

Литература

1. Михайлова М.В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6, с .
2. Зырянов В.Н. Гидродинамика соленостного клина // Водные ресурсы. 1987. № 6, с. 107 - 125.
3. Зырянов В.Н. Топографические вихри в динамике морских течений. Москва: ИВП РАН. 1995, 240 с.
4. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов/ Под ред. Н.Н.Филатова, А.Ю. Тержевика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 349 с.
5. Зырянов В.Н., Хубларян М.Г. Пампинг-эффект в теории нелинейных процессов типа уравнения теплопроводности и его приложение в геофизике // ДАН, 2006, т. 408, № 4, С. 535-538.

ОХРАНА И ОЧИСТКА ВОД МЕТОДАМИ ФИТОТЕХНОЛОГИЙ

Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н.
Институт водных проблем РАН, г. Москва
kazm@pochta.ru

Фитотехнологии, в основе которых лежит использование высшей водной растительности (ВВР) и сопутствующих ей микроорганизмов, находят все большее применение для охраны, очистки и доочистки вод, а также экологической реконструкции водных объектов в разных регионах мира как с теплым, так и с холодным климатом. В США искусственные ветленды рассматриваются как составная часть системы устойчивого развития и возобновляемого природопользования. В Агентстве охраны окружающей среды США (U.S. Environmental Protection Agency) эта тематика является приоритетной на длительную перспективу и разрабатывается Национальной исследовательской лабораторией управления рисками (National Risk Management Research Laboratory) в целях предотвращения угроз здоровью людей и окружающей среде. Исследования и разработки по этой тематике являются приоритетными и в странах-членах Евросоюза, прежде всего для устойчивого обеззараживания и очистки промышленных, сельскохозяйственных и муниципальных сточных вод [1]. В целом исследования в этом направлении проводятся в более чем 80 странах, в основном в Северной Америке, Европе, Юго-Восточной Азии и Океании. С 1991 г. на эту тему в

мире опубликовано около 4 тыс. работ, и их число растет в геометрической прогрессии, примерно удваиваясь каждые 2-4 года.

Это быстрорастущая индустрия во многих странах мира. В последнее десятилетие резко возросло количество исследований, проводимых в Китае, а также количество биоинженерных сооружений, создаваемых с применением фитотехнологий. Согласно статистическим данным, в 2011 г. в Китае действовало 425 таких сооружений, используемых в основном для очистки сельскохозяйственных ирригационных стоков, при искусственном обводнении водных объектов и обводнении территорий для восстановления лесов. При этом каждый год строятся и вводятся в действие 15-30 новых сооружений.

Первые биоинженерные сооружения с использованием ВВР были созданы в 1960-е годы, однако массовое развитие эти технологии получили в последние десятилетия как в развитых, так и развивающихся странах. Кроме различий в видовом составе используемых макрофитов, принципиальным отличием искусственных ветлендов является наличие или отсутствие свободной поверхности воды. В свою очередь, сооружения без свободной поверхности воды могут быть разделены на сооружения с горизонтальным и вертикальным движением потока. В последних возможно движение загрязненных вод сверху-вниз, снизу-вверх и U-образно. Существует целый ряд комбинированных гибридных систем, где на отдельных участках используются различные схемы. Вызвано это необходимостью создания оптимальных условий для аэрации воды и субстрата, а также комфортных условий для существования ВВР и сопутствующих им микроорганизмов, что, в конечном счете, должно дать максимальную эффективность очистки воды. Сооружения с подповерхностным течением воды, как правило, более эффективны, чем со свободной водной поверхностью.

В той или иной степени, с помощью фитотехнологий можно очищать сотни различных загрязнителей и их комбинации, что особенно актуально для коммунальных, муниципальных и промышленных сточных вод. В последнее десятилетие значительно расширился спектр использования ВВР для охраны и очистки вод. Наряду с традиционными направлениями очистки и перехвата биогенных и органических веществ, тяжелых металлов и радионуклидов, появились быстроразвивающиеся технологии по очистке вод от медицинских препаратов и средств личной гигиены, а также технологии, основанные на совершенствовании и управлении очисткой воды

естественными ассоциациями макрофитов, селекции и генетической модификации растений с целью получения желаемых характеристик, использовании нано частиц, биофумигации, совмещении водоочистки с производством биотоплива, оценке рисков возникновения экстремальных явлений.

Сооружения и установки для извлечения из сточных вод соединений азота и органических веществ с использованием фитотехнологий быстро развиваются во всем мире, прежде всего благодаря низкой стоимости эксплуатационных расходов. Классический путь превращения и извлечения соединений азота включает биологические (аммонификацию, нитрификацию, денитрификацию, ассимиляцию биомассы и т.д.) и физико-химические процессы (адсорбцию). Новые подходы основаны на микробиологическом метаболизме. Их принципиальным отличием является то, что в этих процессах не требуется присутствие органического углерода как донора электронов [2].

Органические соединения в системах фитотехнологий разлагаются в аэробных и анаэробных условиях. При этом в аэробную зону кислород поступает из атмосферы в результате конвективно-диффузионных процессов, а также через корни макрофитов. Анаэробные условия создаются в закрытых порах грунтов наполнения.

Уровень извлечения биогенных и органических веществ из сточных вод в значительной степени зависит от созданных условий: pH, температуры, наличия доступного кислорода, присутствия органического углерода, нагрузки на сооружение, условий и режима поступления загрязнителей, времени нахождения воды в системе, гидрологического режима, удаления растительной массы. Обычными субстратами являются песок и гравий, однако в тех или иных случаях, для совершенствования условий очистки применяют древесные опилки, рисовую шелуху, цеолит, слюду, золу, угольные шлаки, торф, мертвый сестон, компост.

Второй большой группой загрязнителей, в детоксикации и удалении которых используются фитотехнологии, являются тяжелые металлы, металлоиды (иногда относимые к тяжелым металлам) и радионуклиды. Свинец, кадмий, мышьяк и ртуть являются наиболее опасными токсикантами, прежде всего в силу того, что не подвержены биодegradации. Растения, участвующие в обеззараживании тяжелых металлов и радионуклидов, должны соответствовать определенным требованиям: 1) быстро расти; 2) иметь высокую толе-

рантность к металлам; 3) быть устойчивыми к болезням и пестицидам; 4) иметь развитую корневую систему и побеги, а также способность синтезировать особые вещества как отклик на токсичную внешнюю среду; 5) быть непривлекательными для животных, чтобы избежать переноса загрязнителей на более высокие трофические уровни; 6) не быть специфичными к определенным элементам, для того, чтобы существовала возможность извлечения и детоксикации других металлов [3].

Основными типами фиторемедиации тяжелых металлов и радионуклидов являются: фитостабилизация/фитосеквестрация – перевод химических соединений в менее подвижную и активную форму; фитоаккумуляция/фитоэкстракция – накопление в организме растения опасных загрязнителей; фитоволатилизация – испарение воды и летучих химических элементов листьями растений; ризофильтрация – корни всасывают воду и химические элементы необходимые для жизнедеятельности растений. Кроме того, органические и неорганические загрязнители, содержащие тяжелые металлы, могут быть удалены из воды и донных отложений в результате различных механизмов биосорбции: адсорбции, абсорбции, выпадения в осадок, поверхностного комплексообразования или ионного обмена. При этом активными биосорбентами являются как живые растения, так и мертвая фитомасса, поскольку основными агентами в этом случае являются бактерии [4].

В последние годы значительно продвинулись фитотехнологии по обеззараживанию вод, загрязненных мышьяком, являющимся одним из наиболее опасных канцерогенов. Повышенный интерес к поиску недорогих, экологичных и устойчивых методов очистки воды от соединений мышьяка в крупных и мелких масштабах вызван наличием огромных территорий, загрязненных этим металлоидом. Более половины подземных вод в Индии и Бангладеш загрязнены мышьяком выше ПДК, в некоторых районах его концентрации достигают 200 ПДК для питьевой воды [5]. Подобная ситуация наблюдается в Латинской Америке, Португалии, и США (Калифорнии).

Хорошими концентраторами и гиперконцентраторами мышьяка являются: горец перечный (*Polygonum hydropiper*), ряска многокоренная (*Spirodela polyrhiza* L.), ряска горбатая (*Lemna gibba* L.)₂, вольфия шаровидная (*Wolffia globosa*), азолла каролинская (*Azolla caroliniana*). Последний вид принадлежит к семейству сальвиниевых. В этой связи следует обратить внимание на еще один вид –

сальвинию плавающую (*Salvinia natans*) – единственный вид этого семейства, произрастающий в России. Сальвиния плавающая представляет собой плавающий папоротник и в обилии встречается в южных областях Европейской части России, в Западной Сибири и на Дальнем Востоке. Этот вид также является гиперконцентратором тяжелых металлов. По нашим данным, полученным на Нижней Волге, сальвиния плавающая способна концентрировать количество меди почти в 100 раз большее, чем тростник обыкновенный (*Phragmites communis*) и рогоз узколистный (*Typha Angustifolia L.*). Несколько ниже значения для цинка: сальвиния концентрирует этот элемент почти в 10 и 2 раза больше, чем тростник и рогоз, соответственно. Следует отметить, что сальвиния плавающая пресноводное растение, однако средние содержания цинка, никеля, кобальта, меди и хрома в этом виде близки к их содержанию в морских растениях. Учитывая то, что сальвиния является свободноплавающим видом и может быть легко удалена с поверхности воды, ее применение в фитотехнологиях открывает широкие перспективы для искусственных установок и очистки естественных водных объектов.

Как уже отмечалось, в последние годы появилось новое направление – очистка и обеззараживание с помощью фитотехнологий фармацевтических препаратов и средств личной гигиены. Присутствие в воде медицинских препаратов отмечалось давно, но только в последние 15 лет, после появления новых аналитических методов, позволяющих определять экстремально низкие концентрации, они стали считаться загрязнителями. Эти технологии дают возможность количественно проанализировать присутствие в окружающей среде около 3000 биологически активных химических соединений с целью исследования их источников, поведения, судьбы, риска и контроля [6].

Принципиально, конструкции сооружений по извлечению и обеззараживания фармацевтических препаратов на основе фитотехнологий, мало чем отличаются от таковых для очистки от других загрязнителей. Все они имеют субстрат, ВВР и бактериальное население. Существуют установки со свободной водной поверхностью и с подповерхностным движением воды в горизонтальном или вертикальном направлениях, а также гибридные установки. Используются укореняющиеся и свободноплавающие растения. Такие системы уже функционируют в США, Канаде, Дании, Италии, Португалии,

Испании, Китае, Сингапуре и позволяют очищать и доочищать сточные воды от 115 фармацевтических препаратов [7, 8].

В качестве субстратов в таких установках наиболее часто используют гравий, реже легкий керамзит, вспученный перлит и чистый песок. Для извлечения антибиотиков используют песчаную, супесчаную почву или почву на основе песчаных суглинков. В последнее время нашли применение биосорбенты, такие как рисовая шелуха, сосновая кора, гранулированная кора пробкового дуба. Обычными растениями в таких ветлендах являются тростник обыкновенный, узколистый и широколистный, рогозы. При этом отмечено, что применение тростника более эффективно, чем рогозов.

По средней эффективности извлечения из воды с помощью фитотехнологий лекарственные препараты могут быть разделены на легко, средне, слабо и почти не удаляемые. Легко удаляемыми препаратами (средняя эффективность удаления более 70%) являются ацетаминофен, салициловая кислота, сульфадиазин, сульфадиметоксин, сульфаметазин, сульфаметоксазол, сульфацидидин, триметоприм, атенолол, метопролол, фуросемид, кофеин и тетрациклин. Лекарственные препараты, средняя эффективность удаления которых 50-70% включают ибупрофен, напроксен, доксициклин и гемфиброзил. Слабо удаляемыми с помощью фитотехнологий (средняя эффективность удаления 20-50%) являются диклофенак, кетопрофен, амоксициллин, кларитромицин, триклозан, соталол, 2-(2-Метил-4-хлорфенокси) пропионовая кислота и карбамазепин. Наконец, существует целый ряд лекарственных препаратов, удаление которых с помощью фитотехнологий проблематично (эффективность удаления менее 20%). Это в первую очередь ампициллин, эритромицин и линкомицин [7].

Из новых перспективных методов совершенствования фитотехнологий можно отметить использование генной инженерии и совмещение технологий очистки воды и производства биотоплива. В данном контексте методы генной инженерии призваны помочь получить генно-модифицированные микробы и ВВР с характеристиками, позволяющими микробам и макрофитам самим быть устойчивыми к загрязнителям, а также более активно и стабильно аккумулировать, абсорбировать и обеззараживать сточные воды. Что касается микробного населения, то здесь принципиальное значение имеют микробы, в целом населяющие субстрат и отдельно ризосферная микрофлора – совокупность микроорганизмов, содержа-

щихся в большом количестве в узкой зоне вокруг корней. Пока не известно о существовании трансгенных ВВР, хотя для сухопутных растений уже получены первые результаты на резуховидке Таля (*Arabidopsis thaliana*) и табаке обыкновенном (*Nicotiana tabacum*).

Контроль зарастаемости, переработка и утилизация загрязненной растительной массы входят в ряд основных проблем при использовании фитотехнологий для очистки вод, особенно для быстрорастущих растений, имеющих значительную фитомассу. Примером такого растения является водный гиацинт (*Eichhornia crassipes*) – многолетнее свободноплавающее растение, которое является хорошим концентратором и детоксикатором многих загрязнителей, однако, в силу своего быстрого распространения и захвата новых территорий может создать ряд экологических проблем. С помощью эйхорнии возможно извлечение и обезвреживание фосфатов, сульфатов, фенола, СПАВ, тяжелых металлов, радионуклидов, гептила, формальдегида, диметиламина и даже ракетного топлива (диметилгидразина). Однако следует напомнить, что это один из десяти самых худших сорняков в мире. Именно этот инвазивный вид, имеющий свое происхождение из бассейна р. Амазонки, сейчас вторгся в водоемы Европы, Африки, Азии и Северной Америки. В некоторых странах водный гиацинт распространился до такой степени, что заполнил все водоемы и стал национальным бедствием. Так в Новой Гвинее распространение растительности, завезенной в бассейн р. Сепик, привело к полному зарастанию озер и проток, исчезновению рыбы, голоду среди местного населения и его вынужденной миграции. Для борьбы с зарастанием водоемов водным гиацинтом в Японии налажено производство по переработке биомассы этого растения в биотопливо.

Литература

1. Miksch K., Cema G., Corvini P.F.-X., Felis E., Sochacki A., Surmacz-Górska J., Wiszniowski J., Żabczynski S. R&D priorities in the field of sustainable remediation and purification of agro-industrial and municipal wastewater // *New Biotechnology*, 2015. Vol. 32 No. 1, pp.128-132.

2. Saeed T., Sun G. A review on nitrogen and organic removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters operating conditions and supporting media// *Journal of Environmental Management*, 2012. Vol. 112, pp.429-448.

3. Sharma S., Singh B., Manchanda V.K. Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy metal contaminated soil and water// *Environmental Science and Pollution Research*, 2015. Vol. 22, p.946-962.

4. Gaur N., Flora G., Yadav M., Tiwari A. A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals// *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014. Vol. 16, p.180-193.

5. Islam S., Saito T., Kurasaki M. Phytofiltration of arsenic and cadmium by using an aquatic plant, *Micranthemum umbrosum*: Phytotoxicity, uptake kinetics, and mechanism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015. Vol. 112, p.193-200.

6. Rivera-Utrilla J., Sanchez-Polo M., Ferro-Garcia M.A., Prados-Joya G., Ocampo-Perez R. Pharmaceuticals as emerging contaminants and their removal from water. A review. *Chemosphere*, 2013. Vol. 93, p.1268-1287.

7. Li Y., Zhu G., Ng W.J., Tan S.K. A review on removing pharmaceutical contaminants from wastewater by constructed wetlands: Design, performance and mechanism// *Science of the Total Environment*, 2014. Vol. 468-469, p.908-932.

8. Zhang D., Gersberg R.M., Ng W.J., Tan S.K. Removal of pharmaceuticals and personal care products in aquatic plant-based systems: A review. *Environmental Pollution*, 2014. Vol. 184, p.620-639.

ВОДОРОСЛИ ФИТОЭПИЛИТОНА КАК ИНДИКАТОРЫ КАЧЕСТВА ВОДЫ В РАЗНОТИПНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ БАССЕЙНА ВЕРХНЕЙ ОБИ

Ким Г.В.

Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул
king@iwep.ru

Несмотря на то, что ценотическая, трофическая и индикаторная значимость водорослей, развивающихся на твердых субстратах общепризнанна, использование этой группы в качестве инструмента мониторинга и для оценки качества воды применяется в странах СНГ в значительно меньшей степени, чем водорослей планктона, водных беспозвоночных и рыб. В тех случаях, когда состояние водных объектов оценивают и по фитоперифитону, в комплекс показателей включают всего четыре: общее число видов, массовые виды, частоту встречаемости, сапробность [1-3]. В европейских странах и