
ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА МАКРОФИТЫ *POTAMOGETON CRISPUS* L. В УСЛОВИЯХ МИКРОКОСМОВ

С.А. Остроумов, Е.А. Соломонова

МГУ им. М.В. Ломоносова, биологический факультет,
лаборатория физхимии биомембран, г. Москва

Перспективность использования фиторемедиации и фитотехнологий для очищения воды делают необходимым изучение диапазонов устойчивости макрофитов в присутствии контаминантов. В данной работе в качестве возможного контаминанта исследовали поверхностно-активное вещество. Изучали эффекты воздействия анионного поверхностно-активного вещества додецилсульфата натрия (ДСН) на водный макрофит *Potamogeton crispus* L. Внесение ДСН в форме нескольких последовательных добавок в течение 8 дней (при суммарной нагрузке 33 мг/л и выше) вызывало фрагментацию стеблей растений в условиях микрокосмов.

Prospective using of phytoremediation and phytotechnologies to treat water makes it necessary to study the tolerance range of macrophytes in the presence of contaminants. In the current research project a surfactant was studied as a potential contaminant. The effects of the anionic surfactant, sodium dodecylsulphate (SDS), on the aquatic macrophyte *Potamogeton crispus* L. were studied. Several additions of SDS during 8 days (the total load of 33 mg/l and larger) induced the fragmentation of the stems of the plants.

В последнее время для снижения опасности химического загрязнения среды разрабатываются подходы, основанные на фиторемедиации (использовании растений) [1]. Эти средоулучшающие фитотехнологии привлекают своей эффективностью, надежностью, экономичностью в плане минимального потребления энергии. Наиболее активно ведутся разработки, в которых используются наземные растения. Работ, посвященных возможному использованию водных растений, значительно меньше. Вместе с тем, в водных объектах растения-макрофиты являются важными компонентами экосистем, участвующими в очищении воды и поддержании ее качества [1–3].

Одним из классов загрязняющих веществ являются поверхностно-активные вещества (ПАВ). Экологическая опасность ПАВ изучена и проанализирована пока недостаточно. С одной стороны, имеется немало работ о различных биоэффектах и нарушениях структуры и функции организмов при воздействии синтетических ПАВ [4–6]. С другой стороны, некоторые авторы не включают ПАВ в число наиболее важных загрязняющих веществ (например, Мур и Рама-

мурти [7]) и считают, что большой экологической опасности для водных экосистем они не представляют (например, Фендинджер и др. [8]). Поэтому целесообразны дальнейшие исследования воздействий веществ этого класса на организмы.

В результате проведения обширного цикла работ по изучению воздействия ПАВ и ПАВ-содержащих смесевых препаратов, выявления и сопоставления толерантности организмов различных таксонов предложено использовать покрытосеменные растения для целей фиторемедиации [5]. Для этого необходимо продолжение изучения фактов о взаимодействии растений с различными ПАВ. Необходимо изучение по возможности более широкого круга видов макрофитов, поскольку виды отличаются и по диапазону устойчивости, и по условиям культивирования, что важно для практического использования фитотехнологий. Поскольку до сих пор отсутствовала удобная методика быстрой констатации и градации негативного воздействия химических веществ на водные макрофиты по визуально выявляемым признакам, разработка такой методики является необходимой. Для

практического использования макрофитов в рамках средоулучшающих фитотехнологий представляет интерес выявление не только вредоносных концентраций поллютантов, но и определение таких концентраций, при которых заметных негативных эффектов не наблюдается (определение диапазона устойчивости растений к данному фактору).

Цель данной работы – представить результаты исследований воздействия различных концентраций водного раствора анионного ПАВ додецилсульфата натрия (ДСН) на жизнеспособность водного макрофита рдеста курчавого (*Potamogeton crispus* L.). Отметим, что выявление вредных и относительно безвредных концентраций (вне связи с деталями биохимических и физиологических механизмов) вносит вклад в разработку основ использования средоулучшающих фитотехнологий и является начальным необходимым шагом. Изучение вопросов биохимии или физиологии представляет собой самостоятельную интересную задачу, но на данном этапе исследования не входило в цели проведенного исследования. Предварительные результаты данной работы и опытов, для сравнения проводившихся и на других видах макрофитов, докладывались на нескольких конференциях по инновационным технологиям (МГУ, Москва; г. Атланта, США; и др.) [9–13].

Материалы и методы

Растения были собраны в природном водотоке в сентябре. Опыты были проведены в том же месяце (сентябрь) в условиях лабораторных микрокосмов. Микрокосмы создавали по методике, ранее разработанной и апробированной на других видах макрофитов [11, 12]. В сосуды с предварительно отстоянной в течение 48 ч водопроводной водой (объем 1,2 л) помещали 2–4 стебля *P. crispus* суммарной биомассой 7,0–7,5 г. Использовали метод рекуррентных добавок исследуемого вещества (ДСН) [14]. Приготовленный исходный водный раствор ДСН (концентрация 2 мг/мл) добавляли в сосуды с интервалом 48 ч между добавками в течение 20 суток. Объем добавленного раствора при одноразовой добавке составлял 0,10; 0,20; 0,30; 0,50; 1,00; 5,00; 10,00; 30,00 мл. Приращение концентрации ДСН составило 0,17; 0,33; 0,50;

0,83; 1,67; 8,30; 16,60; 49,80 мг/л, соответственно. Был также поставлен ряд опытов с однократным внесением ДСН. При этом концентрация ДСН составила 83,3; 100,0; 133,3 мг/л, соответственно. Опыты проводились при температуре воды в сосудах 19–23°, при комнатном освещении, в апреле и сентябре. Степень воздействия ДСН на макрофиты оценивали по разработанной авторами 10-балльной шкале. При разработке шкалы учитывали несколько визуально определяемых характеристик состояния растений, в том числе отделение фрагментов стебля, отделение листьев и их пигментацию (табл. 1).

Результаты и обсуждение

Перспективы использования фитотехнологий для очищения воды делают необходимым изучение диапазонов устойчивости макрофитов в присутствии контаминантов. В данной работе в качестве возможного контаминанта исследовали синтетическое поверхностно-активное вещество, додецилсульфат натрия (ДСН).

Опыты с макрофитами *P. crispus* показали, что при достижении суммарного количества добавленного ДСН 6,68 мг/л (через 8 суток после начала опыта) происходило снижение тургора стеблей макрофита (табл. 2). На этом же этапе опыта в микрокосмах с суммарным количеством ДСН от 33,2 до 199,2 мг/л происходила значительная фрагментация (табл. 2): при 33 мг/л степень воздействия ДСН была 9 баллов, при 199 мг/л – 10 баллов.

Необходимо подчеркнуть, что выявление величины нагрузок, которые растения могут выдержать, имеет существенное значение для разработки режима использования макрофитов в фитотехнологиях. Это обусловлено тем, что при использовании растений для очищения среды абсолютно необходимо знать диапазон их устойчивости с тем, чтобы ни в коем случае не выходить за его границы. В противном случае произойдет гибель растений и они вместо фактора очищения среды превратятся, наоборот, в фактор дополнительного загрязнения водной среды гниющей фитомассой.

Был поставлен опыт и по однократному внесению ДСН в микрокосмы с макрофитами (тоже в сентябре). При однократном внесении

Таблица 1. Шкала воздействий додецилсульфата натрия (ДСН) на структурную целостность макрофитов

Баллы	Характеристика степени фрагментированности стеблей макрофитов
0	Отсутствие фрагментации и признаков, ей предшествующих
1	Снижение упругости (тургора) стеблей (обратимая стадия)
2	Надлом стеблей в 1–2 участках общей совокупности макрофитов
3	Отделение 1–2 участков стеблей общей совокупности макрофитов
4	Большинство макрофитов (но не все) подверглись фрагментации
5	Все макрофиты подверглись фрагментации, при этом 50% фрагментов имеют длину от 6 см и более
6	Все макрофиты подверглись фрагментации, при этом более 50% фрагментов являются относительно короткими (менее 6 см). При этом присутствуют 3 и более относительно крупных фрагментов длиной от 6 см и длиннее
7	Большинство фрагментов относительно мелкие, короче 6 см. Наблюдаются 1–2 относительно длинных фрагмента (6 см и длиннее)
8	Все фрагменты длиной менее 6 см
9	Все фрагменты имеют длину менее 4 см и находятся на дне сосуда, при этом большинство фрагментов с сохранившейся пигментацией листьев
10	Все фрагменты имеют длину менее 4 см и находятся на дне сосуда, при этом больше 50% листьев отделились, разрушение листовой пластинки, выраженная депигментация

Примечание. Для определения степени фрагментации с применением данной шкалы использовали микрокосмы, в которых находилось не менее 3 растений с длиной стеблей от 12 до 30 см.

Таблица 2. Степень воздействия ПАВ ДСН (рекуррентные добавки) на структурную целостность стеблей *Potamogeton crispus* L. через 8 суток* (сентябрь)

№ сосуда	Биомасса макрофитов (сырой вес) (г)	Количество ДСН в одной добавке (мг)	Увеличение концентрации ДСН после каждой добавки (мг/л)	Суммарная добавка ДСН за весь период опыта (мг/л)	Степень фрагментации**
1	7,0	0,00	0,00	0,00	0
2	7,0	0,00	0,00	0,00	0
3	7,1	0,20	0,17	0,68	0
4	7,0	0,20	0,17	0,68	0
5	7,3	0,40	0,33	1,32	0
6	7,0	0,40	0,33	1,32	0
7	7,2	0,60	0,50	2,00	0
8	7,0	0,60	0,50	2,00	0
9	7,0	1,00	0,83	3,32	0
10	7,3	1,00	0,83	3,32	0
11	7,0	1,00	1,67	6,68	1
12	7,1	1,00	1,67	6,68	1
13	7,3	10,00	8,30	33,20	9
14	7,4	10,00	8,30	33,20	9
15	7,0	20,00	16,60	66,40	10
16	7,0	60,00	49,80	199,20	10

* Сделано 4 добавки за 8 суток.

** Степень воздействия ДСН на макрофиты оценивали по 10-балльной шкале.

Таблица 3. Степень воздействия ПАВ ДСН на макрофиты *P. crispus* L. при однократном внесении добавок ДСН

№ микро-косма	Биомасса макрофитов (сырой вес) (г)	Количество ДСН в добавке (мг)	Концентрация ДСН в сосуде (мг/л)	Степень фрагментации*			
				через 1 день	через 2 дня	через 3 дня	через 6 дней
17	7,0	100,0	83,33	1	4	5	9
18	7,0	120,0	100,00	1	5	5	9
19	7,1	160,0	133,33	1	5	5	9

*Степень воздействия ДСН на макрофиты оценивали по 10-балльной шкале.

сравнительно больших доз ДСН (83,3; 100,0; 133,3 мг/л) через день после внесения раствора ДСН степень воздействия составила 1 балл. Стебли *P. crispus* полностью фрагментировались через 6 дней после начала опыта (табл. 3).

В литературе имеются сведения об исследованиях других макрофитов, в которых изучали процессы распада и разрушения растений как часть естественных процессов отмирания, деструкции, детритообразования и в конечном результате минерализации растительной биомассы (например, [15]). Однако в этих работах не исследовалось влияние ксенобиотиков на процессы распада макрофитов.

Отметим, что полученные результаты интерпретируются как полученные в условиях именно микрокосмов – экологически довольно сложных систем, в которых наряду с макрофитами присутствуют многие другие виды водных организмов.

Нами были проведены измерения поверхностного натяжения в воде микрокосмов, содержащих водные макрофиты. Динамика изменения величины поверхностного натяжения после добавления в воду ПАВ ДСН свидетельствовала о том, что в присутствии макрофитов уменьшение концентрации ПАВ в воде ускорялось. По этому направлению работ готовится отдельная публикация. В измерениях поверхностного натяжения участвовала Е.В. Лазарева (МГУ).

Полученные результаты дополняют ранее полученные сведения о чувствительности и устойчивости растений к воздействию синтетических ПАВ [5, 16–19]. Использованная методика дополняет ранее применявшиеся методы для исследования влияния других опасных токсикантов на водные растения – макрофиты [20] и микроводоросли [21–23].

Полученные результаты в перспективе могут представить интерес в связи с поиском средоулучшающих фитотехнологий, перспективных для фиторемедиации [1] и снижения опасности химического загрязнения.

Выводы

1. Получено подтверждение целесообразности использования такого показателя, как нагрузка ксенобиотика на систему с макрофитами, которая рассчитывается как суммарное весовое количество ксенобиотика, внесенное на 1 л среды за конкретный период времени в форме нескольких добавок. Апробирован конкретный вариант методики для количественной оценки допустимой нагрузки в условиях лабораторных микрокосмов.

2. Полученные данные вносят вклад в характеристику выживаемости растений (макрофитов *P. crispus*) при воздействии загрязняющих веществ из класса ПАВ. Если период времени, в течение которого распределена нагрузка в форме нескольких добавок ДСН, составлял 8 суток, то растения *P. crispus* выдерживали добавление 6,7 мг суммарного количества ДСН на 1 л водной среды.

3. Полученные данные представляют интерес в связи с поиском показателей и характеристик взаимодействия макрофитов и ксенобиотиков, полезных и необходимых для оценки потенциальной опасности загрязнения водной среды синтетическими ПАВ и разработки средоулучшающих фитотехнологий.

Благодарность. Авторы благодарят члена-корреспондента РАН В.К. Жирова, доктора биологических наук В.С. Новикова, кандидата биологических наук М.А. Кудряшова за обсуждение затронутых в статье вопросов, кандидата

химических наук Е.В. Лазареву за помощь в определении поверхностного натяжения воды.

Список литературы

1. McCutcheon, S., Schnoor, J. Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants. Environmental Science and Technology: A Wiley-Interscience Series of Texts and Monographs. – Hoboken, 2003. – 987 p.
2. Садчиков, А.П., Кудряшов, М.А. Гидробиотика. Прибрежно-водная растительность. – М.: Издательство Academia, 2005.
3. Wetzel, B. Limnology. – San Diego, 2001. – 1006 p.
4. Давыдов, О.Н., Балахнин, И.А., Калениченко, К.П., Куровская, Л.Я. Адсорбция и десорбция катионных поверхностно-активных веществ препаратом «Аэросил» и его влияние на иммунно-физиологические показатели крови карпа // Гидробиол. ж. – 1997. – № 2. – С. 68–75.
5. Остроумов, С.А. Биологические эффекты при воздействии поверхностно-активных веществ на организмы. – М., 2001. – 331 с.
6. Остроумов, С.А. Загрязнение, самоочищение и восстановление водных экосистем. – М., 2005. – 98 с.
7. Moore, J., Ramamoorthy, S. Organic Chemicals in Natural Waters. – New York, 1984. – 289 p.
8. Fendinger, N., Versteeg, D., Weeg, E., Dyer, S., Rapaport, R. Environmental behavior and fate of anionic surfactants // Environmental Chemistry of Lakes and Reservoirs. – Washington D.C., 1994. – P. 527–557.
9. Соломонова, Е.А., Остроумов, С.А. Разработка фитотехнологий предотвращения загрязнения водной среды // Интеграция научно-технической и педагогической общественности в обеспечении экологической безопасности. Материалы конференции в рамках научно-технического конгресса по безопасности «Безопасность – основа устойчивого развития регионов и мегаполисов». Москва, 12 октября 2005 г., М.: Правительство Москвы; Международный, Российский и Московский союзы научных и инженерных общественных объединений. – МГУ, 2005. – С. 43–46.
10. Ostroumov, S.A. Bridging ecology and phytoremediation: phytoremediation potential of some aquatic and terrestrial plants // The 3rd International Phytotechnologies Conference, 2005 April 19–22, Atlanta, Georgia. – 2005. – P. 150.
11. Ostroumov, S.A. Manchenko, E.A. Studying interactions between *Elodea canadensis* and sodium dodecyl sulphate // The 3rd International Phytotechnologies Conference, 2005 April 19–22, Atlanta, Georgia. – 2005. – P. 153.
12. Ostroumov, S.A., Manchenko, E.A. Biological effects of chemicals that pollute aquatic ecosystems: interactions between sodium dodecylsulphate and *Elodea canadensis* // Abstracts. EURECO 2005. X European Ecological Congress, November 8–13, 2005, Kusadasi, Izmir, Turkey. – Bornova/Izmir: META Press, 2005. – P. 177.
13. Ostroumov, S.A., McCutcheon, S.C., Nzengung, V.A., Yifru, D.D., Manchenko, E.A. Plant ecology and phytoremediation: using potential of some aquatic and terrestrial plants to decontaminate environment // Abstracts. EURECO 2005. X European Ecological Congress, November 8–13, 2005, Kusadasi, Izmir, Turkey. Bornova/Izmir: META Press, 2005. – P. 171.
14. 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 // Ecol. Stud., Hazards, Solut. – 2006. – Vol. 11. – P. 72–74.
15. Gamage, N., Asaeda, T. Decomposition and mineralization of *Eichhornia crassipes* litter under aerobic conditions with and without bacteria // Hydrobiologia. – 2005. – Vol. 541. – P. 13–27.
16. Уланова, А.Ю., Остроумов, С.А. Использование растений для фиторемедиации и изучение ассимиляционной емкости систем с макрофитами // Водные экосистемы и организмы. – М., 1999. – С. 57.
17. Остроумов, С.А., Соломонова, Е.А. Изучение фиторемедиационного потенциала водных растений // Экол. окруж. среды и безопас. жизнедеят. – 2006. – № 6. – С. 63–68.
18. Остроумов, С.А., Соломонова, Е.А. К разработке гидробиологических вопросов фиторемедиации: взаимодействие трех видов макрофитов с додецилсульфатом натрия // Вода и экол. – 2006. – № 3. – С. 45–49.
19. Ostroumov, S.A. Biological effects of surfactants. – Boca Raton, 2006. – 280 p.
20. Кузьмицкая, И.В. Чувствительность элодеи канадской к бихромату калия // Водные организмы и экосистемы: Мат. науч. конф. Москва, 19–20 апр. 1999. – М., 1999. – Т. 1. – С. 35.
21. Паршикова, Т.В. Влияние поверхностно-активных веществ на рост, размножение и функциональную активность водорослей в культурах и природных популяциях // Эколого-физиологическое исследование водорослей и их значение для оценки состояния природных вод: Докл. на конф. Борок, 3–5 дек. 1996. – Ярославль, 1996. – С. 161–163.
22. Христофорова, Н.К., Айздайчер, Н.А., Березовская, О.Ю. Действие ионов меди и детергента на зеленые микроводоросли *Dunaliella tertiolecta* и *Platymonas* sp. // Биол. моря. – 1996. – № 2. С. 114–119.
23. Маркина, Ж.В., Айздайчер, Н.А. *Dunaliella salina* (Chlorophyta) как тест-объект для оценки загрязнения морской среды детергентами // Биол. моря. – 2005. – Т. 31, № 4. – С. 274–279.