

УДК 577.118:574.524(478.9)

**Капитальчук М.В.¹, Голубкина Н.А.²,
Шешницан С.С.¹, Капитальчук И.П.¹**

¹Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко (г. Тирасполь)

²Всероссийский НИИ селекции и семеноводства овощных культур
(Московская область)

ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯЦИИ СЕЛЕНА РАСТЕНИЯМИ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ МОЛДАВИИ

M. Kapitalchuk¹, N. Golubkina², S. Sheshnitsan¹, I. Kapitalchuk¹

¹*Taras Shevchenko Transdnestrian State University, Tiraspol*

²*All-Russian Scientific Research Institute of Breeding and Vegetable Seed Culture,
Moscow region*

FEATURES OF SELENIUM ACCUMULATION BY THE PLANTS OF FRESHWATER ECOSYSTEMS IN MOLDOVA

Аннотация. Впервые для территории Молдавии представлены результаты по накоплению селена растениями водных экосистем. Во всех экосистемах наблюдается повышенное содержание этого микроэлемента в воде, изменяясь в диапазоне 0,20–6,09 мкг/л. Содержание селена в растениях определялось для четырех экологических групп – водоросли, гидрофиты, гелофиты и прибрежные растения. Установлено, что концентрации селена в растениях составляют от 19 до 2917 мкг/кг и могут превышать его количество в воде в 3740 раз. Наблюдаются отличия в накоплении селена растениями в разных экосистемах, разных группах и внутри одного вида. Наиболее существенными оказались вариации его концентрации в пределах отдельных видов, особенно для водорослей и гидрофитов. Исходя из средних концентраций селена, группы растений можно расположить в виде следующей последовательности: прибрежные растения (139) < гелофиты (182) < водоросли (532) < гидрофиты (855).

Ключевые слова: селен, биоаккумуляция, водная экосистема, водоросли, гидрофиты, гелофиты, прибрежные растения.

Abstract. The results of investigation on selenium accumulation by the plants of freshwater ecosystems in Moldova are presented in the first time. Elevated concentrations of this trace element in surface waters ranging from 0.20–6.09 µg/L were observed. Selenium concentrations in plants were defined for some ecological groups such as algae, hydrophytes, helophytes and water-side plants. It was found that selenium contents in plants were ranged from 19 to 2917 µg/kg (dry weight) and higher than selenium concentrations in water more than 3740 times. Ecosystem differences in selenium accumulation by plants and differences within ecological groups were observed. The most significant concentration differences within some plant species particularly in algae and hydrophytes were found. Average selenium concentrations (µg/kg dry weight) increased in the series of plant's ecological groups: water-side plants (139) < helophytes (182) < algae (532) < hydrophytes (855).

Key words: selenium, bioaccumulation, freshwater ecosystem, algae, hydrophytes, helophytes, water-side plants.

Селен (Se) как биогенный микроэлемент является эссенциальным для животных и человека [3] и условно необходимым микроэлементом питания растений [1]. Однако существуют, например, доказательства эссенциальности селена для водорослей [12]. Возможно, он также является жизненно важным элементом питания для подсолнечника [4]. Известно, что водные растения способны аккумулировать селен в количествах, в 1150 раз превышающих его концентрации в воде [10]. Находясь в основании пищевых цепей водных экосистем, многие виды этих растений определяют обеспеченность селеном организмов более высоких трофических уровней.

Повышенное содержание селена в компонентах водных экосистем вызывает увеличение его концентрации в пищевых цепях и может стать причиной токсичности этого элемента для

организмов высших трофических уровней [8; 10]. С другой стороны, растения являются естественным биофильтром и могут эффективно применяться в целях фиторемедиации загрязнённых селеном водных экосистем [9; 11]. В то же время, отмершие остатки растений, особенно при их чрезмерном разрастании, могут быть источником вторичного загрязнения водной среды [2]. Таким образом, оценка накопления селена водорослями и макрофитами представляется весьма актуальной, тем более для Молдавии, где изучение его миграции в водных экосистемах до сих пор не проводилось. Целью настоящей работы является восполнение этого пробела в системном изучении селена на данной территории.

Материалы и методы

Отбор проб воды и растений осуществлен в двух крупных водных объектах – реке Днестр и лимане-водохранилище реки Кучурган, а также в небольших водоемах и водотоках, расположенных в бассейне Среднего и Нижнего Днестра. Пробы воды брали на расстоянии 3-5 м от берега и на глубине 0,2-0,3 м от поверхности. В местах отбора проб воды собирались образцы водных и прибрежных растений. После определения систематической принадлежности растения высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали и гомогенизировали.

Количество Se в пробах воды определялось с помощью атомно-абсорбционной спектрофотометрии в лаборатории геохимии

Института геологии и сейсмологии АН Молдовы. Содержание Se в образцах растений определялось авторами микрофлуориметрическим методом [7].

Статистическую обработку проводили в системе статистического анализа STATISTICA 10. Поскольку для большинства малых выборок не было доказано нормальное распределение, их сравнение осуществляли при помощи непараметрического аналога дисперсионного анализа *H*-теста Краскела–Уоллиса. Различия между выборками считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Исследуемые водные объекты, а для Днестра – отдельные его части, существенно различаются по характеру экологических условий и антропогенного воздействия, что дает основание рассматривать их как разные типы экосистем. Результаты анализа образцов воды, представленные в табл. 1, показывают, что общий фон содержания селена в водных экосистемах достаточно высок и составляет в среднем 1,83 мкг Se в 1 л воды, варьируя от 0,20 до 6,09 мкг/л.

Для экосистем Среднего и Нижнего Днестра, разделенных плотиной Дубоссарской ГЭС, наблюдаются близкие значения средних концентраций селена и границ интервалов их колебаний. В Кучурганском лимане, используемом в качестве водоема-охладителя Молдавской ГРЭС, диапазон колебаний концентрации селена оказался более узким, а среднее его содержание примерно в 1,5 раза

Таблица 1

Содержание селена (мкг/л) в воде экосистем

Наименование экосистемы	Количество проб	Диапазон значений	Среднее значение
Средний Днестр	6	0,20–3,13	1,50
Нижний Днестр	5	0,25–3,73	1,59
Кучурганский лиман	6	0,60–1,43	1,01
Ягорлыкская заводь	3	0,71–3,25	2,34
Пруды	4	1,43–6,09	3,48
Все экосистемы	24	0,20 – 6,09	1,83

меньше по сравнению с Днестром. В то же время в устье речки Ягорлык (Ягорлыкская заводь), являющейся заповедной акваторией, средняя концентрация микроэлемента достигает 2,34 мкг/л, хотя количество селена в проанализированных образцах не выходит здесь за пределы интервала, установленного для Днестра. Максимальные концентрации селена, превышающие 6 мкг/л, наблюдаются в небольших прудах, располагающихся в населенных пунктах, и, вероятно, обусловлены антропогенными факторами.

Приведенные в табл. 1 данные хорошо согласуются с результатами наших исследований, проведенных ранее в этом регионе. В частности, тогда было установлено, что содержание селена в водоемах сельской местности составляет в среднем 1,5 мкг/л с максимумом 3 мкг/л, а в городских водоемах его средняя концентрация возрастает до 5,6 мкг/л при максимальном значении 8,8 мкг/л [5]. Таким образом, водные экосистемы на исследуемой территории содержат большое количество водорастворимого селена, доступного для усвоения и накопления растениями.

Данные о среднем содержании селена в растениях водных экосистем представлены в табл. 2. Здесь все макрофиты разделены на три группы в зависимости от их экологических особенностей [6]: гидрофиты, гелофиты и прибрежные растения. Оценка, проведенная нами с помощью теста Краскела–Уоллиса, показала, что в рассматриваемых выборках эти группы растений действительно различаются по способности аккумулировать селен

($p = 0,0038$). Дополнительно была выделена группа водорослей, куда вошли представители зелёных нитчатых водорослей.

В среднем наибольшее количество селена аккумулируют гидрофиты и водоросли, причем статистически значимых различий между двумя этими группами растений по способности накапливать микроэлемент не наблюдается. Вариации средней концентрации селена в водорослях разных водных экосистем относительно невелики за исключением Кучурганского лимана, где его содержание в мужоции (*Mougeotia* sp.) оказалось аномально высоким – 2917 мкг/кг. Эта концентрация в 8-10 раз превышает средние показатели накопления селена водорослями в других водоемах и в 3740 раз больше содержания микроэлемента в воде на момент сбора растений.

Заметно различаются средние концентрации селена в гидрофитах разных экосистем. Превышение максимума (Ягорлыкская заводь) над минимумом (Нижний Днестр) для этого показателя составляет более чем в 6 раз. Обратим внимание на высокое содержание селена в гидрофитах Кучурганского лимана, что хорошо согласуется с его аномально высокой концентрацией в водорослях. Возможной причиной столь интенсивного поглощения селена гидрофитами и водорослями является воздействие на эту экосистему выбросов Молдавской ГРЭС, использующей в качестве топлива уголь. Повышенное количество микроэлемента в растениях Ягорлыкской заводи, являющейся заповедной территорией, соответствует его высокой кон-

Таблица 2

Среднее содержание селена в растениях водных экосистем

Наименование экосистемы	Содержание Se, мкг/кг воздушно-сухого вещества			
	водоросли	гидрофиты	гелофиты	прибрежные
Средний Днестр	284	549	192	149
Нижний Днестр	325	270	–	144
Кучурганский лиман	2917	1299	176	–
Ягорлыкская заводь	–	1699	233	–
Пруды	332	762	162	38
Все экосистемы	532	855	182	139

центрации в воде (см. табл. 1) и обусловлено, видимо, геохимическими условиями на площади водосбора. Для подтверждения этих предположений требуется проведение дополнительных исследований.

Таким образом, гидрофиты, также как и водоросли, являются мощными аккумуляторами селена. Среднее количество содержащегося в них селена превышает его среднюю концентрацию в воде Кучурганского лимана в 1286 раз, а Ягорлыкской заводи – в 726 раз.

Существенно более низкой аккумуляцией селена характеризуются гелофиты и прибрежная растительность, которые в среднем накапливают 182 и 139 мкг Se/кг соответственно. Тем не менее, эти концентрации все же превышают в 1,2-1,6 раз среднее его количество, накапливаемое сельскохозяйственными растениями региона (111-112 мкг/кг)

[5]. В среднем наибольшее количество селена наблюдается у гелофитов (233 мкг/кг), произрастающих в Ягорлыкской заводи, и у прибрежных растений (149 мкг/кг) Среднего Днестра.

Исходя из средних концентраций, межгрупповые различия в накоплении селена можно отобразить в виде следующей последовательности: **прибрежные растения** (139) < **гелофиты** (182) < **водоросли** (532) < **гидрофиты** (855). Согласно работе [10], пресноводные водоросли и водные растения могут аккумулировать селен в широком диапазоне: от 100 до 2000 мкг/кг. Из данных, представленных в табл. 3, видно, что для водных экосистем Молдавии этот диапазон несколько шире и составляет 19-2917 мкг/кг.

Межвидовые различия в способности биоаккумуляции селена внутри выделен-

Таблица 3

Аккумуляция селена различными видами водно-болотных растений (мкг/кг воздушно-сухого вещества)

Экологические группы растений	Количество проб	Диапазон значений	Среднее значение
Водоросли			
<i>Cladophora</i> sp.	6	36–562	334
<i>Mougeotia</i> sp.	6	19–2917	794
<i>Ulortix</i> sp.	1	56	
Гидрофиты			
<i>Potamogeton</i> sp.	7	111–959	573
<i>Myriophyllum spicatum</i>	5	57–1699	969
<i>Ceratophyllum demersum</i>	4	712–2040	1133
<i>Lemna trisulca</i>	1	1526	
<i>Salvinia natans</i>	1	1657	
Гелофиты			
<i>Phragmites australis</i>	8	81–366*	204*
	8	104–302**	181**
<i>Typha angustifolia</i>	3	84–160*	119*
	2	59–321**	190**
Прибрежные растения			
<i>Ranunculus polyphyllus</i>	4	62–181	113
<i>Rumex stenophyllus</i>	4	124–299	183
<i>Polygonum amphibium</i>	3	110–261	200
<i>Carex riparia</i>	2	38–68*	53
	1	47**	

Примечание: (*) – надводная часть, (**) – корневище

ных групп растений могут быть весьма существенными. Так, для разных видов гидрофитов установлены, по меньшей мере, 50-кратные различия в биоаккумуляции и интенсивности поглощения этого микроэлемента [10]. Однако имеющиеся у нас данные (табл. 3) не подтверждают столь больших межвидовых различий для гидрохимических условий Молдавии. Если рассматривать в качестве показателя межвидовых различий отношение средних концентрации селена отдельных видов для соответствующей группы, исключив виды с единичными образцами, то межвидовые различия составят для водорослей – 2,4; гидрофитов – 1,7-2,0; гелофитов (надводная часть) – 1,7; прибрежных растений – 2,1-3,8.

Эти показатели несущественно изменятся при переходе к соотношениям максимальных концентраций, и будут иметь следующие значения (без учета единичных образцов): водоросли – 5,2; гидрофиты – 1,2-2,1; гелофиты (надводная часть) – 2,3; прибрежные растения – 1,2-4,4.

Проведенные выше оценки дают общие представления о межвидовых различиях в способности накапливать селен. Более адекватные оценки такого рода можно получить путем сравнения концентрации микроэлемента в разных видах растений, собранных в одной точке отбора проб, где обеспечивается относительная однородность экологических условий. Например, в точке отбора проб в Кучурганском лимане с концентрацией селена в воде $0,87 \pm 0,17$ мкг/л содержание микроэлемента в растениях составило (мкг/кг): сальвиния (*Salvinia natans*) – 1657, ряска тройчатая (*Lemna trisulca*) – 1526, роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum*) – 712, тростник южный (*Phragmites australis*) – 185, рогоз узколистный (*Typha angustifolia*) – 160. Отсюда находим, что в одинаковых экологических условиях сальвиния аккумулирует селен лучше ряски в 1,1 раза, роголистника – в 2,3 раза, тростника – в 9 раз, рогоза – в 10,4 раза.

И все же, исходя из данных табл. 3, следует признать, что межвидовые различия в

способности аккумулировать селен уступают внутривидовым колебаниям концентрации селена в водно-болотных растениях. Интервалы внутривидовых превышений максимальных концентраций Se над минимальными для разных групп составляют (в размах): водоросли – 16-154, гидрофиты – 3-30, гелофиты – 2-5, прибрежные растения – 2-3.

Выводы

1. В водных объектах Молдавии наблюдается повышенное содержание селена, доступного для усвоения растениями.

2. Водно-болотные растения являются мощными накопителями селена, аккумулируя его в диапазоне от 19 до 2917 мкг/кг. Наибольшей поглощающей способностью обладают водоросли и гидрофиты.

3. Установлены статистически значимые различия для средних концентраций селена в разных экологических группах – гидрофитах, гелофитах и прибрежных растениях, а также выявлены межвидовые и внутривидовые различия в способности растений аккумулировать Se. Наиболее значимыми оказались внутривидовые колебания концентрации микроэлемента.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Агрохимия / под ред. Б.А. Ягодина. – М.: Агропромиздат, 1989. – 639 с.
2. Власов Б.П., Гигевич Г.С. Использование высших водных растений для оценки и контроля за состоянием водной среды: методические рекомендации. – Минск: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 2002. – 84 с.
3. Голубкина Н.А., Папазян Т.Т. Селен в питании: растения, животные, человек. – М.: Печатный город, 2006. – 254 с.
4. Капитальчук М.В., Голубкина Н.А., Капитальчук И.П. Селен и его антагонисты в биогеохимической цепи «почва-растение» в условиях Приднестровья // Вестник МГОУ. Серия «Естественные науки». – 2011. – № 2. – С. 137-141.
5. Капитальчук М.В., Капитальчук И.П., Голубкина Н.А. Аккумуляция и миграция селена в компонентах биогеохимической цепи «почва-растение-человек» в условиях Молдавии // Поволжский экологический журнал. – 2011. – № 3. – С. 323-335.

6. Папченков В.Г. О классификации макрофитов водоёмов и водной растительности // Экология. – 1985. – № 6. – С. 8–13.
7. Alfthan G. A micromethod for the determination of selenium in tissues and biological fluids by single-test-tube fluorimetry // Anal. Chim. Acta, 1984. – Vol. 65. – P. 187–194.
8. Ecological assessment of selenium in the aquatic environment. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. – 339 p.
9. Hansen D., Duda P.J., Zayed A., Terry N. Selenium removal by constructed wetlands: role of biological volatilization // Env. Sci. Technol. – 1998. – Vol. 32. – P. 591–597.
10. Ohlendorf H.M. Ecotoxicology of selenium // Handbook of Ecotoxicology. – 2nd ed.– Boca Raton, FL: CRC Press, 2003. – P. 465–500.
11. Shardendu, Salhani N., Boulyga S.F., Stengel E. Phytoremediation of selenium by two helophyte species in subsurface flow constructed wetland // Chemosphere. – 2003. – Vol. 50. – P. 967–973.
12. Terry N., Zayed A.M., de Souza M.P., Tarun A.S. Selenium in higher plants // Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. – 2000. – Vol. 51. – P. 401–432.