

**Современные тенденции использования фитотехнологий
для очистки и охраны вод**

© 2016. В. Д. Казмирук, к. г. н., н. с., Т. Н. Казмирук, к. т. н., н. с.,
Институт водных проблем РАН,
119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3,
e-mail: kazm@pochta.ru, tamnicgor@yandex.ru

Рассмотрены основные тренды развития методов фитотехнологий для очистки и охраны вод. Традиционно фитотехнологии широко используются для очистки муниципальных, сельскохозяйственных и промышленных стоков, содержащих биогенные элементы. Чаще всего здесь применяются гибридные системы с вертикальным движением воды сверху вниз, снизу вверх и U-образно. Вторым направлением использования фитотехнологий являются искусственные ветленды для очистки и обеззараживания вод, содержащих тяжёлые металлы. В последнее время особое внимание уделяется поиску новых технологий обеззараживания соединений высокотоксичных металлов и металлоидов, таких как мышьяк и кадмий. В последнее десятилетие появилось и быстро развивается новое направление – фиторемедиация вод, загрязнённых медицинскими препаратами и средствами личной гигиены. Методы фитотехнологий позволяют эффективно удалять из воды такие известные препараты, как салициловая кислота, сульфадиметоксин, атенолол, кофеин, тетрациклин и др.

Ключевые слова: фитотехнологии, макрофиты, сточные воды, биогенные элементы, тяжёлые металлы, медицинские препараты.

**Phytotechnology: current trends of wastewater treatment
and water quality protection**

V. D. Kazmiruk, T. N. Kazmiruk
Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences,
3 Gubkin St., Moscow, Russia, 119333,
e-mail: kazm@pochta.ru, tamnicgor@yandex.ru

This paper presents a comprehensive review of the current state of research and industry activities on the application of phytotechnologies for removing contaminants from polluted waters. Phytotechnologies have been used in ecological engineering for more than five decades, since the 1960s as an alternative secondary wastewater treatment system or as a wastewater polishing treatment system. In order to assess the present applications and main trends of phytotechnologies for wastewater treatment and water quality protection, we summarized the prospect, influencing factors and operation management in phytotechnologies. The removal a wide range of pollutants by phytotechnologies often involves a diverse and complex set of physical, chemical and biological processes, which can be affected by the design and operational parameters selected for treatment. Traditionally, phytotechnologies are widely used for removal nutrients from municipal, agricultural, and industrial wastewaters. Hybrid systems are most often used technologies, which can be divided into several groups: vertical up-flow, down-flow, and U-shaped subsurface flow constructed wetlands. The second most common trend in use of phytotechnologies is constructed wetlands for purification and treatment of waters contaminated with heavy metals. Recently, much attention has been paid to the search for new decontamination technologies for the removal highly toxic metal and metalloid compounds such as arsenic and cadmium. In the last decade, a new trend in use of phytotechnologies has been detected: removal of pharmaceuticals and personal care products from wastewaters. This is a rapidly growing trend. The pharmaceuticals that can be readily removed by phytotechnologies are salicylic acid, sulfadimethoxine, atenolol, caffeine, tetracycline, etc.

Keywords: phytotechnologies, macrophytes, wastewater, nutrients, heavy metals, pharmaceuticals.

Использование фитотехнологий находит всё большее применение в разных областях человеческой деятельности, в т.ч. и для охраны и экологической реконструкции водных объектов. Так, 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). 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 растёт в геометрической прогрессии, удваиваясь примерно каждые 2–4 года. Целью данной работы является анализ и обобщение современных тенденций использования фитотехнологий для очистки и охраны вод.

Фитотехнологии – 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 эксплуатацию 15–30 новых сооружений.

Первые биоинженерные сооружения с использованием высшей водной растительности (ВВР) были созданы в 1960-е годы, однако массовое развитие эти технологии получили в последние десятилетия, как в развитых, так и развивающихся странах [2, 3]. 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 загрязнённых 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 счёте, 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 от сотни различных загрязнителей и их комбинаций, что особенно актуально для коммунальных, муниципальных, промышленных и сельскохозяйственных сточных вод. Основными преимуществами фитотехнологий для очистки вод являются универсальность использования практически для любых загрязнителей, природный характер очистки вод, отсутствие каких-либо побочных эффектов, длительный срок и низкая стоимость эксплуатации сооружений и установок, малые ресурсо- и энергозатраты, небольшая и простая инфраструктура. Строительство осуществляется из местных материалов, не требует высокой квалификации кадров и специальных механизмов и оборудования [4, 5]. В последнее десятилетие значительно расширился спектр использования ВВР для охраны и очистки вод. Наряду с традиционными направлениями очистки и перехвата биогенных и органических веществ, тяжёлых 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 наночастиц, биофумигации, совмещении водоочистки с производством биотоплива, оценке рисков возникновения экстремальных явлений [6].

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 [7].

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, мёртвый сестон, компост.

Второй большой группой загрязнителей, в детоксикации и удалении которых используются фитотехнологии, являются тяжёлые металлы, металлоиды (иногда относимые к тяжёлым металлам) и радионуклиды. Свинец, кадмий, мышьяк и ртуть являются наиболее опасными токсикантами, прежде всего, в силу того, что они не подвержены биодеградации. Растения, участвующие в обеззараживании тяжёлых металлов и радионуклидов, должны соответствовать определённым требованиям: 1) быстро расти; 2) иметь высокую толерантность 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 определённым элементам для того, чтобы существовала возможность извлечения и детоксикации других металлов [8].

Основными типами фиторемедиации тяжёлых 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 тяжёлые 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 мёртвая фитомасса, поскольку основными агентами в этом случае являются бактерии.

В последние годы значительно продвинулись фитотехнологии по обеззараживанию вод, загрязнённых мышьяком, который является одним из наиболее опасных канцерогенов. Повышенный интерес к поиску недорогих, экологических и устойчивых методов очистки воды от соединений мышьяка в крупных и мелких масштабах вызван наличием огромных территорий, загрязнённых этим металлоидом. Так, более половины подземных вод в Индии и Бангладеш загрязнены мышьяком выше ПДК, а в некоторых районах его концентрации достигают 200 ПДК для питьевой воды [9]. Аналогичная ситуация наблюдается в Латинской Америке, Португалии и Калифорнии (США).

Хорошими концентраторами и гиперконцентраторами мышьяка являются горец перечный (*Polygonum hydropiper*), ряска многокоренная (*Spirodela polyrrhiza*), ряска горбатая (*Lemna gibba*), вольфия шаровидная (*Wolffia globosa*), азолла каролинская (*Azolla caroliniana*). Последний вид принадлежит к семейству сальвиниевых. В этой связи следует обратить внимание на ещё 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 тяжёлых 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*). 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, её применение в фитотехнологиях открывает широкие перспективы как для искусственных установок, так и для очистки естественных водных объектов.

Как уже было отмечено, 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, когда появились новые аналитические методы, позволяющие определять экстремально низкие концентрации (от нано- до микрограмм в литре), они начали считаться загрязнителями. Новые аналитические методы дают возможность количественно проанализировать присутствие в окружающей среде около 3000 биологически активных химических соединений с целью исследования их источников, поведения, трансформации, а также контроля, поскольку наличие фармацевтических препаратов в воде даже в малых концентрациях может иметь долговременные побочные эффекты и создаёт риски экологическому благополучию водных экосистем и здоровью человека.

Основными механизмами очистки вод, загрязнённых фармацевтическими препаратами, в биоинженерных системах с ВВР являются фотолитическая деградация, сорбция, поглощение растениями и фитодеградация, микробная деградация. Принципиально конструкции сооружений по извлечению и обеззараживанию 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. Производственные (не эксперименталь-

ные) ветленды для этих целей, как правило, имеют площадь более 100 м² и глубину воды до 30 см. В зависимости от конструкции ветленда, время нахождения воды в системе составляет от 1 до 15 суток. Такие системы уже функционируют в США, Канаде, Дании, Италии, Португалии, Испании, Китае, Сингапуре и позволяют очищать и доочищать сточные воды от 115 фармацевтических препаратов.

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. Иногда в качестве субстратов используют камни и вулканический туф. В последнее время в этом качестве нашли применение биосорбенты, такие как рисовая шелуха, сосновая кора, гранулированная кора пробкового дуба. Обычными растениями в таких ветлендах являются рогозы узколистный (*Typha angustifolia*) и широколистный (*Typha latifolia*), тростник обыкновенный (*Phragmites communis*), малый камыш (*Scirpus validus*). Для выращивания последних часто используют методы гидропоники. Суть метода заключается в том, что корни растений получают питательные вещества не из почвы, а из воды. При этом замечено, что применение тростника более эффективно, чем рогозов. Плотность растений обычно составляет 10–50 шт/м². Реже для этих целей используются погруженные и свободноплавающие макрофиты, такие как элодея канадская (*Elodea canadensis*), роголистник темно-зелёный (*Ceratophyllum demersum*), гигантская сальвиния (*Salvinia molesta*), ряска малая (*Lemna minor*).

По средней эффективности извлечения из воды с помощью фитотехнологий лекарственные препараты могут быть разделены на легко-, средне-, слабоудаляемые и почти не удаляемые. Легко удаляемыми препаратами (средняя эффективность удаления более 70%) являются ацетаминофен, салициловая кислота, сульфадiazин, сульфадиметоксин, сульфаметазин, сульфаметоксазол, сульфацил, 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, прежде всего, ампициллин, эритромицин и линкомицин. Кроме того, для всех препаратов эффективность очистки воды зимой снижается на 3–41% [10].

Из новых перспективных методов совершенствования фитотехнологий следует 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 микроорганизмам 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 микроорганизмы, в целом – населяющие субстрат и отдельно – ризосферная микрофлора – совокупность микроорганизмов, содержащихся в большом количестве в узкой зоне вокруг корней. Пока нам 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 загрязнённой 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 как инвазивный вид может создать ряд экологических проблем. С помощью эйхорнии возможно извлечение и обезвреживание фосфатов, сульфатов, фенола, синтетических поверхностно активных веществ, тяжёлых металлов, радионуклидов, 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 своё происхождение из бассейна р. Амазонки, сейчас вторгся в водоёмы Европы, Африки, Азии и Северной Америки. В некоторых странах водный гиацинт распространился до та-

кой степени, что заполнил все водоёмы и стал национальным бедствием. Так, в Новой Гвинее распространение растительности, завезённой в бассейн р. Сепик, привело к полному зарастанию озёр и проток, исчезновению рыбы, голоду среди местного населения и его вынужденной миграции. Для борьбы с зарастанием водоёмов водным гиацинтом в Японии налажено производство по переработке биомассы этого растения в биотопливо.

Таким образом, всё более очевидным становится то, что, используя природный характер очистки вод и имея существенные экономические преимущества, фитотехнологии имеют значительную перспективу. В связи с этим, при разработке энерго- и ресурсосберегающих программ государственного и регионального уровней следовало бы уделить больше внимания практической реализации результатов научных исследований по использованию фитотехнологий для очистки вод, как в России, так и за её пределами.

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. V. 32. № 1. P. 128–132.
2. Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н. Использование фиторемедиации для охраны вод в России и мире // Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз. Новочеркасск. 2013. С. 332–337.
3. Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н. Очистка воды методами фитотехнологий // Водоочистка. 2015. № 5–6. С. 66–70.
4. Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н., Бреховских В.Ф. Зарастающие водотоки и водоёмы: Динамические процессы формирования донных отложений. М.: Наука, 2004. 310 с.
5. Казмирук В.Д. Фиторемедиация в охране вод: неограниченные возможности и возможные ограничения // Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства: Сб. науч. тр. Вып. 10. Рязань. 2013. С. 494–501.
6. Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н. Охрана и очистка вод методами фитотехнологий // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Т. 1. Петрозаводск. 2015. С. 294–301.
7. Saeed T., Sun G. A review on nitrogen and organic removal mechanisms in subsurface flow constructed wet-

lands: Dependency on environmental parameters operating conditions and supporting media // Journal of Environmental Management. 2012. V. 112. P. 429–448.

8. 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. V. 22. P. 946–962.

9. Islam S., Saito T., Kurasaki M. Phytoltration of arsenic and cadmium by using an aquatic plant, *Micranthemum umbrosum*: Phytotoxicity, uptake kinetics, and mechanism // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2015. V. 112. P. 193–200.

10. 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. V. 468–469. P. 908–932.

References

1. Miksch K., Cema G., Corvini P.F.-X., Felis E., Sochacki A., Surmacz-G rska 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. V. 32. № 1. P. 128–132.

2. Kazmiruk V.D., Kazmiruk T.N. Using phytoremediation for water protection in Russia and the world // Vodnaya stikhiya: opasnosti, vozmozhnosti prognozirovaniya, upravleniya i predotvrashcheniya ugroz. Novocherkassk. 2013. P. 332–337 (in Russian).

3. Kazmiruk V.D., Kazmiruk T.N. Water treatment by phytotechnology methods // Vodoochistka. 2015. № 5–6. P. 66–70 (in Russian).

4. Kazmiruk V.D., Kazmiruk T.N., Brekhovskikh V.F. Overgrown streams and reservoirs: Dynamic processes of formation of bottom sediments. Moscow, Nauka, 2004. 310 p. (in Russian).

5. Kazmiruk V.D. Phytoremediation in water protection: unlimited possibilities and potential limitations // Sovremennyye energo- i resursosberegayushchiye, ekologicheski ustoychivyye tekhnologii i sistemy seleskokhozyaystvennogo proizvodstva: Sbornik nauchnykh trudov. Vypusk 10. Ryazan. 2013. P. 494–501 (in Russian).

6. Kazmiruk V.D., Kazmiruk T.N. Phytotechnologies for water treatment and water bodies protection // Nauchnoyye obespecheniye realizatsii «Vodnoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 g.». T. 1. Petrozavodsk. 2015. P. 294–301 (in Russian).

7. 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. V. 112. P. 429–448.

8. 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. V. 22. P. 946–962.

9. Islam S., Saito T., Kurasaki M. Phytoltration of arsenic and cadmium by using an aquatic plant, *Micranthemum umbrosum*: Phytotoxicity, uptake kinetics, and mechanism // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2015. V. 112. P. 193–200.

10. 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. V. 468–469. P. 908–932.