



УДК 504.4:628.32

Листостебельные мхи в ремедиации ливневых вод с территории промышленных предприятий

Д. В. Ульрих¹, С. С. Тимофеева², М. Н. Брюхов¹

¹Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

²Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Иркутск

Аннотация. В ходе исследований по разработке и внедрению фитотехнологий очистки сточных вод с загрязнённых территорий промышленных предприятий проведено обследование территории Южного Урала и осуществлён отбор водных растений из местной флоры. Установлено, что макроконцентратором тяжёлых металлов является листостебельный мох *Scorpidium scorpioides* (Hedw.) Limpr. В лабораторных и натуральных исследованиях изучены закономерности накопления мхом металлов и мышьяка. Растения способствуют изменению рН и соосаждению металлов в виде гидроксидов. Рекомендовано использование мха в качестве компонента фитоценоза в инженерных сооружениях по перехвату тяжёлых металлов из ливневых и талых вод, поступающих с загрязнённой территории г. Карабаш (Челябинская обл.).

Ключевые слова: ремедиация загрязнённых территорий, ливневые и талые сточные воды, фитотехнологии, тяжёлые металлы, макрофиты, листостебельный мох, аккумуляция металлов.

Введение

В настоящее время ремедиации загрязнённых территорий уделяется пристальное внимание. С этой целью проводятся исследования по выявлению и инвентаризации зон загрязнения, разработке технологий такого восстановления. В промышленно развитых странах уже создана целая индустрия по ремедиации территорий, успешно работают фирмы, специализирующиеся на разработке ремедиационных технологий и оборудования, в последние годы данное направление стало развиваться и в России.

Ремедиация загрязнённых территорий может осуществляться двумя принципиально разными способами: первый основан на удалении загрязнителей из почв тем или иным способом; второй предполагает проведение мероприятий, направленных на стабилизацию зоны загрязнения и на снижение подвижности и биоактивности загрязнителей путём создания инженерно-геологических способов изоляции загрязнённых мест, перехвата ливневых и талых вод с загрязнённых территорий.

К числу перспективных способов ремедиации относится фиторемедиация, которая основана на использовании возможностей растений концентрировать загрязнители, в первую очередь тяжёлые металлы, и предполагает последующую утилизацию биомассы растений с рециклингом металлов.

Водные растения (гидрофиты) имеют высокую биомассу в водоёмах и выполняют двойную роль: являются стимуляторами жизнедеятельности микроорганизмов, а также поглощают загрязняющие вещества и регулируют солевое равновесие. Они выполняют следующие основные функции:

- фильтрационную (способствуют осаждению взвешенных веществ);
- поглотельную (поглощают биогенные элементы, некоторые органические вещества);
- накопительную (способны накапливать некоторые металлы и труднорастворимые органические соединения);
- санитарную (обладают бактерицидными свойствами);
- окислительную (в процессе фотосинтеза обогащают воду кислородом);
- детоксикационную (способны накапливать токсичные вещества и превращать их в нетоксичные).

В практике фитотехнологической обработки сточных вод чаще всего используют три основных группы водных растений: гидатофиты – погружённые растения; нейстофиты, или свободноплавающие, – растения с плавающими вегетативными органами; гелофиты – воздушно-водные растения с побегами, часть которых находится в воде, а часть над поверхностью.

Исследования по разработке и внедрению фитотехнологий очистки сточных вод и обезвреживания отходов в условиях резко конти-

ментального климата ведутся более 30 лет под руководством одного из авторов: разработаны и внедрены технологии фиторемедиации сточных вод золотообогатительных фабрик в Узбекистане, свинцово-цинкового комбината в Казахстане и др. [14].

Настоящее исследование предпринято на Южном Урале – в регионе, насыщенном горнодобывающими и перерабатывающими предприятиями. Перед авторами была поставлена задача найти в составе флоры Южно-Уральского региона растения, которые можно рекомендовать для использования в фиторемедиации воды на территории, подверженной влиянию Карабашского медеплавильного комбината – одного из крупнейших медеплавильных центров России.

Материалы и методы

Многолетняя добыча колчеданных руд и обработка их на Карабашском медеплавильном комбинате нанесли заметный ущерб окружающей природной среде, в том числе водным объектам. Основными загрязнителями территории являются тяжёлые металлы (ТМ): медь, цинк, свинец, мышьяк, кадмий, железо и др.

Особенно серьёзному техногенному загрязнению подверглись бассейны рек Сак-Элга, Аткус и Аргазинское водохранилище. Отходы производства обогатительной фабрики до её закрытия в 1989 г. сбрасывались в р. Сак-Элга и в специально созданные хвостохранилища, в которых, как и в пойме реки, образовались обширные отложения сульфидных материалов, окисляющихся на поверхности под воздействием воды и воздуха. Исследования этой территории установили смыв «хвостов» в Аргазинское водохранилище – источник водоснабжения Челябинского промышленного узла, в котором наблюдается многократное превышение ПДК меди, цинка, марганца, железа. Кроме названного, источниками загрязнения рек Сак-Элга и Аткус являются также: промышленные, хозяйственные и ливневые сточные воды г. Карабаш; водоток, собирающий промышленные и ливневые стоки с территории медеплавильного комбината; пруд-отстойник нейтрализованных рудничных вод шахты «Центральная»; кислые прудки, образовавшиеся вследствие затопления отработанной шахты «Южная»; газопылевые выбросы в результате их аэрозольного переноса.

Сбор водных растений производился с мая по август в 2012–2013 гг. в водотоках близ городов Челябинск и Карабаш и на прилегающих территориях, различающихся по степени антропогенной нагрузки. Надводную часть рас-

тений после тщательного ополаскивания последовательно высушивали до воздушно-сухого, затем до абсолютно сухого состояния и озоляли до белой золы в муфельной печи при 450 °С. Содержание тяжёлых металлов в золе растений определяли методом плазменной ИСП-спектроскопии в лаборатории кафедры водоснабжения и водоотведения Южно-Уральского государственного университета.

Результаты и обсуждение

Исследованные макрофиты широко распространены в водоёмах Южного Урала и относятся к 4 экологическим группам: I – свободноплавающие неприкреплённые (ряска малая *Lemna minor* и водяной орех *Trapa natans*); II – плавающие прикреплённые (кубышка жёлтая *Nuphar luteum* и горец земноводный *Polygonum amphibium*); III – погружённые (элодея канадская *Elodea canadensis*, роголистник погружённый *Ceratophyllum demersum*, рдест пронзённолистный *Potamogeton perfoliatus*); IV – надводные (земноводные или воздушно-водные) (стрелолист обыкновенный *Sagittaria sagittifolia*, сусак зонтичный *Butomus umbellatus*, частуха подорожниковая *Alisma peantago-aquatica*, манник наплывающий *Glyceria fluitans*, болотница болотная *Eleocharis palustris*, камыш озёрный *Scirpus lacustris*, тростник обыкновенный *Phragmites communis* и др. Наиболее распространённым видом на данной территории оказался листостебельный мох *Scorpidium scorpioides* (Hedw.) Limpr. Это представитель широко распространённого рода двудомных болотных и водных мхов, образующий очень рыхлые, блестящие, от желтовато-зелёных до почти чёрных дерновинки. Данный вид широко распространён в Арктике и на севере бореальной зоны; относительно недалеко проникает на юг в горах Евразии – до Центральной Европы, Алтая, севера Монголии, но в Америке по Андам заходит в Центральную и Южную Америку. В европейской части России относительно нередок в Карелии и на Кольском полуострове, но южнее очень редок. Встречается на территории Восточной Сибири, в том числе в оз. Байкал на глубине 0,5–1,5 м в устье р. Сарма, губах Мужинай, Слюдянка, устье р. Верх. Ангара, Чивыркуйском заливе. Обычно растёт в мочажинах и озерах болотных комплексов, питаемых сильно минерализованными грунтовыми водами; иногда растения лежат в пятнах сильно обводнённого, никогда полностью не пересыхающего торфа.

На примере исследования накопления меди в пробах растений, отобранных на загрязнён-

ной территории, установлены следующие закономерности. В диапазоне низких концентраций металла в донных отложениях максимальные значения коэффициентов накопления меди K_n отмечаются для растений группы I. Представители группы II аккумулируют металл в 3–14 раз интенсивнее в сравнении с растениями первой группы ($K_{n \text{ II гр.}} = 0,81$). Погружённые растения (группа III) накапливают медь в 6–14 раз интенсивнее, чем растения предыдущих групп ($K_{n \text{ III гр.}} = 3,78$). Коэффициент накопления у представителей группы IV в 4–5 раз выше, чем у других групп ($K_{n \text{ IV гр.}} = 0,798$). Наивысший коэффициент накопления меди зафиксирован у листостебельного мха *S. scorpioides*.

Исследования возможности использования этого растения в качестве компонента инженерных сооружений, создающихся для перехвата тяжёлых металлов из ливневых и талых вод, были выполнены нами в условиях лабораторного и натурного моделирования. В условиях лабораторного моделирования в сосуды ёмкостью 3–5 л помещали навески растений из расчёта 1–10 г/л, заполняли модельными сточными водами и экспонировали в термолюминостате при освещённости 2–3,5 тыс. лк. и температуре от 0 до 25 °С. Спустя определённые интервалы времени анализировали остаточное содержание металлов в тканях растения. Во всех исследованиях параллельно ставили контрольные эксперименты: сточные воды без растений, а также с инактивированными растениями. В условиях натурного моделирования создавали искусственное биоплато на участке хвостохранилища, высаживая скорпи-

диум из расчёта 20 дерновин на 1 м², на которое подавали сточную воду. Ткани мха через определённое время экспозиции анализировали на содержание металлов. Содержание металлов в воде определяли колориметрическим методом.

Экспериментально установлено, что скорпидиум скорпионовидный при экспозиции в сточной воде в течение 7 сут. накапливает в листьях до 0,05 % Cd, до 0,09 % Cu, до 0,013 % Pb, до 2,15 % Fe, до 0,6 % Zn, до 0,03 % As.; в стеблях до 0,03 % Cd, до 0,3 % Cu, до 0,16 % Pb, до 10,3 % Fe, до 0,7 % Zn, до 0,01 % As.

По величине аккумуляции металлов макрофиты условно подразделяются на макро- ($K_n > 2$), микро- ($K_n = 1-2$) и деконцентраторы ($K_n < 1$) [6]. Один и тот же вид при разных уровнях содержания металлов в донных отложениях может одновременно относиться к разным классификационным группам. Установлено, что коэффициент накопления мхом меди и других металлов изменяется в диапазоне от 2 до 4, следовательно, скорпидиум относится к группе макроконцентраторов.

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных исследований по накоплению скорпидиумом мышьяка из модельной сточной воды при экспозиции в течение 21 сут. и биомассе растений 10 г/дм³.

В условиях натурного моделирования в летний период 2013 г. на экспериментальной ботанической площадке площадью 100 м² и объёмом 100 м³, расположенной в зашламованной пиритом пойме р. Сак-Элга, исследовали накопление посадками скорпидиума металлов из сточных вод (табл. 2).

Таблица 1

Динамика извлечения мышьяка из сточных вод в присутствии *S. scorpioides* и его накопление в растении

Время, сут.				Содержание As в листе, %	Содержание As в стебле, %	К накопл. в листе	К накопл. в стебле
0	7	14	21				
Концентрация As в воде, мг/дм ³							
2	0,5	0,4	0,1	0,0005	0,0025	24,5	13
5	1	0,5	0,2	0,0012	0,005	24	10
7	1,5	0,7	0,35	0,0017	0,008	24	11,4
8,5	2	1,5	0,9	0,002	0,011	23,5	12,9
10	3	2	1,2	0,0023	0,013	25	13
12	5,2	2,25	1,5	0,003	0,016	25	13,3
14	5,6	2,5	1,6	0,03	–	–	–

Таблица 2

Показатели накопления тяжёлых металлов в тканях *S. scorpioides* на экспериментальной площадке в пойме р. Сак-Элга

Металлы	Cd ²⁺	Cu ²⁺	Pb ²⁺	Fe ³⁺	Zn ²⁺	As ^{V+}
листья, %	0,22	0,05	0,13	2,13	0,66	0,01
стебель, %	0,03	0,3	0,16	10	0,7	0,05
Поглощено, мг/кг	86,0	629	510	2127	234	108

Установлено, что биомасса растений в течение 3 мес. эксперимента на биоплато увеличилась примерно в 3–4 раза.

Заключение

Листостебельный мох скорпидиум скорпионовидный относится к растениям – макроконцентраторам тяжёлых металлов. Растения способствуют изменению pH и соосаждению металлов в виде гидроксидов. Лабораторные и натурные испытания доказали возможность и целесообразность использования скорпидиума скорпионовидного в качестве компонента фитоценоза водоёмов в составе инженерных сооружений по перехвату тяжёлых металлов из ливневых и талых вод с загрязнённой территории г. Карабаш.

Публикация статьи осуществлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 13-04-06068-г.

Литература

1. Тимофеева С. С. Роль макрофитов в обезвреживании флотореагентов / С. С. Тимофеева, Г. Д. Русецкая // *Водн. ресурсы.* – 1989. – № 4. – С. 130–134.

2. Тимофеева С. С. Роль макрофитов в обезвреживании хлорированных фенолов / С. С. Тимофеева, А. М. Бейм // *Водн. ресурсы.* – 1992. – № 1. – С. 89–96.

3. Тимофеева С. С. Использование макрофитов для интенсификации биологической очистки роданидсодержащих сточных вод / С. С. Тимофеева, О. А. Меньшикова // *Водн. ресурсы.* – 1985. – № 6. – С. 80–85.

4. Тимофеева С. С. Биотехнологическая очистка сточных вод объектов нефтедобычи / С. С. Тимофеева, С. С. Тимофеев // *Безопасность в техносфере* – 2010. – № 4. – С. 12–165.

5. Ялынская Н. С. Накопление микроэлементов и тяжелых металлов в растениях рыбоводных прудов / Г. С. Ялынская, А. Г. Лопотун // *Гидробиол. журн.* – 1993. – Т. 29, № 5. – С. 40–46.

6. Никаноров А. М. Тяжелые металлы в организмах ветлендов России / А. М. Никаноров, А. В. Жулидов, В. М. Емец. – СПб. : Гидрометеоздат, 1993. – 282 с.

7. Лукина Л. Ф. Физиология высших водных растений / Л. Ф. Лукина, Н. Н. Смирнова. – Киев : Наукова думка, 1998. – 184 с.

Scorpidium moss in industrial wastewater remediation

D. V. Ulrich¹, S. S. Timofeeva², M. N. Bryukhov¹

¹National Research South Ural State University, Chelyabinsk

²National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk

Abstract. We present analysis of remediation methods for polluted industrial areas, where is shown that the most effective method is phytoremediation. We performed examination of the Southern Ural territory and performed a selection of aquatic plants of the local flora. It was found that a leafy moss of genus *Scorpidium* (Schimp.) Limpr is a macroconcentrator of heavy metals. Plants contribute to changes in pH and codeposition of metals as hydroxides. In laboratory and field studies we examined patterns of accumulation of metals and arsenic in *Scorpidium* and recommended its use as a component of ecosystem and in creation of engineering structures to intercept heavy metals from rain and snowmelt in contaminated areas of Karabash city.

Keywords: remediation of contaminated areas, rain and melted snow wastewater phytotechnology, heavy metals, macrophytes, scorpidium moss, accumulation of metals.

Ульрих Дмитрий Владимирович
кандидат технических наук, доцент
Национальный исследовательский Южно-Уральский
государственный университет
454000, Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, 76
тел. (351) 267–96–66

Ulrikh Dmitriy Vladimirovich
Ph. D. of Technics, Associate Professor
National Research South Ural State University
76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454000
tel.: (351) 267–96–66

Тимофеева Светлана Семеновна
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой
Национальный исследовательский Иркутский
государственный технический университет
664047, Иркутск, ул. Лермонтова, 83
тел.: (3952) 40–51–06
E-mail: timofeeva@istu.edu

Timofeyeva Svetlana Semenovna
Dr. Sci. in Technics, Professor.
National Research State Irkutsk Technical University
83 Lermontov st., Irkutsk, 664047
tel.: (3952) 40–51–06
E-mail: timofeeva@istu.edu

Брюхов Михаил Николаевич
аспирант
Национальный исследовательский Южно-Уральский
государственный университет
454000, Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, 76
тел. (351) 267–96–66

Bryukhov Mikhail Nikolayevich
Doctoral Student
National Research South Ural State University
76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454000
tel.: (351) 267–96–66