

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВОДУ ВЕЩЕСТВ С МАКРОФИТАМИ: метод определения допустимых нагрузок

Использован новый метод рекуррентных добавок ксенобиотиков для изучения диапазона устойчивости растений, потенциально перспективных для фиторемедиации загрязненных водных систем. Метод апробирован на пяти видах водных макрофитов (*Elodea canadensis* Michx., *Potamogeton crispus* L., *Najas guadelupensis* L., *Fontinalis antipyretica* L., макрофите OST-1). В микрокосмы с этими растениями добавляли додецилсульфат натрия (ДСН) и синтетического моющего средства (СМС) «Аист-Универсал». В условиях проведенных опытов максимальная нагрузка ДСН для макрофита OST-1 составляла 460,0 мг/л, при этом время инкубации составляло 213 суток. Максимальная допустимая нагрузка СМС для этого макрофита – 1687,5 мг/л, при инкубации в течение 314 суток.



Введение

Нарастание загрязнения водных объектов (водоемов и водотоков), выявление новых сторон опасности химического загрязнения делает необходимым поиск и разработку эффективных подходов к задаче улучшения их состояния и восстановления качества воды [1-19].

В целях улучшения состояния водных объектов большое внимание уделяется возможностям использования водных растений для очищения воды, разработкам фитотехнологий [1-3]. В связи с этим возникает необходимость получения информации об устойчивости различных видов растений к загрязняющим веществам. К настоящему времени изучены многие вопросы о влиянии различных веществ на водные растения, включая поверхностно-активные вещества (ПАВ) [4] и другие поллютанты (тяжелые металлы, нефть, пестициды, фенолы и др.) [11, 12]. Имеются данные о количественном содержании в тканях растений загрязняющих веществ. Описаны отдельные аспекты

С.А. Остроумов*,
доктор биологических
наук, ведущий
научный сотрудник
биологического
факультета, ФГОУ
ВПО Московский
государственный
университет
им. М.В. Ломоносова

Е.А. Соломонова,
аспирант
биологического
факультета, ФГОУ
ВПО Московский
государственный
университет
им. М.В. Ломоносова

формирования качества вод под влиянием высших водных растений [2]. Эти аспекты являются частью процессов формирования качества вод под влиянием практически всей биоты, полифункциональная роль которой в очищении вод была показана во многих работах, причем выявлено значение практически всего биоразнообразия водных организмов, включая виды растений, животных, грибов и микроорганизмов [5-8, 20-26]. При определении количественной характеристики допустимых нагрузок неизбежно встает вопрос не только о количестве поступающих в водную систему химических веществ, но и том, за какой период времени эти вещества поступают в данную систему. Однако в известной авторам литературе не был исследован вопрос о допустимых нагрузках загрязняющих веществ на водные растения в условиях их неоднократного (хронического) поступления в систему, т.е. в условиях, когда нагрузка вещества на систему зависит от распределения добавок вещества во времени. Это делает необходимым проведение экспериментов по выявлению

* Адрес для корреспонденции: ar55@yandex.ru

реакции компонентов водной системы на добавление в воду тех или иных химических соединений в форме нагрузки, распределенной на протяжении определенного периода времени [9]. В качестве метода для изучения реагирования растений на нагрузки, распределенные в течение некоторого периода времени, был предложен метод рекуррентных добавок [9]. Метод основан на использовании многократных добавок загрязняющего вещества одинаковой концентрации в течение некоторого периода времени.

Цель данной работы – экспериментальное обоснование эффективности метода рекуррентных добавок и его применение для изучения диапазона устойчивости конкретных видов высших водных растений к ПАВ и ПАВ-содержащему смесевому препарату в лабораторных условиях в целях использования фитотехнологического (фиторемедиационного) потенциала водных растений (макрофитов).

Конкретные задачи исследования включали апробацию метода рекуррентных добавок для изучения диапазона устойчивости ряда видов водных растений и допустимых нагрузок поллютантов на макрофиты; изучение эффектов воздействия рекуррентных добавок анионного ПАВ додецилсульфата натрия (**ДСН**), а также ПАВ-содержащего смесового препарата синтетического моющего средства (**СМС**) «Аист-Универсал» на жизнеспособность водных растений; выявление среди изучаемых видов водных растений тех, которые обладают относительно большим диапазоном устойчивости к действию указанных веществ.

Некоторые предварительные данные по этой тематике были опубликованы в [10, 13].

Материалы и методы исследования

Для исследований были выбраны представители экологически различных групп водных растений, относящихся к нескольким семействам. Среди них представители полностью погруженных укореняющихся водных растений – *Elodea canadensis* Michx. (сем. *Hydrocharitaceae*), *Potamogeton crispus* L. (сем. *Potamogetonaceae*), *Najas guadelupensis* L. (сем. *Najadaceae*), представители полностью погруженных прикрепляющихся *Fontinalis antipyretica* L. (сем. *Fontinalaceae*), макрофит OST-1, а также представители макрофитов, свободно плавающих на поверхности воды – *Salvinia natans* L., *S. auriculata* Aubl. (сем. *Salviniaceae*).

При постановке опытов использовали лабораторные микрокосмы, содержащие макрофиты. В опытах в сосуды с отстоянной в течение 48 ч водопроводной водой (1,2 л) помещали растения суммарной биомассой (сырой вес) 7–8 г (*E. canadensis*, *P. crispus* и *F. antipyretica*) и 4–5 г (*N. guadelupensis*, OST-1). В опытах с использованием СМС и макрофитов OST-1 объем воды составлял 0,8 л. В опытах с *S. natans* и *S. auriculata* учитывали число надводных листьев растений (по 40 надводных листьев в сосуде).

Опыты проводились в двукратных повторностях при температуре воды в сосудах 21 °С +3 °С. Инкубация проводилась в условиях естественной фотопериодичности.

В качестве представителей веществ, загрязняющих водную среду, использовали анионное поверхностно-активное вещество (**АПАВ**) ДСН и СМС «Аист».

Логика поставленных задач требовала проведения 2-х этапов опытов для изучения

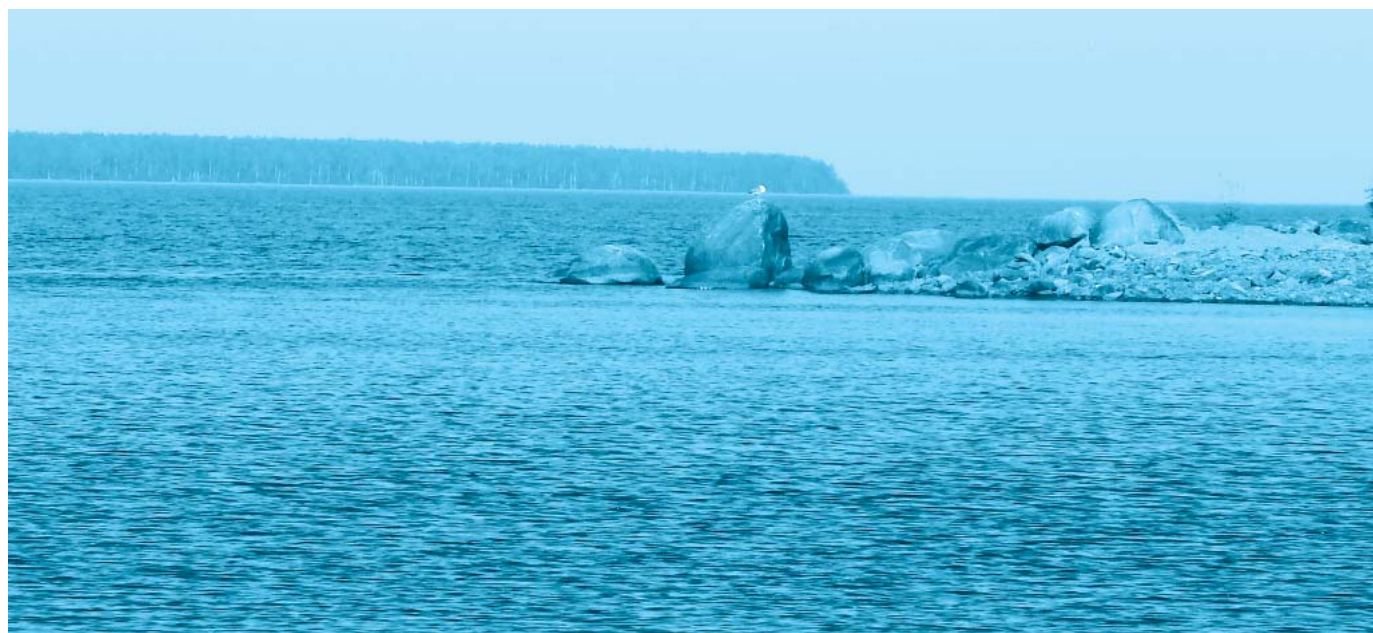


Таблица 1

Концентрации веществ в опытах с однократными добавками и прирост количества веществ в опытах с рекуррентными добавками

Однократные добавки	Концентрации ДСН, мг/л:	50,0; 60,0; 100,0; 120,0; 133,3; 160,0; 166,7; 250,0; 298,8; 300,0; 320,0
	Концентрации СМС, мг/л:	100,0; 166,7; 200,0; 250,0; 300,0; 400,0; 600,0; 800,0; 1000,0
Рекуррентные добавки	Прирост кол-ва ДСН, мг/л:	0,5; 0,8; 1,7; 8,3; 16,7; 49,8; 50,0; 100,0
	Прирост кол-ва СМС, мг/л:	1,3; 2,5; 6,3; 12,5; 18,8; 25,0; 37,5; 50,0; 62,5

диапазона устойчивости высших водных растений к ПАВ и ПАВ-содержащим смешанным препаратам. В ходе первого этапа исследования проводили с применением однократных добавок контаминантов. Во втором этапе применяли метод рекуррентных добавок ПАВ и ПАВ-содержащих смешанных препаратов [9].

Использованные концентрации веществ в опытах с однократными добавками и прирост количества веществ в опытах с рекуррентными добавками указаны в табл. 1.

Результаты и их обсуждение

В опытах с однократными и рекуррентными добавками установлено следующее.

1. Устойчивость водных растений к ДСН при однократных добавках ПАВ

При проведении экспериментов в рамках первого этапа представляло интерес сопоставить наиболее заметные негативные последствия при воздействии ДСН на водные растения, принадлежащие к различным крупным таксонам.

Так, для цветковых водных растений (*E. canadensis*, *P. crispus*, *N. guadelupensis*) общими зарегистрированными последствиями действия ДСН явились: снижение тургорного давления, депигментация листьев, опадение депигментированных и недепигментированных листьев, фрагментация стеблей, и уменьшение биомассы растений.

В опытах с *F. antipyrretica* и макрофитом OST-1 регистрировали случаи депигментации листьев, а также опадение части депигментированных листьев и уменьшение биомассы. Для *F. antipyrretica* фрагментация не была характерна. Были зафиксированы случаи возникновения депигментации стеблей у макрофитов OST-1 в опытах с однократными добавками ДСН.

Плавающие на поверхности воды водные папоротники *S. natans* и *S. auriculata* реагировали на добавку ДСН отмиранием части листовых пластинок, погружением под воду

участков листа или всей листовой пластинки, а также депигментацией листьев.

Опыты с однократными добавками ДСН показали, что среди изученных цветковых растений *P. crispus* был относительно более чувствительным к действию однократных добавок ДСН. Так, в опытах гибель более 50 % растений была зафиксирована через 4 сут от начала опыта при концентрациях ДСН 100,0; 133,3 и 298,8 мг/л. В опыте с элодеей при концентрации ДСН 298,8 мг/л гибель растений регистрировали на 8 сут от начала опыта.

Среди использованных цветковых водных растений наиболее устойчивой к действию ДСН была наяда. Гибель растений *N. guadelupensis* в вариантах опыта с концентрацией ДСН 298,8 мг/л отмечали через 17 сут. Из этого видно, что наяда была способна выдерживать нагрузку в 298,8 мг/л в 4 раза дольше, чем рдест и в 2 раза дольше, чем элодея. Водные папоротники были менее устойчивы к действию ДСН, чем цветковые растения *E. canadensis* и *N. guadelupensis*. При изучении диапазона таких макрофитов, как *F. antipyrretica* и OST-1) выявилось, что относительно более чувствительным к действию ДСН был фонтаналис. Гибель растений *F. antipyrretica* в вариантах опыта с концентрациями 100,0; 166,7; 250,0 и 300,0 мг/л фиксировали через 7 сут. В отличие от этого, за время проведения опыта (30 сут) с макрофитом OST-1 при тех же концентрациях АПАВ гибели растений не произошло.

Макрофит OST-1 в течение более длительного времени выдерживал воздействие ДСН в концентрациях от 250,0 мг/л и выше, чем наяда.

Так, при концентрациях 250,0 и 298,8 мг/л гибели макрофита OST-1 за время проведения опыта (30 сут) не произошло. При воздействии ДСН в концентрациях 250,0 мг/л гибель более 50 % растений *N. guadelupensis* была зафиксирована через 19 и 21 сут, при воздействии ДСН в концентрациях 298,8 мг/л – через 17 сут.

Таким образом, проведенные опыты позволили предварительно выявить растения как

более чувствительные к действию однократных добавок относительно высоких концентраций ДСН (*P. crispus*, *S. natans*, *S. auriculata*, *F. antipyrretica*), так и относительно более устойчивые среди изученных виды растений (макрофит OST-1, *N. guadelupensis*).

2. Устойчивость водных растений к ДСН в условиях рекуррентных добавок ПАВ

В результате проведения второго этапа опытов с рекуррентными добавками с цветковыми водными растениями (*Elodea canadensis*, *Potamogeton crispus*, *Najas guadelupensis*), а также с макрофитом OST-1 были установлены нагрузки ДСН на микрокосмы, при которых не наблюдалось видимых отличий от контроля в течение относительно длительного периода времени (табл. 2). Таким образом, нагрузка находилась в пределах диапазона устойчивости. Показано, что диапазон устойчивости макрофита OST-1 был на два порядка выше, чем у элодеи. Суммарная нагрузка при приросте ДСН 0,5 мг/л составляла 4 мг/л для элодеи и 460 мг/л для OST-1.

В опытах с *E. canadensis*, *P. crispus*, *N. Guadelupensis* и OST-1 были установлены нагрузки ДСН на микрокосмы, содержащие водные растения, при которых наблюдаются нарушения состояния макрофитов. Эти нагрузки (при реализации за указанный период времени) выходили за пределы диапазона устойчивости (табл. 3).

Сопоставление нагрузок ДСН, при которых наблюдаются нарушения состояния макрофитов, с нагрузками ДСН, при которых не наблюдалось видимых отличий от контроля в течение относительно длительного периода времени, показывает, что удалось выявить границу перехода от сравнительно допустимой нагрузки к безусловно недопустимым в

использованных экспериментальных условиях нагрузкам.

Выявлено, что суммарное количество ДСН, не приводящее к видимым изменениям в модельных системах с *N. guadelupensis*, более чем в 40 раз превышало таковое в опытах с другими цветковыми водными растениями. Это свидетельствует о сравнительно более высокой степени устойчивости (толерантности) *N. guadelupensis* к действию этого ПАВ по сравнению с другими изучавшимися нами видами растений.

Суммарное количество ДСН, не приводящее к видимым изменениям в модельных системах с макрофитом OST-1 при рекуррентных добавках, значительно превышало значение этого показателя у других видов использованных растений, в том числе наяды, что также свидетельствует о сравнительно более высокой степени устойчивости макрофита OST-1 к действию этого ПАВ. Устойчивость изученных видов макрофитов к ДСН возросла в следующем порядке:

- ♦ для *P. crispus* допустимая нагрузка составляла 3,3 мг/л при инкубации в течение 8 сут при приросте концентрации после одной добавки 0,8 мг/л;
- ♦ для *E. canadensis* допустимая нагрузка составляла 4,0 мг/л при инкубации в течение 18 сут при приросте концентрации после одной добавки 0,5 мг/л;
- ♦ для *N. guadelupensis* допустимая нагрузка составляла 208,0 мг/л при инкубации в течение 29 сут при приросте вещества после одной добавки 1,7 мг/л;
- ♦ для макрофита OST-1 допустимая нагрузка составляла 460,0 мг/л при инкубации в течение 213 сут при приросте концентрации после одной добавки 5,0 мг/л.

3. Устойчивость водных растений к СМС в условиях рекуррентных добавок СМС

На основании результатов, полученных в экспериментах с использованием индивидуального ПАВ, была сформулирована гипотеза, что этот же подход можно применить к смесевым препаратам. Гипотеза была проверена на СМС «Аист-Универсал».

Таблица 2

Изучение диапазона устойчивости (толерантности) водных растений. Максимальные нагрузки, создаваемые с помощью рекуррентных добавок, при которых не наблюдалось значительных изменений в состоянии макрофитов в модельных системах (микрокосмах) по сравнению с контролем

Вид растения	Суммарные нагрузки (количества*) ДСН, не приводящие к видимым изменениям в состоянии макрофитов в модельных системах, мг/л	Прирост ДСН после каждой добавки, мг/л	Количество добавок	Время, в течение которого не наблюдалось видимых изменений в состоянии макрофитов в модельных системах, сут
<i>E. canadensis</i>	4	0,5	8	18
<i>P. crispus</i>	3,3	0,8	4	8
<i>N. guadelupensis</i>	208,8	1,7	125	291
OST-1	460	5	92	213

* Суммарное количество вещества, внесенное за все число добавок, указанное в колонке 4.

Таблица 3

Количества ДСН, приводящие к начальным видимым изменениям в состоянии макрофитов в модельных системах (микрокосмах) и гибели растений при рекуррентных добавках ДСН

Вид растения	Количество ДСН в одной добавке, мг/л	Регистрация первых видимых начальных изменений* в модельных системах			Гибель растений		
		Суммарное количество ДСН, мг/л	Количество добавок	Время, через которое наблюдались изменения, сут	Суммарное количество ДСН, мг/л	Количество добавок	Время, через которое наступала гибель, сут
<i>E. canadensis</i>	8,3	33,2	4	8	83,0	10	19
	16,7	33,4	2	3	66,8	4	8
<i>P. crispus</i>	8,3	24,9	3	6	33,2	4	8
	16,7	33,4	2	3	66,8	4	7
	49,8	99,6	2	3	199,2	4	7
<i>N. guadelupensis</i>	8,3	124,5	15	34	141,1	17	39
	8,3	141,1	17	39	157,7	19	44
	16,7	167,0	10	21	233,8	14	32
	50,0	300,0	6	14	350,0	7	16
	100,0	300,0	3	6	400,0	4	8
OST-1	8,3	215,8	26	59	282,2	34	77
	8,3	373,5	45	103	398,4	48	110
	16,7	400,8	24	55	567,8	34	77
	50,0	850,0	17	38	1100,0	22	49
	100,0	1700,0	17	38	2200,0	22	49

* Депигментация листьев

Устойчивость макрофитов к данному СМС была изучена на примере *F. antipyretica* и OST-1. Устойчивость изученных видов макрофитов к СМС, как показали опыты, характеризуется следующими цифрами.

Для *F. antipyretica* допустимая нагрузка составляла 62,5 мг/л при инкубации в течение 11 сут при приросте концентрации после одной добавки 12,5 мг/л.

В отличие от этого, для макрофита OST-1 допустимая нагрузка была значительно больше; она составляла 1687,0 мг/л при инкубации в течение 314 сут при таком же приросте концентрации после одной добавки – 12,5 мг/л.

4. Оценка допустимых нагрузок использованных загрязняющих веществ

На основании полученных данных можно привести примеры оценки допустимых нагрузок использованных загрязняющих веществ в пересчете на 1 г биомассы растений (табл. 4.).

Выявленные в опытах допустимые нагрузки ПАВ ДСН на биомассу рдеста, элодеи, наяды и макрофита OST-1 приводятся ниже. Допустимые суммарные нагрузки ДСН на 1 г биомассы для рдеста составляют 0,6 мг/г при максимальной продолжительности инкубации 8 сут и приросте концентрации после одной добавки 0,8 мг/л.

Таблица 4

Примеры оценки допустимых нагрузок загрязняющих веществ в пересчете на биомассу растений (биомасса в расчете на сырой вес)

Вид	Вещество	Допустимые суммарные нагрузки, мг/л	Допустимые суммарные нагрузки на 1 г биомассы, мг/г	Максимальная продолжительность инкубации, сут	Кол-во вещ-ва в одной добавке, мг/л
<i>E.canadensis</i>	АПАВ ДСН	4,0	0,7	18	0,5
<i>P. crispus</i>		3,3	0,6	8	0,8
<i>N.guadelupensis</i>		208,8	58,3	291	1,7
OST-1		460,0	128,5	213	5,0
OST-1	СМС «Аист-Универсал»	1687,5	333,3	314	12,5
<i>F. antipyretica</i>		62,5	7,0	11	12,5

Допустимые суммарные нагрузки ДСН на 1 г биомассы для элодеи составляют 0,7 мг/г при максимальной продолжительности инкубации 18 сут и приросте концентрации после одной добавки 0,5 мг/л.

Допустимые суммарные нагрузки ДСН на 1 г биомассы для наяды составляют 58,3 мг/г при максимальной продолжительности инкубации 291 сут и приросте концентрации после одной добавки 1,7 мг/л.

Допустимые суммарные нагрузки ДСН на 1 г биомассы для макрофита OST-1 составляют 128,5 мг/г при продолжительности инкубации 213 сут и приросте концентрации после одной добавки 5,0 мг/л.

Допустимые суммарные нагрузки использованного СМС на 1 г биомассы для фонтиналисы составляют 7,0 мг/г при максимальной продолжительности инкубации 11 сут и приросте концентрации СМС после одной добавки 12,5 мг/л.

Допустимые суммарные нагрузки использованного СМС на 1 г биомассы для макрофита OST-1 составляет 333,3 мг/г при продолжительности инкубации 314 сут и приросте концентрации СМС после одной добавки 12,5 мг/л.

Заключение

Новые результаты продолжают линию исследований, представленных в публикациях [9, 10, 14, 15] и получившую одобрение и поддержку в научной литературе [27]. Проведенные опыты продолжены в серии экспериментов, в которых были обнаружены новые факты о перспективности водных растений для фиторемедиации вод, загрязненных другими поллютантами – тяжелыми металлами [18, 19].

Полученные данные дополняют знания о фиторемедиационном потенциале сосудистых растений в целом [3, 12-19, 28-30] и подтверждают высказанное ранее предположение о перспективности использования растений для ремедиации водных систем, загрязненных ПАВ [4].

На основании проведенных опытов можно сделать следующие выводы.

Апробирован предложенный ранее [9] метод рекуррентных добавок ксенобиотиков (на примерах ДСН, СМС) для изучения диапазона устойчивости растений, потенциально перспективных для восстановления загрязненных водных систем. Метод апробирован на пяти видах водных макрофитов (*Elodea canadensis* Michx., *Potamogeton crispus* L., *Najas guadelupensis* L., *Fontinalis antipyretica* L., макрофите OST-1).

Ключевые слова:

фиторемедиация,
водные растения,
ПАВ,
детергенты,
качество воды

Выявлены распределенные на протяжении определенного периода времени (от 8 до 314 сут) нагрузки ДСН и СМС на микрокосмы, содержащие водные растения, при которых не наблюдалось видимых отличий от контроля. Разработанный подход вносит вклад в научную информацию о допустимых нагрузках на макрофитный компонент водных экосистем. Выявлены выходящие за пределы диапазона устойчивости распределенные на протяжении определенного периода времени нагрузки ДСН на микрокосмы, содержащие макрофиты (*E. canadensis*, *P. crispus*, *N. guadelupensis*, *F. antipyretica*, OST-1), при которых наблюдаются нарушения состояния макрофитов.

Установлено, что среди исследованных видов относительно более устойчивым к действию изученных веществ был макрофит OST-1. В условиях проведенных опытов максимальная нагрузка ДСН для этого макрофита составляла 460,0 мг/л, при этом время инкубации составляло 213 сут. Максимальная нагрузка СМС для этого макрофита – 1687,5 мг/л, при этом время инкубации составляло 314 сут. Полученные экспериментальные результаты доказывают, что фитосистемы с этим макрофитом перспективны для патентования и практического использования.

Разработанный метод и полученные количественные данные вносят вклад в характеристику диапазона устойчивости пяти видов водных растений и дает количественные оценки допустимой нагрузки в условиях исследованной системы.

Проведенные серии опытов позволили экспериментально обосновать эффективность применения метода рекуррентных добавок для изучения диапазона устойчивости высших водных растений к ПАВ и ПАВ-содержащему смесевому препарату в лабораторных условиях.

Авторы ведут поиск заинтересованных партнеров в реальном секторе экономики (промышленность, добыча, транспортировка и переработка полезных ископаемых, муниципальный сектор, транспорт, другие сектора хозяйственной деятельности), которые были бы готовы создать у себя пробную (пилотную) установку или площадку с использованием водных растений для очищения или доочистки воды.

Авторы выражают благодарность В.С. Новикову и М.А. Кудряшову за обсуждение, В.А. Поклонову и Т.В. Шестаковой за участие в работах, продолжающих тему данной статьи.

Литература

1. Крот Ю.Г. Использование высших водных растений в биотехнологиях очистки поверхностных и сточных вод // Гидробиологический журн. 2006. Т. 42. № 1. С. 47-58.
2. Кудряшов М.А. Введение в гидробиологию континентальных водоемов (гидробиологические аспекты) / М.А. Кудряшов, А.П. Садчиков. М.: МАКС Пресс, 2002. 248 с.
3. Морозов Н.В. Экологическая биотехнология: очистка природных и сточных вод макрофитами. Казань: Изд-во Казанского гос. пед. ун-та, 2001. 396 с.
4. Остроумов С.А. Биологические эффекты при воздействии поверхностно-активных веществ на организмы. М.: МАКС Пресс, 2001. 344 с.
5. Остроумов С.А. О биотическом самоочищении водных экосистем. Элементы теории // ДАН. 2004. Т. 396. № 1. С.136-141.
6. Остроумов С.А. Биологический механизм самоочищения в природных водоемах и водотоках: теория и практика // Успехи современной биологии. 2004. Т. 124. № 5. С. 429-442.
7. Остроумов С.А. О некоторых вопросах поддержания качества воды и ее самоочищения // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 3. С. 337-347.
8. Остроумов С.А. О полифункциональной роли биоты в самоочищении водных экосистем // Экология. 2005. № 6. С. 452-459.
9. Остроумов С.А. Модельная система в условиях рекуррентных (реитерационных) добавок ксенобиотика или поллютанта: инновационный метод изучения толерантности, ассимиляционной емкости системы, предельно допустимых поступлений загрязняющих веществ и потенциала фиторемедиации // Ecological Studies, Hazards, Solutions. 2006. Т. 11. С. 72-74.
10. Остроумов С.А. К разработке гидробиологических вопросов фиторемедиации / С.А. Остроумов, Е.А. Соломонова // Вода : химия и экология . 2006. № 3. С. 45-49.
11. Lizotte R.E. Ecological effects of an anionic C12-15AE-3S alkylethoxysulfate surfactant in outdoor stream mesocosms / Lizotte R.E., Dorn P.B., Steinriede R.W., Wong D.C.L., Rodgers J.H. // Environ Toxicol. and Chem. 2002. V. 21. № 12. P. 2742-2751.
12. Phytoremediation. Transformation and control of contaminants / Ed. by McCutcheon S.C., Schnoor J.L. Hoboken (New Jersey, USA): Wiley-Interscience, 2003. 987 p.
13. Остроумов С.А. Инновационная разработка экотехнологического подхода к очищению вод: фиторемедиация с использованием водных макрофитов / С.А. Остроумов, Е.А. Соломонова // Вода: технология и экология. 2008. № 3. С.48-56.
14. Соломонова Е.А. Изучение устойчивости водного макрофита *Potamogeton crispus* L. к додецилсульфату натрия / Е.А. Соломонова, С.А. Остроумов // Вестник Моск. ун-та. Сер. 16. Биология. 2007. № 4. С. 39-42.
15. Лазарева Е.В. Ускорение снижения концентрации поверхностно – активного вещества в воде микрокосма в присутствии растений: инновации для фитотехнологии / Е.В. Лазарева, С.А. Остроумов // ДАН. 2009. Т. 425. № 6. С. 843-845.
16. Solomonova E.A. Tolerance of an aquatic macrophyte *Potamogeton crispus* L. to sodium dodecyl sulphate / Solomonova E.A., Ostroumov S.A. // Moscow University Biological Sciences Bulletin. 2007. V. 62. №. 4. P. 176-179.
17. Lazareva E.V. Accelerated decrease in surfactant concentration in the water of a microcosm in the presence of plants: innovations for phytotechnology / Lazareva E.V., Ostroumov S.A. // Doklady Biological Sciences, 2009. V. 425. P. 180-182.
18. Остроумов С.А. Новое о фиторемедиационном потенциале: ускорение снижения концентраций тяжелых металлов (Pb, Cd, Zn,



Cu) в воде в присутствии элодеи / С.А. Остроумов, С.В. Котелевцев, Т.В. Шестакова, Н.Н. Колотилова, В.А. Поклонов, Е.А. Соломонова // Экологическая химия. 2009. Т. 18(2). С. 111-119.

19. Остроумов С.А. Снижение измеряемых концентраций Cu, Zn, Cd, Pb в воде экспериментальных систем с *Ceratophyllum demersum*: потенциал фиторемедиации / С.А. Остроумов, Т.В. Шестакова // ДАН. 2009. Т. 428. № 2. С. 282-285.

20. Ostroumov S.A. Aquatic ecosystem as a bioreactor: water purification and some other functions // Rivista di Biologia – Biology Forum. 2004. V. 97. № 1. P. 67-78.

21. Ostroumov S.A. Inhibition of mussel suspension feeding by surfactants of three classes / Ostroumov S.A., Widdows J. // Hydrobiologia. 2006. V. 556. № 1. P. 381-386.

22. Остроумов С.А. Водная экосистема: крупноразмерный диверсифицированный биореактор с функцией самоочищения воды // ДАН. 2000. Т. 374. № 3. С. 427.

23. Остроумов С.А. Ингибиторный анализ регуляторных взаимодействий в трофических цепях // ДАН. 2000. Т. 375. № 6. С. 847.

24. Ostroumov S.A. On the biotic self-purification of aquatic ecosystems: elements of the theory // Doklady Biological Sciences. 2004. V. 396. № 1-6. P. 206-211.

25. Ostroumov S.A. Inhibitory analysis of top-down control: new keys to studying eutrophication, algal blooms, and water self-purification // Hydrobiologia. 2002. V. 469. № 1-3. P. 117-129.

26. Ostroumov S.A. Polyfunctional role of biodiversity in processes leading to water purification: current conceptualizations and concluding remarks // Hydrobiologia. 2002. V. 469. № 1-3. P. 203-204.

27. Жиров В.К. О новых исследованиях взаимодействия загрязняющих веществ с макрофитами в связи с изучением их фиторемедиационного потенциала // Вода: технология и экология. 2009. № 1. С. 72-74.

28. Rai P.K. Heavy metal pollution in aquatic ecosystems and its phytoremediation using wetland plants: an ecosustainable approach // Int. J. Phytoremediation. 2008. V. 10(2). P. 131-158.

29. Rahman M.A. Aquatic arsenic: phytoremediation using floating macrophytes / Rahman M.A., Hasegawa H. // Chemosphere. 2011. V. 83(5). P. 633-646.

30. Nirmal-Kumar J.I. Macrophytes in phytoremediation of heavy metal contaminated water and sediments in Pariyej Community Reserve, Gujarat, India Nirmal-Kumar J.I., Soni H., Kumar R.N., Bhatt I. // Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2008. V. 8. P. 193-200. http://www.trjfas.org/pdf/issue_8_2/193_200.pdf.



S.A.Ostroumov, E.A.Solomonova

DEVELOPMENT OF THE SCIENTIFIC BASIS OF PHYTOREMEDIATION OF AQUATIC ENVIRONMENT USING A NEW METHOD OF RECURRENT ADDITIONS

A new method of recurrent additions is developed and successfully applied to studying the tolerance of plants that are prospective tools to remediate polluted aquatic systems. The method was applied and proved to be efficient when studying 5 species of aquatic macrophytes (*Elodea canadensis* Michx., *Potamogeton crispus* L., *Najas guadelupensis* L., *Fontinalis antipyretica* L., and the macrophyte OST-1). Sodium dodecylsulfate (SDS) and synthetic detergent (SD) «Aist-Universal» were added in microcosms with these plants. Under the experimental conditions used, the maximal tolerable load of the SDS on the system with the macrophyte OST-1 was 460,0 mg/L (over the time period of 213 days). The maximal tolerable load of a SDS tested on the system with the same macrophyte OST-1 was 1687,5 mg/L (over the time period of 314 days).

Key words: phytoremediation, aquatic plants, surfactant, detergents, water quality.

