

УДК 553.63
DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4387
Шифр специальности ВАК 1.6.21. Геоэкология

Управление отходами калийных горнодобывающих предприятий

А.А. Перевощикова^{1,2✉}, Р.Д. Перевощиков¹, Е.Е. Малышкина¹, Н.В. Митракова¹

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, г. Пермь

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь

✉ aaperevoshchikova@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* работы связана с необходимостью проведения природозащитных мероприятий на территории калийных горнодобывающих предприятий, испытывающих экологические последствия влияния много-тоннажных солеотходов. *Цель* исследования заключается в обобщении и анализе географии распространения калийных горнодобывающих предприятий, воздействия этих предприятий на окружающую среду и методов управления отходами калийных производств. *Объекты:* отходы калийных горнодобывающих предприятий. *Методы:* теоретический и логический анализ данных. *Результаты.* Рассмотрена география распространения калийных месторождений и представлена характеристика отходов калийных горнодобывающих предприятий на примере Верхнекамского месторождения солей. Приведен отечественный и зарубежный анализ экологических последствий в результате хранения отходов на дневной поверхности. Проанализировано несколько вариантов обращения с отходами калийных предприятий. При управлении глинисто-солевыми шламами наиболее эффективна закачка в подземные горизонты, в том числе использование насыщенных растворов в качестве удобряющего компонента, составляющей части продукта в строительном направлении и применение в нефтедобывающей отрасли. При управлении галитовыми отходами нужен более комплексный подход. Закладка в отработанное пространство является актуальным подходом в связи с тем, что на территории долго действующих предприятий имеются уже отработанные целики. Рекультивация солеотвала позволит изолировать тело отвала от поступления атмосферных осадков, что приведет к сокращению поступления насыщенных вод в окружающую среду. Использование отходов для производства стройматериалов является наиболее предпочтительным как с экономической, так и с экологической позиции. Извлечение ценных компонентов, производство удобрений, концентрата и др. из отходов является наименее актуальным направлением, это связано как с эколого-экономическими затратами на приобретение оборудования по извлечению, так и с повторным образованием отхода. Наиболее сложным направлением для снижения образования отходов в технологическом аспекте является совершенствование ведения горных работ и селективной добычи.

Ключевые слова: калийная промышленность, горнодобывающая деятельность, управление отходами, шламохранилище, солеотвал, экологическая безопасность, засоление, просачивание рассолов

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2023.

Для цитирования: Управление отходами калийных горнодобывающих предприятий / А.А. Перевощикова, Р.Д. Перевощиков, Е.Е. Малышкина, Н.В. Митракова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 1. – С. 19–35. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4387

UDC 553.63
DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4387

Waste management in potash mining companies

A.A. Perevoshchikova^{1,2✉}, R.D. Perevoshchikov¹, E.E. Malyshkina¹, N.V. Mitrakova¹

¹ Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

✉ aaperevoshchikova@yandex.ru

Abstract. Relevance. Related to the need to carry out environmental protection measures in potash mining areas exposed to the environmental consequences of the impact of multi-tonnage salt waste. **Aim.** To summarise and analyse the geography of potash mining operations, the environmental impact of these operations, and potash waste management practices. **Object.** Potash mining waste. **Methods.** Theoretical and logical analysis of the data. **Results.** The research considers the geographical distribution of potash deposits and presents the characteristics of potash mining waste using the example of the Verkhnekamskoe Potash Deposit. The paper provides both domestic and foreign analyses of ecological consequences of waste storage on the day surface. Several options for potash mining waste management are analysed. For the management of clay-salt slurry, the most effective approach is its injection into underground horizons, which includes the use of saturated solutions as a fertiliser component, as a part of a product in construction, and in the oil industry. A more comprehensive approach to halite waste management is needed. Waste disposal to waste dumps is relevant due to the presence of mined-out areas on the territory of long-operating enterprises. Reclamation of the salt dump will help to isolate it from atmospheric precipitation, thereby reducing the inflow of saturated water into the environment. Utilising waste for production of construction materials is the most economically and environmentally favourable option. Extracting valuable components, producing fertilisers, concentrates, etc. from waste is the least practical approach due to the ecological and economic expenses involved in acquiring extraction equipment and the repeated generation of waste. The most challenging aspect of reducing waste generation in terms of technology lies in improving mining operations and implementing selective mining.

Keywords: potash industry, mining, waste management, slurry storage, salt dump, environmental safety, salinisation, brine seepage

Acknowledgments: The research was supported by the Perm scientific and educational center «Rational subsoil use», 2023.

For citation: Perevoshchikova A.A., Perevoshchikov R.D., Malysheva E.E., Mitrakova N.V. Waste management in potash mining companies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 1, pp. 19–35. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4387

Введение

Горнодобывающая деятельность имеет важное экономическое значение, однако она является одной из основных причин загрязнения окружающей среды во всем мире. Целью добычи полезных ископаемых является удовлетворение спроса на минеральное сырье для повышения качества жизни населения. Добываемый материал является сырьем для производства изделий, ценным энергетическим ресурсом и основой для развития многих отраслей промышленности. Продукция горнодобывающей промышленности иногда используется напрямую, но чаще всего подвергается дальнейшей переработке. Принципиальными технологическими операциями на любом горнодобывающем предприятии являются добыча сырья, последующая его переработка, отгрузка продукции и утилизация отходов. Однако горнодобывающая деятельность является мощным фактором преобразования природных комплексов. Эта отрасль связана с рядом экологических проблем, в частности, имеет проблемы с хранением отходов с точки зрения отчуждения земель и рассеивания загрязнителей [1, 2]. Химическое и физическое загрязнение, возникающее в результате горнодобывающей деятельности, является глобальной проблемой, которая имеет отношение к различным аспектам:

- экологическому: загрязнение почв и водных объектов, образование кислых шахтных стоков, фитотоксичность и изменение биocenozов;
- геоморфологическому: изменение ландшафта, геологическая опасность (эрозия, наводнения, оползни, карст, провалы);

- санитарному: риск для здоровья человека, воздействие на население, проживающего в непосредственной близости от горнодобывающих предприятий.

Компонентный состав и количество отходов, образующихся в процессе добычи и переработки полезных ископаемых, становятся важными аспектами в вопросе управления отходами и цикличности производства. Накопление значительного количества отходов приводит к формированию природно-техногенных объектов, которые представляют собой геологические тела техногенного происхождения, состоящие из отработанных «пустых» горных пород, отходов обогащения, зол, шлаков и шламов [3–6].

Обращение с отходами, образующимися на горнодобывающих предприятиях, как правило, вызывает финансовые и экологические трудности. Рудник и обогатительная фабрика проектируются с целью извлечения как можно большего количества товарной продукции, а отходы и общее природопользование рассматривается как следствие применяемых технологических операций [7].

Основное воздействие горнодобывающих предприятий на окружающую среду связано с совокупностью факторов: географическим положением, площадью и категориями земель, отведенных для хранения отходов, объемом выбросов и сбросов на этапе эксплуатации. Кроме того, повреждения хвостохранилищ могут нанести серьезный ущерб окружающей среде [7].

Промышленные отходы образуются в огромных объемах. В зависимости от масштаба и мощности производства, вопрос рационального обращения с ними становится все более актуальным. Тем не менее промышленные отходы различаются по составу, свойствам, типам и характеристикам. В частности, отходы горнодобывающей и обрабатывающей отрасли отнесены к таким типам, как [8]:

- кислоты и щелочи;
- отработанные растворители;
- органические компоненты;
- растворы тяжелых металлов;
- отработанные растворители красок;
- сточные воды, содержащие бензол и другие углеводороды;
- отработанные нефтяные катализаторы;
- отработанные шламы;
- толуол и бензол;
- электронный лом;
- шламы, содержащие отходы цианидов тяжелых металлов;
- металлургические шлаки;
- газообразные и твердые выбросы;
- вскрышные породы/пустая порода;
- хвосты обогащения полезных ископаемых и др.

В настоящее время проведено небольшое количество исследований, посвящённых рациональному использованию промышленных отходов [9].

В связи с ужесточением экологических норм во всем мире важно найти рациональное решение по управлению промышленными отходами. В зависимости от отрасли специализации, методы управления отходами необходимо рассматривать индивидуально, но существуют наиболее стандартные варианты утилизации хвостов и пустой породы. Наиболее распространенными являются следующие:

- сброс шламов в пруды-отстойники;
- засыпка шламов или пустой породы в подземное хранилище или карьеры;
- складирование сухих шламов или пустой породы в отвалы на поверхности;
- использование шламов или пустой породы в качестве вторичного продукта;
- сброс шламов в водные объекты (в моря, озера, реки).

Выбор метода утилизации шламов и/или пустой породы зависит в основном от трех факторов: стоимости, экологических характеристик территории и возможных рисков. Необходимо также учитывать возможности и проблемы повторного использования отходов в рамках промышленной экологии и экономики замкнутого цикла для решения связанных с этим социальных и экологических проблем.

Разработка месторождений калийных солей выполняет одну из главных целей устойчивого разви-

тия – борьбы с голодом, поскольку 90 % добываемого калия направлено на получение калийных удобрений. Несмотря на важную роль калийных удобрений в отрасли сельского хозяйства, разработка месторождений калия имеет ряд экологических последствий, одним из которых является образование и складирование на поверхности нескольких миллионов тонн твёрдых и жидких отходов с высоким содержанием хлорида натрия, сульфатов, калия и кальция [6].

В научной литературе существует множество результатов частных исследований по управлению отходами на калийных предприятиях, но несмотря на глубокую изученность возможных способов утилизации и обезвреживания, до сих пор редкостью является достаточно полный и актуальный литературный обзор в области управления отходами на калийных месторождениях. Целью данного исследования является обобщение и анализ географии распространения калийных горнодобывающих предприятий, воздействия этих предприятий на окружающую среду и методов управления отходами калийных производств. Для подготовки обзорной статьи были изучены результаты более 100 опубликованных работ на подобную тематику.

Калийная промышленность

Добыча калийных солей (извлечение сильвинита и карналлита) в основном (90 % добываемого калия) направлена на получение удобрений и особенно важна для отрасли сельского хозяйства [10]. Калий является основным компонентом большинства удобрений и содержит смесь фосфатов, азота и калия. Согласно данным геологической службы США, запасы калийных руд оцениваются в более чем 11 млрд т [11], что сможет обеспечить общество калийными удобрениями еще на несколько десятков лет. В настоящий момент лидерами по добыче калийной руды являются Канада, Россия и Беларусь, на них приходится более 80 % мировых запасов калия (табл. 1).

Геологоразведочные работы по поиску калийных солей продолжаются и по сей день в нескольких странах. Наиболее активно разведочные работы ведутся в Канаде с целью удержания лидерских позиций, в Бразилии, поскольку она входит в тройку крупнейших мировых импортёров калийных удобрений, а также в Аргентине, Перу, Эритрее, Эфиопии, Конго, Великобритании, Китае, Таиланде и Узбекистане [10]. В том числе ведутся работы по разработке и дальнейшему освоению месторождений калийных солей в России [6]. Ведущими регионами-потребителями калийных удобрений являются страны Северной и Южной Америки, а также страны Юго-Восточной Азии [11].

Таблица 1. Добыча калийных солей в мире с 2018 по 2021 гг., по данным [8]

Table 1. Potash production worldwide from 2018 to 2021, according to [8]

Страна Country	2018	2019	2020	2021
млн т/million tonnes				
Канада/Canada	13,80	12,30	13,8	14,0
Россия/Russia	7,17	7,34	8,11	9,0
Беларусь/Belarus	7,20	7,35	7,40	8,0
Китай/China	5,0	5,0	6,0	6,0
Германия/Germany	3,20	3,0	2,20	2,30
Израиль/Israel	2,20	2,04	2,28	2,30
Иордания/Jordan	1,48	1,52	1,59	1,60
Чили/Chile	1,20	0,84	0,90	0,90
Испания/Spain	0,70	0,50	0,42	0,40
США/USA	0,52	0,51	0,46	0,48
Другие страны/Other countries	0,35	0,31	0,36	0,37
Лаос/Laos	0,20	0,40	0,27	0,30
Бразилия/Brazil	0,20	0,25	0,25	0,21
Общепланетарный объем Global volume	43,30	41,30	44,0	46,0

*Примечание: жирным выделены мировые лидеры по добыче калийных солей.

* Note: world leaders in potash mining are highlighted in bold.

Прогнозируется, что мировые годовые мощности по производству калийных удобрений увеличатся почти до 69 млн т к 2025 г. Большая часть прироста будет обеспечена за счет открытия новых рудников на уже освоенных месторождениях, а также в перспективных районах и за счет наращивания мощностей существующих предприятий в Канаде, России и Беларуси [11].

В мировой практике добыча калийных солей осуществляется преимущественно подземным шахтным способом (Канада, Россия, Беларусь). Всего 6 % месторождений разрабатываются методом подземного выщелачивания (штат Юта, США) [12], где горно-механические и температурные условия не позволяют вести шахтную разработку, и 26 % месторождений добывают калийные соли из природных рассолов (Китай, Израиль, Иордания, Чили) [13].

Отходы калийной промышленности

В процессе шахтной добычи и при обогащении добытой породы в районе деятельности калийных предприятий образуется большое количество отходов (примерно 70 % от добываемой руды), которые могут вызывать негативные последствия для окружающей среды в случае отсутствия их безопасной обработки и утилизации отходов [6].

Одной из основных проблем, возникающих при добыче и переработке калийной руды, является образование миллионов тонн жидких и твердых отходов с высоким содержанием хлорида натрия. В зависимости от минералогического состава добываемой руды и с учётом используемой технологии обогащения, на тонну конечного продукта может образовываться от 0,99 до 4,97 т твердых отходов и от 0,3 до 1,1 т жидких отходов [7, 13].

Отходы калийной промышленности представлены галитовыми отходами, которые складировать в солеотвалы (рис. 1, а), и глинисто-солевым шламом (смесь растворимых и нерастворимых компонентов), который хранится в шламохранилищах на земной поверхности (рис. 1, б).



а/а



б/б

Рис. 1. Отходы калийного производства на Верхнекамском месторождении калийных солей: (а) солеотвал (б) шламохранилище

Fig. 1. Potash mining waste at the Verkhnekamskoe Potash Deposit: (a) salt dump (b) sludge storage

Солеотвалы и шламохранилища считаются основными источниками загрязнения поверхностных вод на Верхнекамском калийном месторождении (Россия) [14–16], Старобинском месторождении (Беларусь) [17], Эльзасском месторождении (Фран-

ция), старейшем калийном месторождении в Штрасфурте (Германия) [18, 19] и Саскачеванском соленосном бассейне (Канада) [20]. Огромное количество отходов хранится в хвостохранилищах на поверхности (табл. 2).

Таблица 2. Отходы, хранящиеся в солеотвалах и шламохранилищах

Table 2. Waste stored in salt dumps and slurry storages

Тип отхода Waste type	Верхнекамское месторождение солей (Россия) Verkhnekamское Potash Deposit (Russia) [14]	Старобинское месторождение (Республика Беларусь) Starobinskoe Deposit (Belarus) [21]	Саскачеванский соленосный бассейн (Канада) Saskatchewan salt basin (Canada) [22]	Эльзасское месторождение (Франция) Alsace deposit (France) [23]
Твердые галитовые отходы Solid halite waste	>270 млн т/million tonnes	>950 млн т/million tonnes	>250 млн т/million tonnes	7 млн т/million tonnes
Жидкие глинисто-солевые шламы Clay-salt slurry	>30 млн м ³ /million m ³	110 млн т/million tonnes	Нет данных No data available	Нет данных No data available

В среднем отводимые площади под солеотвал с рассолосборником составляют 300–350 га, из которых порядка 150 га занимает сам рассолосборник. В верхней части площади намываются солеотходы, в нижней скапливаются тонкие частицы и рассол. Угол откоса намываемого массива до 4°. Высота солеотвалов в большинстве случаев составляет 35–45 м относительно земной поверхности рядом с солеотвалом [24].

В состав сооружения шламохранилищ входят: дамба, насосная станция перекачки сточных вод, насосная станция перекачки осветленных сточных вод (рассолов), шламопровод и рассолопровод.

Количество образующихся отходов на примере Верхнекамского месторождения солей (Пермский край, Россия)

На территории Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) в настоящий момент функционируют три крупные калийные компании: ПАО «Уралкалий», ООО «ЕвроХим-УКК» и АО «ВКК». На 2022 г. объём образования галитовых отходов и глинисто-солевых шламов составляет 27356,2 тыс. т [25].

Согласно статистической отчетности Министерства природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края [25, 26], наибольший вклад в образование отходов по предприятиям в Пермском крае вносят предприятия калийной отрасли. На рис. 2 представлено процентное соотношение образования отходов в Пермском крае с 2017 по 2022 гг. по основным предприятиям.

Согласно открытым данным экологической статистической отчетности ПАО «Уралкалий» [27], прослеживается тенденция увеличения объёма как образования, так и утилизации отходов (табл. 3). Утилизация образующихся отходов увеличилась с 77 до 98 % с 2018 по 2022 гг. соответственно.

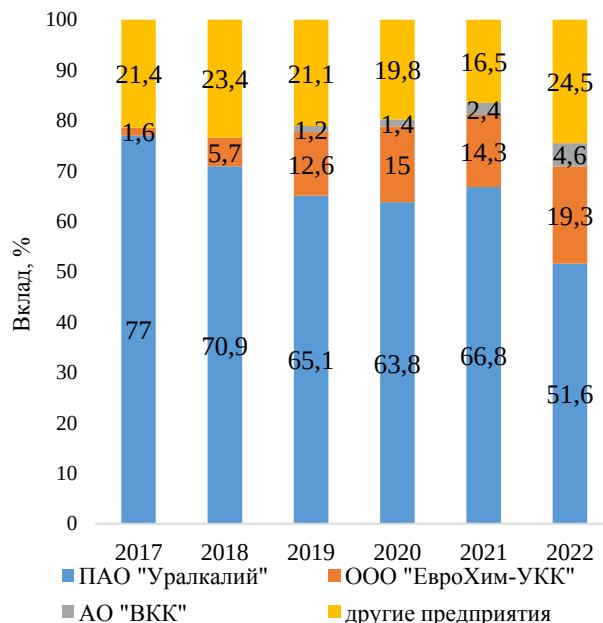


Рис. 2. Вклад в общее образование отходов в Пермском крае по основным предприятиям

Fig. 2. Contribution to total waste generation in Perm Krai by major companies

По данным дистанционного зондирования Земли, общая площадь земель, отведённых под солеотвалы, составляет 8,69 км²; шламохранилища – 7,12 км².

Экологические проблемы разработки калийных месторождений

Важно отметить, что крупнейшие месторождения калийных солей расположены на территориях с континентальным и умеренно-континентальным климатом, где годовое количество осадков превышает возможное испарение, что предполагает избыточное увлажнение территорий.

Таблица 3. Сведения об образовании и утилизации промышленных отходов ПАО «Уралкалий» [27]

Table 3. Data on generation and disposal of industrial waste at Uralkali

Тип отхода Waste type	2018		2019		2020		2021		2022	
	Образовано Generated	Утилизировано Disposed	Образовано Generated	Утилизировано Disposed	Образовано Generated	Утилизировано Disposed	Образовано Generated	Утилизировано Disposed	Образовано Generated	Утилизировано Disposed
	млн т / million tonnes									
Твердые галитовые отходы Solid halite waste	28,91	20,19	29,39	22,14	31,68	25,51	31,68	25,50	18,60	18,40
Глинисто-солевые шламы Clay-salt slurry	1,17	3,04	1,03	0,31	1,12	0,36	1,11	0,36	0,64	0,35
Всего/Total	30,08	23,23	30,42	22,45	32,80	25,87	32,79	25,86	19,24	18,75

Избыточное увлажнение является фактором, создающим комплекс экологических проблем при поверхностном складировании водорастворимых отходов соледобывающей промышленности. Твёрдые галитовые отходы, хранящиеся в солеотвалах, содержат хлориды, сульфаты, калий, натрий и кальций, которые выпадают в виде осадков на протяжении десятилетий [28]. Дождевая и талая воды, растворяя вещество отвала, содержат высокие концентрации ионов солей и переносят их в грунтовые и поверхностные воды, а нерастворимая часть отходов остаётся в виде пористой поверхности, однако 75–94 % осадков просачивается через отвалы [29] и попадает в окружающую среду.

Фильтрационные воды в совокупности с природными условиями способны изменять химиче-

ский состав водных объектов [6, 13, 30, 31] и почв [6, 32, 33], приводить к оседанию земной поверхности, формированию галофитной растительности [6, 33, 34], угнетению растительного покрова и возникновению опасных геологических процессов (обрушение породы, внутрисолевой карст) в пределах зоны их влияния [35]. К другим воздействиям также можно отнести ветровую пыль от отвалов и визуальное нарушение ландшафта.

Возникающие экологические последствия способствуют нарушению естественных процессов в почвенном и растительном покрове (рис. 3), в том числе могут привести к ухудшению санитарно-эпидемиологической обстановки в ближайших населённых пунктах.



Рис. 3. Заболачивание техногенно трансформированной долины малой реки в зоне воздействия калийного предприятия на территории Пермского края

Fig. 3. Waterlogging of technogenically transformed valley of a small river in the area affected by potash enterprise on the territory of Perm Krai

Например, добыча калия в регионе Багес (Испания) является причиной прогрессирующего засоления рек Карденер и Льобрегат [36]. В Германии стоки, поступающие с калийных рудников, приводили к экстремальным концентрациям соли (72 г/л) в окружающих реках и ручьях, вызывая массовое цветение водорослей и гибель рыб [37]. В результате прямого сброса рассолов в р. Верра отмечено изменение видового состава беспозвоночных, который является одним из важнейших параметров контроля толерантности речной экосистемы [37].

На территории ВКМС многолетняя эксплуатация шламохранилища привела к формированию фильтрационных вод Cl–Na состава, что способствовало процессам засоления вод р. Ленвы и почв долинных ландшафтов [6].

Воды родников, которые находятся в непосредственной близости от действующих калийных предприятий и объектов размещения отходов ВКМС, также показали значительную трансформацию химического состава. Состав подземных вод характеризуется хлоридным кальциево-натриевым составом [13]. Сходные результаты были выявлены в исследованиях состава подземных вод и в районах размещения отходов калийных предприятий в Германии и Франции [38, 39].

Вследствие долговременного влияния высокоминерализованных стоков на территории ВКМС (в зоне воздействия шламохранилища) произошла трансформация почвенного покрова в долинах малых рек. Типичные аллювиальные гумусовые глеевые глинистые почвы преобразовались в солончаковые типы почв, которые не характерны для таёжной зоны [6]. В свою очередь, в районах формирования очагов почвенного засоления на ВКМС отмечены луговые ассоциации растений с небольшой долей солелюбивых трав и галофитов [6].

В зоне воздействия Солигорского калийного комбината (Беларусь) при почвенном обследовании выявлено превышение в 7–10 раз суммы калия, натрия и хлора в почвенных образцах у границы предприятия в сравнении с фоном [21]. Хлоридно-натриевое загрязнение плодородного слоя почв сельскохозяйственных земель в Солигорском районе приводит к резкому снижению продуктивности почв, которое влияет на урожайность зерновых культур [40, 41].

Особое внимание нужно уделить тому, что калийные шахты подвержены риску катастрофического затопления или обрушения, которое может привести к необратимым потерям на рудниках [42]. За последние 50 лет калийная отрасль пережила семь катастроф на калийных месторождениях в России, Канаде и Конго, которые привели к потере минерально-сырьевой базы [43].

Таким образом, интенсификация калийного производства входит в противоречие с сохранени-

ем природной среды. Складируемые на поверхности отходы калийных предприятий являются одним из основных источников загрязнения окружающей среды, в частности водных объектов и почв на территории многих стран.

Анализ существующих методов и технологий по управлению отходами

Функционально-технические решения по утилизации и обезвреживанию отходов калийной промышленности имеют приоритетное значение при проектировании объектов калийного производства. Безвредное хранение и возможность утилизации или обезвреживания отходов калийного производства являются сложной экологической, технологической и экономической задачей.

Исследования по управлению отходами проводились с целью характеристики технического уровня и тенденций развития калийной отрасли в направлении экологически безопасного освоения месторождений солей, повышения эффективности и безопасности ведения горных работ.

В связи с тем, что при обогащении калийной руды образуются жидкие и твердые отходы, рационально рассматривать способы обращения с отходами в контексте управления разными фазами отходов.

Методы обращения с глинисто-солевым шламом. Проведенный анализ информации [44] о способах размещения и утилизации рассолов калийных предприятий показал, что в мировой практике используются основные стандартные методы обращения с отходами (рис. 4).

В частности, канадская фирма «Denison Potash Co» перекачивает избыточный рассол вместе с водой из шахтного ствола по трубопроводу на расстояние около 34 км и сбрасывает в залив Фанди. В Англии фирма «Cleveland Potash LTD» сбрасывает 300 т NaCl и 500 т глинистых шламов в сутки в Северное море. Отходы и шламы перекачиваются по трубопроводу длиной около 1,8 км в туннель по дну моря, откуда они под действием приливов и отливов диспергируются в морской воде [45, 46].

В Бразилии фирма «Petromisa» проложила от предприятия к морскому побережью трубопровод протяженностью 35 км для сброса отходов в Атлантический океан. В Израиле рассол, состоящий из концентрированных растворов хлорида магния и калия, сбрасывается в Мертвое море [46].

Французская фирма «Min de Potass d'Alzas» (MDPA), получая из руды KCl, использует остающийся в результате флотации NaCl, а глинистые шламы сбрасывает в р. Рейн [46]. Фирма PCA в провинции Саскачеван (Канада) сбрасывает часть отходов в южную часть оз. Пейшнс, воды которого по природе щелочные.



Рис. 4. Управление глинисто-солевым шламом
Fig. 4. Management of clay-salt slurry

Жидкие отходы калийной промышленности в Германии, сосредоточенные по р. Верра (земли Тюрингии и Гессена), начиная с 1925 г. закачиваются в поглощающие пласты. Они представляют собой концентрированные растворы (с минерализацией 300–400 г/л) NaCl , MgCl_2 , MgSO_4 . Растворы по скважинам закачиваются в трещиноватые известняки и плитчатые доломиты верхнего и среднего шехштейна, залегающие на глубине от 50 до 500 м.

Известны и другие способы управления глинисто-солевым шламом:

- использование в производстве смешанной калийной соли: вместо сырой необогащенной калийсодержащей руды к товарному хлористому калию предлагают добавлять шламовые отходы;
- использование в качестве удобряющей и структурообразующей добавки к торфяной и песчаной почвам;
- применение в промышленности строительных материалов;
- применение для приготовления буровых растворов.

Управление глинисто-солевым шламом зависит от природных гидрологических и гидрогеологических условий, поэтому для каждого рудника метод и/или совокупность методов будет индивидуальным с учетом природных условий, капитальных и эксплуатационных затрат. Наиболее целесообразно использовать комплексный подход к проблеме утилизации глинисто-солевых шламов при одновременном применении нескольких вариантов или их комбинации, а долю каждого из них определить исходя из природных условий.

Закачка глинисто-солевых шламов и рассолов в подземные горизонты как с целью утилизации жидких отходов, так и для укрепления пластов является одним из перспективных направлений обращения с отходами и требует дополнительных исследований, опытно-промышленных испытаний, а также разработки необходимой нормативно-правовой документации.

Анализ отечественного и зарубежного опыта утилизации глинисто-солевых шламов показал, что несмотря на то, что существуют способы повторного использования их в качестве вторичных продуктов, основным способом их утилизации остается складирование в шламохранилищах и закачка в подземные поглощающие горизонты.

Методы обращения с твердыми галитовыми отходами. В настоящий момент развиты и применяются несколько основных направлений по снижению объемов образующихся и уже накопленных галитовых отходов, которые заключаются в совершенствовании технологии горных работ, реализации способов селективной добычи, а также мероприятий по возвращению отходов в выработанные пространства рудников и рекультивации отвалов уже закрытых рудников (рис. 5).

Кроме того, рассматриваются способы и методы предотвращения засоления подземных вод и почв при формировании солеотвалов [14, 48]. Ряд работ направлен на повышение эффективности гидроизоляции солеотвала [49], на совершенствование методов подземного складирования отходов [50, 51], в том числе на улучшение способов отвалообразования отходов для сокращения площадей, отведённых для хранения отходов [47, 52–54].



Рис. 5. Управление галитовыми отходами
Fig. 5. Management of halite waste

Основным и наиболее распространённым, но и самым затратным способом снижения объёмов отходов на поверхности являются закладочные работы в отработанное шахтное пространство (подземное хранилище) [26]. Согласно проведенным исследованиям [55], закачка отходов в поглощающие пласты на территории ВКМС экологически эффективна, поскольку размещение отходов в отработанном шахтном пространстве не приведет к изменению гидродинамического и гидрохимического режима подземных вод и значительно снизит нагрузку на окружающую среду. Такой способ обезвреживания отходов частично применяется на рудоправлениях ВКМС предприятием ПАО «Уралкалий» [26]. Выбранный способ обусловлен эффективностью обеспечения экологической безопасности. Однако при применении данного метода имеется ряд недостатков, связанных с капитальными и эксплуатационными затратами на реализацию и дальнейшую эксплуатацию [56].

В совокупности с закладочными работами за рубежом применяется метод рекультивации солеотвалов на закрытых рудниках. Опыт рекультивации свидетельствует о сложности и многоступенчатости природозащитных мероприятий, включающих комплекс технических, технологических и биологических решений. В Германии и Франции внедрены два метода рекультивации солеотвалов в соответствии с принятым экологическим законодательством: 1) изменение формы солеотвала (срез части) и покрытие его поверхности слоем из глины и битума, который защищает отходы от воздействия атмосферных осадков [24], с формированием почвенно-растительного покрова; 2) растворение химическими соединениями естественным или стимулированным способом со сбором дренажных стоков в очистные скважины с дальнейшим сбросом их в притоки р. Рейн [57].

В Германии уже отработан один из способов рекультивации. Один из отвалов высотой до 100 м, длиной 1200 м и шириной 550 м имеет типичную трапециевидную форму и в настоящее время частично засыпан и засажен растениями. Юго-западная часть склона отвала используется как солнечная электростанция. Южная часть склона отвала в основном засажена, а в северной части до сих пор виден оригинальный материал отвала, что связано с очень крутыми склонами [58]. Необходимость рекультивации обусловлена близостью солеотвала к сельскохозяйственным землям, что в дальнейшем может порождать процессы сильного засоления в почвенном слое и ухудшать урожайность и качество сельскохозяйственной продукции.

В исследовании [59] рассмотрен эксперимент по эффективности использования покровного субстрата, состоящего из осадков городских сточных вод и песчаной почвы. Такой субстрат позволил уменьшить содержание нитратов и нитритов в фильтрационных водах и обеспечить приемлемый рост растений.

Изучен опыт по естественному восстановлению растительности на отвалах калийных рудников. В естественной сукцессии на отвалах появляются виды, которые являются наиболее устойчивыми к условиям среды (кустарники и травостой) [60].

Кроме этого, на территории Германии проведены исследования по оценке водного баланса и транспирации на отвалах калийных рудников с целью снижения поступления большого объема фильтрационных вод в окружающую среду. Исследования показывают, что транспирация может уменьшить сток высокоминерализованных вод с отвалов и снизить загрязнение вод и почв [28].

В работе [61] в целях улучшения экологического состояния территорий возле калийных отвалов были проведены экспериментальные исследования по выщелачиванию солей с отвалов и посадке ку-

старников и деревьев. При посадке были использованы высушенный осадок сточных вод, гидрогель и другие примеси. Через пять лет были начаты исследования растений и почвы. Результаты показали, что высаженные кустарники и деревья способны расти в неблагоприятных условиях.

Российскими учёными [62] разработаны способы рекультивации откосов солеотвалов путем создания на их поверхности замкнутых микробассейнов выщелачивания или путем установки на откосах контрбарьеров, а также предложены меры по защите окружающей среды для восстановления защитной функции пород в ложе солеотвала и предохранения солевой толщи от атмосферных осадков [63].

В процессе рекультивации и восстановления ландшафтов происходит улучшение качества окружающей среды. Рекультивационные мероприятия направлены как на устранение источника загрязнения (отвалы), так и на снижение уровня солевого загрязнения.

Физико-химические и химико-технологические методы утилизации и обезвреживания глинисто-солевых шламов и галитовых отходов. Большой интерес вызывает возможность комплексной утилизации отходов калийного производства с использованием физико-химических и химико-технологических методов: извлечение драгоценных металлов из отходов, производство удобрений, производство технической соли, создание производства кальцинированной соды с замкнутой системой, производство каустической соды для создания биодизельного топлива и др.

В работе [54] было выделено три направления промышленного использования продуктов электролиза водного раствора галитовых отходов: в качестве компонентов для производства тротуарной плитки, в качестве сырья для получения мыла, возможно извлечение газов водорода и хлора с последующим промышленным использованием. Согласно исследованиям [64, 65], раскрывается стратегия управления сточными водами, которая включает жидкие отходы любого состава. В ряде работ [66–70] рассматриваются способы извлечения ценных материалов, такие как соли, драгоценные металлы (платина, палладий, золото, серебро и др.) и химикаты, содержащие хлориды щелочных и щелочноземельных металлов, которые делают процесс экономичнее за счёт использования хлорирующего агента и сокращения количества операций.

Зарегистрированы изобретения, где конечным продуктом переработки будет зола, которую можно использовать в качестве долговременного удобрения [66]. Одним из способов обезвреживания отходов является получение коллективного концентрата, содержащего природную и техногенную орга-

нику, в которой сконцентрирована значительная доля благородных металлов [71–73].

Запатентован способ по дополнительному извлечению калия из отходов калийного производства, что сможет повысить объёмы калия, переводимого в минеральные удобрения из руд калийного месторождения [74]. Также были разработаны методы извлечения золота из рассолов калийного производства [75, 76]. Посредством химических методов переработки отходов применим способ утилизации рассолов калийного производства при использовании распылительного испарения и аэрозольного барьера [77].

Рассмотренные методы были изучены в рамках лабораторных испытаний, но в промышленном масштабе не нашли свое применение в связи с высоким капиталовложением и получением небольшого объема полезного продукта.

Замкнутый цикл. Учеными из Беларуси рассмотрена концепция управления отходами, заключающаяся в формировании замкнутой системы по производству кальцинированной соды, позволяющей перерабатывать высокоминерализованные стоки (для получения товарного продукта хлорида кальция), а стоки с низкой минерализацией возвращать в технологический процесс [78]. Также на одном из рудоуправлений ОАО «Беларуськалий» [54] освоен выпуск нового глинистого минерализованного продукта. Компоненты этого продукта используются для получения удобрений, которые способны ускорять выращивание древесины в лесах плантационного типа и восстанавливать почву, которые загрязнены радионуклидами. Глинистый минерализованный продукт также применяется как изоляционный слой, противопожарный барьер и др.

Наиболее перспективным и востребованным вариантом использования отходов в качестве источника полезного продукта (KCl) и микроэлементов является производство новых удобрений и мелиорантов [79]. Кроме того, по опыту других государств и с учётом проводимых в Беларуси исследований, продукт можно использовать в производстве строительных материалов и при приготовлении промывочных (буровых) растворов в качестве минерализатора.

В Беларуси на базе ОАО «Беларуськалий» рассматривается вопрос о строительстве комбината по переработке отвалов калийных производств, в котором будут развиты такие отрасли производства, как выпуск каустической соды для биодизельного топлива или бумаги и картона, производство промышленного хлора как компонента при изготовлении обуви, одежды, игрушек и стройматериалов, изготовление поливинилхлорида как составляющей части стеклопакетов и линолеума [79].

Научные сотрудники Витебской государственной академии ветеринарной медицины [80] посредством экспериментальных исследования определили возможность использования отходов калийной промышленности в сельском хозяйстве. Из-за того, что в большинстве кормов содержится мало натрия, его недостаток в рационах компенсируют за счёт ввода поваренной соли. Галитовые отходы как побочный продукт можно использовать в кормлении крупного рогатого скота, что способствует повышению рентабельности предприятий, при этом общий уровень состояния здоровья крупного рогатого скота не снизится.

Предприятием ПАО «Уралкалий» внедрена практика передачи части отходов добычи и обогащения калийных солей Березниковскому содовому заводу для дальнейшей утилизации. Использование системы замкнутого цикла или вторичного использования отходов в области калийной промышленности является актуальным с точки зрения рационального недр- и природопользования.

Заключение

Во многих странах мира добыча калийной руды является основой экономики и источником национального богатства (Канада, Беларусь, Россия). Геологоразведочные работы по поиску калийных солей продолжаются и по сей день в нескольких странах. Активная добыча калийной руды обусловлена высоким спросом на калийные удобрения. Использование этих удобрений способствует повышению объёма и качества сельскохозяйственной продукции. Предприятия, которые производят калийные удобрения, выполняют одну из глобальных целей устойчивого развития – борьбы с голодом, тем самым обеспечивая продовольственную безопасность, улучшая продукты питания и способствуя развитию сельского хозяйства. Одновременно с этим непрерывное и многотоннажное производство удобрений предполагает увеличение объёмов добычи и переработки калийных руд, что влечёт за собой увеличение объёма жидких и твёрдых отходов. Именно отходы калийной промышленности, которые складывают на поверхности, вызывают ряд экологических проблем ввиду водорастворимости породы. Экологические последствия, возникающие при хранении отходов на поверхности, выражаются в процессах засоления водных объектов и почв, в формировании галофитной растительности и галотолерантных видов бактерий. В результате накопленного экологического вреда формируется неблагоприятная экологическая обстановка в районах разработки калийных месторождений, что заставляет искать пути решения в области управления отходами. Безопасное хране-

ние и возможность утилизации или обезвреживания отходов калийного производства является сложной экологической, технологической и экономической задачей.

Были рассмотрены следующие варианты: для глинисто-солевых шламов – сброс в водные объекты, закачка в подземные горизонты и хранение на поверхности, использование в производстве, строительстве и др.; твёрдые галитовые отходы – закладка в выработанное пространство, вторичное использование, рекультивация отвалов пустых пород, совершенствование технологии ведения горных работ, производство строительных материалов, извлечение ценных компонентов, передача части отходов другим предприятиям для утилизации.

При управлении глинисто-солевыми шламами наиболее эффективна закачка в подземные горизонты, в том числе использование насыщенных растворов в качестве удобрения компонента, составляющей части продукта в строительном направлении и применение в нефтедобывающей отрасли. Данные направления использования глинисто-солевых шламов являются привлекательными и способствуют снижению техногенной нагрузки на водные объекты.

При управлении галитовыми отходами нужен более комплексный подход, который может содержать несколько вариантов утилизации в связи с многотоннажностью. Закладка в отработанное пространство является актуальным подходом в связи с тем, что на территории долго действующих предприятий имеются уже отработанные целики. Такой способ утилизации позволит устранить загрязнение водных объектов, почв и улучшить экологическую обстановку территории.

Рекультивация отвала позволит изолировать тело отвала от поступления атмосферных осадков, что приведет к сокращению объёмов фильтрационных вод.

Использование отходов для производства строительных материалов является наиболее предпочтительным как с экономической, так и экологической позиции. Для реализации этого варианта необходима организация государственно-частного партнерства и формирование нормативно-правовых требований. Извлечение ценных компонентов, производство удобрений, концентрата и др. из отходов является наименее актуальным направлением, это связано как с эколого-экономическими затратами на приобретение оборудования, так и с повторным образованием отхода.

Наиболее сложным направлением для снижения образования отходов в технологическом аспекте является совершенствование ведения горных работ и селективной добычи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mining wastes as road construction material: a review / P. Segui, A.e.M. Safhi, M. Amrani, M. Benzaazoua // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 1–18.
2. Bech J., Bini C., Pashkevich M.A. Assessment, restoration and reclamation of mining influenced soils. – London: Academic Press, 2017. – 497 p.
3. Formation of the sediment yield in areas of mining of placer deposits / S.R. Chalov, D.I. Shkol'nyi, E.V. Promakhova, V.N. Leman, A.O. Romanchenko // *Geography and Natural Resources*. – 2015. – Vol. 36. – № 2. – P.124–131.
4. Lazăr M., Nyari I.-M., Faur F. Methodology for assessing the environmental risk due to mining waste dumps sliding-case study of Jiu Valley // *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. – 2015. – Vol. 10. – № 3. – P. 223–234.
5. Efficiency of acid sulphate soils reclamation in coal mining areas / N.V. Mitrakova, E.A. Khayrulina, S.M. Blinov, A.A. Perevoshchikova // *Journal of Mining Institute*. – 2023. – Vol. 260. – P. 266–278.
6. Environmental aspects of potash mining: a case study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit / E. Ushakova, A. Perevoshchikova, E. Menshikova, E. Khayrulina, R. Perevoshchikov, P. Belkin // *Mining*. – 2023. – Vol. 3. – P. 176–204.
7. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du développement durable et de la mer, tour sequoia, 92055 La Defense Cedex (France). Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities. – France, January 2009. – 557 p.
8. Challenges, regulations, and case studies on sustainable management of industrial waste / R.R. Srivastava, D.K. Rajak, S. Ilyas, H. Kim, P. Pathak // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – P. 1–30.
9. El Haggag S. Sustainable industrial design and waste management: cradle-to-cradle for sustainable development. – San Diego, CA, USA: Academic Press, 2010. – 420 p.
10. Аспекты повышения эффективности разработки Верхнекамского калийного месторождения / В.А. Соловьев, В.Н. Аптуков, Д.С. Чернопазов, А.И. Секунцов, М.И. Русаков, В.В. Тарасов, В.С. Пестрикова. – Новосибирск: Наука, 2019. – 182 с.
11. Mineral commodity summaries. National minerals information center. Statistics and information on the worldwide supply of, demand for, and flow of the mineral commodity potash. – USA, 2022. URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/potash-statistics-and-information> (дата обращения 03.02.2023).
12. Lanzerstorfer C. Potential of industrial de-dusting residues as a source of potassium for fertilizer production – a mini review // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2019. – Vol. 143. – P. 68–76.
13. Белкин П.А. Трансформация химического состава подземных вод в зоне влияния объектов складирования отходов разработки калийных солей: дис...канд. геолог.-минерал. наук. – М., 2019. – 117 с.
14. Бачурин Б.А., Бабошко А.Ю. Эколого-геохимическая характеристика отходов калийного производства // *Горный журнал*. – 2008. – Vol. 10. – P. 88–91.
15. Beltyukov G.V. The main sources of pollution of groundwater and surface water on the territory of the Verkhnekamskoe potassium salt deposit // *Bulletin of the Perm University. Ecology*. – 1996. – Vol. 4. – P. 128–140.
16. Liu Y., Lekhov A.V. Modeling changes in permeability characteristics of gypsified rocks accompanying brine flow // *Water Resources*. – 2013. – Vol. 40. – № 7. – P. 776–782.
17. Колпашиников Г.А., Клементьев В.П., Еременко Ю.П. Процессы засоления пород и подземных вод твердыми отходами калийных производств Солигорских калийных комбинатов // *Доклады академии наук Белорусской ССР*. – 1979. – № 5. – P. 443–445.
18. Arle J., Wagner F. Effect of anthropogenic salinisation on the ecological status of macroinvertebrate assemblages in the Werra River (Thuringia, Germany) // *Hydrobiologia*. – 2013. – Vol. 701. – P. 129–148.
19. Luo J., Diersch H.J., Monninkhoff L. 3D modeling of saline groundwater flow and transport in a flooded salt mine in Stassfurt, Germany // *Mine Water and the Environment*. – 2012. – Vol. 31. – P. 104–111.
20. Rauche A.M., Fulda D., Schwalm V. Tailings and disposal brine reduction – design criteria for potash production in the 21st century // *Tailings and mine waste 8th International conference*. – Fort Collins, Colorado, USA, 2001. – P. 85–94.
21. Khomich V.S., Zhumar P.V., Korobeinikov B.I., Tishchikov G.M. Degradation of the natural environment in the areas affected by potash production // *Natural Environment of Belarus*. – 2002. – P. 332–347.
22. Tallin J.E., Pufahl D.E., Barbour S.L. Waste management schemes of potash mines in Saskatchewan // *Canadian Journal of Civil Engineering*. – 1990. – Vol. 17. – № 4. – P. 528–542.
23. Giovanetti R.A. A long term plan for the processing of the waste piles in French potash mines. *Mine Planning and Equipment Selection // Proceedings of the 7th International symposium*. – Calgary, Canada, 1998. – P. 673–676.
24. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 17-2021. Размещение отходов производства и потребления. – М.: Бюро НДТ, 2021. – 161 с.
25. Государственный ежегодный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2022 году». – Пермь: Министерство природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края, 2023. – 234 с.
26. Государственный ежегодный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2021 году». – Пермь: Министерство природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края, 2022. – 295 с.
27. Официальный сайт ПАО «Уралкалий». Раздел Экология. URL: <https://www.uralkali.com/ru/sustainability/environment> (дата обращения: 02.08.2023).
28. Water balance assessment of different substrates on potash tailings piles using non-weighable lysimeters / C. Bilibio, C. Schellert, S. Retz, O. Hensel, H. Schmeisky, D. Uteau, S. Peth // *Journal of Environmental Management*. – 2017. – Vol. 196. – P. 633–643.
29. Lydia K. Roesel effects of less impermeable sealings for mine piles // *Ecological Engineering*. – 2022. – Vol. 176. – P. 1–6.
30. Effects of potash mining on river ecosystems: an experimental study / M. Cañedo-Argüelles, S. Brucet, S. Carrasco, N. Flor-Arnau, M. Ordeix, S. Ponsá, E. Coring // *Environmental Pollution*. – 2017. – Vol. 224. – P. 759–770.
31. Effects of an hypersaline effluent from an abandoned potash mine on freshwater biofilm and diatom communities / L. Vendrell-Puigmitja, L. Llenas, L. Proia, S. Ponsa, C. Espinosa, S. Morin, M. Abril // *Aquatic Toxicology*. – 2021. – Vol. 230. – P. 1–10.

32. Sommer V., Karsten U., Glaser K. Halophilic algal communities in biological soil crusts isolated from potash tailings pile areas // *Frontiers in Ecology and Evolution*. – 2020. – Vol. 8. – P. 1–16.
33. Техногенные поверхностные образования зоны солеотвалов и адаптация к ним растений: монография / О.З. Еремченко, О.А. Четина, М.Г. Кусакина, И.Е. Шестаков. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2013. – 148 с.
34. Шишконокова Е.А. Антропогенная растительность территорий предприятий ОАО «Уралкалий» (Пермская область) // *Социально-экологические технологии*. – 2017. – № 3. – С. 65–79.
35. Борзаковский Б.А., Аптуков В.Н., Волегов С.В. Геомеханическая оценка образования карстовых провалов на солеотвалах // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2016. – № 10. – С. 157–166.
36. Gorostiza S. Potash extraction and historical environmental conflict in the Bages region (Spain) // *Investigaciones Geográficas*. – 2014. – Vol. 61. – P. 5–16.
37. Schulz C.-J., Cañedo-Argüelles M. Lost in translation: the German literature on freshwater salinization // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. – 2019. – Vol. 374. – P. 1–11.
38. Siefert B., Büchel G., Lebküchner-Neugebauer J. Kalirückstandshalde Sollstedt (Thüringen): Untersuchungen zur Ausbreitung der Haldenlösung im Rötkeim // *Grundwasser*. – 2006. – Vol. 11. – P. 99–110.
39. Geochemical tracing and hydrogeochemical modelling of water-rock interactions during salinization of alluvial groundwater (Upper Rhine Valley, France) / Y. Lucas, A.D. Schmitt, F. Chabaux, A. Clément, B. Fritz, Ph. Elsass, S. Durand // *Applied Geochemistry*. – 2010. – Vol. 25. – P. 1644–1663.
40. Червань А.Н., Романенко С.С. Пространственное отображение устойчивости почв к техногенному засолению в Солигорском горнопромышленном районе на основе почвенных комбинаций // *Почвоведение*. – 2019. – № 8. – С. 993–1003.
41. Головатый С.Е., Ковалевич З.С., Лукашенко Н.К. Влияние содержания натрия и хлора на урожайность яровых зерновых культур // *Почвоведение и агрохимия*. – 2010. – № 1. – P. 148–156.
42. Высоцкая Н.А., Пискун Е.В. Основные факторы неблагоприятного воздействия на окружающую среду деятельности калийного производства и способы ее защиты // *Горные науки и технологии*. – 2019. – № 4. – P. 172–180.
43. Gnützmann H., Kowalewski O., Śpięwanowski P. Market structure and resilience: evidence from potash mine disasters // *American J. Agr. Econ.* – 2019. – Vol. 102. – № 3. – P. 911–933.
44. United Nations Environment Programme International Fertilizer Industry Association Environmental aspects of phosphate and potash mining. – Paris: UNEP, IFA, 2001. – 68 p.
45. Комаров Ю.А. Обоснование технологии высотного складирования пород-отходов при разработке калийных месторождений: дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2016. – 152 с.
46. Трофимов В.И. Геологическое обоснование сброса рассолов калийного производства в техногенные коллекторы надсолевого комплекса Верхнекамского месторождения: дис. ... канд. геолог.-минерал. наук. – Пермь, 2005. – 182 с.
47. Бачурин Б.А., Сметанников А.Ф., Хохрякова Е.С. Геохимическая трансформация отходов калийного производства в условиях гипергенеза // *Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых: сборник материалов конференции*. – Минск, Беларусь, 2017. – Ч. 2. – С. 54–57.
48. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира / Е.Н. Батурин, Е.А. Меньшикова, С.М. Блинов, Д.Ю. Наумов, П.А. Белкин // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7513> (дата обращения: 11.04.2023).
49. Способ изоляции солеотвалов на калийных рудниках: пат. Рос. Федерация № 2273735; заявл. 23.07.2004; опубл. 10.04.2006. – 5 с.
50. Способ подготовки камер для подземного складирования солей-шламовых отходов: пат. Рос. Федерация № 2166096; заявл. 05.01.1999; опубл. 27.04.2001. – 6 с.
51. Способ подземного складирования жидких отходов производств: пат. Рос. Федерация № 2128140; заявл. 15.01.1997; опубл. 27.03.1999. – 5 с.
52. Способ размещения отходов обогатительных фабрик калийных комбинатов: пат. Рос. Федерация № 2402682; заявл. 22.07.2009; опубл. 27.10.2010, Бюл. № 30. – 6 с.
53. Способ размещения солеотвала и шламохранилища на одной площадке: пат. Рос. Федерация № 2316651; заявл. 05.07.2006; опубл. 10.02.2008, Бюл. № 4. – 7 с.
54. Khodko E.M., Serookiy Yu.A. Integrated use of halite waste potash production. *The Science and Innovations // Resource Conservation*. – 2016. – Vol. 10. – P. 40–42.
55. Квиткин С.Ю., Трофимов В.И., Ковальская В.В. Об экологической эффективности и правовой возможности размещения в надсолевом комплексе пород Верхнекамского месторождения минерализованных вод // *Записки Горного института*. – 2017. – № 228. – С. 731–737.
56. Блинов С.М., Меньшикова Е.А. Использование отходов предприятий Пермского края // *Вестник Пермского университета. География. Геоэкология (Науки о земле)*. – 2019. – № 2. – С. 179–191.
57. Isotopic and hydrochemical studies of groundwater flow and salinity in the southern Rhine Graden / M. Baure, L. Eichinger, P. Elsass, W. Kloppmann, G. Wirsing // *International Journal of Earth Sciences*. – 2005. – Vol. 94. – P. 565–579.
58. Günther T., Rücker C. Boundless electrical resistivity tomography (BERT) v. 2.0 – Open Access Software for Advanced and Flexible Imaging // *Conference: Schlumberger Symposium – 100 years of electrical imaging*. – Paris, France, 2012. – P. 1–4.
59. Liemen F., Bernsdorf S., Meissner R. Recultivation of a potassium mining waste dump with municipal sewage sludge compost // *19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*. – Brisbane, Australia, 2010. – P. 59–61.
60. Schmeisky H., Podlacha G. Natural revegetation of saline waste dumps – drought tolerant specialists and halophytes // *Landscape and Urban Planning*. – 2000. – Vol. 2–4. – P. 159–163.
61. Lothar K., Rainer K., Siegfried T. Evaluation of an attempt to cultivate shrubs and trees on a heap of a potash mine // *Landscape and Urban Planning*. – 2000. – Vol. 2–4. – P. 109–112.

62. Копшталев В.П., Сланевский В.В., Дехтярев А.А. Рекультивация солеотвалов как способ защиты природных вод от засоления // Горный журнал. – 2016. – № 4. – С. 93–96.
63. Хайрулина Е.А., Кудряшова О.С., Новоселова Л.В. Проблемы рекультивации солеотвалов калийных предприятий // Горный журнал. – 2019. – № 5. – С. 83–88.
64. Zero liquid discharge of ultrahigh-salinity brines with temperature swing solvent extraction / C. Boo, I.H. Billinge, X. Chen, K.M. Shah, N.Y. Yip // Environmental Science and Technology. – 2020. – Vol. 4. – P. 9124–9131.
65. Tiezheng T., Menachem E. The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions // Environmental Science and Technology. – 2016. – Vol. 50. – P. 6846–6855.
66. Способ переработки отходов калийного производства: пат. Рос. Федерация № 2497961; заявл. 02.10.2012; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. – 7 с.
67. Способ извлечения благородных металлов: пат. Рос. Федерация № 2291907; заявл. 10.01.2006; опубл. 20.11.2007, Бюл. № 2. – 6 с.
68. Способ извлечения палладия, платины, серебра из отходов переработки калийно-магниевого руд: пат. Рос. Федерация № 2770546; заявл. 07.06.2021; опубл. 18.04.2022, Бюл. № 11. – 11 с.
69. Способ извлечения благородных металлов: пат. Рос. Федерация № 2386710; заявл. 29.09.2008; опубл. 20.04.2010, Бюл. № 11. – 6 с.
70. Способ сорбционного извлечения благородных металлов: пат. Рос. Федерация № 2394109; заявл. 11.01.2009; опубл. 10.07.2010, Бюл. № 19. – 6 с.
71. Способ получения коллективного концентрата для извлечения благородных металлов: пат. Рос. Федерация № 2284221; заявл. 10.01.2006; опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27. – 6 с.
72. Способ получения коллективного концентрата: пат. Рос. Федерация № 2385772; заявл. 29.09.2008; опубл. 10.04.2010, Бюл. № 10. – 6 с.
73. Способ получения коллективного концентрата: пат. Рос. Федерация № 2530923; заявл. 13.05.2013; опубл. 20.10.2014, Бюл. № 29. – 7 с.
74. Способ получения удобрений из отходов калийного производства: пат. Рос. Федерация № 2281929; заявл. 24.02.2005; опубл. 20.08.2006, Бюл. № 23. – 5 с.
75. Способ извлечения золота из рассолов калийного производства: пат. Рос. Федерация № 2137854; заявл. 15.06.1998; опубл. 20.09.1999. – 5 с.
76. Способ получения золота на калийном месторождении: пат. Рос. Федерация № 2170352; заявл. 29.11.1999; опубл. 10.07.2001. – 4 с.
77. Umweltfreundliche entsorgung für salzwasser aus der kalisalzproduktion mit sprühverdunstung und aerosolbarriere: pat. Germany № DE 102007033080; 10.2007; 10.01.2009. – 16 p.
78. Высоцкий Э.А., Демидович Л.А., Клементьев В.П. Проблемы рационального использования Старобинского месторождения калийных солей и охраны окружающей среды // Вестник Белорусского университета. – 1993. – № 1. – С. 70–72.
79. Кичаева Н.Б., Тетяникова А.Г. Состояние обращения с отходами производства в Минской области // Экологический вестник. – 2015. – № 3. – С. 122–129.
80. Разумовский Н.П., Соболев Д.Т. Галитовые отходы в рационах для крупного рогатого скота // Научно-практический журнал для руководителей и специалистов АПК. Животноводство России. Корма. – 2019. – № 12. – С. 55–58.

Информация об авторах

Анна Александровна Перевошикова, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Генкеля, 4; аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. aaperevoshchikova@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1769-7740>

Роман Дмитриевич Перевошиков, ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории экологической геологии Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Генкеля, 4. rperevoshnikov@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6451-8202>

Елизавета Евгеньевна Малышкина, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Генкеля, 4. thelionofcintra@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7251-7637>

Наталья Васильевна Митракова, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Генкеля, 4. mitrakovanatalya@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5571-7725>

Поступила в редакцию: 11.09.2023

Поступила после рецензирования: 25.09.2023

Принята к публикации: 14.10.2023

REFERENCES

1. Segui P., Safhi A.e.M., Amrani M., Benzaazoua M. Mining wastes as road construction material: a review. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 1–18.
2. Bech J., Bini C., Pashkevich M.A. *Assessment, restoration and reclamation of mining influenced soils*. London, Academic Press, 2017. 497 p.
3. Chalov S.R., Shkolnyi D.I., Promakhova E.V., Leman V.N., Romanchenko A.O. Formation of the sediment yield in areas of mining of placer deposits. *Geography and Natural Resources*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 124–131.
4. Lazăr M., Nyari I.-M., Faur F. Methodology for assessing the environmental risk due to mining waste dumps sliding-case study of Jiu Valley. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2015, vol. 10, no. 3, pp. 223–234.
5. Mitrakova N.V., Khayrulina E.A., Blinov S.M., Perevoshchikova A.A. Efficiency of acid sulphate soils reclamation in coal mining areas. *Journal of Mining Institute*, 2023, vol. 260, pp. 266–278.
6. Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova E., Khayrulina E., Perevoshchikov R., Belkin P. Environmental aspects of potash mining: a case study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit. *Mining*, 2023, vol. 3, pp. 176–204.
7. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer, Tour Sequoia, 92055 La Defense Cedex (France) (2009). *Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities*. France, January 2009. 557 p.
8. Srivastava R.R., Rajak D.K., Ilyas S., Kim H., Pathak P. Challenges, regulations, and case studies on sustainable management of industrial waste. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 51, pp. 1–30.
9. El Haggag S. *Sustainable Industrial design and waste management: cradle-to-cradle for sustainable development*. San Diego, CA, USA, Academic Press, 2010. 420 p.
10. Soloviev V.A., Aptukov V.N., Chernopazov D.S., Sekuntsov A.I., Rusakov M.I., Tarasov V.V., Pestrikova V.S. Aspects of improving the mining efficiency of the Verkhnekamskoe Potash Deposit. Novosibirsk, Nauka Publ., 2019. 182 p. (In Russ.)
11. Mineral commodity summaries. *National minerals information center. Statistics and information on the worldwide supply of, demand for, and flow of the mineral commodity potash*. USA, 2022. Available at: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/potash-statistics-and-information> (accessed 3 February 2023).
12. Lanzerstorfer C. Potential of industrial de-dusting residues as a source of potassium for fertilizer production – a mini review. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, vol. 143, pp. 68–76.
13. Belkin P.A. *Transformation of chemical composition of ground waters in the area affected by potash mining waste disposal sites*. Cand. Diss. Moscow, 2019. 117 p. (In Russ.)
14. Bachurin B.A., Baboshko A.Yu. Ecological and geochemical characteristics of potash production waste. *Gorny Zhurnal*, 2008, vol. 10, pp. 88–91. (In Russ.)
15. Beltyukov G.V. The main sources of pollution of groundwater and surface water on the territory of the Verkhnekamskoe potassium salt deposit. *Bulletin of the Perm University. Ecology*, 1996, vol. 4, pp. 128–140.
16. Liu Y., Lekhov A.V. Modeling changes in permeability characteristics of gypsified rocks accompanying brine flow. *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 7, pp. 776–782.
17. Kolpashnikov G.A., Klementiev V.P., Eremenko Yu.P. Salinization of rocks and ground waters by solid wastes from Soligorsk plants potash production. *Report in Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR*, 1979, no. 5, pp. 443–446. (In Russ.)
18. Arle J., Wagner F. Effect of anthropogenic salinisation on the ecological status of macroinvertebrate assemblages in the Werra River (Thuringia, Germany). *Hydrobiologia*, 2013, vol. 701, pp. 129–148.
19. Luo J., Diersch H.J., Monninkhoff L. 3D modeling of saline groundwater flow and transport in a flooded salt mine in Stassfurt, Germany. *Mine Water and the Environment*, 2012, vol. 31, pp. 104–111.
20. Rauche A.M., Fulda D., Schwalm V. Tailings and disposal brine reduction – design criteria for potash production in the 21st century. *Tailings and mine waste 8th International conference*. Fort Collins, Colorado, USA, 2001. pp. 85–94.
21. Khomich V.S., Zhumar P.V., Korobeinikov B.I., Tishchikov G.M. Degradation of the natural environment in the areas affected by potash production. *Natural Environment of Belarus*, 2002, pp. 332–347.
22. Tallin J.E., Pufahl D.E., Barbour S.L. Waste management schemes of potash mines in Saskatchewan. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1990, vol. 17, no. 4, pp. 528–542.
23. Giovanetti R.A. A long term plan for the processing of the waste piles in French potash mines. *Mine Planning and Equipment Selection. Proceedings of the 7th International symposium*. Calgary, Canada, 1998. pp. 673–676.
24. *Information and Technical Handbook on Best Available Techniques. ITH 17-2021. Disposal of production and consumption waste. Waste disposal*. Moscow, NDT Office, 2021. 161 p. (In Russ.)
25. *State annual report. On the condition and protection of the environment of Perm Krai in 2022*. Perm, Ministry of Natural Resources Forestry and Environment of Perm Krai Publ., 2023. 234 p. (In Russ.)
26. *State annual report. On the condition and protection of the environment of Perm Krai in 2021*. Perm, Ministry of Natural Resources Forestry and Environment of Perm Krai Publ., 2022. 295 p. (In Russ.)
27. *Official website of Uralkali. Section Ecology*. (In Russ.) Available at: <https://www.uralkali.com/ru/sustainability/environment> (accessed 2 August 2023).
28. Bilibio C., Schellert C., Retz S., Hensel O., Schmeisky H., Uteau D., Peth S. Water balance assessment of different substrates on potash tailings piles using non-weighable lysimeters. *Journal of Environmental Management*, 2017, vol. 196, pp. 633–643.
29. Lydia K. Roesel effects of less impermeable sealings for mine piles. *Ecological Engineering*, 2022, vol. 176, pp. 1–6.
30. Cañedo-Argüelles M., Brucet S., Carrasco S., Flor-Arnau N., Ordeix M., Ponsá S., Coring E. Effects of potash mining on river ecosystems: an experimental study. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 224, pp. 759–770.
31. Vendrell-Puigmitja L., Llenas L., Proia L., Ponsa S., Espinosa C., Morin S., Abril M. Effects of an hypersaline effluent from an abandoned potash mine on freshwater biofilm and diatom communities. *Aquatic Toxicology*, 2021, vol. 230, pp. 1–10.
32. Sommer V., Karsten U., Glaser K. Halophilic algal communities in biological soil crusts isolated from potash tailings pile areas. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2020, vol. 8, no. 46, pp. 1–16.

33. Eremchenko O.Z., Chetina O.A., Kusakina M.G., Shestakov I.E. *Technogenic superficial formations of zone of salt slag-heap and adaptation to them of plants*. Perm, Perm State University Publ., 2013. 148 p. (In Russ.)
34. Shishkonakova E.A. Anthropogenic vegetation in the area of the enterprise «Uralkaliy» (Perm region, Russia). *Socialno-ecologicheskie Tekhnologii*, 2017, no. 3, pp. 65–79. (In Russ.)
35. Borzakovsky B.A., Aptukov V.N., Volegov, S.V. Geomechanical assessment of karst sinkhole formation on salt tailings piles. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2016, no. 10, pp. 157–166. (In Russ.)
36. Gorostiza S. Potash extraction and historical environmental conflict in the Bages region (Spain). *Investigaciones Geográficas*, 2014, vol. 61, pp. 5–16.
37. Schulz C.-J., Cañedo-Argüelles M. Lost in translation: the German literature on freshwater salinization. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2019, vol. 374, pp. 1–11.
38. Siefert, B., Büchel, G., Lebküchner-Neugebauer, J. Potash mining waste pile Sollstedt (Thuringia): investigations of the spreading of waste solutes in the Roethian Karst. *Grundwasser*, 2006, vol. 11, no. 2, pp. 99–110. (In Germ.). DOI: 10.1007/s00767-006-0131-1
39. Lucas Y., Schmitt A.D., Chabaux F., Clement A., Fritz B., Elsass Ph. et al. Geochemical tracing and hydrogeochemical modelling of water-rock interactions during salinization of alluvial groundwater (Upper Rhine Valley, France). *Applied Geochemistry*, 2010, vol. 25, no. 11, pp. 1644–1663.
40. Chervan A.N., Romanenko S.S. Spatial mapping of soil resistance to technogenic salinization in Soligorsk mining district based on soil combinations. *Soil Science*, 2019, no. 8, pp. 993–1003. (In Russ.)
41. Golovaty S.E., Kovalevich Z.S., Lukashenko N.K. Effect of sodium and chlorine content in soil on summer grain crops productivity. *Soil Science and Agrochemistry*, 2010, no. 1, pp. 148–156. (In Russ.)
42. Vysotskaya N.A., Piskun E.V. The main factors of adverse environmental impact of potash production and methods of environmental protection. *Mining Science and Technology (Russia)*, 2019, no. 4, pp. 172–180. (In Russ.)
43. Gnutzmann H., Kowalewski O., Śpiewanowski P. Market structure and resilience: evidence from potash mine disasters. *American J. Agr. Econ.*, 2019, vol. 102, no. 3, pp. 911–933.
44. United Nations Environment Programme International Fertilizer Industry Association *Environmental aspects of phosphate and potash mining*. Paris, UNEP, IFA, December, 2001. 68 p.
45. Komarov Y.A. *Justification of high stockpiling of waste rock during potash deposit mining*. Cand. Diss. St. Petersburg, 2016. 152 p. (In Russ.)
46. Trofimov V.I. *Geological substantiation of potash production brine discharge into man-made reservoirs of the suprasalt complex of the Verkhnekamskoe deposit*. Cand. Diss. Perm, 2005. 182 p. (In Russ.)
47. Bachurin B.A., Smetannikov A.F., Khokhryakova E.S. Geochemical transformation of wastes of potash production in conditions of hypergenesis. *Modern problems of geochemistry, geology and prospecting for mineral deposits. Collection of conference materials*. Minsk, Belarus, 2017. P. 2, pp. 54–57. (In Russ.)
48. Baturin E.N., Menshikova E.A., Blinov S.M., Naumov D.Yu., Belkin P.A. Challenges of developing the world's largest potash deposits. *Modern Problems of Science and Education. Surgery*, 2012, no. 6. (In Russ.) Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7513> (accessed 11 April 2023).
49. Belkin V.V., Platygin V.I., Kuznetsov N.V. *Method of isolating salt dumps at potash mines*. Patent RF, no. 2273735, 2006. (In Russ.)
50. Nesterov M.P., Borzakovskiy B.A., Kondrashev P.I., Papulov L.M., Marakov V.E. *Method of preparation of chambers for underground storage of salt and sludge wastes*. Patent RF, no. 2166096, 2001. (In Russ.)
51. Nikiforov V.N., Kuznetsov Yu.S., Ignatev V.N., Idrisov A.Z., Nurbaev B.A., Shulgina N.Yu. *Method of underground storage of liquid industrial wastes*. Patent RF, no. 2128140, 1999. (In Russ.)
52. Borzakovskiy B.A., Grinberg A.YA., Panteleev B.I., Sabirov R.Kh., Chernyshov V.Yu., Shilov A.V. *Method of disposal of waste from potash processing plants*. Patent RF, no. 2402682, 2010. (In Russ.)
53. Borzakovskiy B.A., Konshin A.A., Nakonechny C.C., Timakov V.M., Kololeev N.V., Panteleev B.I., Sabirov Z.Kh. *Method of location of salt dump and sludge storage on one site*. Patent RF, no. 2316651, 2008. (In Russ.)
54. Khodko E.M., Serookiy Yu.A. Integrated use of halite waste potash production. *The Science and Innovations. Resource Conservation*, 2016, vol. 10, pp. 40–42.
55. Kvitkin S.Y., Trofimov V.I., Kovalskaya V.V. Environmental efficiency and legal possibility of mineralized water dispose in the suprasalt sequence of the Verkhnekamskoe deposit. *Journal of Mining Institute*, 2017, vol. 228, pp. 731–737. (In Russ.)
56. Blinov S.M., Menshikova E.A. Utilisation of industrial wastes in Perm Region. *Bulletin of Perm University. Geology. Geoecology (Earth Science)*, 2019, no. 2, pp. 179–191. (In Russ.)
57. Baure M., Eichinger L., Elsass P., Kloppmann W., Wirsing G. Isotopic and hydrochemical studies of groundwater flow and salinity in the southern Rhine Graden. *International Journal of Earth Sciences*, 2005, vol. 94, pp. 565–579.
58. Günther T., Rücker C. Boundless electrical resistivity tomography (BERT) v. 2.0 – Open Access Software for Advanced and Flexible Imaging. *Conference: Schlumberger Symposium – 100 years of electrical imaging*. Paris, France, 2012. pp. 1–4.
59. Liemen F., Bernsdorf S., Meissner R. Recultivation of a potassium mining waste dump with municipal sewage sludge compost. *19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*. Brisbane, Australia, 2010. pp. 59–61.
60. Schmeisky H., Podlacha G. Natural revegetation of saline waste dumps – drought tolerant specialists and halophytes. *Landscape and Urban Planning*, 2000, vol. 2–4, pp. 159–163.
61. Lothar K., Rainer K., Siegfried T. Evaluation of an attempt to cultivate shrubs and trees on a heap of a potash mine. *Landscape and Urban Planning*, 2000, vol. 2–4, pp. 109–112.
62. Kopshtalev V.P., Slanevskiy V.V., Dekhtyarev A.A. Recultivation of salt tails piles as a method to protect natural waters from salinization. *Gorny Zhurnal*, 2016, no. 4, pp. 93–96. (In Russ.)
63. Khayrulina, E.A., Kudryashova, O.S., Novoselova L.V. Problems of potash tailings pile remediation. *Gorny Zhurnal*, 2019, no. 5, pp. 83–88. (In Russ.)

64. Boo C., Billinge I.H., Chen X., Shah K.M., Yip N.Y. Zero liquid discharge of ultrahigh-salinity brines with temperature swing solvent extraction. *Environmental Science and Technology*, 2020, vol. 4, pp. 9124–9131.
65. Tiezheng T., Menachem E. The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions. *Environmental Science and Technology*, 2016, vol. 50, pp. 6846–6855.
66. Smetannikov A.F., Onosov D.V., Sinegribov V.A., Kosolapova A.I., Novikov P.Yu., Semenov A.A. *Method of potash production waste recycling*. Patent RF, no. 2497961, 2013. (In Russ.)
67. Sinegribov V.A., Yudina T.B., Smetannikov A.F., Krasnoshteyn A.E. *Method of extraction of noble metals*. Patent RF, no. 2291907, 2007. (In Russ.)
68. Smetannikov A.F., Onosov D.V., Onosova E.F. *Method of extraction of palladium, platinum, silver from potassium-magnesium ore processing wastes*. Patent RF, no. 2770546, 2022. (In Russ.)
69. Sinegribov V.A., Smetannikov A.F., Yudina T.B., Novikov P.Yu., Logvinenko I.A., Krasnoshteyn A.E. *Method of extraction of noble metals*. Patent RF, no. 2386710, 2010. (In Russ.)
70. Logvinenko I.A., Vlasova T.V., Sinegribov V.A., Smetannikov A.F., Krasnoshteyn A.E. *Method of sorption extraction of noble metals*. Patent RF, no. 2394109, 2010. (In Russ.)
71. Smetannikov A.F., Onosov D.V., Krasnoshteyn A.E. *Method of production of collective concentrate for extraction of noble metals*. Patent RF, no. 2284221, 2006. (In Russ.)
72. Smetannikov A.F., Onosov D.V., Chistyakov A.A., Sinegribov V.A., Novikov P.Yu., Krasnoshteyn A.E. *Method of collective concentrate production*. Patent RF, no. 2385772, 2010. (In Russ.)
73. Smetannikov A.F., Onosov D.V., Sinegribov V.A., Novikov P.Yu., Semenov A.A. *Method of collective concentrate production*. Patent RF, no. 2530923, 2014. (In Russ.)
74. Platygin V.I., Bruev N.I., Shumakher A.I., Kuznetsov N.V., Belkin V.V., Alzhev I.A. *Method of production of fertilisers from potash production waste*. Patent RF, no. 2281929, 2006. (In Russ.)
75. Belkin V.V., Nikolaev A.S., Papulov L.M. *Method of gold extraction from potash brines*. Patent RF, no. 2137854, 1999. (In Russ.)
76. Belkin V.V., Nikolaev A.S. *Method of gold production at the potash deposit*. Patent RF, no. 2170352, 2001. (In Russ.)
77. Reinhardt T. *Environmentally friendly disposal of salt water from potassium salt production with spray evaporation and aerosol barrier*. Patent FRG, no. DE 102007033080, 2009. (In Germ.)
78. Vysotsky E.A., Demidovich L.A., Klementiev V.P. Problems of rational use of the Starobinskoye Deposit and environmental protection. *Bulletin of Belarusian University*, 1993, no. 1, pp. 70–72. (In Russ.)
79. Kichaeva N.B., Tsetsyannikova A.G. The analysis of generation, utilisation and deposition of wastes in the Republic of Belarus. *Ekologicheskii Vestnik*, 2015, no. 3, pp. 122–129. (In Russ.)
80. Razumovsky N.P., Sobolev D.T. Halite waste in cattle diets. *Scientific and practical journal for managers and specialists of agro-industrial complex. Livestock breeding in Russia. Feeds*, 2019, no. 12, pp. 55–58. (In Russ.)

Information about the authors

Anna A. Perevoshchikova, Researcher, Perm State National Research University, 4, Genkel street, Perm, 614990, Russian Federation; Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komso-molsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. aaperevoshchikova@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1769-7740>

Roman D. Perevoshchikov, Lead Engineer, Perm State National Research University, 4, Genkel street, Perm, 614990, Russian Federation. rperevoshchikov@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6451-8202>

Elizaveta E. Malyshkina, Engineer, Perm State National Research University, 4, Genkel street, Perm, 614990, Russian Federation. thelionofcintra@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7251-7637>.

Natalya V. Mitrakova, Cand. Sc., Senior Researcher, Perm State National Research University, 4, Genkel street, Perm, 614990, Russian Federation. mitrakovanatalya@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5571-7725>

Received: 11.09.2023

Revised: 25.09.2023

Accepted: 14.10.2023