

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ТОКСИКОЛОГИЯ

УДК 574.58 : 546.56-546.816

НАКОПЛЕНИЕ СВИНЦА И ДРУГИХ ТОКСИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ ВОДНЫМИ РАСТЕНИЯМИ

И.В. Тропин, С.А. Остроумов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический факультет, 119991, г. Москва, Российская Федерация

Три токсичных металла, - свинец, медь и цинк - были измерены в биомассе водных высших растений *Elodea densa*. Использовали метод атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Растения инкубировали при повышенных концентрациях трех металлов в водной среде. Это привело к значительному увеличению содержания свинца в биомассе растений. А именно, концентрация свинца в биомассе выросла до 1567% по сравнению с фоновой концентрацией этого элемента в биомассе в контроле (фоновая концентрация была принята за 100%). После инкубации концентрация меди в биомассе составляла 594% от фоновой концентрации. После аналогичной инкубации концентрация цинка составляла 133% от фоновой концентрации. Результаты могут быть полезны при анализе вопросов биологического мониторинга и очищения воды.

Ключевые слова: свинец, загрязнение воды, тяжелые металлы, медь, цинк, водные высшие растения, макрофиты, накопление металлов.

Введение. Тяжелые металлы – в том числе свинец, цинк и медь – относятся к опасным химическим загрязнителям водной среды. Показаны многочисленные токсичные воздействия этих металлов на водные организмы [1].

Исследователями многих лабораторий изучается вопрос о накоплении водными растениями химических элементов, в том числе металлов, из водной среды [2-11]. Этот вопрос обсуждается в связи с разработкой проблем биологического мониторинга и научных основ биотехнологий (фитотехнологий) очищения водной среды [2, 12-15].

По этим вопросам опубликован существенный объем данных, полученных при изучении высших водных растений (макрофитов) отечественными и зарубежными исследователями [3-11]. Однако, для разработки научных основ технологий использования растений для очищения воды необходимы как можно более широкие сведения о максимально возможном круге биологических видов макрофитов и химических элементов.

Цель данной работы – изучение взаимодействия трех металлов (свинец, медь, цинк) с водными растениями, макрофитами *Elodea densa*.

Материалы и методы исследования. До начала эксперимента очищенные от эпифитов и эпибионтов растения *Elodea densa* в течение нескольких недель содержались в 40-литровом аквариуме (постоянная барботация воды воздухом, температура воды 21°C, фотопериод 14С:10Т, освещенность 16 мкМ квантов · м⁻² · с⁻¹). Один раз в 10 дней в водную среду вносили 5 мл раствора микроэлементов [16] и 5 мл подкормки (70 мМ азот N, 1,6 мМ фосфор P и 170 мМ углерод C). Инкубацию растений в эксперименте проводили в пластиковых сосудах емкостью 1 л в барботируемой воздухом среде при весовом соотношении фитомассы и воды (1:100). Физические условия (температура воды, фотопериод и освещенность) инкубации растений в эксперименте соответствовали исходным условиям содержания в аквариуме.

Тропин Иван Владимирович (Tropin Ivan Vladimirovich), к.б.н., старший научный сотрудник биологического факультета, МГУ им. М.В. Ломоносова, ar55@yandex.ru

Остроумов Сергей Андреевич (Ostroumov Sergey Andreyevich), д.б.н., ведущий научный сотрудник биологического факультета, МГУ им. М.В. Ломоносова, ar55@yandex.ru

В соответствии с планом эксперимента растения в водной среде подвергали раздельному 24-часовому воздействию $PbNO_3$, $CuSO_4$ и $ZnSO_4$, при конечной концентрации металлов в среде 5 мкМ/л. После окончания инкубации растения вынимали из пластиковых сосудов и дважды ополаскивали дистиллированной водой. Избыточную влагу с поверхности растений удаляли, тщательно промокая их фильтровальной бумагой.

Измерения содержания металлов в целых растениях *Elodea densa* проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре (метод пламенной ионизации) «НИТАСНИ-180-80» (Япония). Содержание металлов рассчитывали в мкМ на грамм массы сырого растения. Результаты были обработаны статистически, рассчитана стандартная ошибка.

Результаты и обсуждение. Проведенные опыты дали ответ на вопрос о том, как повышение концентрации свинца, меди и цинка в водной среде сказывается на их содержании в тканях высшего водного растения *Elodea densa*.

Полученные данные о фоновом содержании металлов (свинец, медь, цинк) и об их накоплении в эксперименте в целых растениях водного макрофита *Elodea densa* представлены в таблице 1.

Результаты, представленные в таблице 1, показывают существенное увеличение содержания обоих металлов в тканях изученного макрофита. Обращает на себя внимание тот факт, что после инкубации в водной среде с повышенной концентрацией металлов нарастание содержания трех металлов было выражено в разной степени для свинца, меди и цинка.

Содержание свинца увеличилось очень значительно: более чем в 15 раз (1566.7% по сравнению с контролем, который был принят за 100%).

Содержание меди выросло более чем в 5 раз (593.6% по сравнению с концентрацией меди в контроле). Содержание цинка выросло, но в меньшей степени. После инкубации в среде с повышенным содержанием цинка концентрация этого металла в тканях макрофита *Elodea densa* увеличилась в 1,3 раза (133,3% по сравнению с концентрацией цинка в контроле).

Отметим, что полученные в данной работе результаты - нарастание концентрации свинца, меди и цинка в биомассе макрофитов *Elodea densa* - согласуются с данными других исследователей о возможности аккумуляции этих металлов в высших водных растениях.

С учетом данных научной литературы составлена таблица 2, где указаны примеры накопления изученных металлов водными растениями.

Ранее один из соавторов опубликовал статью о самоочищении воды в водных экосистемах, в которых в качестве одного из факторов самоочищения указывалась сорбция и аккумуляция загрязняющих веществ водными организмами [18, 19]. Полученные в данной работе новые факты об аккумуляции токсичных металлов (свинца, меди и цинка) водными растениями подтверждают это положение указанной теории самоочищения воды.

В последнее время получены новые данные о токсичности и экологической опасности тяжелых металлов, в том числе изученных в данной работе [20, 21]. Это еще раз подтверждает актуальность полученных результатов.

Необходимо отметить два аспекта практического значения изложенного выше.

Во-первых, повышение содержания токсичных металлов в водных растениях может использоваться как полезная информация при проведении биологического мониторинга состояния водое-

Таблица 1

Содержание металлов в *Elodea densa* при фоновой (0.01 мкМ Ме/л) и повышенной (5.0 мкМ Ме/л) концентрации металлов в среде. Концентрации металлов указаны в расчете на сырой вес биомассы растений. N= 3 (биологические повторности). Фон – фоновая концентрация в контроле; Эксп (эксперимент) – концентрация после инкубирования при повышенной концентрации металла в водной среде

Ме	вариант	концентрация, мкМ/г	Стандартная ошибка	Содержание металлов как % от фонового
Pb	Фон	0,018	0,01	100
Cu	Фон	0,069	0,003	100
Zn	Фон	0,955	0,021	100
Pb	Эксп	0,282	0,01	1566.7
Cu	Эксп	0,4096	0,036	593.6
Zn	Эксп	1,2733	0,064	133.3

Таблица 2

Выявление накопления свинца, меди и цинка высшими водными растениями

Металлы	Виды растений	Ссылки
Свинец	<i>Elodea densa</i>	Данная работа
Свинец	<i>Ceratophyllum demersum</i>	Остроумов С.А., Шестакова Т.В., 2009. [17]
медь	<i>Elodea densa</i>	Данная работа
	<i>Potamogeton pectinatus</i> L.:	Costa M.B., Tavares F.V., Martinez C.B., Colares I.G. and Martins C.D.M.G., 2018. [3]
медь	<i>Eichhornia crassipes</i> and <i>Alternanthera philoxeroides</i>	Ramachandra T.V., Sudarshan P.B., Mahesh M.K. and Vinay S., 2018. [4]
медь	<i>Pistia stratiotes</i> (water lettuce)	Sanches Filho P.J., Nunes L., da Rosa N., Betemps G.R. and Pereira R.S., 2015. [5]
медь	<i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms-Laubach,	Romero-Hernández, et al., 2017 [6]
медь	<i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verdc,	Romero-Hernández, et al., 2017 [6]
цинк	<i>Elodea densa</i>	Данная работа
цинк	<i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms-Laubach,	Romero-Hernández, et al., 2017 [6]
цинк	<i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verdc,	Romero-Hernández, et al., 2017 [6]

мов и водотоков в условиях химического загрязнения.

Во-вторых, накопление экотоксикантов в биомассе водных растений означает удаление этих веществ из водной среды и связано с некоторым очищением водной среды. Новые данные в этой области помогают лучше видеть полезную роль растений в самоочищении воды.

Выводы:

1. Изучали содержание трех металлов (свинца, меди и цинка) в высших водных растениях *Elodea densa* методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии в контроле и после инкубации при повышенных концентрациях этих металлов в водной среде.

2. Показано нарастание концентрации трех металлов в изученных растениях *Elodea densa* после

инкубации в водной среде, куда добавили эти металлы и где была создана повышенная концентрация этих металлов.

3. Нарастание концентрации, по сравнению с контролем, было значительно более выражено для свинца и меди, чем для цинка.

4. Новые факты об аккумуляции трех токсичных металлов подтверждают теорию биотического самоочищения воды в водных экосистемах [18, 19].

5. Полученные результаты вносят вклад в понимание роли макрофитов в очищении водной среды (что имеет значение для разработки новых биотехнологий очищения и детоксикации воды), а также в разработку вопросов биологического мониторинга загрязнения водной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моисеенко Т.И. Водная экотоксикология: Теоретические и прикладные аспекты М.: Наука, 20

2. Тропин И. В., Остроумов С. А. Проблемы биологического мониторинга водных экосистем с использованием пресноводных растений. Биохимические аспекты накопления тяжелых металлов. Природные и антропогенные экосистемы: проблемы и решения. Москва: Библио-Глобус, 2017: 112–135.

3. Costa M.B., Tavares F.V., Martinez C.B., Colares I.G., Martins C.D.M.G., 2018 Accumulation and effects of copper on aquatic macrophytes *Potamogeton pectinatus* L.: Potential application to environmental monitoring and phytoremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018; 155: 117-124.

4. Ramachandra T.V., Sudarshan P.B., Mahesh M.K., Vinay S., Spatial patterns of heavy metal accumulation in sediments and macrophytes of Bellandur wetland, Bangalore. *Journal of Environmental Management*. 2018; 206: 1204-1210.

5. Sanches Filho P.J., Nunes L., da Rosa N., Betemps G.R., Pereira R.S., Comparison among native floating aquatic macrophytes for bioconcentration of heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, 2015;10(1): 1-6.

6. Romero-Hernández J.A., Amaya-Chávez A., Balderas-Hernández P., Roa-Morales G., González-Rivas N., Balderas-Plata M.Á., Tolerance and hyperaccumulation of a mixture of heavy metals (Cu, Pb, Hg, and Zn) by four aquatic macrophytes. *International Journal of Phytoremediation*, 2017; 19(3): 239-245.

7. Тропин И.В., Золотухина Е.Ю., Бурдин К.С. Распределение тяжелых металлов в биохимических фракциях тканей водных макрофитов. *Океанология*. 1994; 34: 62-64.

8. Золотухина Е.Ю., Гавриленко Е.Е. Связывание меди, кадмия, железа, цинка и марганца белками водных макрофитов. *Физиология растений*. 1990; 37 (4): 651-658.

9. Золотухина Е.Ю., Тропин И.В., Кононенко П.В. Распределение тяжелых металлов в талломах бурой водоросли *Laminaria saccharina* (Ag.) Kjellm. *Вестник МГУ, Серия Биология*. 1992; 1: 72-76.

10. Лубкова Т.Н., Пухов В.В., Шестакова Т.В., Тропин И.В., Хотелевцев С.В., Остроумов С.А. Изучение взаимодействия токсичных металлов с биомассой

одноклеточных водорослей методом ICP-MS. Токсикологический вестник. 2015; 6: 41-45.

11. 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. 2009; 18 (2): 111-112.
12. Остроумов С.А., Соломонова Е.А. Метод определения допустимых нагрузок загрязняющих веществ на высшие водные растения и перспективы его применения. Экология промышленного производства. 2012; 2: 54-60.
13. Соломонова Е.А., Остроумов С.А. Оценка допустимых нагрузок

загрязняющих веществ на макрофиты в водной среде с использованием метода рекуррентных добавок.

- Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014; 2: 88-112. <https://www.researchgate.net/publication/262303768>;
14. Крот Ю.Г., 2015. Использование высших водных растений в биотехнологиях очистки поверхностных и сточных вод. Гидробиологический журнал. 2006; 42 (1):76-91.
15. Тарушкина Ю.А., Ольшанская Л.Н., Мечева О.Е., Лазуткина А.С. Высшие водные растения для очистки сточных вод. Экология и промышленность России. 2006; 5:36-39.
16. Шубравый О.И. Аквариум с искусственной морской водой для со-

держания и разведения примитивного многоклеточного организма *Trichoplax* и других мелких беспозвоночных. Зоологический журнал. 1983; 12 (4): 618-621.

17. Остроумов С.А., Шестакова Т.В. Снижение измеряемых концентраций Cu, Zn, Cd, Pb в воде экспериментальных систем с *Ceratophyllum demersum*: потенциал фиторемедиации. Доклады академии наук (ДАН). 2009; 428 (2): 282-287. <https://www.researchgate.net/publication/266209702> ;
18. Остроумов С.А. О биотическом самоочищении водных экосистем. Элементы теории. Доклады академии наук (ДАН). 2004; 396 (1): 136-141. <https://www.researchgate.net/publication/265294672> ;

19. Остроумов С.А. Качество и кондиционирование воды в природных экосистемах: разработка теории биологических механизмов самоочищения воды. Экологическая химия, 2017; 26 (4): 175-181. <https://www.researchgate.net/publication/319955185> ;
20. Саптарова Л.М., Князева О.А., Галимов Ш.Н., Когина Э.Н., Газдалиева Л.М. Влияние хронической интоксикации медно-цинковой колчеданной рудой на показатели системы крови и содержание в ней тяжелых металлов в эксперименте. Токсикологический вестник, 2017; 6: 31-34.
21. Еськов Е. К., Еськова М. Д., Рожников А. С. Диагностика отравлений пчел свинцом и кадмием. Токсикологический вестник, 2018; 1: 26-29.

REFERENCES:

1. Moiseenko T.I. Aquatic ecotoxicology: Theoretical and applied aspects. Moscow: Nauka Press, 2009 (in Russian).
2. Tropin I. V., Ostroumov S. A. Issues of biological monitoring of aquatic ecosystems with use of freshwater plants. Biochemical aspects of accumulation of heavy metals. *Prirodnye i antropogennye ekosistemy: problemy i resheniya*. Moscow: Biblio-Globus Press, 2017: 112-135 (in Russian).
3. Costa M.B., Tavares F.V., Martinez C.B., Colares I.G., Martins C.D.M.G. Accumulation and effects of copper on aquatic macrophytes *Potamogeton pectinatus* L.: potential application to environmental monitoring and phytoremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018; 155: 117-124.
4. Ramachandra T.V., Sudarshan P.B., Mahesh M.K., Vinay S. Spatial patterns of heavy metal accumulation in sediments and macrophytes of Bellandur wetland, Bangalore. *Journal of Environmental Management*. 2018; 206: 1204-1210.
5. Sanches Filho P.J., Nunes L., da Rosa N., Betemps G.R., Pereira R.S. Comparison among native floating aquatic macrophytes for bioconcentration of heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, 2015; 10(1): 1-6.
6. Romero-Hernández J.A., Amaya-Chávez A., Balderas-Hernández P., Roa-Morales G., González-Rivas N., Balderas-Plata M.Á. Tolerance and hyperaccumulation of a mixture of heavy metals (Cu, Pb, Hg, and Zn) by four aquatic macrophytes. *International Journal of Phytoremediation*, 2017; 19(3): 239-245.
7. Tropin I.V., Zolotukhina E.Yu., Burdin K.S. Distribution of heavy metals in biochemical fractions of tissues of aquatic macrophytes. *Okeanologia*. 1994; 34: 62-64 (in Russian).
8. Zolotukhina E.Yu., Gavrilenko E.E. Binding of copper, cadmium, iron, zinc and manganese to proteins of aquatic plants. *Fiziologiya rasteniy*. 1990; 37 (4): 651-658 (in Russian).
9. Zolotukhina E.Yu., Tropin I.V., Kononenko R.V. Distribution of heavy metals in talloms of brown alga *Laminaria saccharina* (Ag.) Kjellm. *Vestnik MGU, Seriya Biologiya*. 1992; 1: 72-76 (in Russian).
10. Lubkova T.N., Pukhov V.V., Shestakova T.V., Tropin I.V., Kotelevtsev S.V., Ostroumov S.A. Study of interactions of toxic metals with biomass of unicellular algae ICP-MS. *Toksikologicheskiy vestnik*. 2015; 6: 41-45 (in Russian).
11. Ostroumov S.A., Kotelevtsev S.V., Shestakova T.V., Kolotilova N.N., Poklonov V.A., Solomonova E.A. New on phytoremediation potential: acceleration of decrease of concentrations of heavy metals (Pb, Cd, Zn, Cu) in water in the presence of elodea. *Ekologicheskaya khimiya*. 2009; 18 (2): 111-119 (in Russian).
12. Ostroumov S.A., Solomonova E.A. Method for determination of allowable loads of pollutants on higher aquatic plants and prospects of its application. *Ekologiya i promyshlennogo proizvodstva*. 2012; 2: 54-60 (in Russian).
13. Solomonova E.A., Ostroumov S.A. Assessment of allowable loads of pollutants on macrophytes in aquatic environment using a new method of recurrent additions. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2014; 2: 88-112. <https://www.researchgate.net/publication/262303768> (in Russian).
14. Krot Yu.G. Use of higher aquatic plants in biotechnologies of purification of surface and sewage waters. *Gidrobiologicheskiy zhurnal*. 2006; 42 (1):76-91 (in Russian).
15. Tarushkina Yu.A., Ol'shanskaya L.N., Mecheva O.E., Lazutkina A.S. Higher aquatic plants to purify sewage waters. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2006; 5:36-39 (in Russian).
16. Shubravyy O.I. Aquatium with artificial seawater to keep and breed a primitive multicellular organism *Trichoplax* and other small invertebrates. *Zoologicheskiy zhurnal*. 1983; 12 (4): 618-621 (in Russian).
17. Ostroumov S.A., Shestakova T.V. Decreasing the measurable concentrations of Cu, Zn, Cd, and Pb in the water of the experimental systems containing *Ceratophyllum demersum*: The phytoremediation potential. *Doklady Biological Sciences*. 2009; 428:444-449. <https://www.researchgate.net/publication/40481671> .
18. Ostroumov S.A. On the biotic self-purification of aquatic ecosystems: elements of the theory. *Doklady Biological Sciences*. 2004; 396: 206-212. <https://www.researchgate.net/publication/200567576> .
19. Ostroumov S.A. Water quality and conditioning in natural ecosystems: biomachinery theory of self-purification of water. *Ekologicheskaya khimiya*, 2017; 26 (4): 175-181. <https://www.researchgate.net/publication/319955185> (in Russian).
20. Saptarova L.M., Knyazeva O.A., Galimov Sh.N., Kogina E.N., Gazdalieva L.M. Influence of chronic intoxication copper-zinc pyrite ore on indicators of the blood system and the content of heavy metals in it in the experiment. *Toksikologicheskiy vestnik*. 2017; 6: 31-34 (in Russian).
21. Es'kov E. K., Es'kova M. D., Rozhenkov A. S. Diagnosis of bee poisoning by lead and cadmium. *Toksikologicheskiy vestnik*, 2018; 1: 26-29 (in Russian).

I.V. Tropin, S.A. Ostroumov

ACCUMULATION OF LEAD AND OTHER TOXIC METALS BY AQUATIC PLANTS

M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, 119991, Moscow, Russian Federation

Three toxic metals-lead, copper and zinc - were measured in the biomass of the aquatic higher plants of *Elodea densa*. The method of atomic absorption spectrophotometry was used. Plants were incubated at elevated concentrations of three metals in the aqueous medium. This has led to a significant increase in lead content in plant biomass. Namely, the concentration of lead in biomass increased to 1567% compared to the background concentration of this element in the biomass in the control (the background concentration was taken as 100%). After incubation, the concentration of copper in the biomass was 594% of the background concentration. After similar incubation, zinc concentration was 133% of the background concentration. The results can be useful in the analysis of biological monitoring and water purification.

Keywords: lead, water pollution, heavy metals, copper, zinc, aquatic higher plants, macrophytes, metal accumulation.

Материал поступил в редакцию 17.04.2018 г.