

ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ГИГИЕНИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ УТИЛИЗАЦИИ ПРОДУКТОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

К. А. Воробьев[✉], Е. В. Колодежная

ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова»

Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация

✉ vorobyev_k@ipkonran.ru

Аннотация: Мусоросжигательные заводы (МСЗ) в настоящее время становятся важным элементом комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) в России. Рассмотрены вопросы обработки и трансформации в окружающей среде продуктов, образующихся при сжигании ТКО. Приведены результаты сравнительного анализа литературных данных о наличии в шлаках и зольных остатках от сжигания ТКО загрязняющих веществ с позиции эколого-гигиенического аспекта их утилизации или хранения. В качестве объекта исследований взяты шлак и летучая зола МСЗ № 3. С целью выявления возможности безопасного использования и депонирования данных отходов определено наличие в шлаках и зольных остатках загрязняющих веществ комплексом минералого-аналитических методов. Сделан однозначный вывод о значительном превышении в летучей золе содержания тяжелых металлов (по отношению к гигиеническим нормативам для почв), показана высокая миграционная способность тяжелых металлов из золы в почвы, воды поверхностных и подземных источников. Сравнение содержаний тяжелых металлов и микроэлементов в водных вытяжках шлаков с ПДК химических веществ в воде водных объектов показало, что по всем основным экоконтролируемым элементам концентрации гораздо ниже ПДК. Из результатов испытаний на выщелачивание изучаемых шлаков следует, что перехода тяжелых металлов из шлаков практически не происходит, значит, шлаки стабильны и могут быть пригодны для рециклинга без каких-либо ограничений.

Ключевые слова: мусоросжигательный завод, остатки от сжигания твердых коммунальных отходов, шлак, летучая зола, водные вытяжки, ПДК, выщелачивание тяжелых металлов, химический состав, полигоны захоронения, класс опасности

Благодарности, признательность: авторы выражают искреннюю благодарность научному руководителю аспиранта – заведующему отделом горной экологии ИПКОН РАН, профессору, доктору технических наук И. В. Шадреновой и ведущему научному сотруднику отдела доктору технических наук О. Е. Горловой за ценные рекомендации при обсуждении результатов исследования.

Для цитирования: Воробьев КА, Колодежная ЕВ. Оценка эколого-гигиенических аспектов утилизации продуктов термической обработки твердых коммунальных отходов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):88-94. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-88-94>.

ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL AND HYGIENIC ASPECTS OF THERMAL TREATMENT WASTE DISPOSAL FROM MUNICIPAL SOLID WASTE

K. A. Vorobyev[✉], E. V. Kolodezhnaya

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow,

Russian Federation

✉ vorobyev_k@ipkonran.ru

Abstract: Waste incineration plants (WIPs) are currently becoming an important element of the integrated municipal solid waste (MSW) management system in Russia. This article examines the issues of processing and transformation of products formed during MSW incineration in the environment. The results of a comparative analysis of literature data on the presence of pollutants in slag and ash residues from MSW incineration are presented, from the perspective of the environmental and hygienic aspects of their disposal

or storage. Slag and fly ash from WIP No. 3 were taken as the object of research. In order to determine the possibility of safe use and disposal of these wastes, the presence of pollutants in slag and ash residues was determined using a complex of mineralogical and analytical methods. An unambiguous conclusion was drawn about a significant excess of heavy metal content in fly ash (in relation to hygienic standards for soils), and a high migration capacity of heavy metals from ash to soils and into surface and groundwater sources was demonstrated. A comparison of the contents of heavy metals and trace elements in aqueous extracts of slag with the maximum permissible concentrations (MPCs) of chemical substances in water bodies showed that, for all major environmentally controlled elements, the concentrations are much lower than the MPCs. The results of leaching tests on the studied slag indicate that the transfer of heavy metals from the slag is practically non-existent, which means that the slag is stable and may be suitable for recycling without any restrictions.

Keywords: waste incineration plant, MSW incineration residues, slag, fly ash, aqueous extracts, MPC, heavy metal leaching, chemical composition, landfills, hazard class

Acknowledgments: The authors express their sincere gratitude to the scientific supervisor of the postgraduate student, Head of the Department of Mining Ecology at IPKON RAS, D. Sc. (Eng.), Prof. Irina V. Shadrinova, and to the Leading Researcher of the Department, D. Sc. (Eng.) Olga E. Gorlova, for their valuable advice and guidance during the preparation of this article.

For citation: Vorobyev KA, Kolodezhnaya EV. Assessment of the environmental and hygienic aspects of thermal treatment waste disposal from municipal solid waste. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):88-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-88-94>.

Введение

Проводимая в настоящее время комплексная реформа системы обращения с отходами уже приносит некоторые положительные результаты, в том числе она благоприятно отразилась на реорганизации и улучшении инфраструктуры действующих полигонов ТКО. Мусоросжигательные заводы становятся важным элементом новой системы, так как они позволяют сократить объем отходов, уменьшить риск загрязнения окружающей среды, значительно снизить необходимость в мусоровозах и повысить эффективность использования ресурсов. На сжигание сегодня отправляется порядка 6 % образующихся отходов, но перспективность данного направления утилизации становится очевидной. Исключительным достоинством такого подхода является значительное (на 90 %) уменьшение объема и веса (на 70 %) твердых отходов, что является приоритетной стратегией обеспечения экологической безопасности и поддержания чистоты городской среды.

В мире сжигается в среднем более 10 % образующихся коммунальных отходов. Во многих европейских странах, таких как Швеция, Франция, Нидерланды и Дания, этот показатель превышает 50 % [1]. Всего в развитых странах ежегодно образуется свыше 550 млн т муниципальных отходов. Наиболее остро проблема переработки шлаков, образующихся при сжигании мусора, стоит в Японии, где сжигается свыше 70 % муниципальных отходов. По данным Агентства по защите окружающей среды США (US EPA, 2000 г.), на 102 мусоросжигательных заводах было переработано 35 млн т (39 % от общего объема), что привело к образованию 8,75 млн т остатков сжигания. В Германии в отрасли утилизации обрабатывается более 20 % всех твердых отходов, в том числе и муниципальных [2]. Начиная с 1990-х годов количество отходов, размещаемых на полигонах захоронения, с каждым годом сокращается, а подвергаемых переработке – увеличивается. Так, ежегодно сжигается 9–11 млн т отходов [3, 4].

Процесс сжигания ТКО не является безотходным, в результате термического воздействия происходит трансформация вещества с образованием остатков сжигания: шлака и золы, суммарное количество которых составляет 25–30 % от исходной массы ТКО. Зола обычно составляет около 2–6 % от исходной массы сжигаемых отходов [5, 6].

При этом способы обработки и трансформация твердых остатков сжигания в окружающей среде изучены на сегодняшний момент не в полной мере. В нескольких исследованиях были получены или обобщены данные о химическом составе шлака и летучей золы [7, 8]. Отмечается, что основными элементами шлака являются Si (91–308 г/кг), Al (22–73 г/кг), Fe (4–150 г/кг), Ca (0,4–123 г/кг), Mg (0,4–26 г/кг), а также S (1–5 г/кг), P (1–7 г/кг) и Cl (0,5–4,5 г/кг). Особое внимание уделяется содержанию в остатках сжигания As (0,12–189 мг/кг), Cd (0,3–70,5 мг/кг), Cr (23–3170 мг/кг), Cu (190–8240 мг/кг), Hg (0,02–7,75 мг/кг), Ni (7–4280 мг/кг), Pb (87–13700 мг/кг) из-за их токсичности [9, 10].

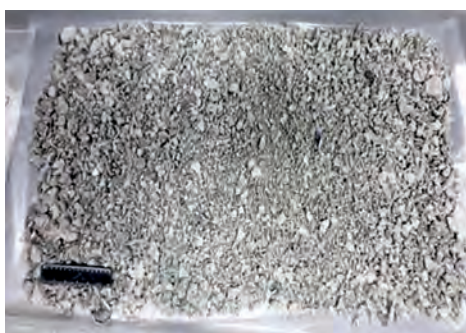
В золе-уносе распространены такие элементы, как Cl (45–380 г/кг), Ca (46–361 г/кг), Si (36–190 г/кг), Pb (254–27000 мг/кг), Zn (4308–41000 мг/кг). В золе обычно присутствуют следовые количества высокотоксичных органических соединений: полициклических углеводородов (ПАУ), хлорбензолов (ХБ), полихлорированных бифенилов (ПХБ), полихлорированных дибензо-*p*-диоксинов (ПХДД) и фуранов (ПХДФ).

Анализ литературных данных показал, что количество опасных химических соединений в шлаке намного ниже, чем в летучей золе от сжигания ТКО. Поэтому шлак, как правило, относится в IV классу и не включается в категорию опасных отходов. Зола-унос имеет III класс опасности и обычно классифицируется как опасные отходы из-за присутствия токсичных тяжелых металлов и диоксинов. Отметим, что содержания отдельных элементов и тяжелых металлов в золошлаковых отходах, диапазоны содержаний, приводимые в различных зарубежных и отечественных источниках, значительно разнятся. Поэтому нет однозначного вывода об опасности или неопасности таких отходов. В отношении зольных остатков от сжигания мусора практически всегда делается вывод о том, что они относятся к опасным отходам и обычное полигонное захоронение или вторичное использование неприемлемы для данного материала без предварительной обработки.

Химическое состояние, в которое переходят металлы в процессе сжигания отходов, важно, поскольку от этого зависит последующий переход их в окружающую среду в местах конечного захоронения (почвы, грунтовые и поверхностные воды) или вторичного использования таких материалов. По-



Шлак / slag



Зола / ash



Зола / ash

Рис. 1. Фотографии шлака и золы / Fig. 1. Photographs of slag and ash

ступление ионов тяжелых металлов в окружающую среду связано с антропогенным влиянием на биосферу, поскольку многие соединения тяжелых металлов обладают способностью растворяться, диссоциировать, перераспределяться и мигрировать в объектах окружающей среды [11].

Цель исследования: процессы выщелачивания загрязняющих веществ из остатков сжигания твердых отходов с целью минимизации их негативного воздействия на геосферные оболочки в результате миграции в природные среды (почвы, поверхностные и грунтовые воды) подвижных форм тяжелых металлов (главным образом, свинца, кадмия, цинка, меди, хрома).

Для достижения поставленной цели были определены химический состав и физико-механические показатели шлаков и летучей золы от сжигания ТКО комплексом минералого-аналитических методов, а также установлены закономерности выщелачивания загрязняющих веществ из остатков от сжигания ТКО с позиции эколого-гигиенического аспекта их утилизации или хранения.

Объектами исследования послужили пробы шлака и летучей золы Московского мусоросжигательного завода № 3, г. Москва. Отбор и подготовка представительных технологических проб проводились в соответствии с общепринятыми методиками.

Макроскопически шлак мусоросжигательных установок представляет собой кусковой материал серого цвета. Шлаковая масса, представленная вновь образованными при сжигании фазами, имеет пористую слабосцементированную структуру с максимальной крупностью агрегатов до 40 мм. Установлено наличие в шлаке небольшого количества металлического скрапа. Летучая зола представляет собой тонкодисперсный порошок светло-серого цвета, склонна к слеживанию и формированию комков.

Методы исследований

Вещественный состав и технологические свойства шлаков и золы-уноса от сжигания отходов формируются под влиянием большого количества факторов техногенного характера, что приводит к многообразию и непостоянству их состава и свойств, а следовательно, делает их трудными объектами для изучения.

Для проведения экспериментальных работ нами использовано уникальное оборудование Центра коллективного пользования ИПКОН РАН и ЗАО «Урал Омега». Отдельные образцы шлаков были исследованы в ВИМС и ИГЕМ РАН.

Техногенные материалы, образующиеся при высокотемпературных процессах, шлаки и золы мусоросжигательных

установок, представляют собой композиционные материалы и в составе содержат разнородные компоненты, содержание которых варьируется в широком диапазоне значений. В связи с этим определение химического состава исходных материалов проводилось рентгено-флуоресцентными методами анализа.

Шлак был отобран непосредственно из-под решетки теплоагрегата. Зола-унос сухого удаления была отобрана на выгрузке из тканевых фильтров систем газоочистки. Пробы подвергались усреднению, перемешиванию, квартованию и измельчению в соответствии с принятыми методиками. В процессе подготовки проб шлака к химическому анализу из них были удалены недробимые частицы металлического скрапа.

Внешний вид образцов шлака и золы-уноса представлен на рисунке 1.

Химический состав определен рентгено-флуоресцентным методом на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре ARL QUANT'X компании Thermo Scientific.

Гранулометрический состав шлака определен методом ситового анализа по ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний». Дисперсный состав золы определялся на лазерном анализаторе размера частиц Mastersizer 2000 Malvern Instruments (ГОСТ Р 8.777 2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения»).

Для оценки выщелачивания микроэлементов были проведены статические серийные тесты по методике, изложенной в работе [12], позволяющие оценить переход экоконтролируемых компонентов из остатков от сжигания ТКО в жидкую фазу. Для этого пробы шлаков и золы были выдержаны при комнатной температуре в течение нескольких дней для испарения лишней влаги. Шлак был просеян через сито с размером ячейки 10 мм. Материал крупнее был удален. Пробы навеской 50 г шлака помещались в стеклянную емкость, и к ним добавлялось 500 мл дистиллированной воды (рН 5,8). Смесь устанавливалась на магнитную мешалку для слабого перемешивания в течение 8 ч, а затем отстаивалась в спокойном состоянии в течение 12 ч. Жидкость отделялась от пробы и отфильтровывалась через фильтр бумаги два раза, определялся рН. Через 6 ч отфильтрованная жидкость анализировалась на микроэлементный состав.

Микроэлементный состав водных вытяжек, включающий Li, B, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Cd, Ba, W, Re, Pb и U, был определен методом масс-спектрометрии с индук-

тивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе SUPEC700 фирмы FPI. Концентрации макроэлементов Ca, Mg, K и Na были измерены методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP OES) на приборе EXPEC 6500 фирмы FPI.

Результаты исследований

Зерновой состав шлаков и зол от сжигания ТКО имеет большое значение для различных аспектов обращения с отходами. Результаты ситового анализа шлаков представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Гранулометрический состав шлака, % / Granulometric composition of slag, %

Остатки на ситах / Oversize fraction	Размер частиц / Oversize fraction retained								
	20 мм	10 мм	5 мм	2,5 мм	1,25 мм	0,63 мм	0,315 мм	0,16 мм	Дно / Pan
Частные / Individual Sieve Residues	2,5	41,3	41,5	7,5	3,3	0,9	0,8	0,7	1,5
Полные / Total Sieve Residue	2,5	43,8	85,3	92,8	96,1	97,0	97,8	98,5	100

Шлак имеет крупнозернистый состав с преобладанием частиц размером от 5 до 20 мм, пылевые классы практически отсутствуют. Это способствует хорошей водопроницаемости шлака при хранении и направленной обработке реагентами шлакового массива.

Результаты определения гранулометрического состава золы, приведенные в таблице 2, свидетельствуют о ее тонкодисперсном характере: 80 % частиц имеют размер менее 18,9 мкм.

Таблица 2 / Table 2

Показатели гранулометрического состава золы / Granulometric composition parameters of ash

Размер частиц D, мкм / Particle size D, μm	Количество материала меньше размера частиц D, % / Percentage of material finer than size D, %
3,6	10
4,8	20
8,7	50
18,9	80
32,9	90
60,0	98

Анализ гранулометрического состава позволяет предположить возможность использования золы в качестве вяжущего и тонкого наполнителя.

Анализ распределения частиц по размерам показывает, что средний медианный диаметр частиц шлака составляет 3,25 мм, зольного остатка – 8,7 мкм.

Результаты изучения физических и химических свойств остатков от сжигания ТКО приведены в таблице 3.

Как следует из представленных данных, летучая зола по сравнению со шлаком имеет меньшую плотность, меньший размер частиц, большую удельную поверхность и большую щелочность. Уровень pH золы-уноса и твердых остатков, образующихся при обработке дымовых газов (APC), высок и

обычно превышает $11 \div 12$ ед. из-за избытка извести, вводимой для очистки газов.

Таблица 3 / Table 3

Физические и химические свойства остатков от сжигания ТКО / Physical and chemical properties of municipal solid waste (MSW) incineration residues

Параметр / Parameter	Шлак / Slag	Летучая зола / Fly ash
Истинная плотность, кг/м ³ / True density, kg/m ³	2,1–2,3	2,7–3,2
Насыпная плотность, кг/м ³ / Bulk density, kg/m ³	0,9–1,1	0,6–0,7
Влажность, % / Moisture content, %	0,24	1,96
Средний медианный диаметр, мкм / Median diameter, μm	3 250	8,7
Максимальный размер частиц, мкм / Maximum particle size, μm	25 000	60
Удельная поверхность, м ² /кг / Specific surface area, m ² /kg	-	280,0
pH	8,9	11,4
Модуль основности / Basicity modulus	0,48	6,2
Модуль активности / Activity modulus	0,18	0,38

Для оценки использования шлаков термической утилизации ТКО в качестве вяжущего в составе бетонов применяется модуль основности ($\text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), который определяет количество кальция и магния в фазах, способных к гидратации, но не в карбонатах, и модуль активности ($\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$), дающие модулю основности и модулю активности представление о соотношении отдельных минералов и позволяющие оценить способность шлака к гидратации [13–15].

По результатам химического анализа (табл. 4) проб исследуемый шлак относится к кислым с модулем основности 0,48 и модулем активности 0,18, что указывает на возможно низкую гидратационную активность.

Таблица 4 / Table 4

Химический состав исследуемых шлака и золы уноса / Chemical composition of the analyzed slag and fly ash

Компонент / Element	Массовая доля элементов и соединений, % / Mass fraction of elements and their compounds, %	
	Шлак / Slag	Зола-унос / Fly ash
SiO_2	36,4	4,63
Al_2O_3	6,54	1,76
CaO	19,5	39,07
MnO	0,10	0,73
MgO	0,97	0,53
TiO_2	0,47	0,34
K_2O	0,95	4,96
P_2O_5	0,40	0,20
SO_3	1,03	3,50
ZnO	0,11	0,66
Fe_2O_3 (FeO)	5,22	1,58
Na_2O	2,25	3,24
PbO	-	0,13
Cl	0,43	16,64
As_2O_3	-	0,16

Результаты элементного анализа водных вытяжек шлаков сжигания ТКО представляют собой ценный материал для

изучения геохимических процессов, протекающих при термической обработке отходов, и их влияния на окружающую среду. Оценка возможного неблагоприятного влияния отхода на окружающую среду проводится путем сопоставления уровня фактического соединения компонентов отходов в водном и буферном экстрактах с их ПДК для воды водоемов (ПДК_в) и содержания токсикантов в мг/кг в отходах с их ПДК в почве (ПДК_п).

Тест на выщелачивание загрязняющих веществ был проведен на пробах шлаков, поскольку из результатов химического анализа летучей золы следовало, что содержание экоконтролируемых тяжелых металлов: цинка, свинца, мышьяка – превышает ПДК химических веществ в почве в соответствии с гигиеническими нормативами (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Содержание некоторых экоконтролируемых элементов в летучей золе в сравнении с ПДК_п /
Content of selected environmentally controlled elements in fly ash compared to MAC_s

Соединение / Compound	Массовая доля в золе, % / Mass fraction in ash, %	Элемент / Element	Содержание элемента, мг/кг / Element content, mg/kg	ПДК _п , мг/кг / MAC _s , mg/kg
MnO	0,73	Mn	5 621	1 500
ZnO	0,66	Zn	5 280	23,0
PbO	0,13	Pb	1 200	32,0
As ₂ O ₃	0,16	As	1 210	2,0

Наиболее адекватно прогнозировать потенциальную опасность промышленного отхода для окружающей среды позволяет буферная вытяжка, поскольку она наиболее приближенно к реальным условиям моделирует кислотность почвенного раствора и кислотных дождей, поэтому проводили процедуру выщелачивания в дистиллированной воде

и в ацетатно-аммонийном буферном растворе. Элементный состав вытяжек водных и в ацетатно-аммонийном буферном растворе по микроэлементам в размерности ppb (миллиардная доля, в системе единиц СИ означает множитель 10⁻⁹) приведен на рисунке 2.

Для шлаков МСЗ характерно статистически значимое повышение концентраций Li, B, Cr, Fe, Rb, Sr, Ba, W и Re. Данные элементы связаны с определенными компонентами ТКО, характерными для городской среды мегаполиса, также включающими промышленные и бытовые отходы.

В буферных вытяжках содержания микроэлементов выше по сравнению с водными вытяжками ввиду слабокислой среды ацетатно-аммонийного буферного раствора (pH 4,8). Сравнение содержания элементов в водных вытяжках шлака с ПДК химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования показывает, что по основным тяжелым металлам содержание гораздо ниже ПДК_в. Превышение ПДК_в наблюдается только по литию и по вольфраму.

Приведенные данные по водным и буферным вытяжкам свидетельствуют, что перехода тяжелых металлов из шлаков практически не происходит, и подтверждают исключение возможности миграции вредных веществ из шлаков или продуктов их переработки в окружающую среду.

Элементный состав вытяжек шлаков, определенный методами количественного анализа, позволяет установить класс опасности отходов расчетным методом по ориентировочному водно-миграционному показателю (ОВМП) в соответствии с СП 2.1.7.1386-03 «Определение класса опасности токсичных отходов производства и потребления». Этот показатель используется для предварительной оценки водно-миграционной опасности отхода и характеризует возможное отрицательное влияние отхода на условия жизни и здоровье человека в результате миграции его компонентов в грунтовые и поверхностные воды.

По результатам химического анализа водного экстракта

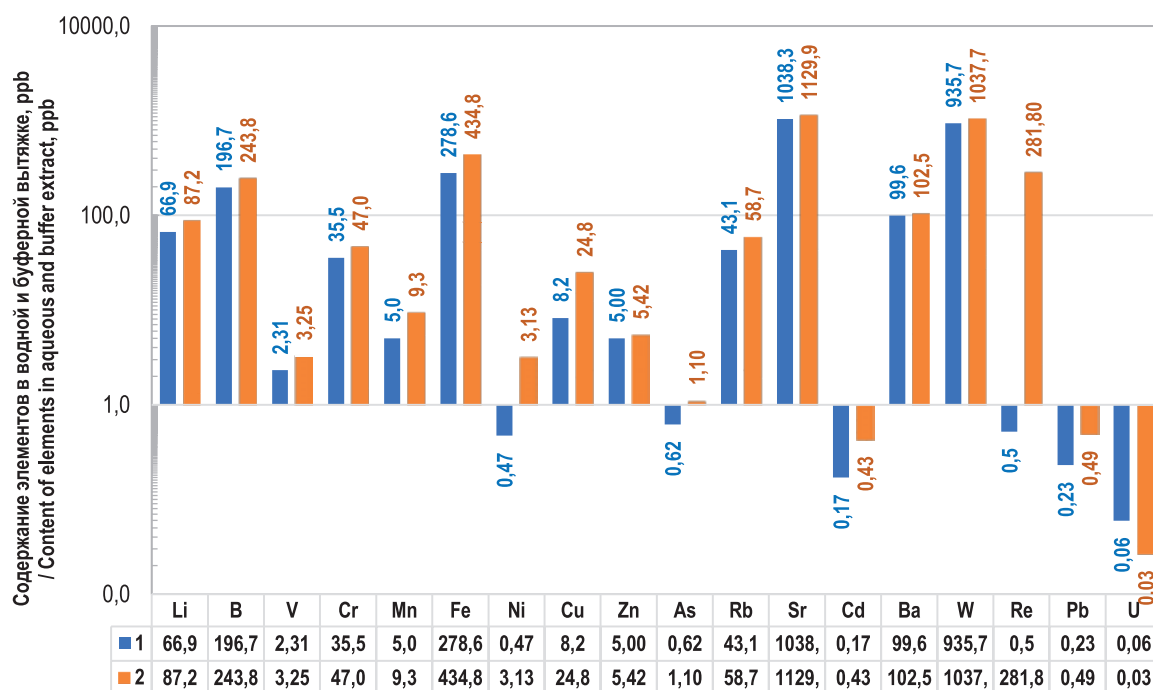


Рис. 2. Элементный состав водной (1) и буферной (2) вытяжки шлака по микроэлементам /
 Fig. 2. Elemental composition of aqueous (1) and buffer (2) extract of slag with respect to trace elements

производился расчет ОВМП_в, по результатам анализа буферного экстракта отхода – расчет ОВМП_б по формулам:

$$\text{ОВМП}_{\text{в(б)}} = \sum \frac{C_i^{\text{в(б)}}}{\text{ПДК}_i^{\text{в(б)}}},$$

где $C_i^{\text{в}}$, $C_i^{\text{б}}$ – фактические концентрации i -того компонента в водном и буферном экстрактах соответственно, мг/л;

$\text{ПДК}_i^{\text{в}}$ – предельно допустимая концентрация содержания данного компонента в воде водоемов, мг/л.

По результатам расчета для шлака ОВМП_в = 22,38, класс опасности – III. Таким образом, шлак московского МСЗ по ориентировочному водно-миграционному показателю является умеренно опасным.

Заключение

1. Анализ литературных данных о наличии в шлаках и зольных остатках от сжигания ТКО загрязняющих веществ и их способности мигрировать в соприкасающиеся с отходами среды, с позиции эколого-гигиенического аспекта их утилизации или хранения показал, что в отношении летучей золы большинством исследователей установлена высокая миграционная способность тяжелых металлов из золы в почвы и воды поверхностных и подземных источников. Зольные остатки классифицируются как опасные отходы, обычное полигонное захоронение которых или вторичное использование чаще всего неприемлемо. В отношении шлаков такого однозначного вывода об их опасности или неопасности не делается, потому что данные, приводимые в разных источниках, существенно разнятся.

2. Для каждого изучаемого отхода, наряду с достоверными данными о его качественно-количественных характеристиках, необходимо проведение тестов по выщелачиванию для оценки потенциального экологического риска, создаваемого экотоксикантами. Наличие ингредиентов, например тяжелых металлов, в составе отхода лишь косвенно свидетельствует о его токсичности и не в полной мере характеризует миграционную активность токсичных элементов, как и возможность неблагоприятного воздействия продуктов переработки отходов и на окружающую среду.

3. Были получены экстракты выщелачивания (водные и ацетатно-аммонийные буферные вытяжки) проб шлака и проанализированы на содержание в них микроэлементов современными аналитическими методами. Сравнение содержаний тяжелых металлов и микроэлементов в водных вытяжках шлака МСЗ № 3 с ПДК химических веществ в воде водных объектов показало, что по всем основным экоконтролируемым элементам концентрации гораздо ниже ПДК_в. Некоторое превышение ПДК наблюдается только по литию и вольфраму.

4. Из результатов испытаний на выщелачивание изучаемых шлаков следует, что перехода тяжелых металлов из шлаков практически не происходит, значит, шлаки стабильны и пригодны для повторного использования.

5. Дальнейшая работа будет направлена на проработку технологических решений и эколого-социальное обоснование соутилизации отходов от сжигания ТКО и секвестрации углекислого газа методом минеральной карбонизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Алексашина ВВ. Экология города. Мусоросжигательные заводы. *Academia. Архитектура и строительство*. 2014; 4: 10. [Aleksashina VV. The ecology of the city. waste incineration plants. *Academia. Architecture and Construction*. 2014; 4: 10. (In Russ.)].
2. Щерба ВА, Баранова КР, Абрамова ЕА и др. Особенности правового регулирования и обращения с твердыми коммунальными отходами в России и Германии. *Отходы и ресурсы*. 2023; 10 (2): 1-12. [Shcherba VA, Baranova KR, Abramova EA, et al. Features of legal regulation and management of municipal solid waste in Russia and Germany. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2023; 10 (2): 1-12. (In Russ.)]. DOI: 10.15862/12NZOR223.
3. Costa G, Baciocchi R, Poletti A, et al. Current status and perspectives of accelerated carbonation processes on municipal waste combustion residues. *Environ Monit Assess*. 2017; 135: 55-75.
4. Воробьев КА, Щерба ВА. Особенности захоронения CO₂ в техногенных литосферных реакторах как фактор сокращения количества его антропогенных выбросов. *География: развитие науки и образования: Сборник статей по материалам ежегодной международной научно-практической конференции (к 225-летию Герценовского университета): В 2 томах*. Санкт-Петербург, 2022; II: 31-35 [Vorobyev KA, Shcherba VA. Features of CO₂ disposal in technogenic lithospheric reactors as a factor in reducing its anthropogenic emissions. *Geography: Development of Science and Education: Collection of Articles Based on the Materials of the Annual International Scientific and Practical Conference (on the 225th Anniversary of Herzen University)*. In 2 volumes. St. Petersburg, 2022; II: 31-35. (In Russ.)].
5. Hongwei Luo, Ying Cheng, Dongqin He, et al. Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash. *Science of The Total Environment*. 2019; 668: 90-103. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.004.
6. Колодежная ЕВ, Шадрюнова ИВ, Горлова ОЕ, et al. Вещественный состав остатков сжигания твердых коммунальных отходов и оценка их потенциала минерального связывания диоксида углерода. *Обогащение руд*. 2025; 1: 42-49. [Kolodezhnaya EV, Shadrinova IV, Gorlova OE, et al. Material composition of solid municipal waste incineration residues and assessment of their potential for mineral carbon dioxide binding. *Ore Processing*. 2025; 1: 42-49. (In Russ.)]. DOI: 10.17580/or.2025.01.07.
7. Lindberg D, Molin C, Hupa M. Thermal treatment of solid residues from WtE units: a review. *Waste Manag*. 2015; 37: 82-94. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.12.009.
8. Taurino R, Karamanova E, Barbieri L, et al. New fired bricks based on municipal solid waste incinerator bottom ash. *Waste Manag. Res*. 2017; 35 (10): 1055-1063. DOI: 10.1177/0734242X17721343.
9. Ko MS, Chen YL, Wei PS. Recycling of municipal solid waste incinerator fly ash by using hydrocyclone separation. *Waste Manag*. 2013; 33 (3): 615-620. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.10.009.
10. Chen D, Zhang Y, Xu Y, et al. Municipal solid waste incineration residues recycled for typical construction materials-a review. *RSC Adv*. 2022; 12 (10): 6279-6291. DOI: 10.1039/d1ra08050d.
11. Гонопольский АМ, Дыган ММ, Тимофеева АА. Некоторые физико-химические свойства золошлаковых отходов мусоросжигательных заводов. *Экология и промышленность России*. 2008; 7: 36-39. [Gonopolsky AM, Dugan MM, Timofeeva AA. Some physical and chemical properties of ash and slag waste from waste incineration plants. *Ecology and Industry of Russia*. 2008; 7: 36-39. (In Russ.)].

12. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04 Т 16.1:2:3:3.8-04. Токсикологические методы анализа. Методика определения интегральной токсичности поверхностных, в том числе морских, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных экстрактов почв, отходов, осадков сточных вод по изменению интенсивности бактериальной билюминесценции тест системой «Эколюм». Москва, 2004: 22. [PND F T 14.1:2:3:4.11-04 Т 16.1:2:3:3.8-04 Toxicological methods of analysis. Method for determining the integral toxicity of surface water, including marine, groundwater, drinking water, wastewater, aqueous extracts of soils, waste, and sewage sludge, based on changes in the intensity of bacterial bioluminescence using the Ecolum test system. Moscow, 2004: 22. (In Russ.)].

13. Zhang H, He PJ, Shao LM et al. Leaching behavior of heavy metals from municipal solid waste incineration bottom ash and its geochemical modeling. *J Mater Cycles Waste Manag.* 2008; 10: 7-13. DOI: 10.1007/s10163-007-0191-z.

14. Luo H, Cheng Y, He D, Yang EH. Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash. *Sci Total Environ.* 2019; 668: 90-103. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.004.

15. Mehdizadeh H, Jia X, Mo KH, et al. Effect of water-to-cement ratio induced hydration on the accelerated carbonation of cement pastes. *Environmental Pollution.* 2021; 280: 116914. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116914.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Кирилл Александрович Воробьев – аспирант, инженер отдела горной экологии ИПКОН РАН, 111020, г. Москва, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5792-3979>, e-mail: vorobyev_k@ipkonran.ru



Екатерина Владимировна Колодежная – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела горной экологии, ИПКОН РАН, 111020, г. Москва, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-0252-4479>, e-mail: kev@uralomega.ru

ABOUT THE AUTHORS

Kirill A. Vorobyev – Post-graduate Student, Engineer of the Department of Mining Ecology, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5792-3979>, e-mail: vorobyev_k@ipkonran.ru

Ekaterina V. Kolodezhnaya – Cand. Sci. (Eng.), associate professor, Leading Researcher of the Department of Mining Ecology, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation, e-mail: kev@uralomega.ru

Критерии авторства / Contribution:

К. А. Воробьев – формулирование идеи и задач исследования, отбор проб шлаков и золы на мусоросжигательных заводах, разработка методики и проведение экспериментов, выполнение работы по систематизации теоретического и экспериментального материала, написание текста статьи (80 % авторского участия). Е. В. Колодежная – работы по систематизации материала, разработка метода исследования, проведение экспериментов, обработка результатов, написание текста статьи (20 % авторского участия) / К. А. Vorobyev – formulation of the idea and formulation of the research task, sampling of slag and ash at incinerators, development of methods and experiments, carrying out work on the systematization of theoretical and experimental material, writing the text of the article (80 % authorship contributions); Е. V. Kolodezhnaya – work systematization of the material, development of the research method, conducting experiments, processing results, writing the text of the article (20 % authorship contributions).

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 05.05.2025.

Поступила после рецензирования: 01.06.2025.

Принята к публикации: 07.06.2025.

Article info

Received: 05.05.2025.

Revised: 01.06.2025.

Accepted: 07.06.2025.