

УДК 574.6

ОЧИСТКА ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН ОТ ПРОДУКТОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВ МЕТОДОМ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ

Каюмова Гузель Газинуровна¹, к.б.н., доцент кафедры судовождения и судостроения

e-mail: guzelka1003@yandex.ru

Салахов Ильяс Рахимзянович¹, директор Казанского филиала, академик международной академии наук, к.п.н., доцент, заслуженный учитель РТ

e-mail: vguvtkazan@yandex.ru

¹ Институт морского и речного флота имени Героя Советского Союза М.П. Девятаева – Казанский филиал Волжского государственного университета водного транспорта, Казань, Республика Татарстан, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проблема аккумуляции загрязнителей в донных отложениях и литоральной зоне морских портов, являющихся прямым следствием интенсивного судоходства. Основное внимание уделяется тяжелым металлам (Pb, Cd, Cu, Zn), нефтепродуктам и бицидным соединениям из противобрастающих покрытий. Анализируются ограничения традиционных методов очистки (механическая выемка грунта, химическая сорбция) и обосновывается целесообразность применения фиторемедиации – технологии очистки с использованием растений-макрофитов.

Ключевые слова: фиторемедиация, прибрежная зона, продукты эксплуатации судов, тяжелые металлы, нефтепродукты, макрофиты, биоаккумуляция, литораль.

PURIFICATION OF COASTAL ZONES FROM SHIP EXPLOITATION PRODUCTS BY PHYTOREMEDIATION

Guzel G. Kayumova¹, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Navigation and Shipbuilding

e-mail: guzelka1003@yandex.ru

Ilyas R. Salakhov¹, Director of the Kazan Branch, Academician of the International Academy of Sciences, PhD, Associate Professor, Honored Teacher of the Republic of Tatarstan

e-mail: vguvtkazan@yandex.ru

¹ Institute of Maritime and Inland Shipping named after Hero of the Soviet Union M.P. Devyataev – Kazan branch of Volga State University of Water Transport Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

Abstract. The article considers the problem of accumulation of pollutants in bottom sediments and the littoral zone of seaports, which are a direct consequence of intensive shipping. The main focus is on heavy metals (Pb, Cd, Cu, Zn), petroleum products, and biocidal compounds from antifouling coatings. The limitations of traditional purification methods (mechanical excavation, chemical

sorption) are analyzed and the expediency of using phytoremediation, a purification technology using macrophyte plants, is substantiated.

Keywords: phytoremediation, coastal zone, products of ship operation, heavy metals, petroleum products, macrophytes, bioaccumulation, littoral.

Интенсификация глобальных и региональных грузоперевозок приводит к беспрецедентному антропогенному прессингу на прибрежные и эстуарные экосистемы. Помимо прямых аварийных разливов, хроническое загрязнение акваторий формируется за счет так называемых «продуктов эксплуатации судов». К ним относятся продукты износа корпусных конструкций, абразивный износ от швартовых операций, утечки горюче-смазочных материалов, а также вымывание токсичных компонентов (в первую очередь соединений меди и цинка) из противообрастающих лакокрасочных покрытий.

Традиционные методы санации загрязненных грунтов, такие как экскавация с последующей утилизацией или in-situ химическое осаждение, сопряжены с высокими финансовыми затратами, вторичным взмучиванием седиментов и дальнейшим нарушением бентосных сообществ. Кроме того, данные подходы носят паллиативный характер, лишь перемещая проблему из одной локации в другую. В этом контексте технологии биоремедиации, и в частности фиторемедиация, представляют собой альтернативную парадигму, основанную на использовании естественных метаболических процессов живых организмов для детоксикации среды [1].

Целью настоящей работы является систематизация знаний о применении фиторемедиационных технологий для очистки прибрежных зон от специфических поллютантов, связанных с деятельностью флота.

Материалы и методы

Теоретическую основу исследования составили анализ и синтез данных из профильных научных баз данных (Scopus, Web of Science, eLibrary) по ключевым запросам: "фиторемедиация", "очистка морских побережий", "тяжелые металлы в седиментах", "нефтяное загрязнение гидросферы". Методологическую базу составляет сравнительный анализ механизмов действия различных групп водных макрофитов в отношении приоритетных загрязнителей. В работе классифицируются основные механизмы фиторемедиации (phytostabilization, phytoextraction), приводится обзор перспективных видов-гидробионтов (макроводоросли, морские травы) и обсуждаются факторы, влияющие на эффективность процесса в условиях умеренного климата. Делается вывод о высоком потенциале данного метода как экологически устойчивого и экономически оправданного инструмента реабилитации прибрежных экосистем.

Рассмотрим характеристики загрязнений, механизмы фиторемедиации:

1. Характеристика загрязнителей и их поведение в прибрежной экосистеме.

Продукты эксплуатации судов формируют сложный комплексный профиль загрязнения. Тяжелые металлы, обладая высоким сродством к органическому веществу и глинистым фракциям седиментов, аккумулируются в верхнем слое донных отложений, создавая долговременный источник вторичного загрязнения (в Таблице 1 приведены ориентировочно допустимые концентрации валовых форм тяжелых металлов в различных типах почв, мг/кг) [2].

Нефтепродукты образуют на поверхности осадков тонкие пленки, ингибирующие газообмен и угнетающие микрофлору. Соединения трибутилолова (далее – ТБТ) и меди, входящие в состав красок, являются высокотоксичными альгицидами, нарушающими репродуктивные циклы моллюсков и других беспозвоночных.

2. Механизмы фиторемедиации в водной среде.

Фиторемедиация в аквакультуре реализуется через несколько ключевых механизмов:

Фитоэкстракция (Phytoextraction). Растение поглощает контаминанты корневой системой (или ризоидами у водорослей) и транспортирует их в надземные/поверхностные части биомассы. Этот механизм наиболее эффективен для металлов. После накопления загрязнителя биомасса может быть собрана и безопасно утилизирована (например, путем пиролиза или захоронения).

Таблица 1. Ориентировочно допустимые концентрации валовых форм тяжелых металлов в различных типах почв, мг/кг

Элемент	Гранулометрический состав и pH почвы		
	Песчаные и супесчаные	Суглинистые и глинистые кислые почвы (рНКСl<5,5)	Суглинистые и глинистые нейтральные и близкие к ним почвы (рНКСl>5,5)
Кадмий	0,5	1,0	2,0
Никель	20,0	40,0	80,0
Цинк	55,0	110,0	220,0
Медь	33,0	66,0	132,0

Фитостабилизация (Phytostabilization). Корневая система растений создает физический барьер, препятствующий эрозии субстрата и вторичному перераспределению загрязненных частиц. Экссудаты корней могут изменять pH и окислительно-восстановительный потенциал ризосферы, способствуя иммобилизации металлов в менее биодоступных формах (например, в виде сульфидов или гидроксидов).

Ризофилтрация (Rhizofiltration). Применяется преимущественно для очистки водной толщи. Загрязнители адсорбируются или поглощаются корневой системой растений, выращиваемых в гидропонной системе или непосредственно в водоеме, показан на Рисунке 1.

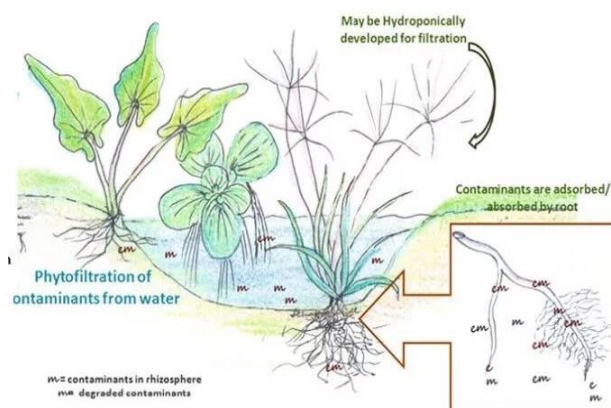


Рисунок 1 – Ризофилтрация

Фитодеградация (Phytodegradation). Растения и ассоциированные с ними микроорганизмы (ризосфера) выделяют ферменты (например, дегалогеназы, оксидазы), способные расщеплять сложные органические молекулы, включая компоненты нефти и некоторые синтетические соединения, до более простых и нетоксичных метаболитов.

Объекты-фиторемедианты для прибрежных зон.

Выбор вида растения-гидробионта определяется типом поллютанта, соленостью воды и климатическими условиями.

Макроводоросли (бурые, зеленые, красные): Представители родов *Fucus*, *Laminaria*, *Ulva* демонстрируют высокую способность к аккумуляции тяжелых металлов благодаря

наличию в клеточной стенке полисахаридов (альгинаты, фукоидан), обладающих выраженными хелатирующими свойствами. Они активно используются для очистки вод от растворенных форм металлов и органических токсинов.

Морские травы (Зостера, Взморник): Высшие цветковые растения, формирующие обширные подводные луга [6]. Их мощная корневищно-корневая система эффективно стабилизирует донные отложения, предотвращая ремобилизацию седиментов. Зостера способна накапливать металлы в своих тканях и стимулировать развитие нефтеокисляющих бактерий в ризосфере.

Высшие гелофиты (Тростник, Рогоз): Хотя они произрастают преимущественно в супралиторали и верхней литорали, их роль в создании буферной зоны между сушей и морем трудно переоценить. Их корневые системы фильтруют поверхностный сток, перехватывая взвешенные частицы и связанные с ними загрязнители еще до их попадания в акваторию [5].

Внедрение фиторемедиационных проектов требует комплексного подхода. На первом этапе необходима оценка характера и масштабов загрязнения. Далее следует подбор видового состава, адаптированного к локальным условиям. Технология может быть реализована как создание искусственных рифов с засевом макроводорослями, восстановление зарослей морской травы на деградированных участках или обустройство биоплато в устьях ливневых стоков порта.

Основными вызовами являются сезонность вегетации в умеренных широтах, что снижает эффективность метода в зимний период, а также необходимость разработки протоколов сбора и утилизации, накопившей загрязнители биомассы во избежание ее попадания обратно в трофическую цепь.

Анализ показывает, что фиторемедиация является перспективным и экологически обоснованным методом реабилитации прибрежных зон, подверженных загрязнению продуктами эксплуатации судов. Интеграция данной биотехнологии в общую систему управления экологической безопасностью морских портов позволяет перейти от реактивных мер по ликвидации последствий к проактивной стратегии поддержания гомеостаза экосистемы. Дальнейшие исследования должны быть направлены на селекцию и изучение генетически модифицированных штаммов макрофитов с повышенной резистентностью и способностью к аккумуляции целевых поллютантов, а также на оптимизацию агротехнических приемов их культивирования в морской среде.

Список литературы:

1. Киприянова, Л. М. Водная и прибрежно-водная растительность Юга Западной Сибири - эталон и ресурс для озеленения городских водоемов и водотоков / Л. М. Киприянова // Ботаника и экология для создания комфортной среды обитания человека : Материалы научно-практической конференции с международным участием, Новосибирск, 20–21 марта 2018 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный педагогический университет, 2019. – С. 27. – EDN KBWOIZ.
2. Обухов А. И., Лепнева О. М. Биогеохимия тяжелых металлов в городской среде // Почвоведение. 1989. №5. С. 65–73.
3. Правила предотвращения загрязнения окружающей среды. Российский речной регистр. Москва. – 2016 г.;
4. Регистровая книга Российского речного регистра. – URL: <http://www.rivreg.ru/activities/class/regbook/> (дата обращения 01.05.2026)
5. Шулепова, О. В. Изучение растительности водных объектов городской среды / О. В. Шулепова, Н. В. Санникова // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2024. – № 4(400). – С. 483-486.



6. Ханбабаева, О. Е. Использование многолетних декоративных растений для озеленения и очищения водоёмов / О. Е. Ханбабаева, В. Н. Сорокопудов, О. А. Сорокопудова // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 9. – С. 26-35.

