

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

МАНСУРОВ Владислав Наилевич

студент

ХАМИТОВ Фидан Ринатович

студент

ЕЛИЗАРЬЕВА Елена Николаевна

кандидат технических наук, доцент

Уфимский университет науки и технологий

г. Уфа, Россия

В данном обзоре рассмотрены перспективы применения фиторемедиации как экономически эффективного и экологически безопасного подхода к очистке сточных вод. Проанализированы основные механизмы фиторемедиации (ризофильтрация, фитоэкстракция, фитостабилизация) и представлен обзор наиболее эффективных видов растений-фиторемедиантов. Особое внимание уделено ключевой проблеме технологии – утилизации загрязненной биомассы. Рассмотрены современные стратегии фитоменеджмента.

Ключевые слова: фиторемедиация, фитоменеджмент, тяжелые металлы, сточные воды, гипераккумуляторы, ризофильтрация, утилизация биомассы, фитомайнинг, углеродные наноматериалы, циркулярная экономика.

Загрязнение сточных вод тяжелыми металлами (ТМ) представляет собой одну из наиболее серьезных экологических проблем в связи с их токсичностью, канцерогенностью и способностью накапливаться, образуя эффект суммации. Традиционные физико-химические методы очистки зачастую являются дорогостоящими, энергоемкими и могут порождать проблему вторичных отходов [6].

В этом контексте фиторемедиация - технология, использующая способность растений поглощать, аккумулировать и детоксицировать загрязняющие вещества, - предлагает экономически эффективное и экологически сбалансированное решение [8; 10].

Для очистки водной среды от тяжелых металлов наиболее эффективны технологии, направленные на поглощение загрязнителей непосредственно из воды. Ключевыми механизмами этого процесса являются ризофилтрация и фитоэкстракция [2].

Ризофилтрация (фитофилтрация) - очистка загрязненной воды с помощью корневых систем растений, которые поглощают и адсорбируют металлы [10]. Другим важным механизмом является фитоэкстракция - процесс, при котором растения поглощают и аккумулируют загрязнители в своих тканях с последующим удалением биомассы [8; 10]. Для повышения эффективности этого метода используются растения-гипераккумуляторы (Табл. 1) .

Таблица 1.

Наиболее эффективные виды растений-фиторемедиантов сточных вод

Название растения	Тяжелые металлы	Особенности
Водный гиацинт (<i>Eichhornia crassipes</i>)	Fe, Cu, Pb, Cd, Zn	Биомасса пригодна для синтеза наноматериалов [11]
Ряска малая (<i>Lemna minor</i>)	Cu, Ni, Zn, Cr, Cd	Высокая скорость роста. Эффективна в доочистке городских стоков (удаление до 77.29% фосфатов) [5]
Элодея канадская (<i>Elodea canadensis</i>)	Cu, Zn, Ni	Погруженный гидрофит с высокой поглотительной способностью. Рекомендуемый период экспозиции — до 12-15 суток [3, 4]
Сальвиния гигантская (<i>Salvinia molesta</i>)	Cr, Cu, Fe, Ni, Pb	Высокие проценты удаления: Cr (81.66%), Pb (74.85%) [7]
Пистия телорезовидная (<i>Pistia stratiotes</i>)	Cu, Zn, Ni	Высокоэффективна для доочистки городских стоков (удаление до 98.64% нефтепродуктов) [5]

Важным этапом является утилизация биомассы, которую фитоменеджмент рассматривает не как отход, а как сырье в рамках циркулярной экономики (Табл.2).

Таблица 2

Классификация способов утилизации биомассы

Способ утилизации	Технология и продукты	Преимущества и ограничения
Фитомайнинг Озоление с последующим извлечением металлов	Коммерчески перспективно для ценных металлов [1]	Экономически оправдано при высоких концентрациях [2]
Синтез углеродных наноматериалов	Химическое осаждение из паровой фазы с использованием биомассы как сырья и катализатора	Получение ценных продуктов (нанотрубки). Замкнутый цикл [11]
Производство электро-химических материалов	Пиролиз и активация для получения пористых углеродных материалов	Создание материалов для суперконденсаторов с высокой емкостью (до 552 Ф/г) [9].
Производство биоудобрений	Сжигание с рекуперацией тепла и прессованием золы в таблетки	Решение проблемы отходов, получение товарного продукта [3].

Проведенный анализ демонстрирует, что фиторемедиация является высокоперспективной технологией для очистки сточных вод от тяжелых металлов. Ее эффективность может достигать 70-95% в зависимости от подобранной комбинации растений [1; 5; 7].

Наиболее перспективным представляется создание каскадных систем, использующих последовательно ризофильтрацию (например, с помощью ивы или подсолнечника), фитоэкстракцию (ряска малая) и доочистку погруженными макрофитами (элодея канадская) с строгим контролем времени экспозиции [2; 4]. Утилизация биомассы через синтез углеродных наноматериалов [11; 12] или производство удобрений с рекуперацией тепла [3] позволяет не только решить проблему образования отходов, но и получить дополнительный экономический эффект, повышая общую устойчивость технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р. Ш., Ольшанская Л. Н., Зобкова А. В. Регенерация рясок малой и крошечной после очистки водных сред от солей никеля и меди и смешанных растворов никеля и меди с кальцием // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – №. 10. – С. 233-237.
2. Елизарьева Е. Н., Янбаев Ю. А., Кулагин А. Ю. Особенности выбора фиторемедиационных технологий очистки почв и сточных вод от ионов тяжелых металлов // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». – 2016. – №. 3. – С. 7-19.
3. Нефедьева Е. Э. и др. Доочистка сточных вод с помощью фиторемедиации // Вестник Казанского технологического университета. – 2017. – Т. 20. – №. 10. – С. 145-148.
4. Петракова Е. А., Анищенко Л. Н. Биоконверсия тяжелых металлов в фиторемедиационных технологиях доочистки и очистки сточных вод // Астраханский вестник экологического образования. – 2016. – №. 1 (35). – С. 46-49.
5. Раимбеков К. Т. Использование макрофитов для доочистки городских сточных вод // Инновации в науке. – 2017. – №. 4 (65). – С. 8-10.
6. Чачина С. Б., Гостева А. Н. Использование высших водных растений для доочистки канализационных сточных вод ОАО «Омскводоканал» // Омский научный вестник. – 2012. – №. 2 (114). – С. 203-207.7) Abh Abhayawardhana M., Bandara N., Rupasinge S. Removal of heavy metals and nutrients from municipal wastewater using *Salvinia molesta* and *Lemna gibba* // Journal of Tropical Forestry and Environment. – 2019. – Т. 9. – №. 2.
7. Acharya A. et al. Current Assessment and Future Perspectives on Phytoremediation of Heavy Metals // Plants. – 2025. – Т. 14. – №. 18. – С. 2847.
8. Khan A. U. et al. Phytoremediation of pollutants from wastewater: A concise review // Open Life Sciences. – 2022. – Т. 17. – №. 1. – С. 488-496.
9. Matsa M. M., Dube T., Mupepi O. Effectiveness of phytoremediation in waste-

water treatment: a case of Karoi water supply station, Zimbabwe // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2025. – Т. 22. – №. 8. – С. 7013-7024.

10. Sasrimuang S. et al. Sustainable carbon nanomaterials solutions: Facile synthesis from heavy metal-rich water hyacinth using CVD method // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2025. – Т. 24. – С. 100862.

11. Sima X. F. et al. Harvesting biomass-based Ni–N doped carbonaceous materials with high capacitance by fast pyrolysis of Ni enriched spent wetland biomass // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2019. – Т. 58. – №. 31. – С. 13868-13878.

PERSPECTIVES OF USING PHYTOREMEDIATION FOR WASTEWATER TREATMENT

MANSUROV Vladislav Nalelevich

Student

KHAMITOV Fidan Rinatovich

Student

ELIZARIEVA Elena Nikolaevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Ufa University of Science and Technology

Ufa, Russia

This review examines the prospects for using phytoremediation as a cost-effective and environmentally friendly approach to wastewater treatment. It analyzes the main mechanisms of phytoremediation (rhizofiltration, phytoextraction, and phytostabilization) and provides an overview of the most effective phytoremediation plant species. Special attention is given to the key challenge of the technology, which is the disposal

of contaminated biomass. The review also explores current phytomanagement strategies.

Keywords: phytoremediation, phytomanagement, heavy metals, wastewater, hyperaccumulators, rhizofiltration, biomass utilization, phytomining, carbon nanomaterials, circular economy.