



УДК 579.66. 574.64

Элиминирование макрофитами биогенов из модельных растворов

Т. Г. Храмцова¹, Г. О. Жданова²

¹*Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Иркутск*

²*Иркутский государственный университет, Иркутск*

E-mail: zhdanova86@yandex.ru

Аннотация. На основании экспериментов с модельными растворами солей азота и фосфора выяснили, что степень элиминирования биофильных элементов из их растворов зависит от вида макрофита и его биомассы, температуры и исходной концентрации загрязнителя. Были найдены наиболее значимые факторы, влияющие на интенсивность гидрофиторемедиации и определены их пределы. Установлено, что макрофиты практически не элиминировали биофильные элементы из растворов с концентрацией нитратов и аммония выше 100 мг/л, фосфатов выше 50 мг/л. Среди распространённых в регионе погруженных макрофитов наиболее интенсивно удаляли биофильные элементы рдест, уруть и нителла.

Ключевые слова: биофильные элементы, макрофиты, элиминирование, элодея, нителла, рдест.

Введение

Среди компонентов сточных вод различных производств особую опасность из-за широкой распространённости и трудности очистки представляют биофильные (биогенные) элементы. Уровень различных загрязнителей, в том числе и названных элементов, в водоёмах, находящихся под антропогенным влиянием, непрерывно увеличивается. Это приводит к изменению гидрохимического режима и в конечном итоге нарушению сложившихся биоценозов. В настоящее время очистка сточных вод от биофильных элементов осуществляется преимущественно с помощью микроорганизмов, которые, однако, не освобождают загрязнённые воды от них полностью.

Качество воды в природных и искусственных водоёмах и ход процессов самоочищения определяются функционированием компонентов их экосистем, одним из важных среди которых являются макрофиты – высшие водные растения и водоросли. В литературе имеются сведения о применении в регионах с тёплым климатом воздушно-водных и плавающих макрофитов для очистки сточных вод от различных загрязнителей [1]. Но в условиях Восточной Сибири с резко континентальным климатом и долгой холодной зимой для этих целей могут быть использованы только погружённые

макрофиты. Для нашего региона необходим подбор растений местной флоры, отвечающих необходимым для фиторемедиации требованиям [6–9].

В связи с этим в лабораторных условиях были изучены закономерности процессов элиминирования солей азота и фосфора из модельных растворов погруженными макрофитами, большая часть которых входит в состав флоры Сибири.

Материалы и методы исследования

В экспериментах использованы следующие макрофиты: элодея канадская *Elodea canadensis* Rich., элодея густолиственная *E. densa* C., пистия телорезовидная *Pistia stratiotes* L., рдест пронзённолистный *Potamogeton perfoliatus* L. и гребенчатый *P. pectinatus* L., уруть колосистая *Myriophyllum spicatum* L., роголистник тёмно-зелёный *Ceratophyllum demersum* L., ряска трёхдольная *Lemna trisulca* L. и малая *L. minor* L., многокоренник *Spirodella polyrhiza* L., валлиснерия спиральная *Vallisneria spiralis* L., нителла *Nitella* sp., хара ломкая *Chara fragilis* L., драпарнальдия байкальская *Draparnaldioides baicalensis* C. Meyer et Skabitsch. и песчаная *D. arenaria* Meyer et Skabitsch.

Макрофиты собирали в Ангаре в районе о. Юность и в водоёмах в окрестностях Иркутска и культивировали в эмалированных ваннах с дехлорированной водопроводной водой при температуре 13 °С и умеренном освещении люминесцентными лампами. Растения, с которыми проводили эксперименты на стационаре НИИ биологии ИГУ в пос. Бол. Коты, собирали в прибрежье оз. Байкал в районе биостанции и адаптировали не менее суток в аквариумах, помещённых в холодильные камеры при температуре 5–7 °С и освещённости 3 000 люкс.

Оценивали способность макрофитов элиминировать следующие соединения: калий азотнокислый (KNO_3), калий азотистокислый (KNO_2), калий фосфорнокислый однозамещённый (KH_2PO_4), аммоний хлористый (NH_4Cl) в концентрациях от 10 г/л до 10 мг/л. Изменение содержания нитратов, нитритов, аммония, фосфатов определяли общепринятыми химическими методами [2–4]. Физиологическое состояние растений в присутствии этих веществ оценивали как по внешнему виду, так и по физиологическим характеристикам и ростовым реакциям (движение цитоплазмы у нителлы, линейный прирост побегов у элодеи канадской) [5]. Прирост фитомассы определяли гравиметрически. Длительность экспериментов составляла до 15 сут. Контролем служили физиологические показатели макрофитов в воде из Байкала и Ангары.

Результаты и обсуждение

Эксперименты показали, что убыль нитратов сильно зависела от вида взятого в опыт растения и от начальной концентрации соединения. Так, содержание нитратов, растворённых в количестве 25 мг/л, нителла и рдест пронзённолистный снижали через 10 суток на 87 %, в то время как ряска трёхдольная всего на 17 %. Нитраты в концентрации 5 мг/л почти все растения поглощали полностью, зато в растворах с концентрацией 100 мг/л убыль

биогена не превышала 15 %, лишь спироделла элиминировала его на 28 % (табл. 1).

Таблица 1

Влияние макрофитов на содержание нитратов в растворах при экспонировании в течение 10 сут.

Вид растений	Концентрация нитратов, % от исходной, мг/л				
	5	10	25	50	100
Рдест пронзённолистный	100	100	87±8,4	45,7±4,0	13,7±1,6
Многокоренник	100	100	75±5,7	54±3,9	28,7±3,5
Роголистник тёмно-зелёный	87±7,3	65±6,4	42±4,6	17±1,8	0
Элодея канадская	97±8,0	81±7,5	60±6,5	24±2,2	10,7±1,7
Уруть колосистая	100	88±6,1	61±6,3	30±2,5	15±2,5
Нителла	100	93±7,7	87±7,0	35±3,0	13±2,8
Драпарнальдия байкальская	100	100	79±6,9	24±3,8	15±3,5
Ряска трёхдольная	85±7,8	51±6,5	17±3,2	5±0,5	0

По способности снижать содержание нитратов исследуемые макрофиты можно расположить в следующий ряд: *Potamogeton perfoliatus* > *Draparnaldioides baicalensis* > *Nitella* sp. > *Spirodella polyrhiza* > *Myriophyllum spicatum* > *Elodea canadensis* > *Ceratophyllum demersum* > *Lemna trisulca*.

Вероятно, при других условиях этот ряд может несколько меняться, поскольку процесс элиминирования биофильных элементов макрофитами во многом зависит от физико-химических условий проведения экспериментов, стадии вегетации растений и ряда других причин.

Значительный прирост в присутствии растворённых нитратов (10 мг/л) наблюдался у элодеи канадской, роголистника и ряски малой. У рдеста прирост практически не фиксировался как в опыте, так и в контроле. Все исследованные виды растений, кроме валлиснерии, в опыте давали больший прирост, чем в контроле (табл. 2).

Таблица 2

Динамика фитомассы макрофитов в растворах нитратов при экспонировании в течение 10 сут.

Вид растений	Прирост фитомассы, % от исходного	
	опыт (NO ₃ 10 мг/л)	контроль
Пистия телорезовидная	116,6±10,6	57,5±7,5
Хара ломкая	16,5±1,8	12,7±1,6
Валлиснерия спиральная	5,0±1,2	10,0±2,1
Элодея канадская	55,0±4,5	40,3±5,3
Элодея густолиственная	37,7±4,4	25,0±2,0
Роголистник тёмно-зелёный	33,3±3,5	20,0±2,2
Рдест пронзённолистный	3,9±0,8	3,3±0,8
Уруть колосистая	17,5±1,5	15,0±2,1
Ряска малая	40,0±5,2	36±4,7
Ряска трёхдольная	10,4±1,7	6,5±1,0

В следующей серии экспериментов использовали растворы с концентрацией нитратов 1 мг/л. Примерно в таком количестве они обычно встречаются в олиготрофных природных водоёмах. Такую концентрацию все исследуемые макрофиты удаляли практически полностью в течение 3–5 сут.

Элиминирование аммонийного азота макрофитами изучали на модельных растворах хлористого аммония с концентрациями 5, 10, 25 и 50 мг/л. Аммоний в количестве 5 и 10 мг/л все исследуемые макрофиты элиминировали полностью, причём в первом случае для этого требовалось в зависимости от вида макрофита от 3 до 7 дней. Даже при концентрации 50 мг/л доля изъятия аммиака была довольно высокой – до 88 %. Однако в растворе с концентрацией 100 мг/л степень его удаления резко снизилась и оказалась фактически на уровне автоокисления (контроля).

В экспериментах с фосфатами показано, что небольшие (5 мг/л) концентрации все гидрофиты за 10 суток поглощали на 85–100 %. С увеличением исходной концентрации фосфатов эффект элиминирования уменьшался. Степень очистки при концентрации фосфатов в растворе 10 мг/л составляла для роголистника 82 %, элодеи 78 %, урути 65 %. Фосфаты в количестве до 25 мг/л растения удаляли на 30–64 %. При дальнейшем увеличении концентрации убыль биогена составляла не более 26 %. В растворах фосфатов с концентрацией 100 мг/л достоверной убыли обнаружено не было, хотя растения не погибали и даже давали прирост.

По способности снижать содержание фосфатов в опытах исследуемые макрофиты можно расположить в следующий ряд: *Potamogeton perfoliatus* > *Spirodella polyrhiza* > *Nitella* sp. > *Ceratophyllum demersum* > *Elodea canadensis* > *Myriophyllum spicatum* > *Vallisneria spiralis*.

Прирост биомассы макрофитов в экспериментах с фосфатами зависел от их начальной концентрации в растворе. При исходной концентрации фосфатов 25 мг/л прирост биомассы составил у *M. spicatum* 21,2 %, *C. demersum* 31,5 %, *E. canadensis* 40,3 %. При увеличении концентрации до 50 мг/л прирост биомассы уменьшился до 11, 18,8 и 28,7 % соответственно. При концентрации фосфатов выше 1 г/л к концу экспериментов прироста растений не происходило (табл. 3).

Таблица 3

Динамика фитомассы макрофитов (% от исходного значения) в растворах фосфатов при экспонировании в течение 10 сут.

Концентрация фосфатов в растворе, мг/л		Вид растений		
		Уруть колосистая	Элодея канадская	Роголистник тёмно-зелёный
Опыт	25	21,2	40,3	31,5
	50	11,0	28,7	18,8
	100	8,0	15,0	10,0
	1000	0	0	0
Контроль	0	16,6	37,5	22,2

На основании экспериментов с модельными растворами солей азота и фосфора были выделены наиболее значимые факторы, влияющие на степень очистки и определены их пределы. Среди них максимальное содержание токсиканта, которое каждый из исследуемых макрофитов способен изъять из раствора; фитомасса макрофита, наиболее эффективная для удаления биофильных элементов; время контакта биоген-макрофит, необходимое для получения максимально возможной степени очистки. Кроме того, были проведены эксперименты по влиянию рН и температуры среды на степень элиминирования биофильных элементов макрофитами и установлены интервалы этих факторов, при которых элиминирование биогенов оказывается наиболее быстрым.

Суммарно найденные оптимальные условия выглядят следующим образом:

- 1) фитомасса макрофита – $3,07 \pm 0,05$ г/л;
- 2) температура для видов из холодолюбивого комплекса водной растительности в интервале от 13 до 20 °С;
- 3) рН среды 7, освещённость 3 тыс. люкс;
- 4) время контакта не более 10–15 сут.

Определённые в опытах максимальные концентрации биофильных элементов, которые макрофиты могут за данное время снизить до норм, разрешающих сброс в водоём, составляют следующие величины: аммоний – не более 20 мг/л; нитраты – не более 30 мг/л; нитриты – не более 1,5 мг/л; фосфаты – не более 10 мг/л.

Заключение

Таким образом, с помощью модельных экспериментов было выяснено, что степень элиминирования биогенов из водных растворов зависит от вида макрофита и его биомассы, температуры и исходной концентрации загрязнителя. Установлено, что макрофиты практически не элиминировали биофильные элементы из растворов с концентрацией нитратов и аммония выше 100 мг/л, фосфатов выше 50 мг/л. Максимальные концентрации биофильных элементов, которые макрофиты могут за данное время снизить до норм, разрешающих сброс в водоём, составляют следующие величины: аммоний – не более 20 мг/л; нитраты – не более 30 мг/л; нитриты – не более 1,5 мг/л; фосфаты – не более 10 мг/л.

На основании проведённых исследований выявлен комплекс оптимальных условий элиминирования макрофитами биогенов. В состав этого комплекса входят: фитомасса макрофита – $3,07 \pm 0,05$ г/л; температура для видов из холодолюбивого комплекса водной растительности – от 13 до 20 °С; рН среды – 7; освещённость – 3 тыс. люкс; время контакта макрофита с раствором биогенов – не более 10–15 сут.

Из погружённых макрофитов, распространённых в водоёмах региона, наиболее интенсивно удаляли нитраты рдест пронзеннолистный *Potamogeton perfoliatus*, уруть колосистая *Myriophyllum spicatum* и нителла *Nitella* sp. Наиболее высокой способностью элиминировать фосфаты отличались роголистник тёмно-зелёный *Ceratophyllum demersum* и элодея канадская *Elodea canadensis*.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-04-31999) и Минобрнауки РФ в рамках реализации проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 13.1263.2014/К от 11.07.2014).

Авторы выражают благодарность С. С. Тимофеевой и Е. А. Зилу за ценные советы и помощь в работе.

Список литературы

1. Лазарев Е. В. Ускорение снижения концентрации поверхностно-активного вещества в воде микрокосма в присутствии растений: инновации для фитотехнологии / Е. В. Лазарева, С. А. Остроумов // Докл. акад. наук. – 2009. – Т. 425, № 6. – С. 843–845.
2. ПНД Ф 14.1:2.112-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации фосфат-ионов. – М., 2004.
3. ПНД Ф 14.1:2.4.276-2013. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации аммиака и аммоний-ионов в питьевых, природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. – М., 2013.
4. ПНД Ф 16.1:2.2.2:3.67-10. Методика измерений массовой доли азота нитратов в пробах почв, грунтов, донных отложений, илов, отходов производства и потребления фотометрическим методом с салициловой кислотой. – М., 2010.
5. Саксонов М. Н. Метод биотестирования по интенсивности флуоресценции хлорофилла клетки нителлы / М. Н. Саксонов, Т. Г. Атавина // Методы биотестирования вод : сб. науч. тр. – Л. : Гидрометеиздат, 1988. – С. 94–95.
6. 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.
7. Тимофеева С. С. Роль макрофитов в обезвреживании флотореагентов / С. С. Тимофеева, Г. Д. Русецкая // Водн. ресурсы. – 1989. – № 4. – С. 130–134.
8. Тимофеева С. С. Роль макрофитов в обезвреживании хлорированных фенолов / С. С. Тимофеева, А. М. Бейм // Водн. ресурсы. – 1992. – № 1. – С. 89–96.
9. Тимофеева С. С. Фитотехнологии и возможности их применения в условиях Восточной Сибири / С. С. Тимофеева, С. С. Тимофеев // Вест. Иркут. гос. сельхоз. акад. – 2012. – Вып. 48. – С. 136–145.

Removal of Nutrients from Model Solutions by Macrophytes

T. G. Hramtsova¹, G. O. Zhdanova²

¹ National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk

² Irkutsk State University, Irkutsk

Abstract. Based on experimental results we establish that the rate of removal of biogenic elements from model solutions of nitrates and phosphates depends on the species and biomass of macrophytes, as well as on solution temperature and initial pollutants concentration. The most significant factors affecting the intensity of hydro-phytoremediation

were found and the limits of these factors were determined. We found that the macrophytes do not remove the biogenic elements from solutions with concentrations of ammonium and nitrates above 100 mg/l and phosphates above 50 mg/l. Regionally distributed submerged macrophytes that remove the nutrients most intensively are *Potamogeton*, *Myriophyllum*, *Nitella*. At equal concentrations of phosphates and nitrates, the past is absorbed faster.

Keywords: nutrients, macrophytes, elimination, *Elodea*, *Nitella*, *Potamogeton*.

Храмцова Татьяна Гурьевна
кандидат биологических наук
Национальный исследовательский
Иркутский государственный
технический университет
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
тел.: (3952) 34–34–37
e-mail: stomd@mail.ru

Hramtsova Tatyana Guryevna
Candidate of Sciences (Biology)
National Research
Irkutsk State Technical University
83, Lermontov st., Irkutsk, 664074
tel.: (3952) 34–34–37
e-mail: stomd@mail.ru

Жданова Галина Олеговна
младший научный сотрудник
Научно-исследовательский институт
биологии Иркутского государственного
университета
664003 г. Иркутск, ул. Ленина, 3
тел.: (3952) 34–34–37
e-mail: zhdanova86@yandex.ru

Zhdanova Galina Olegovna
Junior Research Scientist
Research Institute for Biology
Irkutsk State University
3, Lenin st., Irkutsk, 664003
tel.: (3952) 34–34–37
e-mail: zhdanova86@yandex.ru