

УДК 502.65

DOI 10.26118/2782-4586.2025.64.32.030

**Меньшакова Мария Юрьевна**  
Мурманский арктический университет  
**Гайнанова Рамзия Ильшотовна**  
Мурманский арктический университет

**Повышение экологической и экономической эффективности горнодобывающих предприятий с помощью инновационных методов доочистки сточных вод**

**Аннотация.** Статья посвящена актуальной проблеме повышения экологической эффективности предприятий горнодобывающего комплекса в условиях ужесточения природоохранных требований, необходимости внедрения наилучших доступных технологий и оптимизации затрат на мероприятия по охране окружающей среды. Изучение способности растений к гипераккумуляции металлов из сточных и загрязненных природных вод в Арктической зоне РФ имеет большое научное и прикладное значение, поскольку развитие металлургического производства в Заполярье привело к значительному загрязнению природных водоемов, существующие методы физико-химической очистки требуют больших затрат на модернизацию производства. В рамках исследования разработана и апробирована технология фитоэкстракции, направленная на обеспечение стабильной доочистки сточных вод в течение всего вегетационного периода, снижение негативного воздействия на окружающую среду и, как следствие, экологических платежей предприятий. Инновационный характер технологии заключается в применении биологической очистки (фитоэкстракции) как в летний период для непосредственного поглощения ионов металлов из сточных вод, так и для регенерации вермикулита, загрязненного при очистке сточных вод в зимний период, благодаря чему процесс доочистки сточных вод становится малоотходным. Показана возможность получения полезного продукта, а именно, металлов (фитомайнинг) из растительных остатков, образующихся в процессе очистки воды.

**Ключевые слова:** биодобыча, негативное воздействие на окружающую среду (НВОС), тяжелые металлы, фитомайнинг, фитоэкстракция, экологическая эффективность.

**Menshakova Maria Yurievna**  
Murmansk Arctic University  
**Gainanova Ramzia Ilshatovna**  
Murmansk Arctic University

**Improving the environmental and economic efficiency of mining enterprises with the help of innovative methods of wastewater pretreatment**

**Annotation.** The article is devoted to the urgent problem of increasing the environmental efficiency of mining enterprises in conditions of tougher environmental requirements, the need to implement the best available technologies and optimise the costs of environmental protection measures. The study of the ability of higher and lower plants to hyperaccumulate metals from sewage and polluted natural waters in the Arctic zone of the Russian Federation is of great scientific and applied importance, since the development of metallurgical production in the Polar region has led to significant pollution of natural water bodies, the existing methods of physical and chemical purification require large costs for the modernisation of production. Within the framework of the research the phytoextraction technology has been developed and tested, aimed at ensuring stable wastewater aftertreatment during the whole vegetation period, reducing the negative impact on the environment and, as a consequence, the ecological payments of enterprises. Innovative character of the technology consists in application of biological treatment (phytoextraction) both in summer period for direct absorption of metal ions from waste water, and

for regeneration of vermiculite contaminated by waste water treatment in winter period, due to which the process of waste water after-treatment becomes low-waste. The possibility of obtaining a useful product, namely, metals (phytomining) from plant residues formed in the process of water treatment is shown.

**Key words:** biomining, negative environmental impact, heavy metals, phytomining, phytoextraction, environmental efficiency.

Развитие различных отраслей промышленности и строительства создает все новые перспективы для применения цветных металлов, причем в последнее время имеется тенденция к качественным преобразованиям различных технологических процессов, возможных только с применением определенных элементов. Так, например, новые стандарты в производстве строительных работ в Китайской Народной Республике предусматривают применение высоколегированных сталей, содержащих ванадий, ниобий и другие цветные металлы [1]. В области автомобилестроения введение экологических норм сделало необходимым использование платины для очистки выбросов из двигателей. Широкое распространение альтернативной энергетики требует производства мощных аккумуляторов и с применением ванадия в таких аккумуляторах связаны революционные изменения в энергетике.

Модернизация современного производства требует высокопрочных износостойких сплавов с применением молибдена, марганца и других металлов. В то же время, многие цветные металлы встречаются в земной коре в низких концентрациях и даже не образуют собственных руд. Разработка таких месторождений обычно связана не только с высокими затратами, но и с огромным ущербом для природных экосистем. Как правило, редкоземельные металлы добывают из отходов железорудного производства, однако, с применением традиционных физико-химических методов, извлечение металлов из сырья с низким содержанием полезных элементов является далеко не полным и, как правило, сопряжено с образованием огромных объемов опасных отходов (сточные воды, шламы, хвосты и т.д., содержащие остаточные количества этих элементов).

Кроме того, в последнее время обострилась проблема накопления отвалов вскрышных пород, хвостов, а также истощения месторождений до такого состояния, когда добыча металлов обычными физико-химическими методами становится нерентабельной.

Биотехнологический подход к решению этой проблемы позволяет обеспечить наиболее полное извлечение полезных элементов даже из бедного сырья [2; 3].

Ранее разработанные технологии фитодобычи металлов имеют ограниченную сферу применения, в частности, рассчитаны на выращивание растений в грунте, а не в условиях гидропоники, то есть, не могут использоваться для извлечения металлов из сточных вод, применяются либо для фитодобычи из почвы над месторождениями меди и цинка, содержащей металлы в высоких концентрациях либо для очистки почв, загрязненных в результате аэрозольного загрязнения вблизи металлургического производства.

Системы извлечения полезных металлов из сточных вод с помощью высших водных растений и водорослей применяются лишь в условиях влажного тропического климата (в Юго-Восточной Азии) и не могут применяться в условиях континентального климата и высокогорий [2]. Технологии очистки сточных вод от токсичных веществ (главным образом, от соединений азота и фосфора) с применением элементов биотехнологии (биоплато), применяемые в Скандинавии (в условиях умеренного климата) функционируют только в летнее время, в то время как предлагаемая технология предусматривает круглогодичное использование за счет применения в зимнее время вермикулита для адсорбции металлов с последующей регенерацией вермикулита растениями-гипераккумуляторами.

Целью настоящего исследования была разработка технологии биодобычи цветных металлов (в том числе, редкоземельных металлов и платиноидов) из отходов металлургического производства, в том числе в климатических и производственных условиях горнодобывающих предприятий Мурманской области.

В разработке технологий фитоэкстракции можно выделить два основных направления: фитоэкстракция из промышленных и бытовых сточных вод и фитодобыча металлов из сравнительно бедных руд и отходов горно-обрабатывающей промышленности (хвосты, пульпа) [4; 5]. Наиболее целесообразно использовать методы фитоэкстракции в случаях, когда состав загрязняющих веществ разнообразием по составу и нестабилен в количественном отношении, так как физико-химические методы нередко требуют изоляции гидрофобных и гидрофильных поллютантов на предварительных этапах очистки, в то время как растения способны обитать и на водах, загрязненных как гидрофобными, так и гидрофильными компонентами одновременно [6-9].

Растения-аккумуляторы накапливают в надземных органах значительное количество тяжелых металлов, многократно превышающее их концентрации в почве [10-12]. Произрастая на почвах геохимических аномалий, они сформировали конститутивные механизмы устойчивости, позволяющие им аккумулировать токсичные элементы в метаболически инертных органах и органеллах или включать их в хелаты, и тем самым переводить в физиологически безопасные формы [13-15]. Среди аккумуляторов выделяют растения гипераккумуляторы (сверхнакопители), способные накапливать в надземной биомассе чрезвычайно высокие концентрации тяжелых металлов без каких-либо отрицательных последствий для жизнедеятельности [16; 17].

Технология фитоэкстракции, являясь, с одной стороны, технологией извлечения из сточных вод металлов, с другой стороны, представляет собой метод доочистки стоков горнорудной промышленности, позволяющий существенно снижать показатели их загрязненности, тем самым повышая экологическую эффективность предприятий.

В ходе проведения работ в результате промышленного эксперимента в 2021 году было выявлено (с подтверждением результатов в аккредитованной испытательной лаборатории) явление гипераккумуляции ионов марганца, ванадия, и стронция. Так, например, максимальное содержание марганца у отдельных образцов достигало 23 г/кг сухой растительной массы). Были выявлены наиболее эффективные для фитоэкстракции виды растений из числа аборигенных и адвентивных видов Мурманской области (горчица белая, ива лохматая, береза пушистая, тростник южный и другие), успешно проведен лабораторный эксперимент по регенерации вермикулита с применением общеизвестного гипераккумулятора тяжелых металлов *Brassica juncea*, разработана схема обращения с опасными отходами при внедрении данной технологии в. В настоящее время проводится эксперимент для оценки возможностей снижения объемов опасных отходов при применении данной технологии и выходом на безотходное производство.

Разработана и апробирована технология «Вермифит», предполагающая два варианта реализации:

- 1) осуществление исключительно фитоочистки сточных вод и фитоэкстракции ионов металлов из воды отстойников в безморозный период;
- 2) гибридная технология, предусматривающая применение полного цикла очистки с использованием в зимнее время вермикулита для очистки сточных вод и регенерацией вермикулита с применением растений-гипераккумуляторов в летнее время.

В результате исследования установлено, что эффективность очистки сточных вод с применением гибридной технологии фитоэкстракции составляет 70%.

Экономический эффект от внедрения технологии может быть связан с двумя процессами:

- 1) снижение платы предприятия за негативное воздействие на окружающую среду за сброс загрязняющих веществ в водные объекты;
- 2) получение полезного продукта из отходов производства в процессе очистки воды, а именно, получение металлов из растительных остатков (фитомайнинг).

Результаты расчета суммы платы за НВОС за сброс загрязняющих веществ в водные объекты приведены в таблице 1. Для расчета применены ставки платы, утвержденные Постановлением Правительства РФ от 13.09.2016 № 913 «О ставках платы за негативное

воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» [18]. Коэффициент индексации к ставкам платы установлен согласно Постановлению Правительства РФ от 11.09.2020 № 1393 «О применении в 2021 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду» [19] и составил 1,08.

**Таблица 1. Расчет суммы платы за НВОС при сбросе загрязняющих веществ в водные объекты горнодобывающим предприятием**

Код ЗВ	Наименование загрязняющих веществ	Масса, т/год	Ставка платы, руб./т	Сумма платы, руб.
052	Хлорид-анион	211,9	735 534,30	236 724,36
029	Нитрит-анион	7,667	243,00	193 99,04
028	Нитрат-анион	365,9	1 192,30	1 285,11
040	Сульфат-анион	5 624,4	0,50	8 254,07
080	Нефтепродукты	2,534	1 190,20	7 577,53
113	Взвешенные вещества инертная природная минеральная взвесь, состоящая из неорганического осадочного материала (глинистые и обломочные минералы, горные породы, силикаты, карбонаты и др.) с дисперсностью частиц от 0,5 мкм	81,90	3 679,30	41 874,26
046	Фенол, гидроксibenзол; Карболовая кислота	0,298	5 950,80	12 834,45
132	БПК-полное	73,92	1 488,20	770 598,89
036	ОП-10, СПАВ, смесь моно- и диалкилфеноловых эфиров полиэтиленгликоля	0,998	73 553,2	4 156 167,70
083	Сухой остаток	15 285,3	735 534,30	1 580 810,32
003	Аммоний-ион	5,895	735 534,30	4 194 310,79
090	Фосфаты натрия, калия и кальция	10,54	9 916,60	8 353,74
013	Железо общее	1,997	612 946,60	1 509 319,71
127	Стронций	479,4	14,90	7 839,86
021	Марганец двухвалентный	52,32	73 553,20	314 572,33
008	Ванадий	1,990	99 172,10	665 127,44
022	Медь	5,280	73 553,20	3 110 770,78
143	Титан	0,780	147 106,30	2 365 645,83
024	Молибден	2,280	73 553,20	92 544,64
020	Магний	487,2	73 553 403,00	7 149 390,77
055	Цинк	3,960	850,00	79,87
035	Свинец	6,210	29751,80	1 156,75
027	Никель	39,16	735 534,30	236 724,36
015	Кадмий	14,89	243,00	193 99,04
016	Кобальт	1,165	1 192,30	1 285,11
034	Ртуть и ее соединения	0,090	0,50	8 254,07
079	Барий	0,087	1 190,20	7 577,53
073	Хром	0,036	3 679,30	41 874,26
<b>ВСЕГО:</b>				<b>26 485 814,95</b>

Использование технологии фитоэкстракции для доочистки сточных вод при условии извлечения растениями 70 % катионов металлов позволит снизить размер платы за НВОС на 17 023 606,6 руб. руб. в год (при использовании гибридной технологии).

Результаты оценки потенциального экономического эффекта от полного извлечения катионов из сточных вод (с применением гибридной технологии) приведены в таблице 2.

**Таблица 2. Оценочная стоимость металлов, полученных при полном извлечении катионов из сточных вод, в год**

<i>№</i>	<i>Наименование металла</i>	<i>Объем, т/год</i>	<i>Мировая биржевая цена за тонну металла, доллары США</i>	<i>Стоимость реализованного металла, доллары США</i>
1	Стронций	479,45	12 000	5 753 400
2	Марганец двухвалентный	52,32	600	31 392
3	Ванадий	1,990	35 000	69 650
4	Медь	5,280	10 746	56 738,88
5	Титан	0,780	20 095	15 674,1
6	Молибден	2,280	24 637	56 172,36
7	Цинк	3,960	3 045	12 058,2
8	Свинец	6,210	2 169	13 469,49
9	Никель	39,16	18,215	713,2994
10	Кадмий	14,89	1 679	25 000,31
11	Кобальт	1,165	43 615	50 811,48
<b>ВСЕГО:</b>				<b>12 119 080,11</b>

В таблице 2 показан максимальный объем извлекаемых металлов при применении только технологии фитоэкстракции в условиях отсутствия периода с отрицательными температурами. В случае наличия периодов отрицательных температур (заморозков) объем извлекаемых металлов будет зависеть от продолжительности безморозного периода и, соответственно, возможностей для организации процесса фитоэкстракции.

Извлечение металлов из растительных остатков предполагается проводить после озоления сухой массы растений. Технологии извлечения металлов из золы могут различаться в зависимости от задач. Как правило, извлечение проводится на уже имеющихся производственных мощностях (цеха обжига, пиролиза и электролиза). В связи с этим, расходами на извлечение металлов из золы можно пренебречь при учете, что содержание многих металлов в золе будет несколько ниже, чем в традиционном сырье (рудах и концентратах).

Расчет объемов извлечения металлов произведен на основе следующих представлений об эффективности извлечения металлов [Dushenkov, Ghosh]:

- в процессе фитоэкстракции извлекается 70 % катионов (при условии использования комплекса видов-гипераккумуляторов);
- в процессе обработки растительного материала удастся извлечь до 70 % металлов.

По результатам проведенного исследования стоимость металлов, полученных в процессе фитоэкстракции, оценена в 5 938 349 долларов США.

Таким образом, в ходе исследования разработана биотехнология извлечения тяжелых металлов в условиях высоких широт, в которых и расположены действующие предприятия металлургии. Высокая эффективность извлечения достигается путем разработки комплексов высших растений и ризосферных организмов. Данная технология должна стать частью действующего производства, и не должна требовать возведения дополнительных дорогостоящих производственных сооружений.

Применение данной технологии позволит не только получить обогащенное сырье для металлургии, но и снизить нагрузку на окружающую среду, так как биотехнологическое извлечение полезных элементов из сточных вод приведет к снижению их токсичности, уменьшению платы предприятий за негативное воздействие на окружающую среду, а освободившиеся средства могут быть направлены на модернизацию производства.

**Источник финансирования: исследование выполнено в рамках инициативной НИОКР №124041100059-7.**

#### **Список источников**

1. Костюкова О. И., Костюкова А. И. Китай на мировом рынке стали // Вестник ТГЭУ. 2014. №3 (71). С. 35-48.
2. Тимофеева С. С. Фитомайнинг: современное состояние и перспективы / С. С. Тимофеева // XXI век. Техносферная безопасность. – 2018. – Т. 3, № 3(11). – С. 112-128. – DOI 10.21285/1814-3520-2018-3-112-128.
3. Черепанова А. А., Макарова А. С. Фитомайнинг ванадия // Образование и наука для устойчивого развития : Материалы XIV Международной научно-практической конференции, посвящённой 95-летию со дня рождения профессора Г.А. Ягодина и 50-летию публикации доклада Римскому клубу "Пределы роста". В 2-х частях, Москва, 26–28 апреля 2022 года. Том Часть 1. – Москва: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2022. – С. 218-221.
4. Dushenkov, V., Kumar, P. B., Motto, H., Raskin, I. Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams // Environmental Science & Technology. 2005. V. 29. P. 1239–1247.
5. Ghosh, M., Singh, S. P. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its by-products // Applied Ecology and Environmental Research. 2015. V. 3. P. 1–18.
6. Groudeva, V. I., Groudev, S. N., Doycheva, A. S. Bioremediation of waters contaminated with crude oil and toxic heavy metals // International Journal of Mineral Processing. 2017. V. 62. P. 293–299.
7. Hannink, N., Rosser, S. J., French, C. E., Basran, A., Murray, J. A. H., Nicklin, S., Bruce, N. C. Phytoremediation of TNT by transgenic plants expressing a bacterial nitroreductase // Nature Biotechnology. 2011. V. 19. P. 1168–1172.
8. Schwartz, C., Echevarria, G., Morel, J. L. Phytoextraction of cadmium with *Thlaspi caerulescens* // Plant and Soil. 2003. V. 249. P. 27–35.
9. Eapen, S., Suseelan, K., Tivarekar, S., Kotwal, S., Mitra, R. Potential for rhizofiltration of uranium using hairy root cultures of *Brassica juncea* and *Chenopodium amaranticolor* // Environmental Research. 2013. V. 91. P. 127–133.
10. Brune, A., Urbach, W., Dietz, K-J. Compartmentation and transport of zinc in barley primary leaves as basic mechanisms involved in zinc tolerance // Plant Cell Environ. 1994. V. 17. P. 153–162.
11. Frérot, H., Lefévre, C., Gruber, W., Collin, C., DosSantos, A., Escarré, J. Specific interactions between local metal-tolerant plants improve the phytostabilization of mine soils // Plant and Soil. 2006. V. 282. P. 53–65.
12. Kamal, M., Ghaly, A. E., Mahmoud, N., Cote, R. Phytoaccumulation of heavy metals by aquatic plants // Environment International. 2004. V. 29. P. 1029–1039.
13. Pilon-Smits, E. Phytoremediation // Annual Review of Plant Biology. 2005. V. 56. P. 15–39.
14. Maestri, E., Marmioli, M., Visioli, G., Marmioli, N. Metal tolerance and hyperaccumulation: costs and trade-offs between traits and environment // Environmental and Experimental Botany. 2010. V. 68. P. 1–13.
15. Wand, H., Kuschik, P., Soltmann, U., Stottmeister, U. Enhanced removal of xenobiotics by helophytes // Acta Biotechnol. 2002. V. 22. P. 175–181.

16. Baker, A. J. M., Walker, P. M. Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants // Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects. Boca Raton: CRC Press, Fl. 1990. P. 155–177.
17. Clemens, S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis // Planta. 2001. V. 212. P. 475–486.
18. Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 № 913 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах»
19. Постановление Правительства РФ от 11.09.2020 № 1393 «О применении в 2021 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду»

#### **Сведения об авторах**

**Меньшакова Мария Юрьевна**, доцент заведующий научно-исследовательской лабораторией «Мониторинг и сохранение природных экосистем Арктики», ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», г. Мурманск, Россия

**Гайнанова Рамзия Ильшотовна**, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Мониторинг и сохранение природных экосистем Арктики», ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», г. Мурманск, Россия

#### **Information about the authors**

**Menshakova Maria Yurievna**, Associate Professor, Head of the Scientific Research Laboratory "Monitoring and Conservation of Natural Ecosystems of the Arctic", Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia

**Gainanova Ramzia Ilshotovna**, Researcher at the Scientific Research Laboratory "Monitoring and Conservation of Natural Ecosystems of the Arctic", Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia