

Научная статья
УДК 628.357.4
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.031

ФИТОЭКСТРАКЦИЯ КАК МЕТОД ОЧИСТКИ ЗАГРЯЗНЁННЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Николай Ильич Каганович^{1✉}, Владимир Александрович Мязин^{1,2}, Никита Алексеевич Малыгин³

¹Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

²Аграрно-технологический институт, Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы, Москва, Россия

³Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

¹ikolayi99@mail.ru✉

Аннотация

Экологическая безопасность водных объектов является важной и необходимой задачей для горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. Комплекс эффективных методов очистки сточных вод и загрязнённых почв может включать в себя биологические методы, например, фитоэкстракцию. Данный метод основан на способности растений поглощать тяжёлые металлы и другие виды загрязняющих веществ. Методы биологической очистки можно использовать с высокой эффективностью и экономической выгодой в регионах с низкими среднегодовыми температурами.

Ключевые слова:

фитоэкстракция, тяжёлые металлы, сточные воды, горнодобывающая промышленность

Благодарности:

исследования выполнены в рамках темы НИР № 122022400109-7 «Микробиота природных сред арктической зоны и разработка способов охраны и реабилитации окружающей среды с использованием биотехнологического потенциала микроорганизмов».

Финансирование:

государственное задание по теме НИР № 122022400109-7.

Для цитирования:

Каганович Н. И., Мязин В. А., Малыгин Н. А. Фитоэкстракция как метод очистки загрязнённых водных объектов и обеспечения безопасности экологических систем // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 1. С. 196–200. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.031.

Original article

PHYTOEXTRACTION AS A METHOD FOR TREATMENT POLLUTED WASTEWATER AND ENSURING THE SAFETY OF ECOLOGICAL SYSTEMS

Nikolay I. Kaganovich^{1✉}, Vladimir A. Myazin^{1,2}, Nikita A. Malygin³

¹Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre of RAS, Apatity, Russia

²Agrarian and Technological Institute of the People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia

³Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

¹ikolayi99@mail.ru✉

Abstract

The environmental safety of water ecosystems is important and supporting for mining and processing enterprises. The effective methods for treatment wastewater and polluted soils may include biological methods, such as phytoextraction. This method is based on the ability of plants to absorb heavy metals and other types of pollutants. Biological treatment methods can be used in regions with low average temperatures with high efficiency and economic benefits.

Keywords:

phytoextraction, heavy metals, wastewater, mining industry

Acknowledgments:

the research was carried out within the framework of the research topic No. 122022400109-7 "Microbiota of natural environments of the Arctic zone and the development of methods for environmental protection and rehabilitation using the biotechnological potential of microorganisms".

Funding:

state assignment on the topic of research No. 122022400109-7.

For citation:

Kaganovich N. I., Myazin V. A., Malygin N. A. Phytoextraction as a method for treatment polluted wastewater and ensuring the safety of ecological systems // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 196–200. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.031.

Введение

Поддержание экологической безопасности водных объектов является важной и необходимой задачей для промышленных предприятий добывающей и перерабатывающей отраслей. На территории Северо-Запада России, в том числе в Мурманской области и Республике Карелия, расположено большое количество крупных предприятий горнодобывающего комплекса. Их деятельности (добыча полезных ископаемых и их переработка) сопровождает процесс сброса сточных вод в природные водоёмы, что зачастую приводит к загрязнению водных объектов региона различными соединениями. Наиболее распространёнными загрязняющими веществами являются соединения азота, образующиеся в результате проходки горных выработок с использованием взрывчатых веществ, фосфаты, сульфаты и тяжёлые металлы, образующиеся в процессе обогащения сырья и производства конечной продукции [1]. В настоящее время существующие на предприятиях технологии очистки не всегда позволяют проводить очистку сточных вод до нормативных показателей, что приводит к сбросу загрязнённых вод в реки и озёра и нарушает тем самым естественное состояние водных экосистем. Длительное воздействие на водные экосистемы приводит к снижению биоразнообразия в результате гибели наиболее уязвимых представителей фауны (рыбы, ракообразные и др.). Такие нарушенные экосистемы переходят в статус неустойчивых с высоким риском дальнейшей деградации, что в условиях Арктики и Субарктики имеет серьёзные негативные последствия, их восстановление может занять длительное время и потребовать огромных ресурсов, а в отдельных случаях будет просто неосуществимым.

Разработка новых технологий для эффективной очистки сточных вод остаётся единственным способом добиться защиты водной среды. Одним из решений, направленных на усовершенствование традиционных методов очистки, стало их дополнение за счёт внедрения фитосистем, основанных на использовании водных растений. Фитоочистные системы (ФОС) имеют вид искусственно созданных водных бассейнов произвольной формы: мелких озёр, заболоченных участков или болот. Водная поверхность этих объектов частично или полностью покрыта закреплённой или плавающей высшей водной растительностью. Загрязнённая вода, проходя через заросли растений, корнеобитаемый слой и фильтрующую загрузку, очищается в ходе природных процессов до экологически приемлемого состояния, достаточного для их сброса в водные объекты. ФОС также могут обеспечить эстетическую рекреационную ценность ландшафта, выступая в качестве среды обитания диких животных [2].

Вне зависимости от типа ФОС и применяемых в них видов растений, очистка воды в этих системах происходит по единым физико-химическим и биохимическим механизмам, которые осуществляют растения и микроорганизмы. Одним из механизмов очистки сточной воды в ФОС является фитоэкстракция, в процессе которой происходит трансфер загрязняющих веществ из воды или почвы через корневую систему в надземную часть растения. Таким способом можно проводить очистку загрязнённых вод и грунтов от соединений азота (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-), фосфора ($\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$, HPO_4^{2-}), металлов (Al, Fe, Mn, Zn и др.). Химические соединения, экстрагированные из почвы или воды, аккумулируются в надземной части растений, которые потом могут быть собраны и утилизированы. У данного процесса может быть несколько итераций, что позволяет достичь необходимой степени очистки [3].

Биологические способы очистки и, в частности, фитоочистные сооружения всё чаще используются во всём мире для очистки широкого спектра сточных вод [4, 5], однако в России данный метод очистки не стал широко распространённым, что обусловлено в первую очередь негативным влиянием природно-климатических факторов. В то же время биологические методы очистки имеют свои неоспоримые преимущества, такие как, естественные природоподобные процессы очистки, низкие капитальные и эксплуатационные затраты, минимальное влияние на окружающую среду, возможность восстановления биологического разнообразия в границах техногенного водоёма и др.

Цель данного исследования — оценка накопления загрязняющих веществ в биомассе различных растений, входящих в состав фитоценозов ФОС Мурманской области и Республики Карелия.

Материалы и методы

С 2013 г. сотрудники Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН проводят работы по внедрению ФОС на предприятиях Мурманской области и Республики Карелия. Подбор растений и создание оптимальных условий функционирования ФОС позволили повысить эффективность очистки сточных вод и снизить нагрузку на окружающую среду [6].

Растения для анализа содержания в биомассе загрязняющих веществ брали на ФОС в Республике Карелия. Фитоценоз ФОС представлен рогозом широколистным, тростником обыкновенным, ивами, рдестом и мхами. Моховые сообщества ФОС состоят преимущественно из листостебельных мхов сем. Амблистегиевые — *Leptodictyum riparium*, *Hygroamblystegium varium*, *Sarmentypnum exannulatum* и сем. Брахитециевые — *Brachytheciastrum velutinum*.

В биомассе растений определяли содержание никеля, железа, марганца, магния, калия, лития методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой согласно методике производителя, сульфат-анионов — согласно ГОСТ 26426-85 «Методы определения иона сульфата в водной вытяжке», фосфора — методом Гинзбурга после озоления, азота — методом Кьельдаля. Аналитические исследования проводили в лаборатории Санкт-Петербургского горного университета и Почвенно-экологической лаборатории Аграрно-технологического института РУДН.

Результаты

Результаты исследований показали, что в биомассе растений накапливались соединения азота, калий, литий и железо. В биомассе рогоза содержание нитратов было в 3,5 раза больше, содержание калия — в 4,9 раза, лития — в 46 раз и железа — в 3,6 раза по сравнению с контрольными растениями фоновых участков. Содержание нитратов в растениях осоки изменялось в широких пределах — от 19 до 93 мг/кг, что в 7 раз больше, чем в растениях с фоновых участков.

В биомассе мха из фитосадов, который в настоящее время составляет основу фитоценоза ФОС, отмечено повышенное содержание лития (в 1,5–5 раз), никеля (в 3–24 раза), железа (в 2–6 раз), марганца (в 3–4 раза) (табл. 1).

Таблица 1

Содержание загрязняющих веществ в сухой биомассе мха

Образец	N _{общ} , %	SO ₄ , ммоль/100 г	Fe, мг/кг	Mn, мг/кг	K, мг/кг	Li, мг/кг	Ni, мг/кг
Контроль	2,04	3,0	4552	2743	9931	1,6	4,1
ФОС	2,09–2,35	2,6–3,6	9423–27892	9349–10319	7521–7916	2,2–9,3	12–97

Отдельно были исследованы образцы осоки на содержание общего азота. Результаты показали, что в биомассе растений происходит увеличение его содержания с 0,915 до 1,143 %.

Исходя на данных полуколичественного анализа состава сточной воды и содержания подвижных форм элементов в донных отложениях, для дальнейших исследований были выбраны Mn и Ni. В табл. 2 представлены результаты атомно-эмиссионного анализа содержания марганца и никеля в растительных образцах.

Растения, отобранные с ФОС, содержали в себе большее количество марганца и никеля по сравнению с теми, что были собраны на фоновых участках. Максимальное количество Mn накапливается в биомассе мха, находящегося в толще воды, а Ni — в биомассе сабельника.

Оценка степени накопления тяжёлых металлов растениями производилась на основании расчёта коэффициента биоаккумуляции по формуле

$$K_6 = \frac{K_p}{K_n},$$

где K_6 — коэффициент биоаккумуляции, K_p — концентрация элемента в растении, K_n — концентрация подвижной формы элемента в донных отложениях или воде.

Для расчёта коэффициента биоаккумуляции для укореняющихся растений (гидрофитов) в качестве концентрации подвижной формы элемента принимали усреднённое содержание тяжёлых металлов в пробах донных отложений. Для плавающих в толще воды растений (аэрогидатофитов) и растений, выращенных на плавающих матах (тростник), коэффициент биоаккумуляции рассчитывали как отношение содержания элемента в растении к его содержанию в воде. В табл. 3 представлены значения потенциальных коэффициентов биоаккумуляции анализируемых растений.

Таблица 2

Содержание тяжёлых металлов в сухой биомассе растений

Образец	Mn, мг/кг	Ni, мг/кг	Mn, мг/кг	Ni, мг/кг
	Контрольные образцы с фоновых участков		Образцы с ФОС	
Рогоз	361	3,8	324	21
Тростник	85	2,5	143	5,0
Сабельник	621	2,2	1157	165
Мох	2710	4,0	10063	128

Таблица 3

Коэффициент биоаккумуляции для укореняющихся растений

Образец	Mn	Ni	Образец	Mn	Ni
Растения ФОС в толще воды			Укореняющиеся растения на прибрежных участках отстойников		
Тростник	233	81	Рогоз	11	16
Мох	3299	418	Тростник	5	4
			Сабельник	38	128

Наибольшая потенциальная эффективность биоаккумуляции Mn и Ni характерна для сабельника на заболоченных участках отстойника, в то время как степень поглощения у находящихся в толще воды растений, не укоренённых в грунт, выше, а максимальный коэффициент биоаккумуляции отмечен у мха.

Выводы

Полученные результаты подтверждают возможность использования метода фитоэкстракции для снижения содержания загрязняющих веществ в сточной воде. Функционирующие на данный момент системы фитоочистки на предприятиях Мурманской области и Республики Карелия, где основу фитоценоза составляют мхи, могут быть эффективны, особенно при поглощении тяжёлых металлов.

Применение высшей водной растительности для доочистки сточных вод от тяжёлых металлов и других загрязняющих веществ в условиях холодного климата является перспективной технологией и может применяться на различных производственных объектах. Дальнейшие исследования в направлении развития фитоочистки сточных вод должны быть направлены на поиск аборигенных растений гипераккумуляторов и разработки оптимальных технологий их использования.

Список источников

1. Красавцева Е. А., Сандимиров С. С. Состояние водных объектов в зоне влияния горно-перерабатывающих предприятий на примере ООО «Ловозерский ГОК» // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 2 (86). С. 3–13.
2. Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands // Sci. Total Environ. 2007. No. 380 (1–3). P. 48–65.

3. Морозова М. А. Фиторемедиация как метод очистки почв // Науки о Земле. 2018. № 6 (33). С. 104–106.
4. Design parameters for nitrogen removal by constructed wetlands treating mine waters and municipal wastewater under Nordic conditions / K. Kujala [et al.] // Sci. Total Environ. 2019. No. 662. P. 559–570.
5. Vymazal J. The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment // Land. 2022. Vol. 11, No. 174. <https://doi.org/10.3390/land11020174>.
6. Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от минеральных соединений азота / Л. А. Иванова [и др.]. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра, 2021. 88 с.

References

1. Krasavceva E. A., Sandimirov S. S. Sostoyanie vodnyh ob"ektov v zone vliyaniya gorno-pererabatyvayushchih predpriyatij na primere ООО “Lovozerskij GOK” [The state of water bodies in the zone of influence of mining and processing enterprises using the example of “Lovozersky GOK” LLC]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and ecology: problems and solutions], 2021, No. 2 (86), pp. 3–13. (In Russ.).
2. Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 2007, No. 380 (1–3), pp. 48–65.
3. Morozova M. A. Fitoremediaciya kak metod ochistki pochv [Phytoremediation as a method of soil purification]. *Nauki o Zemle* [Geosciences], 2018, No. 6 (33), pp. 104–106. (In Russ.).
4. Kujala K., Karlsson T., Nieminen S., Ronkanen A.-K. Design parameters for nitrogen removal by constructed wetlands treating mine waters and municipal wastewater under Nordic conditions. *Science of the Total Environment*, 2019, No. 662, pp. 559–570.
5. Vymazal J. The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Land*, 2022, Vol. 11, No. 174. <https://doi.org/10.3390/land11020174>.
6. Ivanova L. A., Myazin V. A., Kornejkova M. V., Fokina N. V., Evdokimova G. A., Red'kina V. V. *Pora ochishchat' Arktiku. Sozdanie fitoochistnoj sistemy dlya doochistki stochnyh vod gornorudnyh predpriyatij ot mineral'nyh soedinenij azota* [It's time to clean up the Arctic. Creation of a phytoremediation system for post-treatment of mining enterprises wastewater from mineral nitrogen compounds]. Apatity, Publishing house of the Kola Science Centre, 2021, 88 p.

Информация об авторах

Н. И. Каганович — аспирант;

В. А. Мязин — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, доцент;

Н. А. Малыгин — магистрант.

Information about the authors

N. I. Kaganovich — Postgraduate Student;

V. A. Myazin — PhD (Biology), Senior Researcher, Associate Professor;

N. A. Malygin — Master's Degree Student.

Статья поступила в редакцию 03.04.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 12.04.2024.
The article was submitted 03.04.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 12.04.2024.