

ФИТОРЕМЕДИАЦИОННЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГИДРОСФЕРЫ

Л.Н. Ольшанская, проф. кафедры экологии и охраны окружающей среды Энгельсского технологического института (филиал Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина), д-р хим. наук

Н.А. Собгайда, доц. кафедры экологии и охраны окружающей среды Энгельсского технологического института (филиал Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина), д-р техн. наук

М.Л. Русских, науч. сотр. кафедры экологии и охраны окружающей среды Энгельсского технологического института (филиал Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина), канд. техн. наук

Р.Ш. Валиев, зав. лабораторией Энгельсского технологического института (филиал Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина), асп.

О.А. Арефьева, доц. кафедры экологии и охраны окружающей среды Энгельсского технологического института (филиала Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина), канд. биол. наук

В работе проанализированы основные направления по очистке гидросферных комплексов от поллютантов (тяжелые металлы, нефть и продукты ее переработки) с использованием метода фиторемедиации.

Ключевые слова: высшие водные растения, фитосорбенты, фиторемедиация, тяжелые металлы, сточные воды, нефтепродукты.

Вода — один из главных компонентов биосферы. Существование всех форм жизни на Земле связано с ее потреблением. Поэтому загрязнение водоемов, поверхностных и подземных водных источников несет в себе угрозу существованию природы вообще и человека, в частности. Качество питьевой воды в настоящее время является одной из актуальнейших проблем современности. Водные ресурсы многих регионов оказались под угрозой в результате целого ряда видов человеческой деятельности. В последнее десятилетие возникла реальная угроза загрязнения тяжелыми металлами и нефтепродуктами как пресноводных, так и морских водоемов. Источники и пути поступления загрязнений в речные и озерные системы могут быть различными: как непосредственный сброс промышленными предприятиями, так и поступление с поверхностным или подземным стоком с водосборной территории.

В настоящее время растущее поступление сточных вод (СВ) в природные водоемы приобретает характер глобальной экологической угрозы. Промышленные предприятия химического профиля, гальванические цеха, производства черной и цветной металлургии, машиностроительные заводы ежегодно сбрасывают в окружающую среду тысячи тонн токсичных компонентов, среди которых особую опасность вызывают тяжелые металлы. Они обладают биологической активностью, приводящей к отравлению и гибели живых организмов, оказывают на них канцерогенное и мутагенное воздействие, поэтому их очистка обязательна [1].

По данным Гринпис, только в России ежегодно из разорванных труб выливается около 10 млн т нефти. Загрязнение поверхностных и подземных вод при эксплуатации скважин и аварий на нефтепроводах приводит к резкому снижению качества окружающей среды [2].

За последние годы произошло несколько глобальных катастроф (в Испании, на Сахалине, Ладоге и Амуре, в Мексиканском заливе), в результате которых в водные акватории вылились сотни тысяч тонн нефти. Многие акватории уже потеряли способность к самоочищению. Некоторые заливы и бухты нефть превратила в практически мертвые районы [2].

Проблема борьбы с разливами нефти и нефтепродуктов при авариях в настоящее время является актуальной для всего мира. Большое количество нефти поступает в природные воды при ее перевозках водным путем; со сточными водами предприятий нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности. Разливы, утечки нефти и нефтепродуктов, а также отходы производств, как показывает практика, неизбежны при их добыче, переработке и транспортировке. Основное количество аварийных ситуаций регистрируется на предприятиях нефтедобывающей промышленности и трубопроводного транспорта. В отличие от локально расположенных предприятий здесь практически невозможно предусмотреть меры по защите окружающей среды на всей протяженности, достигающей многих тысяч километров. Наибольшую экологическую опасность представляют разливы нефти на поверхности морей, водоемов и рек, так как при этом в течение нескольких часов тонкая пленка нефтепродуктов может покрыть сотни квадратных километров водной поверхности, перемещаясь с течением воды, и разливы нефти довольно сложно локализовать. Образующаяся на водной поверхности пленка углеводородов препятствует поступлению кислорода в воду, нарушается воздухообмен. Кроме того, часть углеводородов растворяется в воде и пагубно воздействует на обитателей водоемов [3].

Таким образом, в последние годы загрязнение водных объектов для большинства регионов мира превратилось в проблему национальной безопасности. Для минимизации отрицательного воздействия поллютантов (тяжелые металлы, нефть, продукты ее переработки и др.) на биосферные комплексы в России и за рубежом используются разнообразные методы очистки сточных вод. Большинство из них являются дорогостоящими и сложными в исполнении. Поэтому актуальным является поиск и разработка методов, позволяющих извлекать экотоксиканты без дополнительной техногенной нагрузки на окружающую среду. Несомненный приоритет по эколого-экономической эффективности и рентабельности признается за методом фиторемедиации [4–6]. Данный метод предполагает использование высших водных растений и ассоциированных с ними микроорганизмов для очистки биосферных комплексов (рис. 1). В этой технологии используются природные процессы, с помощью которых растения и ризосферные микроорганизмы деградируют и накапливают различные поллютанты. Фиторемедиация является высокоэф-

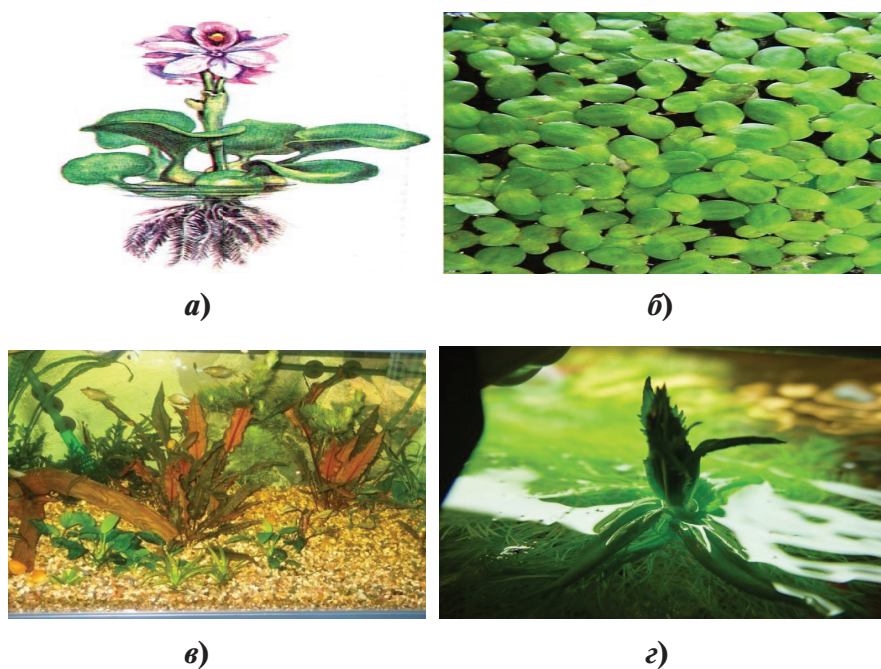


Рис. 1. Высшие водные растения:

a – эйхорния *Eichornia crassipes*; *б* – ряска *Lemna minor*;
в – криптокарина; *г* – лимнофила [8]

фективной технологией очистки гидросферы от ряда органических и неорганических загрязнений. В последние годы фиторемедиация приобрела большую популярность за рубежом, особенно в теплых странах и в России, что отчасти связано с низкой стоимостью этого метода. В процессе фиторемедиации используется только энергия Солнца и растительная масса, поэтому данная технология на порядок дешевле методов, основанных на применении различной техники. Фиторемедиация является экологически чистой, альтернативной ряду химических процессов, экономически оправданной технологией, за которой будущее. Ее недостатками являются сезонность, длительность процесса и невысокая эффективность очистки. Работы, направленные на изучение процессов фиторемедиации, являются весьма актуальными, имеют большое научное и практическое значение и позволят решить ряд фундаментальных задач в области экологии.

Фиторемедиационные технологии в защите гидросферы от тяжелых металлов. К методам, не требующим дополнительных реагентов и дорогостоящего оборудования, относится метод фиторемедиации. Он предполагает удаление токсичных соединений из почвы, грунтовых вод и водоемов при помощи почвенных микроорганизмов и высших водных растений (ВВР), которые являются биосорбентами [7] (эйхорния, ряска, лимнофила и др.).

Поглощаясь растениями, токсиканты инактивируются, проходя разнообразные химические превращения, это долгий процесс, однако затраты на фиторемедиацию обычно не превышают 20 % от стоимости альтернативных технологий. Погибшие и выработавшие жизненный ресурс растения — фитосорбенты — нетоксичны и могут быть использованы в качестве добавок к кормам животным и птицам, для получения компоста и биогаза [8].

Фиторемедиационные технологии привлекают к себе внимание научной общественности вследствие высокой экономической выгоды в сравнении с иными способами очистки загрязненных территорий, а также своей «экологичности» и эстетичности. Фиторемедиация (от греческого «фитон» — растение и латинского «ремедиум» — восстанавливать) — технология очистки окружающей среды с помощью растений и ассоциированных с ними микроорганизмов. Достоинствами этого метода являются — очищение сточных вод от тяжелых металлов (ТМ), органических соединений, моющих веществ, различных ядов и радионуклидов [9–13]. При этом фитомассой в воде уничтожаются вредные бактерии, вода обогащается кислородом, полученным в результате биосинтеза, а большая часть токсичных веществ расщепляется на составные химические элементы. В высшей водной растительности не происходит избыточного накопления опасных количеств вредных веществ. Для очистки вод применяют макрофиты (водоросли), которые входят в состав гидробиологического механизма самоочищения воды, что делает необходимым изучение взаимодействия макрофитов с различными поллютантами в водной среде. Для применения технологии фиторемедиации необходимо подобрать растения-аккумуляторы тяжелых металлов, соответствующие климатическим условиям [14, 15].

Экологическая инженерия, или экотехнология, предлагает ряд вариантов решения проблемы обезвреживания сточных вод, в частности, с использованием технологии «Constructed wetlands» — это экологически сконструированные болотные экосистемы, объединяющие физико-химические, электрохимические и биологические процессы, вовлекающие болотную растительность, почвы и связанные с ними микробные сообщества в процесс очистки сточных вод (рис. 2, 3) [9, 16].

Создаются системы, которые, при условии низкой стоимости и минимальных требований к обслуживанию, управляются, главным образом, естественной энергией (Солнце и гравитация) и способны к самоподдержанию протекающих в них процессов. При этом они надежны и высокоэффективны в трансформации и удалении загрязнителей сточных вод.

В функционировании таких систем важно не только само наличие растительности. На данный момент существует немало публикаций, демонстрирующих значительный эффект от правильного выбора видового состава растений. Самыми распространенными видами макрофитов являются тростник, рогоз и камыш, рдест гребенчатый и курчавый, ряска, элодея, водный гиацинт (эйхорния) и др. Растения накапливают в сотни и тысячи раз больше био-

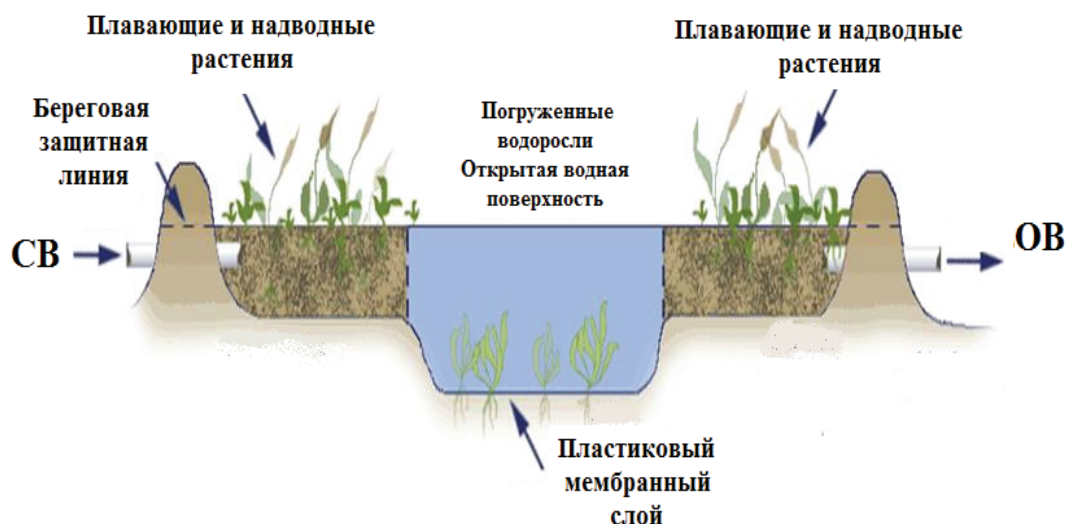


Рис. 2. Принципиальная схема «Constructed wetlands» [16]



Рис. 3. «Constructed wetlands»-биопруд с ВВР [9]

генных веществ по сравнению с их содержанием в окружающей среде. Доказано, что высшие водные растения способны извлекать из воды относительно большие количества урана, радия, тория. В растениях тростника, произрастающего на участках, которые подвергаются воздействию загрязненных вод, накапливается к концу вегетации примерно в 4 раза больше железа, в 100 раз — кальция; в 1,2 — магния; в 1,5 — азота; в 1,3 — фосфора, чем в растениях, не подвергающихся влиянию сточных вод. По данным [10], 1 га густых зарослей тростника может аккумулировать в своей биомассе до 6 т различных минеральных веществ, в том числе калия — 860 кг, азота — 170 кг, фосфора — 120 кг, натрия — 450 кг, серы — 280 кг, кремния — 3 700 кг. Камыш активно аккумулирует марганец, ирис — кальций, осока — железо, ряска — медь. В процессе минерального питания высшие водные растения в природных условиях поглощают и утилизируют в своих органах значительное количество веществ. ВВР способны

аккумулировать радионуклиды (цезий-137, стронций-90, кобальт-60). Высшие водные растения утилизируют азот сточных вод предприятий по производству минеральных удобрений. Извлечение азота из сточных вод биологических прудов с помощью ВВР улучшает качество воды. Так, они выполняют функции минерализации и окисления. Не менее важна роль высших водных растений в регуляции «цветения» воды, поскольку заросшие макрофитами участки водоемов не «цветут».

В процессе фиторемедиации важную роль играет взаимодействие между растением и перифитоном (водные микроорганизмы). Кислород и метаболиты, выделенные растениями, стимулируют развитие и деятельность перифитона, в свою очередь с участием перифитона в процессе окисления и разрушения веществ такой процесс происходит намного быстрее. В результате образуются соединения, более легкодоступные для растений. Так, тростник и камыш ускоряют (с помощью нефтеокисляющих и сапрофитных бактерий) бактериальное разложение нефти и нефтепродуктов в 3–5 раз. Для фенольных соединений скорость окисления увеличивается в 2–3 раза.

В северных районах основной проблемой фитотехнологий является сложность их функционирования при низких температурах. Однако опыт применения таких систем в Дании (130 сооружений), Швеции и Норвегии (71), Канаде (67) и Северной Америке (600) показывает, что искусственно созданные биоплато в качестве сооружений доочистки стоков являются эффективными даже при низких температурах. При этом зимнее снижение активности систем незначительно по сравнению с теплым летним периодом.

Во многих странах Америки довольно широко используются системы очистки шахтных вод на плантациях камыша и тростника [17]. Описаны сооружения с камышовой растительностью для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в Нидерландах, Японии, Китае [18–19]; для очистки загрязненного поверхностного стока в Норвегии, Австралии [20] и в других странах. Стойкость камыша к действию больших концентраций загрязняющих веществ позволила довольно успешно использовать его для очистки сточных вод свиноводческих комплексов в Великобритании [21].

В г. Бентон (США) с населением 4 700 человек с 1985 г. осуществляется очистка бытовых сточных вод в прудах с зарослями камыша и других водных растений. Подсчитано, что стоимость такой системы очистки в 10 раз меньше, чем стоимость традиционных систем при удовлетворительном качестве очистки воды от соединений азота, фосфора, взвешенных и органических веществ [22]. В Ирландии (г. Вильямстоун) успешно эксплуатируется система совместной очистки хозяйственно-бытовых вод (72 %) и поверхностного стока (28 %), сконструированная в виде трех мелководных лагун, две из которых засажены камышом и рогозом, а третья представляет собой биопруд с плавающими водными растениями — лилией и ряской. В процессе очистки вода очищается до следующих показателей (мг/л): биологическое потребление кислорода (БПК) — 9, взвешенные вещества — 9, полный азот — 14,2, аммиак — 0,8, нитраты — 9,2, полный фосфор — 4,45, ортофосфаты — 3,15. Среднее процентное уменьшение концентраций загрязняющих веществ в системе за двухлетний период изучения составляет: 48 % для БПК, 83 % для взвешенных веществ, 51 % для общего азота, 13 % для общего фосфора, удаление патогенных организмов достигает 99,77 % [23].

Очистные системы вторичной и третичной очистки бытовых сточных вод, основанные на использовании элодеи, пригодны для применения в умеренном климате, где могут круглый год удалять биогенные элементы из сточных вод [24].

По результатам промышленно-экспериментальных исследований процесса очистки бытовых сточных вод с использованием водного гиацинта в США, степень очистки по БПК₅ достигает 97–98 % [23]. В Китае водный гиацинт используется для очистки сточных вод кинофабрики от серебра [25]. Установлено, что эффективность очистки воды от серебра, взвешенных веществ, соединений фосфора и азота, соответственно, составляла 100 %, 91 %, 53,9 %, и 92,9 %, при этом БПК и химическое потребление кислорода (ХПК) уменьшалась на 98,6 % и 91 %. Предложенный метод позволяет отказаться от использования сорбционной очистки.

В России в Институте цитологии и генетики разработана технология очистки сточных вод с использованием водного гиацинта [11]. Экспериментальная работа была проведена для сточных вод комплекса по разведению свиней. Очистка проводилась в биопрудах. Концентрация азота аммонийного снижалась (мг/л) с 30–50 до 4–5, БПК₅ — со 150 до 20–30, ХПК с 300 до 25–30, концентрация растворенного кислорода возрастала от 0,5 до 2–5 мг О₂/л.

Таким образом, фиторемедиационные технологии обезвреживания сточных вод можно назвать удовлетворительным дополнением, а в ряде случаев — альтернативой традиционным методам интенсивной очистки загрязненных вод, о чем свидетельствует как обширная география распространения описанной технологии, так и многочисленные исследования в области экологической инженерии систем защиты водных объектов от загрязнения сточными водами [12, 13].

Список литературы

1. **Государственный доклад** «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2009 г.». М.: НИИ-Природа, 2010.
2. **Банин И.В.** Аналитический вестник Совета Федерации РФ / И.В. Банин // Гринпис России. 2010. № 5 (391).
3. **Технология** биологической очистки и доочистки малых рек, водоемов и стоков с помощью эйхорнии / А.Г. Дмитриев, Б.Ф. Рыженко, Ю.Ф. Змиевец, К.Г. Сокол // Экология и промышленность России. 1998. Апрель.
4. **Русских М.Л.** Разработка энергосберегающей технологии доочистки промышленных и бытовых стоков от ионов тяжелых металлов / М.Л. Русских, О.А. Арефьева, Л.Н. Олышанская // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2011. № 7.
5. **Галиулин Р.В.** Фиторемедиация почв и промышленных сточных вод, загрязненных тяжелыми металлами: концептуальные модели технологий фитоэкстракции, фито- и ризофильтрации / Р.В. Галиулин, Р.А. Галиулина, Б.И. Кочуров // Экологические системы и приборы. 2004. № 2.
6. **Высшие** водные растения для очистки сточных вод / Ю.А. Тарушкина, Л.Н. Олышанская, О.Е. Мечева, А.С. Лазуткина // Экология и промышленность России. 2006. № 5.
7. **Поглощение** ряда тяжелых металлов из водных растворов растениями водного гиацинта (*Eichhornia crassipes* (mart.) solms) / О.М. Минаева, Е.Е. Акимова, К.М. Минаев и др. // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2009. № 4.
8. **Протасов В.Ф.** Экология, здоровье и охрана окружающей среды в России. М.: Финансы и статистика, 2000.
9. **Сивкова Е.Е.** Использование технологии «constructed wetlands» для очистки сточных вод малых населенных пунктов и предприятий / Е.Е. Сивкова, С.Ю. Семенов // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2010. № 4 (12).
10. **Аккумуляция** железа, марганца, цинка, меди и хрома у некоторых водных растений / А.И. Кадукин, В.В. Красинцева, Г.И. Романова и др. // Гидробиологический журнал. 1982. Т. 18. № 1.
11. **Мишина А.Я.** Злостный сорняк, спасающий водоемы / А.Я. Мишина // Биология. 2001. № 15.
12. **Биоплато** и их роль в очищении воды / П.И. Погожев, И.Г. Бойкова, С.В. Гордеева, С.В. Артамонов // Проекты развития инфраструктуры города. Вып. 5. Моделирование и анализ объектов городских инженерных систем: сб. науч. тр. М.: Прима-Пресс, 2005.
13. **Захарченко М.А.** Очистка сточных вод и загрязненных грунтов с помощью эофитотехнологий / М.А. Захарченко, И.А. Рыжикова // Мир техники и технологий. 2005. № 11 (48).
14. **Ran N.A.** pilot study of constructed wetlands using duckweed (*Lemna gibba* L.) for treatment of domestic primary effluent in Israel / N. Ran, M. Agami, G. Oron // Water Research. 2004. № 38.
15. **Петрова Н.А.** Экспериментальные исследования воздействия ионов токсичных металлов на структуру природных сообществ планктонных водорослей и водных грибов / Н.А. Петрова, И.В. Иофина, Д.С. Ульянова // Экологическая химия. 2002. № 11 (4).
16. **Высшие** водные растения — как барьер от загрязнения водоемов. Режим доступа: <http://pgoforth.myweb.uga.edu/page3.html>.

17. **Остроумов С.А.** Фиторемедиация и зооремедиация водных экосистем в связи с теорией биотического самоочищения вод / С.А. Остроумов // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. 2007. Т. 1 (3).
18. **Кравец В.В.** Высшая водная растительность как элемент очистки сточных вод / В.В. Кравец, Л.Б. Бухгалтер, А.П. Акользин // Экология и промышленность России. 1999. № 8.
19. **Gleichman-Verheyc E.G** Alvalwaterzuivering met helofytenfilters, een haalbaarheidsstudie / E.G. Gleichman-Verheyc // Tijdschr. watervoorz. en. akvalwater. 1992. № 3.
20. **Дин Яньхуа.** Исследование образцового проекта системы очистки сточных вод на увлажненных землях с зарослями тростника / Яньхуа Дин // Chim. J. Environ. Sci. 1992. № 2.
21. **Assessment** of Pollutant Removal Performance in a Bio-filtration System: Preliminary Results / S.D. Lloyd, T.D. Fletcher, T.H.F. Wong, R.M. Wootton (Australia) // 2nd South Pacific Stormwater Conf.; Rain the Forgotten Resource, 27-29 June 2001. Auckland: New Zealand.
22. **Короткевич Л.Г.** К вопросу использования водоохранно-очистных свойств тростника обыкновенного / Л.Г. Короткевич // Водные ресурсы. 1976. № 5.
23. **Химический** состав макрофитов и факторы, определяющие концентрацию минеральных веществ в высших водных растениях / Под ред. И.М. Распопова. Л.: Наука, 1983.
24. **Дмитриева Н.Г.** Роль макрофитов в превращении фосфора в воде / Н.Г. Дмитриева, Л.О. Эйнон // Водные ресурсы. 1985. № 5.
25. **Стольберг В.Ф.** Биоплато — эффективная малозатратная экотехнология очистки сточных вод / В.Ф. Стольберг, В.Н. Ладыженский, А.И. Спирин // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. 2003. № 3.