwind of a coal-fired power plant. *Procedia Earth Planet Science*, 2014, vol. 8, pp. 59–63. DOI: 10.1016/j.proeps.2014.05.013.

10. Anikeev V., Silka D.N. From coal fired power plant waste to building materials production. *Energy policy*, 2021, no. 1 (155), pp. 48–55. DOI: 10.46920/2409-5516_2021_1155_48. (In Russ.)
11. Alterary S.S., Marei N.H. Fly ash properties, characterization, and applications: A review. *Journal of King Saud University – Science*, 2021, vol. 33, no. 101536. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101536
12. Ram A.K., Mohanty S. State of the art review on physiochemical and engineering characteristics of fly ash and its applications. *International Journal of Coal Science and Technology*, 2022, vol. 9. DOI: 10.1007/s40789-022-00472-6
13. Mayet A.M., Al-Qahtani A.A., Qaisi R.M.A., Ahmad I., Alhashim H.H., Eftekhari-Zadeh E. Developing a model based on the radial basis function to predict the compressive strength of concrete containing fly ash. *Buildings*, 2022, vol. 12, no. 1743. DOI: 10.3390/buildings12101743
14. Ju T., Han S., Meng Y., Jiang J. High-end reclamation of coal fly ash focusing on elemental extraction and synthesis of porous materials. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2021, vol. 9 (20), pp. 6894–6911 DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c00587
15. Liu H. Conversion of harmful fly ash residue to zeolites: Innovative processes focusing on maximum activation, extraction, and utilization of aluminosilicate. *ACS Omega*, 2022, vol. 7 (23), pp. 20347–20356. DOI: 10.1021/acsomega.2c02388
16. Marinina O., Nevskaya M., Jonek-Kowalska I., Wolniak R., Marini M. Recycling of coal fly ash as an example of an efficient circular economy: a stakeholder approach. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 3597. DOI: 10.3390/en14123597
17. Fux S.L., Devyaterikova S.V., Musikhina T.A. Geosorbent Based on the combination of Kuznetsk-Basin coal fly ash with various kinds of lignin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 272, no. 022053. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022053
18. Zhou H., Bhattarai R., Li Y., Si B., Dong X., Wang T., Yao Z. Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 804, no. 149985. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149985
19. Dahiya H.S. Budania Y.K. Prospects of fly ash application in agriculture: a global review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2018, no. 7 (10), pp. 397–409. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.710.043
20. Kim G.W., Khan M.I., Kim P.J., Gwon H.S. Unexpectedly higher soil organic carbon accumulation in the evapotranspiration cover of a coal bottom ash mixed landfill. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 268, no. 110659. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110659
21. Shaheen S.M., Hooda P.S., Tsadilas C.D. Opportunities and challenges in the use of coal fly ash for soil improvements – a review. *Journal of Environmental Management*, 2014, vol. 145, pp. 249–267. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.07.005
22. Singh G., Kaur K. Influence of fly ash incorporation on soil properties and productivity of crops: Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2020, no. 7 (11), pp. 1563–1567.
23. Qadir S.U., Raja V., Siddiqui W.A., Mahmooduzzafar, Abd_Allah E.F., Hashem A., Alam P., Ahmad P. Fly-ash pollution modulates growth, biochemical attributes, antioxidant activity and gene expression in *Pithecellobium Dulce* (Roxb) Benth. *Plants*, 2019, vol. 8, no. 528. DOI: 10.3390/plants8120528
24. Delić D., Stajković-Srbinić O., Buntić A. Hazards and usability of coal fly ash. *Advances in Understanding Soil Degradation, Innovations in Landscape Research*. Springer, 2022, pp. 571–608. DOI: 10.1007/978-3-030-85682-3_26
25. Abdusalamova R.R., Balamirzoeva Z.M. The advantage and importance of reclaimed lands. *Bulletin of the Socio-Pedagogical Institute*, 2022, no. 3 (43), pp. 14–24. (In Russ.)
26. Haynes R.J. Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites – challenges and research needs. *Journal of Environmental Management*, 2009, vol. 90, pp. 43–53. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.07.003
27. Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A. Evaluation of the experience of biological reclamation of ash dumps. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2012, no. 6 (38), pp. 213–215. (In Russ.)
28. Szwalec A., Mundała P., Kedzior R. Suitability of selected plant species for phytoremediation: A case study of a coal combustion ash landfill. *Sustainability*, 2022, no. 14, pp. 7083. DOI: 10.3390/su14127083
29. Gurina I.V., Ivanova N.A., Mikheev P.F. Theoretical justification biological reclamation of ash dumps method of vegetable reclaim. *Environmental Engineering*, 2012, no. 4, pp. 26–29. (In Russ.)
30. Pandey V.C. Assisted phytoremediation of fly ash dumps through naturally colonized plants. *Ecological Engineering*, 2015, no. 82, pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.002
31. Ghosh M., Paul J., Jana A., De A., Mukherjee A. Use of the grass *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash for detoxification an phytoremediation of soils contaminated with fly ash from thermal power plants. *Ecological Engineering*, 2015, no. 74, pp. 258–265. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.10.011
32. Meravi N., Prajapati S.K. Reclamation of fly ash dykes using naturally growing plant species. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 2019, no. 9 (4), pp. 137–148.
33. Gajić G., Djurdjević L., Kostić O., Jarić S., Mitrović M., Pavlović P. Ecological potential of plants for phytoremediation and ecorestoration of fly ash deposits and mine wastes. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, no. 6 (124). DOI: 10.3389/fenvs.2018.00124
34. Gurina I.V. Substantiation for the selection of crops for phytoamelioration of the ash disposal area. *Vestnik of Michurinsk State Agrarian University*, 2011, no. 1, part 1, pp. 96–103.
35. Panova E.N., Stifeev A.I. Creation of sustainable phytocenoses on the ash dump of Kursk thermoelectric station № 1. *Vestnik of Kursk State Agricultural Academy Named After I.I. Ivanov*, 2016, no. 3, pp. 66–72. (In Russ.)
36. Técher D., Laval-Gilly P., Bennisroune A., Henry S., Martinez-Chois C., D’Innocenzo M., Falla J. An appraisal of *Miscanthus x giganteus* cultivation for fly ash revegetation and soil restoration. *Industrial Crops and Products*, 2012, no. 36 (1), pp. 427–433. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.10.009
37. Rawat K., Pathak K., Fulekar M.H. Heavy metal accumulation by plant species at fly-ash dumpsites: Thermal Power Plant, Gandhinagar, Gujarat. *International Journal of Plant and Environment*, 2019, no. 5 (2), pp. 111–116. DOI: 10.18811/ijpen.v5i02.7
38. Maiti D., Prasad B. Revegetation of fly ash – a review with emphasis on grass-legume plantation and bioaccumulation of metals. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2016, no. 14 (2), pp. 185–212. DOI: 10.15666/aeer/1402_185212

39. Dyguś K.H. The role of plants in experimental biological reclamation in a bed of furnace waste from coal-based energy. *Journal of Ecological Engineering*, 2015, no. 16 (1), pp. 8–22. DOI: 10.12911/22998993/581
40. Woch M.W., Radwańska M., Stanek M., Łopata B., Stefanowicz A.M. Relationships between waste physicochemical properties, microbial activity and vegetation at coal ash and sludge disposal sites. *Science of the Total Environment*, 2018, no. 642, pp. 264–275. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.038
41. Gamrat R., Tomaszewicz T., Wróbel M., Miller T., Chudecka J., Stankowski S. Impact of different reclamation modes of fly ash deposits on species richness of spontaneous flora. *Polish Journal of Ecology*, 2020, no. 67 (4), pp. 271–285. DOI: 10.3161/15052249PJE2019.67.4.001
42. Maiti D., Prasad B. Reclamation of fly ash waste dumps by biological means: a scientific approach. *NexGen Technologies for Mining and Fuel Industries*, 2017, no. 2, pp. 1011–1022.
43. Mironov A.V. Experimental biological reclaiming of the ash slag material of the Chita Thermal Power Station-1. *Environmental Engineering*, 2019, no. 4, pp. 29–33. (In Russ.) DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-29-34
44. Kosarev A.S. Research of the chemical and phase compositions of ash and slag waste Novocherkasskaya TPP. *Central Scientific Bulletin*, 2018, vol. 3, no. 21, pp. 41–44. (In Russ.)
45. Shkutnik D.V., Rybushkin S.V. *Method for production of technogenic soil of BEP on the basis of ash-slag wastes (versions) and technogenic soil of BEP*. Patent RF, no. 2688536, 2019. (In Russ.)
46. Fomina N.V. Soil enzymatic activity, created with the addition of bottom-ash waste. *Bulletin of the State Agrarian University of the Northern Trans-Urals*, 2015, no.1 (28), pp. 37–42. (In Russ.)
47. Belozerova T.I. *Recultivation of ash dumps of thermal power plants in the conditions of the North*. Cand. Diss. Abstract. Arkhangelsk, 2006. 20 p. (In Russ.)
48. Tymchuk I., Malovanyy M., Shkvirko O., Chornomaz N., Popovych O., Grechanik R., Symak D. Review of the global experience in reclamation of disturbed lands. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 2021, vol. 22 (1), pp. 24–30. DOI: 10.12912/27197050/132097
49. Banov M., Tsoleva V., Kirilov I. Reclamation of heaps and industrial sites built in the region of Madjarovo mine (Bulgaria). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 192–197.
50. Panova E.N. The effect of deflation from the surface of technogenic landscape CHPP-1 g. Kurska the surrounding area. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*, 2018, no. 3, pp. 44–49. (In Russ.)
51. Belyuchenko I.S. Methods of recultivation of disturbed lands. *Ecological bulletin of the North Caucasus*, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 4–13. (In Russ.)
52. Banov M., Rousseva S., Markov E., Miteva N. Structuring a database of remote sensing Methods and GIS in Reclamation of Disturbed Land. *Journal of Remote Sensing and GIS*, 2017, vol. 6, no. 1, 1000192. DOI: 10.4172/2469-4134.1000192
53. Halli H.M., Govindasamy P., Choudhary M., Srinivasan R., Prasad M., Wasnik V.K., Yadav V.K., Singh A.K., Kumar S., Vijay D., Pathak H. Range grasses to improve soil properties, carbon sustainability, and fodder security in degraded lands of semi-arid regions. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 851, 158211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158211
54. Mukhametov A., Bekhorashvili N., Avdeenko A., Mikhaylov A. The impact of growing legume plants under conditions of biologization and soil cultivation on chernozem fertility and productivity of rotation crops. *Legume Research*, 2021, vol. 44, no. 10, pp. 1219–1225. DOI: 10.18805/LR-573
55. Kumar R., Yadav M.R., Arif M., Mahala D.M., Kumar D., Ghasal P.C., Yadav K.C., Verma R.K. Multiple agroecosystem services of forage legumes towards agriculture sustainability: an overview. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, vol. 90, no. 8, pp. 1367–1377. DOI: 10.56093/ijas.v90i8.105882
56. Vasilchenko A.V. *Recultivation of disturbed lands*. Orenburg, OSU Publ. House, 2017. P. 1, 214 p. (In Russ.)
57. Tremasova A.M., Erokhondina M.A. Assessment of phytotoxicity of bird droppings when using a biological method of disposal. *Topical issues of improving the technology of production and processing of agricultural products*, 2019, no. 21, pp. 443–446. (In Russ.)
58. Titova V.I., Belousova E.G. Phytotoxicity of chicken manure obtained with different methods of keeping poultry. *Perm Agrarian Journal*, 2022, no. 3 (39), pp. 12–19. (In Russ.) DOI: 10.47737/2307-2873_2022_39_12.

Information about the authors

Liudmila I. Khudyakova, Dr. Sc., Senior Researcher, Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. lkhud@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1423-410X>

Natalia M. Garkusheva, Cand. Sc., Researcher, Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. garkusheva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6404-3021>

Irina Yu. Kotova, Cand. Sc., Researcher, Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. ikotova@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3829-6516>

Pavel L. Paleev, Cand. Sc., Researcher, Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. palpavel@mail.ru

Received: 19.04.2023

Revised: 22.06.2023

Accepted: 30.11.2023