

DOI: 10.15593/2224-9400/2025.3.02

Научная статья

УДК 504.53.062.4

**В.М. Юрк, А.А. Бородина,
В.А. Снегирев, Н.А. Третьякова**

Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Российская Федерация

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ

*К настоящему времени накоплено значительное количество золошлаковых отходов (ЗШО), которые оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Занятые отвалами территории изымаются из использования. Токсичные компоненты, входящие в состав ЗШО, могут мигрировать в сопряженные среды. Известен ряд направлений утилизации ЗШО. Перспективным является применение ЗШО при проведении биологической рекультивации нарушенных земель. ЗШО, используемые таким образом, могут как улучшить состояние почвенного покрова, так и являются источником полезных компонентов для растений. В настоящей работе проведена оценка возможности использования ЗШО Троицкой ГРЭС для биологической рекультивации. Рентгенофлуоресцентный анализ отхода показал, что в его состав входят элементы, необходимые для роста и нормального развития растений. Содержание тяжелых металлов – менее 1 % мас. Также была оценена фитотоксичность исследуемых ЗШО. Полученные результаты позволяют отнести рассматриваемый ЗШО к V классу опасности. По совокупности проведенных анализов рассматриваемый отход можно считать безопасным для окружающей среды и пригодным для рекультивации. Тест-культуры, выращенные на субстрате из ЗШО, показали сопоставимые характеристики с культурами, выращенными на субстрате сравнения. Однако в рассматриваемом отходе отмечается меньшее количество питательных компонентов, что негативно сказалось на всхожести тест-культур и их развитии. Наилучшие результаты наблюдались в опытах, в которых к субстрату из ЗШО добавляли удобрение и биологический препарат культуры *Azotobacter*. Таким образом, наиболее перспективной можно считать технологию биологической рекультивации земель с применением ЗШО совместно с биологическим препаратом почвенных азотфиксирующих бактерий.*

Ключевые слова: золошлаковые отходы, рекультивация, восстановление земель, рекультивационный материал, азотфиксирующие бактерии

V.M. Yurk, A.A. Borodina, V.A. Snegirev, N.A. Tretyakova

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING ASH AND SLAG WASTE FOR BIOLOGICAL REMEDIATION

To date, a significant amount of ash and slag waste has accumulated, which has a negative impact on the environment. The territories occupied by landfills are being withdrawn from use. The toxic components that make up the ash and slag waste can migrate to the associated media. There are a number of known areas of ash and slag waste disposal. The use of ash and slag waste during biological reclamation of disturbed lands is promising. Ash and slag wastes used in this way can both improve the condition of the soil cover and are a source of useful components for plants. In this work, an assessment of the possibility of using the ash and slag waste from Troitskaya Power Plant for biological remediation has been carried out. X-ray fluorescence analysis of the waste showed that it contains elements necessary for the growth and normal development of plants. The content of heavy metals is less than 1% by weight. The phytotoxicity of the studied ash and slag waste was also evaluated. The results obtained make it possible to classify the ash and slag waste under consideration as hazard class V. According to the totality of the analyses carried out, the waste in question can be considered safe for the environment and suitable for reclamation. Test crops grown on a substrate from ash and slag waste showed comparable characteristics with crops grown on a comparison substrate. However, there are fewer nutritional components in the waste under consideration, which negatively affected the germination of test crops and their development. The best results were observed in experiments in which fertilizer and a biological preparation of Azotobacter culture were added to the substrate from ash and slag waste. Thus, the technology of biological land reclamation using ash and slag waste together with a biological preparation of soil nitrogen-fixing bacteria can be considered the most promising.

Keywords: ash and slag waste, reclamation, land restoration, reclamation material, nitrogen-fixing bacteria.

В последние десятилетия проблема накопления отходов, в том числе золошлаковых, приобрела мировое значение, вызванное индустриализацией и ростом энергетического потребления. Золошлаковые отвалы оказывают негативное воздействие на окружающую среду [1, 2], территории, на которых они расположены, изымаются из использования [3]. Также ЗШО могут содержать потенциально токсичные компоненты, например, тяжелые металлы [4–6], что делает их серьезной угрозой для экосистем и здоровья человека.

Актуальность решения проблемы накопления ЗШО обусловлена не только их негативным воздействием на окружающую среду, но и тем, что ЗШО представляют собой ценное сырье и могут быть вторич-

но использованы [7]. Особый интерес представляет возможность использования этих материалов в качестве ресурсов для восстановления деградированных земель [8]. Биологическая рекультивация, основанная на применении ЗШО, открывает новые горизонты для устойчивого управления отходами и восстановления экосистем. Исследования показывают, что золошлаковые материалы могут быть использованы как компонент почвы, способствующий улучшению ее структуры, повышению плодородия и увеличению биоразнообразия [9–11].

Тем не менее процесс биологической рекультивации с использованием ЗШО сопряжен с рядом проблем. Во-первых, состав отходов может варьироваться в зависимости от источника получения, что может усложнить их применение. Во-вторых, наличие токсичных элементов, таких как тяжелые металлы и радионуклиды, может негативно сказаться на растительности и животных, обитающих в рекультивируемых зонах [12]. Также необходимо учитывать влияние отходов на микробиологическую активность почвы и взаимодействие с корневыми системами растений.

Несмотря на это, перспектива использования ЗШО для биологической рекультивации выглядит многообещающей. Совершенствование технологий обработки и применения отходов, а также разработка методов мониторинга их воздействия на экосистемы могут значительно повысить эффективность рекультивационных процессов. Исследования показывают, что при правильном подходе ЗШО могут не только способствовать восстановлению нарушенных земель, но и стать источником питательных веществ для растений [13]. Кроме того, внедрение инновационных биотехнологий, таких как использование специализированных микроорганизмов и растений, может способствовать нейтрализации негативных компонентов и улучшению общей структуры почвы.

Таким образом, вопросы, связанные с использованием ЗШО для биологической рекультивации, остаются актуальными и требуют дальнейшего исследования. В настоящей работе были проведены лабораторные исследования по модификации рекультивационного материала на основе ЗШО Троицкой ГРЭС биопрепаратом, приготовленным на основе почвенных микроорганизмов, и проведена оценка перспективности данного направления для использования в биологической рекультивации.

Экспериментальная часть. Объектом исследования в работе являлся золошлаковый отход Троицкой ГРЭС (г. Троицк, Челябинская

область). В качестве контрольного образца использовался почвогрунт цветочный универсальный.

Валовое содержание элементов в составе ЗШО и универсального почвогрунта устанавливалось методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии согласно ГОСТ 33850–2016.

Для определения химического состава ЗШО и универсального цветочного почвогрунта были приготовлены водные вытяжки, в которых определяли pH, содержание сухого остатка, прокаленного остатка, ионов кальция и магния согласно методикам, описанным в работе [14].

Перед началом исследований по возможности использования ЗШО при проведении рекультивации был определен класс опасности отходов на основании исследования их фитотоксичности согласно МР 2.1.7.2297–07. В качестве тестируемого объекта выступали семена клевера красного (*Trifolium pretense*), в качестве тестируемой функции – интенсивность роста корней проростков семян, измеряемый показатель тест-функции – средняя длина корней проростков. Методика МР 2.1.7.2297–07 рекомендует использовать в качестве тест-объекта семена овса, но не исключает применение семян других высших растений. В настоящих исследованиях применялся клевер красный, так как он менее прихотлив в использовании, реже заражен грибом, показывает стабильные воспроизводимые результаты и, кроме того, обладает высокой чувствительностью к загрязняющим веществам. При выполнении исследований на дно чашки Петри укладывали сухую фильтровальную бумагу, вносили 25 семян клевера красного и 10 мл водной вытяжки золошлакового отхода. В качестве контроля использовали пробу, в которой семена проращивались при внесении 10 мл дистиллированной воды. Срок экспозиции 7 сут, по истечении этого времени измерялась длина корней проростков.

Культура азотфиксирующих бактерий рода *Azobacter* была выделена из дерново-подзолистой почвы. Для этого 10 г измельченной почвы добавляли в 100 мл жидкой элективной среды Бёрка, которая позволяет выделять только азотфиксирующие микроорганизмы, и культивировали в течение 7 дней при 30 °C в шейкере-инкубаторе BIOSAN ES-20 со скоростью перемешивания 250 об/мин. Бактерии отделяли от дрожжей путем посева на твердую среду Бёрка. Полученные колонии бактерий вновь добавляли в жидкую среду.

Подсчет живых бактерий осуществлялся цитофлуорометрическим методом, основанным на специфичном взаимодействии флуоро-

хромных красителей с нуклеиновыми кислотами бактерий. Определение проводилось следующим образом. Готовилась проба следующего состава: 3,45 мл разбавителя – раствора глутарового альдегида; 0,5 мл диспергирующего агента (0,1 М раствор $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Далее в затемненном помещении проводят окрашивание бактерий добавлением к суспензии 50 мкл стандартного раствора красителя флуорохрома при тщательном перемешивании, время выдержки составляло 5 мин для полного взаимодействия красителя с клетками.

Для подсчета количества бактерий применялась камера Горяева с двумя сетками и заранее притертым покровным стеклом. Перед использованием камеру и стекло обрабатывали ацетоном, затем заполняли обе сетки камеры суспензией. Подсчеты осуществлялись при увеличении в 800 раз на микроскопе. Клетки подсчитывались в случайных 20 ячейках сетки камеры Горяева независимо от цвета их окрашивания. Среднее количество бактерий на 1 мл биопрепарата, вводимого в субстрат, составило $5,9 \cdot 10^7$.

Для оценки возможности использования ЗШО в качестве субстрата для биологической рекультивации проводили исследование всхожести семян и развития проростков по методике, описанной в ГОСТ 33061–2014. В качестве тестируемых культур были выбраны два вида растений: овес обыкновенный (*Avena sativa*) и клевер красный (*Trifolium pretense*). Проращивание семян тест-культур осуществлялось на субстратах, представляющих собой ЗШО и универсальный цветочный почвогрунт (использовался в качестве контрольного образца). В исследуемый субстрат вносили 10 семян тест-культуры одного вида и 40 мл дистиллированной воды.

Эксперимент с каждым видом тест-культур состоял из 6 вариантов, выполняемых в 2-кратной повторности:

- 1) ЗШО (без внесения добавок);
- 2) универсальный цветочный почвогрунт (без внесения добавок);
- 3) ЗШО + 0,125 г удобрения «Аммофоска»;
- 4) универсальный цветочный почвогрунт + 0,100 г удобрения «Аммофоска»;
- 5) ЗШО + 0,125 г удобрения «Аммофоска» + 1 мл биопрепарата, содержащего бактерии рода *Azobacter*;
- 6) универсальный цветочный почвогрунт + 0,100 г удобрения «Аммофоска» + 1 мл биопрепарата, содержащего бактерии рода *Azobacter*.

Измерения показателей тестирования проводились в соответствии с методикой на 14-й день после прорастания 50 % семян.

Результаты и их обсуждение. Валовое содержание элементов в составе ЗШО и универсальном почвогрунте, определенное методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии, приведено в табл. 1.

Таблица 1

Валовое содержание элементов в составе
золошлакового отхода и универсальном почвогрунте

Элемент	Содержание, % от общ. массы образца	
	ЗШО	Почвогрунт
Al	$14,14 \pm 0,14$	$0,20 \pm 0,01$
C	$2,53 \pm 0,08$	$24,53 \pm 0,22$
Ca	$1,08 \pm 0,04$	$7,21 \pm 0,13$
Cr	$(0,10 \pm 0,01) \cdot 10^{-1}$	$(0,23 \pm 0,01) \cdot 10^{-1}$
Cu	$(0,46 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$	-
Fe	$6,53 \pm 0,11$	$0,36 \pm 0,02$
K	$0,43 \pm 0,02$	$0,60 \pm 0,03$
Mg	$0,32 \pm 0,02$	$0,15 \pm 0,01$
Mn	$0,15 \pm 0,01$	$(0,18 \pm 0,01) \cdot 10^{-1}$
N	-	$0,47 \pm 0,08$
Na	$0,45 \pm 0,02$	$(0,36 \pm 0,02) \cdot 10^{-1}$
Ni	$(0,25 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$	-
O	$46,72 \pm 0,24$	$55,26 \pm 0,56$
P	$0,18 \pm 0,01$	$0,21 \pm 0,01$
Si	$26,06 \pm 0,17$	$0,66 \pm 0,03$
S	$(0,34 \pm 0,02) \cdot 10^{-1}$	$0,14 \pm 0,01$
Ti	$0,63 \pm 0,03$	$(0,26 \pm 0,01) \cdot 10^{-1}$
V	$(0,12 \pm 0,01) \cdot 10^{-1}$	$(0,10 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$
Zn	$(0,10 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$	$(0,02 \pm 0,01) \cdot 10^{-1}$

Основными элементами, входящими в состав ЗШО, являются кремний, алюминий и железо, содержание которых составляет 26,06; 14,14 и 6,53 % соответственно.

Как показал анализ, в состав ЗШО входят элементы, необходимые для роста и нормального развития растений, что является важным аспектом при использовании отходов в качестве субстратов для проведения биологической рекультивации. Кремний способен повышать устойчивость растений к таким негативным воздействиям, как патогенные микроорганизмы, низкие и высокие температуры, дефицит влаги и т.д. Он оказывает положительное влияние на использование питательных веществ, фотосинтез и ростовые процессы [15]. Также благоприятное влияние на рост корневой системы растений, морозо- и засухоустойчивость оказывает обеспеченность грунтов магнием. Магний способствует нормальному протеканию различных физико-

химических и микробиологических процессов, оказывает положительное воздействие на жизнь почвенной флоры [16].

Около 3 % от общей массы образца ЗШО приходится на элементы, обеспечивающие плодородие субстрата – углерод, калий и фосфор.

Азот – необходимый элемент для роста и развития растений – в исследованном ЗШО отсутствует. Следовательно, при использовании ЗШО при проведении биологической рекультивации необходимо дополнительно вносить азот для повышения плодородия, например, в виде азотосодержащих удобрений. Кроме того, ЗШО может быть обогащен азотфиксирующими микроорганизмами.

Содержание углерода в ЗШО составляет 2,53 %. Скорее всего, углерод представлен в исходном ЗШО несгоревшими частицами угля, тогда как в составе почвогрунта углерод присутствует в виде гумусовых веществ.

В контрольном образце почвогрунта на долю биогенных компонентов приходится около 26 % мас., что намного выше, чем в исследованном ЗШО. Можно предположить, что для создания благоприятных условий для произрастания растений на ЗШО, используемом для биологической рекультивации, необходимо искусственно повышать плодородие путем внесения добавок.

Содержание тяжелых металлов в обоих образцах мало – менее 1 мас. %.

Важную информацию о возможности использования ЗШО в качестве субстрата для выращивания растений дает исследование характеристик и состава водной вытяжки, так как именно растворенные соединения являются доступными для растений.

Разные виды растений характеризуются разным оптимальным диапазоном pH для их выращивания. Показатель pH водной вытяжки исследуемого ЗШО составляет 10,65. Следовательно, ЗШО могут быть использованы в качестве субстрата для растений, требующих щелочных почв. Внесение органических удобрений, опилок, культивирование сидератов будет способствовать снижению показателя pH, что обеспечивает возможность выращивания растений, предпочитающих нейтральные или слабокислые почвы.

Для выявления общего содержания в грунте растворимых в воде минеральных и органических соединений проводилось определение сухого остатка. Также был определен прокаленный остаток, который является показателем общего количества водорастворимых минеральных солей, характеризующим минерализацию водной вытяжки.

Результаты определения сухого и прокаленного остатка ЗШО и универсального почвогрунта представлены в табл. 2. Результаты проведенных исследований показывают, что содержание и сухого, и прокаленного остатка выше в ЗШО. При этом наблюдается существенная разница в значениях сухого и прокаленного остатка для ЗШО: 0,860 и 0,275 % соответственно. В то же время для универсального почвогрунта различие этих параметров незначительно, 0,051 и 0,041 % соответственно. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что в ЗШО водорастворимые соединения представлены преимущественно минеральными соединениями. В то время как в грунте количество минеральных соединений составляет около 30 % от общего количества водорастворимых веществ, остальная часть – органические соединения.

Таблица 2

Сухой и прокаленный остаток золошлакового отхода
и универсального почвогрунта

Образец	Сухой остаток, %	Прокаленный остаток, %
ЗШО	0,860 ± 0,039	0,275 ± 0,049
Почвогрунт	0,051 ± 0,039	0,041 ± 0,001

Для роста и развития растений необходимы различные макро- и микроэлементы. К числу последних относятся кальций и магний. Кальций регулирует усвоение белков и углеводов растениями, влияет на продуцирование хлоропластов и усвоение азота. Магний ускоряет созревание семян, улучшает использование и мобильность фосфора, а также увеличивает использование железа в растениях [17]. В табл. 3 приведены результаты определения содержания ионов кальция и магния в водной вытяжке ЗШО и универсального почвогрунта.

Таблица 3

Содержание ионов кальция и магния в водной вытяжке
золошлакового отхода и универсального почвогрунта

Образец	Содержание Ca^{2+} , мг-экв/100 г	Содержание Mg^{2+} , мг-экв/100 г
ЗШО	0,150 ± 0,059	0,033 ± 0,002
Почвогрунт	0,087 ± 0,006	0,025 ± 0,012

Результаты определения ионов кальция и магния в водной вытяжке образцов показывают, что содержание указанных ионов в водной вытяжке ЗШО сопоставимо с их содержанием в универсальном почвогрунте и даже несколько выше.

На основании исследования фитотоксичности согласно МР 2.1.7.2297–07 был определен класс опасности ЗШО и уровень безвредности отхода по фитотоксическому действию. Значения средней длины проростков клевера красного при воздействии водной вытяжки ЗШО и универсального почвогрунта: ЗШО – $3,4 \pm 0,5$ см; почвогрунт – $3,0 \pm 0,4$ см. В экспериментах использовалась водная вытяжка ЗШО без разбавления, при этом не было обнаружено никакого токсического действия на тест-объект, вследствие чего дальнейшее разбавление вытяжки не проводилось.

Значение средней длины корней проростков, выращенных на водной вытяжке ЗШО, больше, чем в контрольных – выращенных на водной вытяжке универсального почвогрунта, следовательно, ЗШО не оказывает токсичного действия на семена растений и его можно отнести к V классу опасности.

Биопрепарат, использованный в исследовании, включает бактерии рода *Azotobacter*. Данные микроорганизмы являются азотфиксирующими, т.е. способны переводить газообразный азот в растворимую форму, доступную для усвоения растениями. Имеют крупные клетки (1–2 мкм) как палочковидной, так и сферической формы. Рост и азотфиксация *Azotobacter* возможна в слабокислых, нейтральных и слабощелочных почвах (оптимальный pH – 7,0–7,5). Большое влияние на развитие данного рода также оказывает влажность. Азотобактер распространен в пресных водоемах, илах, сточных водах, сильно увлажненных почвах, на водных растениях в прудах и водохранилищах [18]. Источниками азота для бактерий служат соли аммония, нитриты, нитраты и аминокислоты. При отсутствии связанных форм азота азотобактер фиксирует молекулярный азот. Небольшие дозы азотсодержащих соединений не приводят к депрессии фиксации азота, а иногда даже стимулируют ее. Увеличение дозы связанного азота в среде полностью подавляет усвоение молекулярного азота [19].

Для оценки возможности использования ЗШО в качестве субстрата для биологической рекультивации в соответствии с ГОСТ 33061–2014 были выбраны два вида растений – овес обыкновенный (*Avena sativa*) и клевер красный (*Trifolium pretense*). Обе культуры являются сидеральными, часто выращиваются с целью улучшения структуры почвы, обогащения питательными элементами и угнетения роста сорняков. Овес обыкновенный и клевер красный благоприятно развиваются в условиях высокой влажности (70–80 %). Оптимальный диапазон pH для раз-

вития семян овса – от 5,0 до 6,0, для семян клевера красного – от 6,0 до 7,0. Овес и клевер красный богаты фосфором и калием, активно поглощают эти питательные вещества из почв, переводя микроэлементы в наиболее усваиваемые для растений формы [20].

В табл. 4 представлены результаты определения всхожести, мокрой и сухой биомассы, длины корней и стеблей проростков овса обыкновенного и клевера красного в различных условиях проведения экспериментов.

Таблица 4

Результаты определения показателей тест-функций
при выращивании овса и клевера в различных условиях

Показатель	Без внесения добавок		С удобрением		С биопрепаратом	
	ЗШО	Почво-грунт	ЗШО	Почво-грунт	ЗШО	Почво-грунт
<i>Овес</i>						
Всхожесть, %	75,0 ± 9,8	100	95,0 ± 4,8	95,0 ± 4,8	80,0 ± 19,6	100
Мокрая биомасса, г	0,46 ± 0,09	3,13 ± 0,44	0,67 ± 0,20	2,72 ± 0,38	0,63 ± 0,37	2,50 ± 0,15
Сухая биомасса, г	0,24 ± 0,10	0,38 ± 0,01	0,23 ± 0,11	0,42 ± 0,10	0,23 ± 0,10	0,41 ± 0,10
Средняя длина корней, см	9,1 ± 3,6	9,6 ± 1,9	10,8 ± 3,1	10,7 ± 0,8	10,1 ± 4,1	11,8 ± 0,4
Средняя длина стеблей, см	2,4 ± 0,7	4,7 ± 0,1	3,7 ± 0,7	3,7 ± 0,5	3,3 ± 0,6	4,5 ± 0,4
<i>Клевер</i>						
Всхожесть, %	55,0 ± 9,8	75,0 ± 9,8	35,0 ± 29,4	45,0 ± 29,4	55,0 ± 9,8	60,0 ± 19,6
Мокрая биомасса, г	0,04 ± 0,02	0,10 ± 0,05	0,02 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,23 ± 0,44	0,56 ± 0,13
Сухая биомасса, г	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,02 ± 0,02	0,02 ± 0,004
Средняя длина корней, см	5,3 ± 2,3	2,4 ± 1,4	4,6 ± 4,6	1,3 ± 0,4	5,4 ± 1,9	1,5 ± 0,7
Средняя длина стеблей, см	1,7 ± 0,5	3,1 ± 1,1	1,8 ± 0,7	0,8 ± 0,4	2,5 ± 0,6	1,8 ± 0,1

Основным отличием тест-культур, использованных при проведении настоящего исследования, является способность клевера накапливать и самостоятельно воспроизводить азот, в то время как овес – культура, которая такими способностями не обладает, поэтому ее рекомендуется сеять на почвы, где ранее произрастали клевер или люцерна [20]. Результаты проведенных экспериментов показывают, что наилучшие показатели всхожести семян овса на ЗШО (см. табл. 4) наблюдаются в образцах с дополнительно внесенным NPK-удобрением

«Аммофоска». В этих условиях всхожесть овса сопоставима с всхожестью на универсальном грунте. У семян клевера красного показатели, наиболее близкие к образцу, выращенному на универсальном почвогрунте, наблюдались в образцах с внесенным биопрепаратом, содержащим бактерии рода *Azobacter*. Отдельно стоит отметить, что биопрепарат вносился в образцы совместно с удобрением, так как бактерии рода *Azobacter* очень требовательны к питательным веществам и на бедных микроэлементами грунтах не развиваются.

Обобщая результаты экспериментов, приведенные в табл. 4, можно сделать вывод, что клевер красный при выращивании на ЗШО чувствует себя комфортнее, чем овес. Наилучшие показатели роста и развития клевера наблюдаются в образцах с дополнительно внесенным биопрепаратом. Можно предположить, что именно в этих образцах микроорганизмы получают наибольшее количество необходимых питательных веществ для развития – от самого клевера и от удобрений. Следовательно, процесс азотфиксации «поставляет» семенам клевера наибольшее количество доступных форм азота, в то время как в образцах с семенами овса недостаточно азота для развития и питания как самой культуры, так и микроорганизмов. Для проращивания семян этой тест-культуры оптимальные условия создаются в образцах с удобрением. Для развития корней и стеблей дополнительно можно вносить биопрепарат, но более подходящий для данной культуры.

Выводы. Результаты проведенных исследований показали, что золошлаковые отходы Троицкой ГРЭС не обладают токсическими свойствами, поэтому могут быть использованы в качестве субстрата для биологической рекультивации нарушенных земель. Однако отход содержит мало питательных компонентов и для развития сидеральных культур требуется внесение удобрений.

Введение биологического препарата бактерий рода *Azotobacter* оказало благоприятный эффект на росте и развитии тест-культуры клевера красного. В то же время всхожесть семян овса обыкновенного изменилась незначительно. Можно заключить, что подбор биологического препарата должен проводиться в соответствии с выращиваемой культурой. В целом способ модификации ЗШО биологическим препаратом имеет положительное влияние на развитии высших растений и может рекомендоваться для разработки рекультивационного материала на основе данных отходов. Также применение данного способа может способствовать более быстрому формированию почвенного слоя, что является крайне важным для восстановления экосистем.

Список литературы

1. Пути снижения воздействия на окружающую среду отходов ТЭС (на Донбассе) / С.Е. Гулько, Н.Г. Насонкина, Д.Г. Соколов, С.Е. Антоненко, В.С. Забурдаев // *Строитель Донбасса*. – 2024. – № 1 (26). – С. 15–21.
2. Чукаева, М.А. Комплексная переработка высокоуглеродистых золошлаковых отходов / М.А. Чукаева, В.А. Матвеева, И.П. Сверчков // *Записки Горного института*. – 2022. – Т. 253. – С. 97–104. DOI: 10.31897/PMI.2022.5
3. Пичугин, Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций / Е.А. Пичугин // *Проблемы региональной экологии*. – 2019. – № 4. – С. 77–87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077
4. Сидорова, Г.П. Экологическое воздействие угольных ТЭС на окружающую среду / Г.П. Сидорова, Д.А. Крылов, А.А. Якимов // *Вестник Забайкальского государственного университета*. – 2015. – № 9 (124). – С. 28–38.
5. Снегирев, В.А. Состояние проблемы биовыщелачивания металлов из золошлаковых отходов / В.А. Снегирев, Т.М. Сабинова // *Металлург*. – 2021. – № 7. – С. 90–99. DOI: 10.52351/00260827_2021_07_90
6. Крылов, Д.А. «Токсичность» угольной тепло-электрогенерации / Д.А. Крылов // *Горная промышленность*. – 2016. – № 5 (129). – С. 66–71.
7. Худякова, Л.И. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций / Л.И. Худякова, А.В. Залуцкий, П.Л. Палеев // *XXI век. Техносферная безопасность*. – 2019. – Т. 4, № 3 (15). – С. 375–391. DOI: 10.21285/2500-1582-2019-3-375-391
8. Coal Fly Ash Utilization in Agriculture: Its Potential Benefits and Risks / R.P. Singh, A.K. Gupta, M.H. Ibrahim, A.K. Mittal // *Reviews in Environmental Science and Bio Technology*. – 2010. – No. 9 (4). – P. 345–358. DOI: 10.1007/s11157-010-9218-3
9. Палеев, П.Л. Использование золошлаковых отходов в сельском хозяйстве / П.Л. Палеев, Л.И. Худякова // *XXI век. Техносферная безопасность*. – 2021. – Т. 6, № 4 (24). – С. 348–356. DOI: 10.21285/2500-1582-2021-4-348-356
10. Yadav, S. Ecological restoration of fly-ash disposal areas: Challenges and opportunities / S. Yadav, V.C. Pandey, L. Singh // *Land Degradation & Development*. – 2021. – Vol. 32, no. 16. – P. 4453–4471. DOI: 10.1002/ldr.4064
11. Potential Fly-ash Utilization in Agriculture: A Global Review / M. Basu, M. Pande, P.B.S. Bhadoria, S.C. Mahapatra // *Progress in Natural Science*. – 2009. – No. 19. – P. 1173–1186. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.12.006
12. Jambhulkar, H.P. Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A review / H.P. Jambhulkar, S.M.S. Shaikh, M.S. Kumar // *Chemosphere*. – 2018. – Vol. 213. – P. 333–344. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.09.045
13. Varshney, A. Composition and Dynamics of Microbial Communities in Fly Ash-Amended Soil / A. Varshney, S. Mohan, P. Dahiya // *Plant Microbiome Paradigm*. – Springer, Cham., 2020. – P. 231–246. DOI: 10.1007/978-3-030-50395-6_12

14. Химический анализ почв: учеб. пособие / О.Г. Растворова [и др.]. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1995. – 264 с.
15. Безручко, Е.В. Кремний – недооцененный элемент питания растений / Е.В. Безручко // Земледелие. – 2020. – № 4. – С. 40–46. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10411
16. Аканова, Н.И. Роль магния в системе питания растений / Н.И. Аканова, А.В. Козлова, М.Т. Мухина // Агрохимический вестник. – 2021. – № 6. – С. 66–72. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-6-014
17. Журова, В.Г. Изучение влияния ионов калия, кальция и магния на рост и развитие растений / В.Г. Журова, М.С. Светличная // Достижения науки и образования. – 2018. – № 14 (36). – С. 13–15.
18. Прозоркина, Н.В. Основы микробиологии, вирусологии и иммунологии: учеб. пособие / Н.В. Прозоркина. – Ростов н/Д: Феникс, 2012. – 378 с.
19. Кочашова, В.Е. Определение активности микроорганизмов рода *Azotobacter* в почвах сельскохозяйственного назначения Доволенского района и их влияние на развитие корневой системы растений / В.Е. Кочашова, Т.С. Томбасова // Юный ученый. – 2023. – № 5 (68). – С. 257–259.
20. Сравнительная оценка сидеральных культур и способов их заделки на серых лесных почвах Лесостепи Иркутской области / В.И. Солодун, Л.А. Цвынтарная, А.М. Зайцев, М.С. Горбунова // Почвы степных и лесостепных экосистем Внутренней Азии и проблемы их рационального использования: материалы междунар. науч.-практ. конф., приуроченной к 90-летию, засл. деятеля науки РБ, д-ра сельскохозяйств. наук, проф. И.А. Ишигенова. – Улан-Удэ: БГСХА им. В.Р. Филиппова, 2015. – С. 211–214.

References

1. Gulko S.E., Nasonkina N.G., Sokolov D.G., Antonenko S.E., Zaburdaev V.S. Puti snizheniia vozddeistviia na okruzhaiushchuiu sredu otkhodov TES (na Donbasse) [Ways to reduce the environmental impact of waste from thermal power plants (in Donbass)]. *The Builder of Donbass*, 2024, no. 1 (26), pp. 15-21.
2. Chukaeva M.A., Matveeva V.A., Sverchkov I.P. Kompleksnaia pererabotka vysokouglerodistykh zoloshlakovykh otkhodov [Complex processing of high carbon ash and slag waste]. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 97-104. DOI: 10.31897/PMI.2022.5.
3. Pichugin E.A. Analiticheskii obzor nakoplenno go v Rossiiskoi Federatsii opyta вовlecheniia v khoziaistvennyi oborot zoloshlakovykh otkhodov teploelektrstantsii [Analytical review of the experience of involving ash and slag waste of thermal power plants in economic circulation gained in the Russian Federation]. *Regional Environmental Issues*, 2019, no. 4, pp. 77-87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077.
4. Sidorova G.P., Krylov D.A., Yakimov A.A. Ekologicheskoe vozddeistvie ugol'nykh TES na okruzhaiushchuiu sredu [Environmental impact of coal plants on

the environment]. *Vestnik Zabajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 9 (124), pp. 28-38.

5. Snegirev V.A., Sabirova T.M. Sostoianie problemy biovyshchelachivaniia metallov iz zoloshlakovykh otkhodov [State and problems of bioleaching of metals from ash and slag waste]. *Metallurgist*, 2021, no. 7, pp. 90-99. DOI: 10.52351/00260827_2021_07_90

6. Krylov D.A. «Toksichnost'» ugol'noi teplo-elektrogeneratsii ["Toxicity" of Coal-fired Heat and Power Generation]. *Gornaya promyshlennost'*, 2016, no. 5 (129), pp. 66-71.

7. Khudyakova L.I., Zalutskiy A.V., Paleev P.L. Ispol'zovanie zoloshlakovykh otkhodov teplovykh elektrostantsii [Use of ash and slag waste of thermal power plants]. *XXI Century. Technosphere Safety*, 2019, vol. 4, no. 3 (15), pp. 375-391. DOI: 10.21285/2500-1582-2019-3-375-391.

8. Singh R.P., Gupta A.K., Ibrahim M.H., Mittal A.K. Coal fy ash utilization in agriculture: its potential benefits and risks. *Reviews in Environmental Science and Bio Technology*, 2010, no. 9 (4), pp. 345-358. DOI: 10.1007/s11157-010-9218-3.

9. Paleev P.L., Khudyakova L.I. Ispol'zovanie zoloshlakovykh otkhodov v sel'skom khoziaistve [Application of ash and slag waste in agriculture]. *XXI Century. Technosphere Safety*, 2021, vol. 6, no. 4 (24), pp. 348-356. DOI: 10.21285/2500-1582-2021-4-348-356.

10. Yadav S., Pandey V.C., Singh L. Ecological restoration of fly-ash disposal areas: Challenges and opportunities. *Land Degradation & Development*, 2021, vol. 32, no. 16, pp. 4453-4471. DOI: 10.1002/ldr.4064.

11. Basu M., Pande M., Bhadoria P.B.S., Mahapatra S.C. Potential fly-ash utilization in agriculture: a global review. *Progress in Natural Science*, 2009, no. 19, pp. 1173-1186. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.12.006.

12. Jambhulkar H.P., Shaikh S.M.S., Kumar M.S. Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: a review. *Chemosphere*, 2018, vol. 213, pp. 333-344. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.09.045.

13. Varshney A., Mohan S., Dahiya P. Composition and dynamics of microbial communities in fly ash-amended soil. In: *Plant Microbiome Paradigm*. Springer, Cham., 2020, pp. 231-246. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50395-6_12.

14. Rastvorova O. G., Andreev D. P., Gagarina Je. I., Kasatkina G. A., Fedorova N. N. Khimicheskii analiz pochv [Himicheskij analiz pochv] [Chemical Analysis of Soils]. SPb., Izdatel'stvo S.-Peterburgskogo universiteta, 1995, 264 p.

15. Bezruchko E. V. Kremnii – nedootsenennyi element pitaniia rastenii [Silicon is an Underestimated Plant Nutrient]. *Zemledelie*, 2020, no. 4, pp. 40-46. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10411.

16. Akanova N.I., Kozlova A.V., Mukhina M.T. Rol' magniia v sisteme pitaniia rastenii [Magnesium role in plant nutrition system]. *Agrohimicheskij Vestnik*, 2021, no. 6, pp. 66-72. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-6-014.

17. Zhurova V.G., Svetlichnaja M.S. Izuchenie vlianiia ionov kaliia, kal'tsiia i magniia na rost i razvitie rastenii [Study of the influence of potassium, calcium and magnesium ions on the growth and development of plants]. *Dostizheniya Nauki i Obrazovaniya*, 2018, no. 14 (36), pp. 13-15.

18. Prozorkina N.V. Osnovy mikrobiologii, virusologii i immunologii [Osnovy mikrobiologii, virusologii i immunologii] [Fundamentals of Microbiology, Virology and Immunology]. Rostov on Don., Feniks, 2012. 378 p.

19. Kochashova V.E., Tombasova T.S. Opredelenie aktivnosti mikroorganizmov roda *Azotobacter* v pochvakh sel'skokhoziaistvennogo naznacheniia Dovolenskogo raiona i ikh vliianie na razvitie kornevoi sistemy rastenii [Isolation of active microorganisms of the genus *Azotobacter* as a result of joint use of the Dovolensky district and their effect on the development of the root system of plants]. *Junyj uchenyj*, 2023, no. 5 (68), pp. 257-259.

20. Solodun V.I., Tsvyntarnaya L.A., Zaitsev A.M., Gorbunova M.S. Sravnitel'naia otsenka sideral'nykh kul'tur i sposobov ikh zadelki na serykh lesnykh pochvakh Lesostepi Irkutskoi oblasti [Comparative evaluation green manure crops and their method of closure on grayforest soils of forest-steppe Irkutsk region]. Soils of steppe and forest-steppe ecosystems of inner Asia and problems of their rational use: Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the honored scientist of the Republic of Buryatia, doctor of agricultural sciences, professor Ishigenov Ivan Afanasyevich. Ulan-Udje, BGSNA im. V.R. Fillipova, 2015, pp. 211-214.

Об авторах

Юрк Виктория Михайловна (Екатеринбург, Российская Федерация) – кандидат химических наук, доцент кафедры химической технологии топлива и промышленной экологии Уральского федерального университета (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: v.yurk@yandex.ru).

Бородина Алиса Александровна (Екатеринбург, Российская Федерация) – студентка магистратуры кафедры химической технологии топлива и промышленной экологии Уральского федерального университета (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: sleepybat3001@gmail.com).

Снегирев Вячеслав Алексеевич (Екатеринбург, Российская Федерация) – ассистент кафедры химической технологии топлива и промышленной экологии Уральского федерального университета (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: v.a.snegirev@urfu.ru).

Третьякова Наталья Александровна (Екатеринбург, Российская Федерация) – кандидат химических наук, доцент кафедры химической технологии топлива и промышленной экологии Уральского федерального университета (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: n-tretyakova@mail.ru).

About the authors

Victoria M. Yurk (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technology of Fuel and Industrial Ecology, Ural Federal University (19, Mira Str., Ekaterinburg, 620062; e-mail: v.yurk@yandex.ru).

Alisa A. Borodina (Ekaterinburg, Russian Federation) – Master's student, Department of Chemical Technology of Fuel and Industrial Ecology, Ural Federal University (19, Mira Str., Ekaterinburg, 620062; e-mail: sleepybat3001@gmail.com).

Vyacheslav A. Snegirev (Ekaterinburg, Russian Federation) – Assistant, Department of Chemical Technology of Fuel and Industrial Ecology, Ural Federal University (19, Mira Str., Ekaterinburg, 620062; e-mail: v.a.snegirev@urfu.ru).

Natalia A. Tretyakova (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technology of Fuel and Industrial Ecology, Ural Federal University (19, Mira Str., Ekaterinburg, 620062; e-mail: n-tretyakova@mail.ru).

Поступила: 27.05.2025

Одобрена: 25.06.2025

Принята к публикации: 25.07.2025

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Оценка возможности использования золошлаковых отходов для биологической рекультивации / В.М. Юрк, А.А. Бородин, В.А. Снегирев, Н.А. Третьякова // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2025. – № 3. – С. 17–32.

Please cite this article in English as:

Yurk V.M., Borodina A.A., Snegirev V.A., Tretyakova N.A. Assessment of the possibility of using ash and slag waste for biological remediation. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2025, no. 3, pp. 17-32 (*In Russ*).