Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2022, №3, Том 14 / 2022, No 3, Vol 14 https://esj.today/issue-3-2022.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/11NZVN322.pdf

**Ссылка для цитирования этой статьи:**
Петрова, Т. А. Анализ воздействия хранилищ отходов калийного производства на окружающую среду и подходы к выбору рационального способа их складирования / Т. А. Петрова, Т. С. Астапенко, А. А. Кологривко, А. С. Долгих // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 3. — URL: https://esj.today/PDF/11NZVN322.pdf

**For citation:**
Petrova T.A., Astapenka T.S., Kologrivko A.A., Dolgih A.S. Analysis of the impact of potash waste storage facilities on the environment and approaches to choosing a rational way to store them. *The Eurasian Scientific Journal*, 14(3): 11NZVN322. Available at: https://esj.today/PDF/11NZVN322.pdf. (In Russ., abstract in Eng.).

**Петрова Татьяна Анатольевна**
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург, Россия
Доцент кафедры «Геоэкологии»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: Petrova_TA@pers.spmi.ru

**Астапенко Татьяна Сергеевна**
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург, Россия
Аспирант
E-mail: tnastapenko@gmail.com

**Кологривко Андрей Андреевич**
Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь
Декан факультета «Горного дела и инженерной экологии»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: akologrivko@bntu.by

**Долгих Александр Сергеевич**
ОАО «Беларуськалий», Солигорск, Республика Беларусь
Главный инженер третьего рудоуправления
E-mail: a.dolgih@kali.by

# Анализ воздействия хранилищ отходов калийного производства на окружающую среду и подходы к выбору рационального способа их складирования

**Аннотация.** Масштабность формирования отходов обогащения калийного производства приводит к отчуждению новых территорий под складирование как твердых, так и жидких отходов, а также пагубному воздействию на компоненты окружающей среды. Учитывая растущий мировой спрос на калийную продукцию, это неизбежно приведет к возникновению негативных геоэкологических последствий, что определяет необходимость системного подхода к решению подобных проблем. В статье рассмотрены вопросы влияния хвостохранилищ на атмосферу, водные ресурсы и сельскохозяйственные угодья. В зоне воздействия солеотвалов и шламохранилищ были проведены: отбор проб твердых и жидких отходов, почв, визуальная оценка исследуемых участков, оценка результатов бурения инженерно-геологических скважин и анализ архивных данных о воздействии изучаемых объектов на атмосферу. В результате проведенных исследований выявлено, что потенциально антропогенным нагрузкам подвергаются почвы, так как воздействие на приземный слой

атмосферы, подземные и поверхностные воды отсутствует. Концентрации хлоридов в почвах изменяются от 71 до 124,25 мг/кг, данные показатели не превышают предельно допустимых концентраций (ПДК). ПДК хлоридов в почве 360 мг/кг, это позволяет утверждать, что процесс техногенной трансформации почв под воздействием калийного производства не развивается на поверхностных участках. В статье определены основные актуальные направления по снижению негативного воздействия от объектов калийной промышленности, в частности, рассмотрен способ складирования отходов калийного производства, позволяющий сократить изъятие плодородных земель. Складирование отходов калийной промышленности оказывает деформационную неустойчивость грунтовых дамб, которые ограничивают шламохранилище, вследствие этого проведение наблюдений, экологический мониторинг и исследование состояния геологической структуры приобретают особую важность.

**Ключевые слова:** техногенные массивы; калийная промышленность; галитовые отходы; солеотвал; шламохранилище; засоление почв; складирование отходов

Значительное количество отходов, образующихся в процессе добычи полезных ископаемых, становится важным аспектом в вопросе управления отходами (например, пустой породой или хвостами). Горнодобывающая промышленность является одним из источников загрязнения окружающей среды. Согласно статистике около 80 % от общего объема отходов приходится на добывающую и перерабатывающую отрасли промышленности [1]. Накопление значительного количества отходов приводит к формированию техногенных массивов, которые представляют собой геологические тела техногенного происхождения, состоящие из горных пород, отходов обогащения, зол, шлаков и шламов [2–4].

Одним из примеров таких производств, является калийная промышленность. Калийная соль широко используются в различных отраслях народного хозяйства, однако, производство ее может оказывать негативное воздействие на компоненты окружающей среды.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что в процессе непрерывного экономического прогресса будет наблюдаться дефицит калийных удобрений, что в свою очередь вызовет повышенный спрос на них. Поскольку калий является важным элементом для продовольствия, а основные запасы руд сосредоточены в нескольких странах, нехватка калия может привести к снижению производства сельскохозяйственной продукции. Результаты исследования показали, что пик производства калийных руд наступит к 2042 и 2073 годам в таких странах как Канада и Российская Федерация, в Республике Беларусь пик ожидается в 2040 году, а в Китае и Чили — в 2030 году [5; 6].

Обзор, проведенный геологической службой США по минеральному сырью, показал, что производство калия увеличилось благодаря наращиванию производства удобрений в Канаде, Российской Федерации и Республике Беларусь. Потребление калийных удобрений по оценкам в 2021 году составило около 46 млн тонн. Согласно прогнозам, производство калийных удобрений к 2025 году увеличится до 69 млн тонн, в то время как в 2021 году оно составило 62,3 млн тонн. Значительная доля калийной промышленности будет приходиться на производство хлористого калия за счет новых рудников и проектов по расширению производства в Республике Беларусь, Канаде и Российской Федерации. Остальная часть охватит сульфатно-калийные месторождения в Австралии, Китае и Эритрее, а также новые рудники в Бразилии, Эфиопии и Испании. Исходя из отчета, главными экспортерами хлористого калия на январь 2022 года являются такие страны как Канада, Российская

Федерация и Республика Беларусь (рис. 1)[1]. Так, производство калийных удобрений в Республике Беларусь и Российской Федерации обеспечивает более 35 % мирового производства [7].

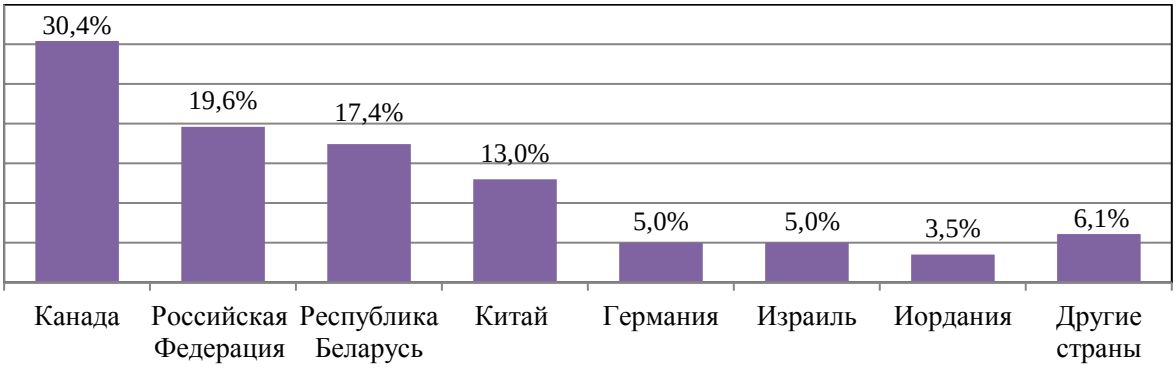


***Рисунок 1.*** *Основные страны производители калийных удобрений на январь 2022 (по данным геологической службы США)*

Основным элементом добываемой руды является хлористый калий, содержание которого изменяется от 24 % до 32 %. В процессе добычи калийной руды ценные компоненты (KCl и $MgSO_4$) отделяются от непригодных солевых остатков NaCl, представляющие собой отходы [8]. Отходы калийного производства составляют до 75 % и представлены твердыми отходами, состав которых до 95 % представлен хлористым натрием (галитом) и жидкими — глинисто-солевые шламы [9]. Согласно статистике, одна тонна готовой продукции содержит от 0,99 до 4,97 т твердых и от 0,3 до 1,1 т жидких отходов калийного производства [10]. Например, на калийных рудниках в центральной Каталонии на каждую тонну добытого калия приходится 3 тонны отходов [11].

Практика ведущих стран калийного производства показывает, что обращение с отходами для каждого предприятия сугубо индивидуально в связи со спецификой каждого из них.

Складирование и утилизация отходов калийного производства осуществляется тремя способами:

- складирование отходов в солеотвалы и шламохранилища;
- подземное складирование отходов;
- сброс отходов в реки и моря.

Твердые отходы, состоящие из галита, некоторого количества других солей и нерастворимого остатка, складируются в солеотвалы на поверхности земли, а жидкие отходы — в шламохралища. Общая площадь отчужденных земель под солеотвалы и шламохранилища составляет около 9000 гектар. Кроме того, некоторое количество отходов используется для закладки выработанного пространства подземных горных выработок. Непосредственная близость предприятий по производству калия от морских бассейнов позволяет утилизировать отходы в море [10]. Так, в Великобритании транспортирование галитовых отходов и глинистых шламов производится по трубопроводу к побережью Северного моря, а в последующем вглубь моря, предварительно репульпируя их. В Германии складирование отходов калийного производства выполняется несколькими способами. Первый способ заключается в

[1] USGS, Mineral Commodity Summaries, 2022 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries (дата обращения: 21.06.2022).

транспортировании отходов с обогатительной фабрики конвейерным транспортом в солеотвалы, находящиеся на поверхности земли [12]. Второй способ представляет собой размещение отходов в выработанном пространстве рудников. Отработанные технологические рассолы фильтруются путем повышения концентрации хлорида магния и хранятся в следующих состояниях: в качестве геотехнически поддерживающей или устойчивой по местоположению закладки и в виде жидкости [13].

Отходы калийного производства, полученные в процессе обогащения, могут оказывать как прямое, так и косвенное воздействие на все компоненты окружающей среды. Высотное складирование отходов имеет свою специфику, отходы могут пылить, воздействуя при этом на приземный слой атмосферы. С выпадением атмосферных осадков на поверхность солеотвалов вымывается значительное количество различных соединений [14]. Под действием осадков растворимые соединения мигрируют в нижние горизонты грунтов и, достигая водоносные горизонты, изменяют качество грунтовых вод. Кроме того, калийное производство может являться источником загрязнения поверхностных вод — на территориях обогатительных комбинатов в Германии и Испании было отмечено увеличение концентраций растворенных ионов в водоемах, что негативно сказывалось на биоразнообразии водных организмов [15; 16].

Возрастающее количество отходов, поступающих в солеотвалы, а также образующиеся рассолы, первопричина засоления почв и водных ресурсов [17]. Главной отличительной особенностью галитовых отходов и глинисто-солевых шламов является высокое содержание легкорастворимых солей. Засоленность почв, накопление избытка солей, которые подавляют рост и функционирование растений, является одним из основных источников деградации почвы во всем мире. Процесс засоления почвы приводит к крайне неблагоприятным последствиям и приносит большой урон хозяйственно-экономическому использованию, изымая пригодные земли из пользования.

Помимо негативного воздействия на окружающую среду, при неправильно подобранной технологии складирования отходов обогащения калийной руды могут возникать чрезвычайные ситуации, связанные с прорывом дамб и неконтролируемыми утечками отходов из хвостохранилищ. Особенно это актуально в случае использования площадей старых хвостохранилищ при длительном складировании отходов.

Цель данного исследования заключается в оценке воздействия хранилищ калийных отходов на компоненты окружающей среды.

## Засоление

Основным этапом исследования является оценка влияния засоления объектов складирования отходов на все компоненты окружающей среды. Загрязнение приземного слоя атмосферы обнаружить не удалось, так как процесса пыления на исследуемых солеотвалах нет, что также подтверждается архивными данными. Были изучены результаты, полученные при проведении инженерно-геологических изысканий на 26 скважинах, глубинами от 16,5 до 54 метров, что позволило изучить физико-механические свойства отходов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что воздействия отходов на грунтовые воды не оказывается, так как солевые остатки кристаллизируются в суглинках. Поверхностные водные объекты находятся в значительном отдалении от расположения зон складирования твердых и жидких отходов калийного производства. Из чего следует, что загрязнение гидросферы сведено к минимуму. В связи с тем, что в непосредственной близости от района складирования отходов находятся сельскохозяйственные угодья, важной задачей является оценка миграции солей на территориях сельскохозяйственных земель.

Изначально, перед определением мест отбора проб проводилась визуальная оценка почв на исследуемой территории, участков солеотвала и намываемой поверхности из галитовых отходов. Результаты визуальной оценки позволили определить наиболее типичные участки для отбора проб и дальнейших лабораторных исследований по определению иона хлорида. Отбор проб велся по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017. На выбранных участках было отобраны 10 объединенных проб, посредством смешивания точечных образцов. Пробы представлены жидкими и твердыми отходами калийного производства, почвой вблизи солеотвала и шламохранилища. Для проведения химического анализа твердые пробы были высушены до воздушно-сухого состояния. Перед определением концентрации иона хлорида из проб были исключены различные включения: корни растений, камни и др. Затем пробы измельчались в ступке пестиком и просеивались через сито диаметром 1 мм. Определение иона хлорида выполнялось в соответствии с ГОСТ 26425-85 и ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.28-02 в водных вытяжках изучаемых образцов почв и твердых отходов.

В результате проведенных исследований распределение концентраций хлоридов в отобранных пробах представлено на рисунке 2. Так, в твердых отходах их концентрация варьировалась в пределах следующих значений: в точке 1 — 521850 мг/кг, точке 2 — 532500 мг/кг. Максимальная концентрация иона хлорида в твердых отходах обнаружена в точке 6 — 614150 мг/кг.

Пробы глинисто-солевых шламов (точки 3 и 7) представлены следующим содержанием хлоридов 60350 мг/кг и 124250 мг/кг.

Концентрация иона хлорида в жидких отходах (точки 4 и 8) имеет следующие показатели — 267650 мг/кг и 269365 мг/кг.

Содержание хлоридов в песке (точка 5), отобранном из дамб, ограждающих шламохранилище, находится в пределах 461,5 мг/кг, что в свою очередь превышает ПДК в 1,28 раза (ПДК для почв согласно ГН 2.1.7.12-1-2004 составляет 360 мг/кг). Однако количество иона хлорида в образцах почв, отобранных с пахотных земель в непосредственной близости от солеотвала, составило от 71 до 124,5 мг/кг.

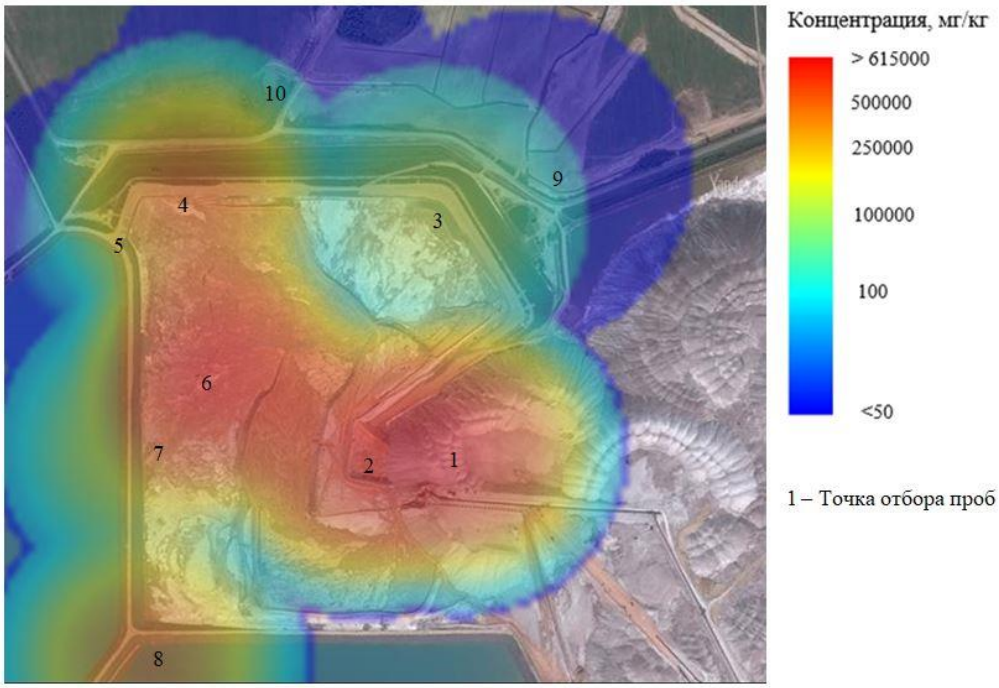


***Рисунок 2.*** *Распределение зон концентрации хлоридов с отобранных участков (сосавлено авторами)*

По установленным концентрациям иона хлорида в почвах, можно сделать вывод о том, что полученные данные указывают на отсутствие процесса засоления почв на поверхностных участках, то есть, утечки из хвостохранилищ отсутствуют.

Результаты исследований говорят о том, что на данный момент отходы калийного производства не несут опасности для сельскохозяйственных угодий, в связи с этим особое внимание следует уделить технологиям складирования отходов обогащения калийной руды.

## Складирование

Складирование отходов в солеотвалы, достигших высоты свыше ста метров технически невозможно за счет возрастающих ветровых нагрузок, а расширение территорий под складирование ведет изъятие новых плодородных земель. Поэтому наращивание производства и количества отходов ставит актуальными вопросы о новых способах складирования, которые позволят сократить отчуждение сельскохозяйственных угодий.

Одним из способов по рациональному складированию отходов калийного производства является использование площади отработанного шламохранилища в качестве ложа для размещения галитовых отходов. На поверхности шламохранилища формируется слой из галитовых отходов, которые в процессе уплотнения и кристаллизации преобразуются в техногенную каменную соль [18]. Затем на подготовленном ложе шламохранилища формируется солеотвал способом гидронамыва [19].

Складирование отходов имеет свою специфику, галитовые отходы пластичны и главным условием при их складировании является обеспечение устойчивости дамб без выпора отходов за систему дамб. Главным компонентом галитовых отходов является NaCl, помимо этого, отходы содержат некоторое количество KCl, MgCl, $CaSO_4$, Br, нерастворимого остатка и некоторые другие компоненты. В процессе переработки калийной руды полученные отходы содержат незначительное количество адсорбированных флотореагентов.

Процесс складирования отходов методом гидронамыва представляет собой сложный технологический процесс, эффективность которого вызвана такими факторами как:

- состав пульпы, включая не только соотношение жидкой и твердой фракций в целом, но неоднородность твердой фракции по размерам и форме частиц;
- способ подачи пульпы;
- скорость распространения пульпы по намываемой поверхности;
- угол наклона намываемой поверхности.

Данный метод складирования отходов заключается в смешивании галитовых отходов с рассолами за счет размыва конуса из галитовых отходов остаточным напором рассолов. Складирование выполняется поэтапно в пределах отдельных зон, ограниченных по периметру ограждающими дамбами. Важным условием эффективности процесса гидронамыва является постоянное обеспечение наклона намываемой поверхности и устойчивости дамб, ограждающих шламохранилище.

Намыв галитовых отходов выполняется поярусно, сначала формируется первый ярус у подножья рабочей площадки. Дальнейший намыв производится после формирования контура ограждающих валов до последующего яруса, заполнение каждого яруса должно выполняться равномерно.

Режим складирования галитовых отходов требует проведения системного мониторинга с применением инженерно-экологических и маркшейдерских методов контроля за состоянием намывных галитовых отходов. Непрерывные наблюдения за солеплитой позволят своевременно определять рассольные горизонты и производить контроль за перемещением намываемой поверхности.

Процесс выполнения гидронамыва с течением времени представлен на рисунке 3.

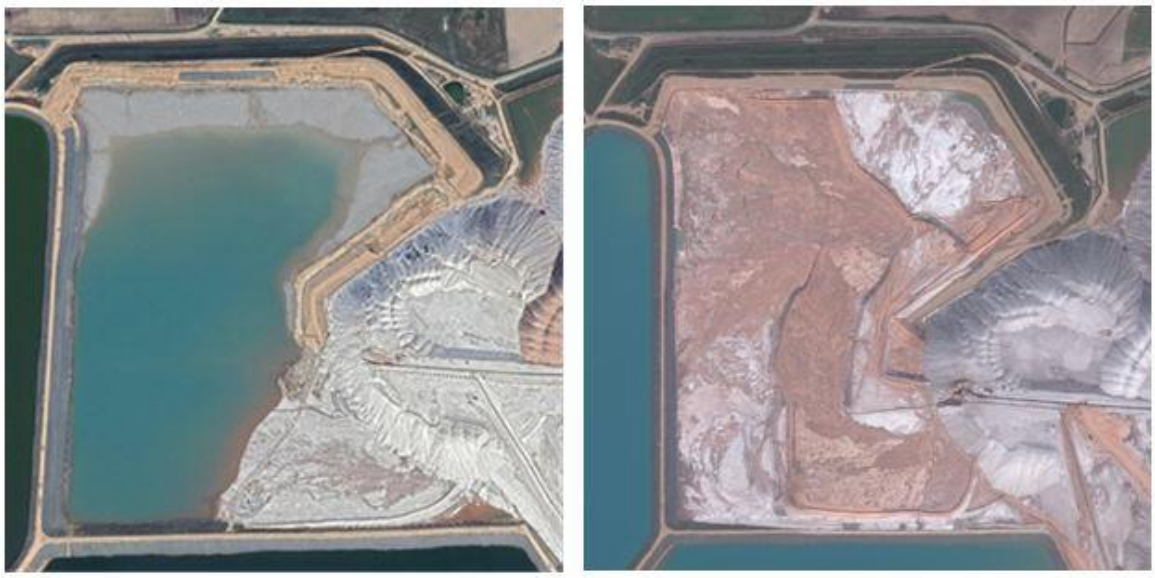

***Рисунок 3.*** *Поверхность исследуемого шламохранилища по состоянию на 2016 и 2022 годы (по материалам Google Earth и Yandex Maps)*

Проведенные исследования показали, что концентрации хлоридов в галитовых отходах, глинисто-солевых шламах и рассолах могут достигать от 60350 мг/кг до 614150 мг/кг. Однако, несмотря на непосредственную близость сельскохозяйственных угодий к солеотвалам и шламохранилищам, процесс техногенной трансформации почв под воздействием калийного производства не развивается. В связи с этим, особого внимания заслуживают вопросы о поиске новых методов складирования отходов, так как значительное количество отходов требует отчуждения больших площадей плодородных земель, что ведет к возникновению техногенной нагрузки.

Наиболее рациональным методом является способ складирования отходов методом гидронамыва. Гидронамыв на отработанное шламохранилище позволит сократить изъятие дополнительных территорий под солеотвалы, однако данный способ требует дополнительного изучения и беспрерывного мониторинга геологического состояния намываемой поверхности и обеспечения устойчивости дамб, ограждающих шламохранилище.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Pashkevich M.A., Bech J., Bini C. Assessment, restoration and reclamation of mining influenced soils. — London; San Diego; Cambridge: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2017. — 497 p.
2. Formation of the sediment yield in areas of mining of placer deposits / Chalov S.R., Shkol'nyi D.I., Promakhova E.V. [et al.] // Geography and natural resources. — 2015. — Vol. 36. — № 2. — P. 124–131.
3. Lazăr M., Nyari I.-M., Faur F. Methodology for assessing the environmental risk due to mining waste dumps sliding-case study of Jiu Valley // Article in Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. — 2015 — Vol. 10. — № 3. — P. 223–234.
4. Alekseenko A.V., Pashkevich M.A. Novorossiysk agglomeration landscapes and cement production: Geochemical impact assessment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2016. — Vol. 43. — № 012050.
5. Rawashdeh R.Al. World peak potash: An analytical study // Resources Policy. — 2020. — Vol. 69. — P. 101834.
6. Rawashdeh R.Al., Xavier-Oliveira E., Maxwell P. The potash market and its future prospects // Resources Policy. — 2016. — Vol. 47. — P. 154–163.
7. Пономаренко Т.В., Султани А.Н. Повышение конкурентоспособности компаний калийной отрасли России и Белоруссии за счет совершенствования сбытовой политики // Записки Горного института. — 2010. — Т. 186. — С. 230–232.
8. 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. 46–60.
9. Шемет С.Ф., Кологривко А.А. Снижение геоэкологических последствий при подземной разработке калийных месторождений // Горный журнал. — 2015. — № 5. — С. 100–105.
10. Rauche H. Die Kaliindustrie im 21, Jahrhundert. — Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. — 580 p.
11. Gorostiza Langa S. Potash Extraction and Historical Environmental Conflict in the Bages Region (Spain) // Investigaciones Geográficas. Universidad de Alicante Servicio de Publicaciones. — 2014. — № 61. — P. 5–16.
12. Knyazev V.V., Komarov Y.A. Environmental aspects of the combined storage of halite wastes and clay-salt slimes // Gornyi Zhurnal. — 2016. — Vol. 2016 — № 4. — P. 97–101.
13. Pinkse T., Quensel R. Introducing a New Approach for the Stowage of Waste Brines from Potash Mines of the Werra District in Germany as a Measure to Ensure the Safe and Sustainable Continuation of Potash. // IMWA 2019 Mine Water: Technological and Ecological Challenges. — 2019. — P. 127–133.
14. Квиткин С.Ю., Ковальская В.В. Об экологической эффективности и правовой возможности размещения в надсолевом комплексе пород верхнекамского месторождения минерализованных вод // Записки Горного института. — 2017. — Т. 228. — С. 731–737.

15. Schulz C.J., Cañedo-Argüelles M. Lost in translation: The German literature on freshwater salinization // Philosophical Transactions of the Royal Society. — 2019. — Vol. 374 — № 1764.

16. Ladrera R., Cañedo-Argüelles M., Prat N. Impact of potash mining in streams: The Llobregat basin (northeast Spain) as a case study // Journal of Limnology. Page Press Publications. — 2017. — Vol. 76 — № 2. — P. 343–354.

17. Ivanov A.V., Strizhenok A.V. Monitoring and reducing the negative impact of halite dumps on the environment // Poll Res. — 2018. — Vol. 37 — № 1. — P. 51–55.

18. Фомин С.И., Комаров Ю.А., Экгарт В.И. Повышение безопасности складирования галитовых отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 4(5–2). — С. 161–169.

19. Шемет С.Ф., Прохоров Н.Н., Кафанова Т.П. Геофизические исследования по изучению строения и оценке состояния намывной солеплиты на площади отработанного шламохранилища // Горный журнал. — 2014. — № 2. — С. 16–19.

**Petrova Tatyana Anatolevna**
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: Petrova_TA@pers.spmi.ru

**Astapenka Tatsiana Sergeevna**
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: tnastapenko@gmail.com

**Kologrivko Andrey Andreevich**
Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
E-mail: akologrivko@bntu.by

**Dolgih Aleksandr Sergeevich**
Belaruskali, Soligorsk, Republic of Belarus
E-mail: a.dolgih@kali.by

# Analysis of the impact of potash waste storage facilities on the environment and approaches to choosing a rational way to store them

**Abstract.** The volume of potash waste leads to the disposal of new areas for the storage of solid and liquid waste as well as harmful impacts on the environment. The growing global demand for potash production will lead to negative geo-environmental impacts which determines the need for a systematic approach to solving such problems. The article deals with the impact of tailings piles on the atmosphere, water resources and agricultural land. The process of salinization from storage of potash waste was assessed by sampling of solid and liquid waste, and soil, visual observation of the investigated areas, evaluation of results of drilling of engineering-geological boreholes and analysis of archive materials on the impact of investigated objects on the atmosphere. As a result of these research activities, it was identified that soils are potentially subject to anthropogenic loads, as there is no impact on the surface layer of the atmosphere, groundwater and surface water. The analysis showed that chloride concentrations in soils range from 71 to 124.25 mg/kg and these values do not exceed the maximum permissible concentrations (MPC). The MPC for chlorides in soil is 360 mg/kg. The obtained results indicate that the process of anthropogenic transformation of soils does not occur at the surface sites in the areas impacted by potassium ore enrichment waste. The article identifies the main topical areas to reduce the negative impact from the potash industry facilities. The method of storage of waste potash production considers which allowing to reduce the withdrawal of fertile land. The storage of potash waste has a deformation instability of ground dams, which restrict the slurry pit. Therefore, observation, environmental monitoring and research of the geological structure condition are of particular importance.

**Keywords:** technogenic massifs; potash industry; solid halite waste; salt pile; slurry pit; soil salinity; waste storage