DOI: 10.24892/RIJIE/20260313

Оценка фитотоксичности хвостов обогащения лопаритовых руд*

Красавцева Е.А.
Институт проблем промышленной экологии Севера, Кольский научный центр Российской академии наук?
Центр наноматериаловедения, Кольский научный центр Российской академии наук
г. Апатиты, Российская Федерация
e.krasavtseva@ksc.ru

Аннотация. **Научная статья посвящена оценке фитотоксичности хвостов обогащения лопаритовых руд, депонируемых на хвостохранилище «Умбозеро» в Мурманской области. Хвосты представляют собой измельчённые твёрдые минеральные отходы, образующиеся в процессе добычи и переработки комплексных редкометалльных руд. Проведено комплексное изучение экологической опасности путём оценки фитотоксического воздействия указанных отходов на высшие растения. Эксперимент проводился двумя методами: фитотестирование в элюатном исполнении и фитотестирование в субстратном исполнении. Использовались стандартные тест-культуры – овес посевной и редис. Полученные результаты показали выраженный фитотоксический эффект, обусловлавливающий неблагоприятные условия для роста растений и самозарастания хвостохранилища. Тонкодисперсные частицы хвостов проявляют наибольшую токсичность, что подчёркивает необходимость дальнейшего изучения и принятия мер по снижению негативного воздействия на окружающую среду.**

Ключевые слова: **хвосты обогащения лопаритовых руд, фитотестирование, тест-культуры, овес посевной, редис, биоремедиация.**

Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых приводит к накоплению значительных объемов образующихся отходов и, как следствие, загрязнению компонентов окружающей среды широким спектром поллютантов. На территории Мурманской области расположено несколько крупных горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий: КФ АО «Апатит», АО «Кольская ГМК», АО «Олкон» и др. В процессе добычи и обогащения руд образуется огромное количество отходов – отвалы вскрышных и проходческих пород, хвостохранилища, занимающие значительные площади и оказывающие негативное воздействие на сопредельные экосистемы Складируемые твердые минеральные отходы являются одним из основных источников загрязнения атмосферы, почв, поверхностных и подземных вод тяжелыми металлами во всем мире, особенно вблизи мест добычи и переработки металлов [1-4].

Измельченные хвосты обогащения руд складируются в хвостохранилищах [5-9], а колебания температуры, влажности и скорости ветра приводят к образованию на их поверхности пыли, которая переносится на большие расстояния и попадает в почвы и водоемы [4]. Традиционно выделяют три группы методов пылеподавления техногенных отвалов: механические, физико-химические и [10-13]. Для кратковременного закрепления пылящих участков на действующих хвостохранилищах рекомендуется физико-химический метод, направленный на создание противоэрозионного покрытия на поверхности промышленного отвала путем обработки ее вяжущими [14-18]. На выведенных из эксплуатации хвостохранилищах применяется биологический - рекультивация пылящих территорий и отвалов с использованием растений, устойчивых к внешней среде и загрязняющим веществам, с развитой корневой системой и большой биомассой.

Восстановление растительного покрова на хвостохранилищах путем создания противоэрозионных сеяных фитоценозов, особенно в сложных климатических условиях, становится затяжным, многоступенчатым процессом. В редких случаях складируемые отходы обогащения обладают благоприятными характеристиками, способствующими активному самозарастанию нарушенных территорий. Чаще, грунт, депонируемый в хвостохранилищах, характеризуется экстремально низкими либо экстремально высокими значениями pH, слабой водоудерживающей способностью, высоким содержанием тяжелых металлов, ограниченным банком семян [18].

Одним из первых этапов разработки стратегии восстановления техногенно нарушенных земель является биотестирование субстратов для оценки влияния накопленных отходов на высшие растения, а также перспектив самозарастания открытых участков отвалов и хвостохранилищ. Ранее нами были изучены хвосты обогащения лопаритовых руд, депонируемые на хвостохранилище «Карнасурт-1» [19-21]. В развитие этих исследований объектом изучения стало выведенное из эксплуатации хвостохранилище «Умбозеро».

Целью работы являлось проведение оценки фитотоксического влияния хвостов обогащения лопаритовых руд рудника «Умбозеро», Мурманская область.

Объекты и методы

Краткая характеристика объекта исследования

Объектом исследования являлись хвосты обогащения лопаритовых руд, складированные на хвостохранилище «Умбозеро», образовавшемся в результате переработки комплексных редкометалльных руд Ловозерского щелочного массива и расположенного в центральной

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-20012 «Разработка научных основ комплексной переработки хво-стов обогащения лопаритовых руд с одновременным снижением техногенной нагрузки на окружающую среду в Арктической зоне РФ», https://rscf.ru/project/25-17-20012/. Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Экология и техносферная безопасность", https://rusecocon.ru

части Мурманской области, вблизи горы Аллуайв, на расстоянии 20 км от озера Умбозеро [22] (рис. 1). Объект функционировал с 1984 года. В августе 1999 г. в массиве рудника произошел горно-тектонический удар [23], в результате которого произошло разрушение значительной части горных выработок; производство было остановлено и до настоящего момента не возобновлено. По причине остановки производства хвостохранилище переведено в разряд законсервированных. По разным сведениям, на момент остановки производства масса накопленных хвостов составила порядка 16 млн т при площади хвостохранилища в 13,5 га [24, 25].

Рис. 1. Схема расположения хвостохранилища «Умбозеро»

Изучение состава и физических свойств отходов обогащения, проведенное ранее [26], выявило следующее: все изученные пробы классифицируются как рыхлые песчаные грунты с преобладанием частиц размером -0.25+0.1 и-0.5+0.25 мм, что позволяет отнести хвосты к мелко- и среднезернистым пескам. В минеральном составе хвостов преобладают нефелин и полевые шпаты. Химический анализ выявил доминирование алюминия, натрия и калия, входящих в состав основных минералов.

Методика эксперимента

Оценка острой фитотоксичности средней пробы хвостов обогащения лопаритовых руд и отделённой тонкой фракции (-0.071 мм) проводилась методом фитотестирования в элюатном исполнении по методике МР 2.1.7.2297-07 «Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности» [27] с использованием стандартной тест-культуры – овса посевного (*Avena sativa* L.).

Приготовленной водной вытяжкой образца ЗШО (соотношение Т:Ж равно 1:10, 24 часа), а также нативным экстрактом, разбавленным в два и пять раз, увлажняли бумажные фильтры «Синяя лента», уложенные в чашки Петри, в количестве 5 мл/чашка. В качестве контроля использовали дистиллированную воду. В каждую чашку помещали по 25 семян овса посевного. Время экспозиции составило семь суток. По окончании эксперимента измеряли тест-параметр – длину корней проростков.

Величина эффекта торможения определяется по формуле:

$$E_т = (L_k - L_{оп}) \cdot 100\% / L_k ,$$

где $E_т$ – эффект торможения, %; $L_{оп}$ – средняя длина корней в опыте, мм; L_k – средняя длина корней в контроле, мм.

Фитотоксическое действие считается доказанным, если фитоэффект ($E_т$) составляет 20 % и более. Если токсический эффект оказывает только нативная вытяжка, отходам автоматически присваивается IV класс опасности.

Оценка хронической фитотоксичности средней пробы хвостов обогащения лопаритовых руд проводилась методом фитотестирования в субстратном исполнении с использованием комплекса двудольных (редис (*Raphanus sativus*)) и однодольных тест-растений (овес посевной (*Avena sativa* L.)) по методике ISO 11269-2:2012(E) [28]

Известно, что субстратное фитотестирование может выявлять более сильный фитотоксический эффект, поскольку в водную вытяжку, используемую в элюатном варианте, переходят только водорастворимые формы поллютантов [21, 29]. В данном случае исследование проводилось ещё и с целью оценки потенциальной возможности самозарастания поверхности хвостохранилища.

В эксперименте использовалась искусственная почва из кварцевого песка, вермикулита и торфа (70:20:10). В пластиковые горшки помещали смеси: искусственная почва:отходы в соотношении 75:25, 50:50, 25:75, а также отдельно искусственную почву и хвосты. В каждый горшок вносили по 16 семян тест-культур, глубина заделки семян составляла 10 мм. По окончании 28-дневного срока экспозиции замеряли длину ростков и массу надземной части растений.

Все эксперименты проводили в трёх повторностях. Статистическая обработка результатов проводилась с использованием MS Excel 2016. Достоверность различий по вариантам проверялась однофакторным дисперсионным анализом (ANOVA).

Результаты и обсуждение

Элюатное фитотестирование

Интегральная оценка токсичности отходов обогащения лопаритовых руд методом фитотестирования в элюатном исполнении выявила угнетающее влияние водных вытяжек усредненной пробы хвостов и тонкодисперсного материала (-0.071 мм), а также их разведений на ранней стадии прорастания семян тест-культуры овса посевного (Avena sativa L.), см. рис. 2, 3. На рис. 2.3 буквы над столбцами обозначают наличие (буквы разные) или отсутствие (буквы одинаковые) статистически значимых различий между вариантами опыта ($p < 0,05$).

Установлено, что водная вытяжка средней пробы хвостов обогащения не оказывает фитотоксического действия – фитоэффект в случае нативного экстракта составил 16,78 %. Статистически значимых различий определенного тест-параметра также не выявлено ANOVA.

Вместе с тем, установлен достоверный ($p < 0,05$) фитотоксический эффект (снижение длины корней в нативном растворе относительно контроля на 27,40 % и двукратном

разбавлении – 26,33 %), который оказывает водная вытяжка тонкой фракции хвостов обогащения лопаритовых руд. Схожие результаты были получены нами ранее для лопаритовых хвостов хвостохранилища «Карнасурт-1» [21].

Рис. 2. Длина корней семян овса посевного в дистиллированной воде и вытяжке средней пробы хвостов обогащения лопаритовых руд

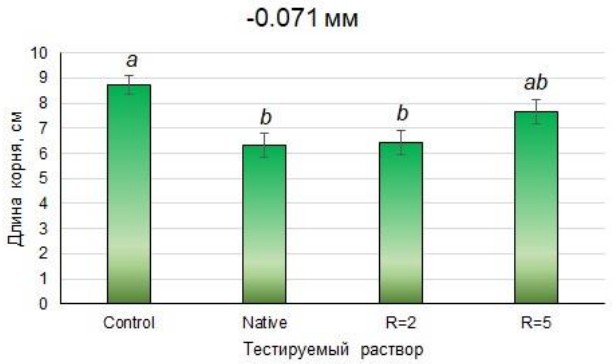

Рис. 3. Длина корней семян овса посевного в дистиллированной воде и тонкой фракции (-0.071 мм) хвостов обогащения лопаритовых руд

Субстратное фитотестирование

Внешний вид растений по окончании срока экспозиции, а также результаты определения морфометрических параметров представлены на рис. 4-6.

Рис. 4. Внешний вид растений по окончании эксперимента

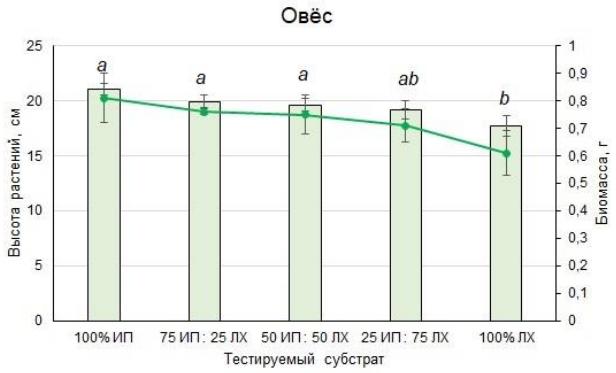

Рис. 5. Высота и биомасса растений (тест-культура – овёс)

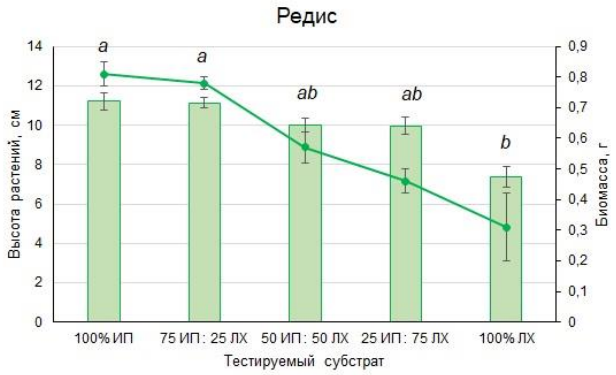

Рис. 6. Высота и биомасса растений (тест-культура – редис)

Более низкие показатели всхожести определены для проростков редиса в опытных вариантах субстратов, состоящих из 100 % хвостов обогащения и смеси 25 : 75 искусственная почва : хвосты. Эти же опытные варианты достоверно ($p < 0,05$) отличались по таким показателям как высота и масса надземной части растений. Больший отклик определен у редиса. О большей чувствительности бобовых (в нашем случае – редиса) к фитотоксическому действию отходов сообщалось в работах [21, 30].

Визуально проростки обоих тестируемых видов растений в опытных вариантах, состоящих на 100 % из хвостов обогащения лопаритовых руд, были в наиболее угнетенном состоянии. Часть ростков погибла ко второй неделе опыта. Данный факт позволяет предположить, что процесс самозарастания хвостохранилища маловероятен. Посевы необходимо будет совмещать с внесением плодородного субстрата и фитопротекторных добавок.

Заключение

Анализ результатов проведенного фитотестирования позволяет выявить фитотоксический эффект, оказываемый тонкодисперсными частицами хвостов обогащения лопаритовых руд на рост и развитие высших растений. Очевидно, что хвосты обладают неблагоприятными характеристиками для произрастания растений, в том числе, для самозарастания поверхности хвостохранилища.

Более чувствительной тест-культурой оказался редис, более устойчивой культурой – овёс посевной, что позволяет предположить, что в составе травосмеси для дальнейших экспериментов будут преобладать однодольные, злаки.

Для выявления факторов, оказывающих большее влияние на рост и развитие высших растений: химическое загрязнение или плотное сложение грунта, низкая влагоудерживающая способность субстрата – требуется проведение дополнительных исследований.

Литература

1. Zhang X. Impacts of lead/zinc mining and smelting on the environment and human health in China / X. Zhang, L. Yang, Y. Li, H. Li, W. Wang, B. Ye // Environ. Monit. Assess. – 2011. – vol. 184. – P. 2261-2273.

2. Liang J. Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China / J. Liang, C. Feng, G. Zeng, X. Gao, M. Zhong, X. Li, X. Li, X. He, Y. Fang // Environ. Pollut. – 2017. – vol. 225. – P. 681-690.

3. Zhang Y. A systemic ecological risk assessment based on spatial distribution and source apportionment in the abandoned lead acid battery plant zone, China / Y. Zhang, S. Li, Z. Chen // Journal of Hazardous Materials. – 2018. – vol. 354. – P. 170-179.

4. Amosov P. Estimating air pollution levels by numerical simulation depending on wind flow speed and dust source area / P. Amosov, A. Baklanov, D. Makarov, V. Masloboev // Min. Ind. J. – 2020. – vol. 5. – P. 80-89.

5. Edahbi M. Environmental challenges and identification of the knowledge gaps associated with REE mine wastes management / M. Edahbi, B. Plante, M. Benzaazoua // J. Clean. Prod. – 2019. – vol. 212. – P. 1232-1241.

6. Buikema N. Stabilisation of iron mine tailings through biocalcification / N. Buikema, B. Zwissler, E. Seagren, T. Oommen, S. Vitton // Environ. Geotech. – 2018. – vol. 5. – P. 94-106.

7. Loredo J. Atmospheric Monitoring at Abandoned Mercury Mine Sites in Asturias (NW Spain) / J. Loredo, J. Soto, R. Álvarez, A. Ordóñez // Environ. Monit. Assess. – 2006. – vol. 130. – P. 201-214.

8. Corriveau M. Direct characterization of airborne particles associated with arsenic-rich mine tailings: Particle size, mineralogy and texture / M. Corriveau, H. Jamieson, M. Parsons, J. Campbell, A. Lanzirotti // Appl. Geochem. – 2011. – vol. 26. – P. 1639-1648.

9. Lilic N. Dust and noise environmental impact assessment and control in Serbian mining practice / N. Lilic, A. Cvjetic, D. Knezevic, V. Milisavljevic, U. Pantelic // Minerals. – 2018. – vol. 8. – P. 34.

10. Лычагин Е.В. Совершенствование способов закрепления пылящих поверхностей / Е.В. Лычагин, И.В. Синица // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – Т. 8. – С. 136-140.

11. Бруев В.П. Михайловский ГОК наращивает производственные мощности // Горный журнал. – 2004. – Т. 1. – С. 25-28.

12. Месяц С.П. Основные положения стратегии возврата нарушенных земель техногенных ландшафтов в биосферный фонд / С.П. Месяц, Е.Ю. Волкова // Горный информационно-аналитический бюллетень. Экология использования ресурсов. Спецвыпуск. – 2014. – Т. 12. – С. 3-11.

13. Devi R.M., Madhavan N., Adhavan N., Bhattacharyya A., Arumugam N. Dust suppressant compositions, methods for making and methods for using // Patent No. WO2013108057 A1.2013. Publication Date 25.07.2013.

14. Маслобоев В.А. Выбор связующих реагентов для предотвращения пылеобразования на хвостохранилищах переработки апатит-нефелиновых руд / В.А. Маслобоев, А.В. Светлов, О.Т. Конина, Г.В. Митрофанова, А.В. Туртанов, Д.В. Макаров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – Т. 2. – С. 161-171.

15. Ivanov A. Efficiency of Dust Suppression with Aerosol Guns–Fogging Machines with Air-and-Fluid Jets / A. Ivanov, A. Strizhenok // Journal of Mining Science. – 2017. – vol. 53. – P. 176-180.

16. Park J. Tailings Storage Facilities (TSFs) Dust Control Using Biocompatible Polymers / J. Park, K. Kim, T. Lee, M. Kim // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2019. – vol. 36. – P. 785-795.

17. Valenzuela T.P. Dust suppressant treatments: Quality control / T.P. Valenzuela, G.J. Palma, S.S. Vega // Revista de la construcción. – 2014. – vol. 13. – P. 27-35.

18. Wang L. A review on in situ phytoremediation of mine tailings / L. Wang, B. Ji, Y. Hu, R. Liu, W. Sun // Chemosphere. – 2017. – vol. 184. – P. 594-600.

19. Максимова В.В. Исследование состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства / В.В. Максимова, Е.А. Красавцева, Е.Э. Савченко, П.В. Икконен, И.Р. Елизарова, В.А. Маслобоев, Д.В. Макаров // Записки Горного института. – 2022. – Т.256. – С. 642-650.

20. Krasavtseva E. Conditions affecting the release of heavy and rare earth metals from the mine tailings Kola Subarctic / E. Krasavtseva, V. Maksimova, D. Makarov // Toxics. – 2021. – vol. 9, is. 7. – P. 163.

21. Максимова В.В. Исследование влияния горнопромышленных отходов Мурманской области на рост и развитие высших растений / В.В. Максимова, Е.А. Красавцева // Проблемы региональной экологии. – 2020. – № 4. – С. 21-26.

22. Красавцева Е.А. Особенности состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд обогатительной фабрики “Умбозеро” / Е.А. Красавцева, В.В. Максимова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024. – № 4. – С. 119-129.

23. Ловчиков А.В. Сильнейший горно-тектонический удар на подземных рудниках и в шахтах России: рудник «Умбозеро», 17 августа 1999 года (магнитуда m = 5, энергетический класс k = 11,8). – Апатиты: Издательство Кольского научного центра; 2022. – 127 с.

24. Кадастр отходов горно-металлургического производства Мурманской области (по состоянию на 01.01.2000 г.). Горный институт КНЦ РАН, Государственный комитет по охране окружающей среды Мурманской области. Апатиты-Мурманск, 2000. – 104с. – URL: https://www.murman.ru/ecology/cadastre/ (дата обращения 30.01.2026).

25. Архипов А.В. Техногенные месторождения. Разработка и формирование / А.В. Архипов, С.П. Решетняк. – Апатиты: КНЦ РАН, 2017. – 175 с.

26. Красавцева Е.А. Особенности изменения состава и свойств лежалых хвостов обогащения лопаритовых руд в зависимости от глубины залегания / Е.А. Красавцева, П.В. Икконен, И.Р. Елизарова, М.Д. Макаров, Д.В. Макаров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2025. – № 6. – С. 169-178.

27 МР 2.1.7.2297-07. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности, 2007. – 15 с.

28. ISO 11269-2:2012(E) Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 2: Effects of contaminated soil on the emergence and early growth of higher plants (Качество почвы. Определение воздействия загрязняющих веществ на флору почвы. Часть 2. Воздействие химикатов на всхожесть и рост высших растений).

29. Бардина Т.В. Оценка экотоксичности почв и почвогрунтов промышленных зон методом фитотестирования. Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири : Монография. В 5 томах / Т.В. Бардина, В.В. Кулибаба, В.И. Бардина. – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2018. – С. 145-149.

30. Дахова Е.В. Оценка фитотоксичности золошлаковых отходов от котельных малой мощности и индивидуальных отопительных систем на примере пгт. Шахтерск Сахалинской области / Е.В. Дахова, Л.П. Майорова, А.И. Лукьянов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. – Т. 30, № 3. – С. 280-291.

DOI: 10.24892/RIJIE/20260313

Assessment of Phytotoxicity of Loparite Ore Dressing Tailings

Krasavtseva E.A.
Institute of the North Ecology Problems, KSC RAS,
Center for Nanomaterials Science, KSC RAS
Apatity, Russian Federation
e.krasavtseva@ksc.ru

Abstract. **The scientific article is devoted to the assessment of the phytotoxicity of conifers from the enrichment of loparite ores deposited at the Umbozero conifer storage facility in the Murmansk region. Tailings are crushed solid mineral wastes formed during the extraction and processing of complex rare metal ores. A comprehensive study of environmental hazards has been conducted by assessing the phytotoxic effects of these wastes on higher plants. The experiment was carried out by two methods: phytotesting in eluate version and phytotesting in substrate version. Standard test crops were used – oats and radishes. The obtained results showed a pronounced phytotoxic effect, which causes unfavorable conditions for plant growth and self-fertilization of the tailings dam. Fine particles of tailings exhibit the greatest toxicity, which underlines the need for further study and measures to reduce the negative impact on the environment.**

Keywords: **loparite ore dressing tailings, phytotesting, test crops, oats, radishes, bioremediation.**

Библиографическое описание статьи

Красавцева Е.А. Оценка фитотоксичности хвостов обогащения лопаритовых руд // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2026. – Т.13, №3. – С. 77-81. DOI: 10.24892/RIJIE/20260313

Reference to article

Krasavtseva E.A. Assessment of phytotoxicity of loparite ore dressing tailings, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2026, vol.13, no.3, pp. 77-81. DOI: 10.24892/RIJIE/20260313