

ФИТОТОКСИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СМЕСИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА МАКРОФИТ *ELODEA CANADENSIS* В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ

© 2017 г. В.А. Поклонов

Международный независимый эколого-политологический университет,
Москва, Россия

Ключевые слова: тяжелые металлы, фитотоксичность, фиторемедиация, микрокосмы, водные макрофиты, биотестирование, качество воды, химическое загрязнение, *Eloдея канадская*.



В.А. Поклонов

Исследован фитотоксический эффект воды, загрязненной смесью тяжелых металлов. Вода экспериментальных микрокосмов содержала тяжелые металлы (Zn, Cu, Pb, Cd, Fe⁺², Fe⁺³, Cr⁺⁶, Ni). Концентрации металлов подобраны таким образом, чтобы имитировать загрязнения воды отходами отрасли машиностроения (шламы). Подобный опыт проводился впервые *in vitro*. В микрокосмы инкубирован макрофит *Eloдея канадская* как один из самых приспособленных и распространенных видов. За первые трое суток не было выявлено фитотоксического эффекта в микрокосмах с растениями и добавкой тяжелых металлов. Гибель растений зафиксирована через 168 ч (7 сут) после начала инкубации. Микрокосмы с растениями без добавления металлов не приобрели изменений после начала инкубации. На вторые сутки после инкубации выпал оранжевый осадок в микрокосмах без макрофитов, но с добавкой тяжелых металлов. Результаты исследований дополняют представления о полифункциональной роли гидробионтов в миграции элементов в водных экосистемах. Полученные данные указывают на перспективность дальнейшего исследования *Eloдея канадская* в целях фиторемедиации и поиска верхней границы толерантности к тяжелым металлам.

Среди загрязняющих окружающую среду веществ значительное место занимают тяжелые металлы (ТМ). Загрязняющие вещества проявляют токсичность в различных тест-системах, а в ряде систем оказывают генотоксичное и мембранотропное действие. Необходимы исследования, направленные на создание экологических технологий очищения среды от поллютантов, в т. ч. от тяжелых металлов [1, 2].

Тяжелые металлы могут попадать в водоемы в результате смыва почвы. Вещества, загрязняющие поверхностные воды, распределяются в ней по-разному: одни растворяются и переносятся за счет движения водных масс, другие адсорбируются на взвешенных частицах и оседают на дно [3, 4]; третьи поглощаются растениями. Изучение взаимодействия неорганических загрязняющих веществ с растениями в условиях водных микросистем необходимо для разработки фитотехнологий очищения воды, а также выявления диапазона условий, в рамках которых можно использовать данный вид в целях фиторемедиации [1]. Благодаря сорбционным процессам происходит частичное самоочищение водотока от соединений тяжелых металлов, они переходят в донные отложения, являющиеся активными накопителями металлов. При значительных превышениях допустимых концентраций тяжелых металлов в донных отложениях происходит ингибирование жизненно важных процессов в бентосных организмах, что зачастую приводит к их болезни и гибели [3, 4].

Для экотехнологий снижения опасности химического загрязнения среды и ремедиации загрязненных сред используется способность организмов, включая растения, воздействовать на физические и химические параметры окружающей среды, в т. ч. и на параметры водной среды [5, 6]. В состав биоты водных экосистем входят макрофиты, которые в настоящее время исследуются с перспективой разработки экотехнологий очищения компонентов окружающей среды (фиторемедиации) [7, 8]. В водоемах и водотоках имеют место сложные взаимосвязи между биотой и качеством воды, функционируют комплексные механизмы самоочищения воды, в которых существенная роль принадлежит водным организмам [9].

Водоросли активно поглощают Zn, Cu, меньше – Pb и Cd. Высокая степень концентрирования металлов водорослями происходит вследствие возможной их адсорбции на клеточной стенке [10, 11]. Экспериментально установлено быстрое поглощение водорослями металлов при их добавке в среду обитания [12]. Такие растения можно рассматривать в качестве естественных очистителей воды. В Канаде имеется успешный опыт очищения прудов-отстойников водной растительностью. Но следует отметить, что при очистке воды водорослями необходимо планировать их обязательный сбор, удаление и утилизацию, поскольку растения, поглощая металлы, переводят их в более подвижное состояние [13].

Цель проведенного исследования – получение данных о воздействии восьми тяжелых металлов на макрофит *Elodea canadensis* (семейство водокрасовые – Hydrocharitaceae) в условиях экспериментальных микросистем. Исследуемая смесь тяжелых металлов впервые используется в подобном эксперименте.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выбор вида растения был связан с предварительными наблюдениями в природе и осмотром водных объектов, находящихся в условиях антропогенного воздействия. Значительная биомасса макрофита *Elodea canadensis* в загрязненных водоемах свидетельствовала о его способности выдерживать определенные уровни загрязнения воды в наблюдаемых условиях [14].

Элодея – очень распространенное в северном полушарии Земли пресноводное растение. Ареал его распространения доходит до субарктики на севере и тропиков на юге. В Африке и Австралии элодея является инвазионным видом. Вышеперечисленные факты обосновали выбор этого растения в качестве тест-объекта в проводимом эксперименте. Перед экспериментом макрофит содержался в условиях оранжереи, в резервуарах с пресной водой.

Использован исходный раствор восьми тяжелых металлов, содержащий меди 61,9 мг/л; железа Fe^{+3} – 50 мг/л; никеля – 37 мг/л; железа Fe^{+2} – 30 мг/л; цинка – 25,8 мг/л; хрома Cr^{+6} – 22 мг/л; свинца – 2,7 мг/л; кадмия – 1,5 мг/л; рН раствора составлял 5,2. Концентрации металлов примерно соответствуют сточным водам из гальванических цехов (отрасль машиностроения).

В состав микрокосмов входили следующие компоненты: отстоянная водопроводная вода (ОВВ) по 2500 мл; раствор восьми тяжелых металлов (8 М) добавляли по 100 мл (табл. 1). Микрокосмы под номерами 1А, 1В и 1С являются контролем без растений. Контроль без растений необходим для того, чтобы рассмотреть действие металлов в воде без растений.

Таблица 1. Состав микрокосмов

Номер микрокосма	Биомасса, сырой вес, г	ОВВ, мл	Добавка 8М, мл
1А	–	2500	100
1В	–	2500	100
1С	–	2500	100
2А	94,3	2500	100
2В	86,5	2500	100
2С	89,8	2500	100
3А	70,5	2500	Нет добавления 8М
3В	72,3	2500	Нет добавления 8М
3С	78,4	2500	Нет добавления 8М

Инкубация происходила в лабораторных условиях при температуре 21 ± 2 °С при естественном фотопериоде. Длительность инкубации составила 7 дней (табл. 2), в течение которых вели ежедневный визуальный мониторинг состояния макрофитов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Тестируемая смесь проявляла фитотоксичность. Через двое суток инкубации в микрокосмах с тяжелыми металлами проявились признаки неблагополучия. Через трое суток инкубации (табл. 2) произошла полная гибель макрофитов. В микрокосмах с добавкой тяжелых металлов и побегам растений мутность воды с каждым днем усиливалась. В дополнительных контрольных микрокосмах 3А, 3В, 3С (без добавления тяжелых металлов) на протяжении всего эксперимента не наблюдалось признаков фитотоксичности.

Уровень рН микрокосмов после добавления тяжелых металлов составил 7,6–7,8 в сосудах с растениями и 7,9–8,2 в сосудах без растений. Уровень рН микрокосмов с растениями, но без добавления тяжелых металлов 7,1–7,2.

Факт гибели макрофитов под воздействием тяжелых металлов указывает на необходимость выявления таких концентраций ионов, которые находятся в пределах диапазона толерантности макрофитов, что будет полезным для практического применения фитотехнологий в дальнейших экспериментах. Особую важность имеет выявление верхней границы диапазона толерантности макрофитов к ионам металлов. Повышенные концентрации ионов могут вызвать гибель макрофитов, что, в свою очередь, может способствовать вторичному загрязнению водной среды.

Фиторемедиационный потенциал ранее изучали и на других видах макрофитов: *Utricularia gibba* L., *Echinodorus quadricostatus* Fasset, *Synnema triflorum* Kuntze, *Hydrotriche hottoniiflora* Zucc, *Lilaeopsis* sp., *Ceratophyllum demersum* L., *Potamogeton crispus* L. [1, 2, 9, 13].

В ходе проведенных экспериментов получены данные о воздействии смеси восьми тяжелых металлов на водный макрофит *Elodea canadensis*. В условиях опыта отмечено, что испытываемая смесь тяжелых металлов (Zn, Cu, Pb, Cd, Fe⁺², Fe⁺³, Cr⁺⁶, Ni) проявляла фитотоксичность. Для уточнения взаимодействия высших водных растений с тяжелыми металлами целесообразно провести дополнительные эксперименты с использованием методов химического анализа.

Сведения о фитотоксичности тяжелых металлов полезны для разработки современных фитотехнологий очищения воды.

Таблица 2. Состояние микрокосмов после добавления восьми металлов

№ микрокосма	Время инкубации				
	0 сут	1 сут	2 сут	3 сут	7 сут
1А	Вода приоб-рела бледно-желтую окраску	Без изменений	Во всех контрольных микрокосмах выпала желтый осадок	Во всех контрольных микрокосмах выпал желтый осадок	Во всех контрольных микрокосмах осталась желтый осадок; опыт завершен
1В					
1С					
Контроль					
2А	Побеги занимают весь столб воды; вода приоб-рела бледно-желтую окраску	Без изменений	Побеги занимают весь столб воды, растения зеленые, тургор ослаблен; появился неприятный запах; вода мутная	Побеги занимают весь столб воды, тургор отсутствует; неприятный запах; сильная мутность воды; фиксируется гибель растений	Побеги занимают весь столб воды; пленка на поверхности воды и на побегах; острый гнилостный запах; листья побурели и согнулись; нет отделения листьев от стеблей; сильная мутность воды; опыт завершен
2В	Побеги занимают весь столб воды; вода приоб-рела бледно-желтую окраску	Без изменений	Побеги занимают весь столб воды, растения зеленые, тургор ослаблен; появился неприятный запах; вода мутная	Побеги занимают весь столб воды, тургор отсутствует; неприятный запах; сильная мутность воды; гибель растений	Побеги занимают весь столб воды; пленка на побегах; острый гнилостный запах; листья побурели и согнулись; нет отделения листьев от стеблей; сильная мутность воды; опыт завершен
2С	Побеги занимают весь столб воды; вода приоб-рела бледно-желтую окраску	Без изменений	Побеги занимают весь столб воды, растения зеленые, тургор ослаблен; появился неприятный запах; вода мутная	Побеги занимают весь столб воды, тургор отсутствует; неприятный запах; сильная мутность воды; гибель растений	Побеги занимают весь столб воды; пленка на поверхности воды и на побегах; острый гнилостный запах; листья побурели и почти все согнулись; нет отделения листьев от стеблей; сильная мутность воды; опыт завершен

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного опыта согласуются с предположениями о взаимодействии металлов с макрофитами, включая данные о негативном воздействии ряда тяжелых металлов на макрофиты. Данные о тяжелых металлах, также как результаты изучения взаимодействия других поллютантов с макрофитами [14], полезны для целей фиторемедиации.

Изложенные выше результаты проведенного эксперимента расширяют сведения о фитотоксическом воздействии смеси тяжелых металлов (Zn, Cu, Pb, Cd, Fe⁺², Fe⁺³, Cr⁺⁶, Ni) на водные растения, в данном случае на элодею. Новые экспериментальные данные вносят вклад в методику разработки эффективных экотехнологий с целью снижения опасности комплексного загрязнения водной среды, что входит в число приоритетов современной экологии. Необходимо и дальше продолжать накапливать опытную информацию о взаимодействии различных поллютантов с водной растительностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поклонов В.А., Котелевцев С.А., Демина Л.А., Шестакова Т.В., Шелейковский В.А., Остроумов С.А. Изучение взаимодействий неорганических загрязняющих веществ с растениями в условиях водных микрокосмов // Успехи наук о жизни. 2011. № 3. С. 121–123.
2. Поклонов В.А., Остроумов С.А., Шестакова Т.В. Изучение химико-биотических взаимодействий макрофитов (*Utricularia gibba* L, *Echinodorus quadricostatus* Fasset, *Synnema triflorum* Kuntze, *Hydrotriche hottoniiflora* Zucc, *Lilaeopsis* sp.) с тяжелыми металлами (Cd, Zn, Cu, Pb), загрязняющими окружающую среду // Всероссийский журнал научных публикаций. М.: Эстет, 2011. С. 10–12.
3. Даувальтер В.А. Подходы к оценке экологического состояния поверхностных вод по результатам исследования донных отложений // Всероссийская конференция «Научные аспекты экологических проблем России»: тез. докл. СПб.: Гидрометиздат, 2001. 37 с.
4. Никаноров А.М., Жулидов А.В. Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных системах. Л.: Гидрометиздат, 1991. 311 с.
5. Абакумов В.А. Инновационные подходы к восстановлению и ремедиации загрязненных водных объектов // Вода: технология и экология. 2007. № 4. С. 69–73.
6. Kapitsa A.P. Formulation of fundamental principles for foundation of the theory of the apparatus of the biosphere // Environm. Ecol. Safety Life Activity. No 1(37). 2007. P. 68–71.
7. Соломонова Е.А., Остроумов С.А. Изучение устойчивости водного макрофита *Potamogeton crispus* L. к додецилсульфату натрия // Вестник Московского университета. Сер. 16. Биология. № 4. 2007. С. 39–42.

8. *Ostroumov S.A.* Polyfunctional role of biodiversity in processes leading to water purification: current conceptualizations and concluding remarks // *Hydrobiologia*. 469. 2002. P. 203–204.
9. *Остроумов С.А., Котелевцев С.В., Шестакова Т.В., Колотилова Н.Н., Поклонов В.А., Соломонова Е.А.* Новое о фиторемедиационном потенциале: ускорение снижения концентраций тяжелых металлов (Pb, Cd, Zn, Cu) в воде в присутствии элодеи // *Экологическая химия*. 18 (2). 2009. С.111–119.
10. *Greene B., Hosea M., McPherson R., Henzl M., Alexander M. D., Darnall D.W.* Interaction of gold(I) and gold(III) complexes with algal biomass, *Environmental Science and Technology*. 1986. Vol. 20. No 6. P. 627–632.
11. *Rebhum S, Ben-Amortz A.* The distribution of cadmium between the marine alga *Chlorella stigmatophora* and sea water medium. Effect of algal growth // *Water resources*. 1984. Vol. 18. No 2. P. 173–178.
12. *Горюнова С.И., Максимов В.Н., Плеханов С.Е.* Адсорбция и выведение тяжелых металлов микроводорослями в зависимости от их физиологического состояния // *Научные труды высшей школы. Биолог. серия*. 1984. № 2. С. 69–72.
13. *Остроумов С.А., Шестакова Т.В., Котелевцев С.В., Соломонова Е.А., Головня Е.Г., Поклонов В.А.* Присутствие макрофитов в водной системе ускоряет снижение концентраций меди, свинца и других тяжелых металлов в воде // *Водное хозяйство России*. 2009. № 2. С. 58–67.
14. *Поклонов В.А.* Фитотоксический эффект бензола в водной среде // *Экологический вестник России*. 2015. № 12. С. 66–69.

Сведения об авторе:

Поклонов Владислав Александрович, канд. биол. наук, заведующий лабораторией водоподготовки и водоочистки экологического факультета, Международный независимый эколого-политологический университет, Россия, 127299, Москва, ул. Космонавта Волкова д. 20; e-mail: warvir@rambler.ru