

ОЦЕНКА ФИТОРЕМЕДИАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ СРЕДНЕЙ ПОЛОСЫ РОССИИ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

В.Э.К. Аль Харбавии, Д.И. Башмаков, А.С. Лукаткин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва», Саранск, Россия, aslukatkin@yandex.ru

Аннотация. В модельных опытах анализировали возможность использования *Chenopodium album* L., *Amaranthus retroflexus* L., *Taraxacum officinale* Wigg., *Arctium tomentosum* Mill., *Medicago sativa* L. для очистки сточных вод предприятий от тяжелых металлов (ТМ). Растения выращивали 1–2 недели на растворах с моно- и полизагрязнением ТМ в концентрациях 1 мкМ – 1 мМ или на образцах промышленных вод. Люцерна и лопух наиболее эффективно очищали промышленные воды предприятий от ТМ.

Ключевые слова: растения, сточные воды, фиторемедиация, тяжелые металлы

DOI: 10.31255/978-5-94797-319-8-1021-1024

В настоящее время растущее поступление сточных вод в природные водоемы и водотоки приобретает характер глобальной экологической угрозы и все сильнее привлекает внимание ученых и исследователей всего мира. Стоки предприятий различных отраслей промышленности содержат многочисленные токсиканты, среди которых особую опасность представляют тяжелые металлы (ТМ). Наносящие серьезный экологический ущерб тяжелые металлы обладают биологической активностью, мутагенными и канцерогенными свойствами, приводящими к повреждению и гибели организмов. Для минимизации отрицательного влияния ТМ на гидросферу необходимы усовершенствование существующих и разработка новых методов очистки стоков путем снижения концентраций токсикантов до принятых нормативов водопользования. Наиболее эффективными, рациональными и экологичными могут стать способы очистки, основанные на сочетании ризофилтрации и способности растений аккумулировать токсиканты. Изучение процессов фиторемедиации тяжелых металлов из сточных вод с помощью различных металлоустойчивых растений-аккумуляторов, как и поиск гипераккумулирующих видов флоры, имеют фундаментальное и практическое значение.

Растения популяций, продолжительно произрастающих в условиях антропогенного или естественного загрязнения ТМ, способны адаптироваться к повышенному содержанию металлов в среде [Ernst, 2006]. Поэтому для проведения исследований нами были отобраны несколько видов сорной флоры средней полосы России (*Chenopodium album*, *Amaranthus retroflexus*, *Taraxacum officinale*, *Arctium tomentosum*), произрастающих на загрязненных ТМ территориях (промышленные пустыри с преимущественным загрязнением Pb, Cu, Ni и Zn), а также люцерна посевная (*Medicago sativa*), которые известны как металлоустойчивые растения [Bashmakov et al., 2008; Шоу и др., 2009; Башмаков, Лукаткин, 2009; Al Harbawee et al., 2017; Башмаков и др., 2017]. Свежесобранные семена закладывали в песок и хранили около 3 месяцев при температуре 2–4 °С для прохождения холодной стратификации [Журбицкий, Ильин, 1968].

Семена проращивали в водной культуре в факторостатируемых условиях (освещенность около 80 мкМ фотонов/м²·с, фотопериод 14 ч, температура 21 °С) на растворах, содержащих смесь эквимольных растворов солей четырех ТМ (Pb(NO₃)₂; ZnSO₄·7H₂O; CuSO₄·5H₂O; NiSO₄·7H₂O – все квалификации чда) в концентрациях 1 мкМ, 10 мкМ, 0,1 мМ и 1 мМ, или на растворах отдельных солей металлов в тех же концентрациях. Тестирующие концентрации подобраны в ранее проведенных

экспериментах с учетом уровня загрязнения почв металлами из мест произрастания и охватывали диапазон от дефицитных и оптимальных до сублетальных и летальных [Башмаков, Лукаткин, 2009]. Контролем служили растения, выращенные в дистиллированной воде. На 7-е сутки роста определяли воздушно-сухую массу, а также концентрацию ТМ в побегах и корнях на атомно-адсорбционном спектрометре Shimadzu AA-7000 [ГОСТ 30692-2000; Методические указания..., 1992].

Для определения способности растений удалять ТМ из промышленно-загрязненных вод были взяты образцы промышленных вод с двух предприятий по производству сухих и жидких батарей (завод № 1 и завод № 2), а также на очистных сооружениях компании по производству аккумуляторов. Основными загрязняющими ТМ в образцах воды были Pb, Zn, Cu и Ni в концентрациях от 0,25 г/л (3,8 мМ/л) до 7,51 г/л (127,9 мМ/л). В лаборатории была проведена фильтрация образцов для избавления от примесей. Семена исследуемых растений выращивали на каждом из образцов воды в течение 14 суток, затем определяли содержание ТМ в органах растений.

Все лабораторные опыты проводили три раза, каждый опыт состоял из 100–200 семян или проростков в каждом варианте. Для определения содержания ТМ и сухой массы отбирали по 20–40 растений из каждой повторности, образец (вариант) включал 3 повторности. Существенность различий оценивали по критерию Дункана при уровне значимости 95%. Результаты обрабатывали статистически с использованием программ «MS Excel» и «Statistica», в таблицах представлены средние значения из всех опытов с их стандартными ошибками.

Анализ накопления ТМ в органах исследуемых растений позволил разделить растения на группы по способности накапливать ТМ. Поскольку амарант аккумулировал ТМ в большей степени в корнях, чем в надземных органах, его можно отнести к видам-исключителям ТМ. У мари белой ТМ накапливались преимущественно в надземных органах при низком загрязнении среды ионами Pb^{2+} , Cu^{2+} и Zn^{2+} , что характеризует мари как аккумулятор, а при высоком уровне – в корнях, т.е. растение принадлежит к исключителям. При экспозиции люцерны на растворах, содержащих одиночные ТМ, металлы аккумулировались в корнях в большей степени, чем в надземных органах, на основании чего люцерну можно отнести к исключителям; однако при экспозиции на растворе, содержащем смесь ТМ (что приближено к естественной среде), люцерна выступает как ярко выраженный аккумулятор как при низком, так и высоком уровне загрязнения среды. Лопух можно отнести к аккумуляторам цинка и исключителям остальных ТМ. При выращивании одуванчика на растворе, содержащем один ТМ, этот вид принадлежит к аккумуляторам меди, а также цинка при низком содержании металла в среде; однако в варианте с экспозицией на смеси ТМ одуванчик выступает в качестве выраженного аккумулятора всех изученных ТМ и при низкой, и при высокой дозе ТМ в среде.

Исследованные растения были гипераккумуляторами только при высоких дозах ТМ в среде. Так, содержание ТМ в растениях амаранта превышало 1 г/кг сухой массы при высокой концентрации Pb^{2+} , Zn^{2+} и Ni^{2+} в среде, но не в варианте с миксом металлов в среде. Мари являлась гипераккумулятором свинца и цинка как в варианте с монозагрязнением данными металлами, так и в варианте со смесью ТМ в среде. В варианте с загрязнением одним ТМ люцерна является гипераккумулятором только свинца, а одуванчик – цинка. У растений лопуха ни в одном из вариантов эксперимента содержание металла не превышало 1 г/кг сухой массы.

Мы рассчитали примерное количество ТМ, которое можно будет удалить из сточных вод предприятий при использовании исследуемых растений (табл. 1).

Проанализировав способность растений аккумулировать ТМ, а также ответные физиологические и биохимические реакции растений на действие ТМ, можно заключить,

что все исследуемые виды можно использовать в качестве фиторемедиантов, а биомасса растений, содержащих извлеченные из загрязненной среды ТМ, может быть использована для получения металлов. Однако, с учетом развиваемой биомассы, среди исследованных растений наилучшие показатели извлечения металлов из 1 м³ сточной воды предприятий были у лопуха, с помощью которого можно извлечь от 0,9 до 1,5 мг Zn, и, особенно, люцерны – от 35 до 70 мг Ni, от 17 до 18,6 мг Pb и от 5,4 до 9,4 мг Cu.

Таблица 1.

Количество металлов, расчетно извлекаемое за одну процедуру фиторемедиации при помощи исследованных растений, мг ТМ на 1 м³ воды за 2 недели

	<i>Arctium tomentosum</i>	<i>Taraxacum officinale</i>	<i>Medicago sativa</i>	<i>Amaranthus retroflexus</i>	<i>Chenopodium album</i>
Pb _{max}	13,3±4,2	10,7±3,8	18,7±7,2	8,6±2,8	9,0±0,3
Pb _{min}	13,1±4,1	10,9±4,4	16,9±6,4	8,0±2,8	9,9±0,4
Zn _{max}	1,5±0,2	0,9±0,2	1,1±0,2	0,6±0,0	0,8±0,1
Zn _{min}	0,9±0,1	0,6±0,2	0,8±0,1	0,4±0,0	0,6±0,1
Cu _{max}	9,4±1,0	6,5±1,3	11,8±1,4	3,1±0,1	2,7±0,2
Cu _{min}	5,4±0,1	4,6±1,5	5,9±1,2	2,2±0,1	1,8±0,2
Ni _{max}	60,9±6,2	47,1±8,6	70,4±6,8	25,7±1,2	28,4±2,0
Ni _{min}	36,3±0,5	33,6±10,0	35,0±6,4	17,3±1,0	18,9±2,1

Также были выявлены наиболее эффективные потенциальные биоремедиаторы сточных вод. В таблице 2 приведена эффективность одной процедуры фиторемедиации, оцененная по степени очистки воды.

Таблица 2.

Степень очистки промышленных сточных вод при проведении одной процедуры фиторемедиации, % от исходного количества ТМ за 2 недели

	<i>Arctium tomentosum</i>	<i>Taraxacum officinale</i>	<i>Medicago sativa</i>	<i>Amaranthus retroflexus</i>	<i>Chenopodium album</i>
Pb _{min}	0,27±0,08	0,22±0,08	0,38±0,15	0,17±0,06	0,18±0,01
Pb _{max}	0,93±0,33	0,77±0,34	1,20±0,50	0,57±0,22	0,70±0,12
Zn _{min}	0,36±0,03	0,24±0,07	0,31±0,06	0,17±0,01	0,22±0,03
Zn _{max}	0,59±0,08	0,34±0,07	0,62±0,11	0,24±0,01	0,33±0,04
Cu _{min}	0,45±0,01	0,38±0,13	0,49±0,10	0,18±0,01	0,15±0,02
Cu _{max}	0,78±0,09	0,54±0,11	0,98±0,11	0,25±0,01	0,22±0,01
Ni _{min}	0,48±0,01	0,45±0,13	0,47±0,08	0,23±0,01	0,25±0,03
Ni _{max}	0,81±0,08	0,63±0,11	0,94±0,09	0,34±0,02	0,38±0,03

Люцерна и лопух наиболее эффективно очищали промышленные воды предприятий от свинца (вынос Pb составил 0,93–1,2% от валового содержания этого металла в воде), цинка (вынос из воды 0,31–0,62 и 0,36–0,59, соответственно), меди (0,49–0,98 и 0,45–0,78%, соответственно). Однако все эти данные приведены для очень малых растений (которые росли в течение 2 недель). Если же продлить срок выращивания до 3–4 месяцев, когда растения растут и развивают большую биомассу (до 300 г сухой массы/растение), то эффективность фиторемедиации может достигать 26–58%.

Таким образом, ряд видов сорной флоры средней полосы России (*Chenopodium album*, *Amaranthus retroflexus*, *Taraxacum officinale*, *Arctium tomentosum*), а также люцерна посевная (*Medicago sativa*) показали высокую степень аккумуляции ТМ в различных частях растений, и могут рассматриваться как потенциально высокоэффективные фиторемедиаторы загрязненных тяжелыми металлами сточных вод

промышленных предприятий. Поскольку все эти виды могут произрастать на загрязненных ТМ территориях и представляют собой металлоустойчивые растения, их эволюционно детерминированная высокая устойчивость к ТМ представляет основу ремедиационного потенциала.

Литература

Башмаков Д.И., Лукаткин А.С. Ростовые характеристики и металлоустойчивость экотипов *Chenopodium album* L. s. l. города Саранска (Россия) // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2009. – № 1 (9). – С. 116–119.

Башмаков Д.И., Аль-Харбави Е.Д.В., Башмакова Д.Д., Лукаткин А.С. Исследование потенциальной способности *Amaranthus retroflexus* L. к фиторемедиации загрязненных тяжелыми металлами почв // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2017. – №3 (1). – С. 29–35.

ГОСТ 30692-2000 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Атомно-абсорбционный метод определения содержания меди, свинца, цинка и кадмия. – М., 2002.

Журбицкий З.И., Ильин М.В. Теория и практика вегетационного метода. – М.: Наука, 1968. – 224 с.

Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. (Изд. 2-е, переработанное и дополненное). – М., 1992.

Шоу Б.П., Прасад М.Н.В., Джа В.К., Саху Б.Б. Механизмы детоксикации / защиты у подвергнутых действию металлов растений // Микроэлементы в окружающей среде: биогеохимия, биотехнология и биоремедиация / Под ред. М.Н.В. Прасада, К. С. Саджвана, Р. Найди; Перевод с англ. к.б.н. Д.И. Башмакова и д.б.н. А.С. Лукаткина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – Гл. 16. – С. 340–380.

Al Harbawee W.E.Q., Kluchagina A.N., Anjum N.A., Bashmakov D.I., Lukatkin A.S., Pereira E. Evaluation of cotton burdock (*Arctium tomentosum* Mill.) responses to multi-metal exposure // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 24, I. 6. – P. 5431–5438.

Bashmakov D.I., Tserkovnova M.V., Lukatkin A.S., Teixeira da Silva J.A. Variability in heavy metal tolerance between Saransk (Russian) *Taraxacum officinale* populations // Terrestrial and Aquatic Environmental Toxicology. – 2008. – V. 2, No. 1. – P. 19–24.

Ernst W.H.O. Evolution of metal tolerance in higher plants // For. Snow Landsc. Res. – 2006. – V. 80, No. 3. – P. 251–274.

ASSESSMENT OF PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF HERBACEOUS PLANTS FROM CENTRAL RUSSIA FOR INDUSTRIAL WASTEWATER CONTAINING HEAVY METALS

W.E.Q. Al-Harbawee, D.I. Bashmakov, A.S. Lukatkin

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research Ogarev Mordovia State University», Saransk, Russia, aslukatkin@yandex.ru

Abstract. In model experiments, we analyze potential use of *Chenopodium album* L., *Amaranthus retroflexus* L., *Taraxacum officinale* Wigg., *Arctium tomentosum* Mill., *Medicago sativa* L. for industrial wastewater treatment from heavy metals (HMs). Plants were grown for 1–2 weeks on solutions with mono- and polycontamination by HMs at concentrations from 1 μ M to 1 mM, or on samples of industrial wastewaters. Alfalfa and burdock purified industrial water from HMs most effectively.

Keywords: plants, wastewater, phytoremediation, heavy metals