

УДК 574.522

Содержание микроэлементов в высших водных растениях дельты Волги и Северного Каспия

Имантаев А. Б.

Астраханский государственный технический университет

Астрахань, Россия

asetkz.ru@yandex.ru

Высшие водные растения играют важную роль среди биотических составляющих водных экосистем. Они выступают идеальными индикаторами для проведения сравнения микроэлементного состава между различными водоемами. В данной статье проводится сравнение содержания тяжелых металлов в высшей водной растительности (*Potamogeton lucens* и *Potamogeton perfoliatus*, *Zostera marina*, *Myriophyllum spicatum* и *Polysiphonia*) в дельте Волги и в Северном Каспии. Для определения концентрации тяжелых металлов (медь, цинк, марганец, свинец, кобальт, никель, железо, хром, кадмий) использовался метод атомно-абсорбционной спектроскопии, согласно методике, ГОСТ 30178-96. В результате исследования были получены данные по концентрациям микроэлементов в рассматриваемых водных организмах, проанализировано их содержание, выявлены закономерности в накоплении микроэлементов водными растениями. Были составлены убывающие ряды концентраций тяжелых металлов для дельты Волги и Северного Каспия, определены металлы, аккумулирующиеся в водных растениях больше, чем другие, а именно железо, марганец и цинк. Сделан вывод, что микроэлементный состав *Myriophyllum spicatum* в большей степени концентрирует тяжелые металлы, чем другие высшие водные растения, что связано с особенностями накопления микроэлементов в данном водном растении. Проведено сравнение микроэлементного состава высших водных растений, а именно *Zostera marina* и *Myriophyllum spicatum* произрастающих как в дельте Волги, так и в Северном Каспии. В ходе исследования установлено, что морские растения, в отличие от произрастающих в дельте, накапливают больше цинка, меди, кадмия и кобальта. Речные гидрофиты концентрируют больше марганца, а специфика накопления таких элементов как хром и свинец связана с видовыми особенностями рассматриваемых растений.

Ключевые слова: тяжелые металлы, высшие водные растения, микроэлементы, концентрация, дельта Волги, Северный Каспий, видовые особенности.

ВВЕДЕНИЕ

Высшие водные растения играют важную роль среди биотических составляющих водных экосистем. Накапливая химические элементы, в тканях и органах, тяжелые металлы удерживают их в течение всего вегетационного периода и тем самым исключают их из круговорота в водоеме до своего отмирания и разложения (Дайнеко и др., 2015).

Северный Каспий является зоной смешения речных и морских вод поэтому большинство элементов поступают в него с речным стоком, морскими водами из Среднего Каспия, атмосферными осадками и выбросами воды из оросительных систем. Так же часть элементов может поступать с газовыми и жидкими выделениями со дна моря (Загрязняющие вещества..., 2017).

Цель исследования – изучить особенности накопления тяжелых металлов в высших водных растениях Северного Каспия и дельты Волги.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

По минеральному составу дельта реки Волги является пресноводным водоемом. Природные воды низовьев реки Волги относятся к трем классам: нейтральные слабощелочные окислительные, нейтральные слабощелочные глеевые (переувлажненные), нейтральные слабощелочные сероводородные (Перельман, 1979). Весной в верхней части дельты водородный показатель (рН) природных вод изменяется от 6,5–7,0 до 8,5–8,8 – в нижней части.

Согласно данным В. В. Громова (2010) и Б. М. Насибулиной (2012), низовье Волги заселено отдельными видами высшей водной растительности: прибрежно-водной растительностью (камыш трехгранный (*Scirpus lacustris* L.), тростник обыкновенный (*Phragmites communis* L.), рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.) и погруженной растительностью (роголистник темнозеленый (*Ceratophyllum demersum* L.), рдест курчавый (*Potamogeton crispus* L.), рдест блестящий (*P. lucens* L.), уруть колосистая (*Myriophyllum spicatum* L.).

Каспийское море представляет собой солоноватый водоем со своеобразным солевым режимом. По минеральному составу он отличается от мирового океана меньшим количеством хлоридов и повышенным содержанием карбонатов в воде. Воды Северного Каспия характеризуются значительным опреснением водоема, особенно в летний период, в результате развития в период половодья продолжительного и обильного притока волжской воды в море (Катунин и др., 2002).

Разнообразные виды зеленых, сине-зеленых, красных и бурых водорослей, а также цветковых растений составляют основу фитобентосных сообществ Северного Каспия. Совокупность видов составляет более 350, из них цветковых растений – 5 видов. Наибольшее их распространение зафиксировано в нейтральной части Северного Каспия, что объясняется слабой заиленностью песчаного грунта. В фитобентосе Северного Каспия из цветковых растений богатое развитие имеют взморник морской, рупия, рдест (Громов, 2009).

В работе изучались макрофиты дельты Волги и Северного Каспия, сбор которых осуществлялся в 2020 году, а именно: рдест блестящий (*Potamogeton lucens* (Linnaeus 1753)) и пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* (Linnaeus 1753)), взморник морской (*Zostera marina* (Linnaeus 1753)), уруть колосистая (*Myriophyllum spicatum* (Linnaeus 1753)) и красная водоросль полисифония (*Polysiphonia* (Greville 1823)).

Определение металлов проводилось методом атомно-абсорбционной спектрометрии (Брицке, 1982) согласно методике ГОСТ 30178-96. Биогенная классификация химических элементов определена согласно А. В. Бгатову (1999). В ходе исследования определялось содержание микроэлементов: медь, цинк, марганец, свинец, кобальт, никель, железо, хром, кадмий.

Результаты исследования обрабатывались статистически при помощи программного продукта Microsoft Office Excel 2010, согласно общепринятым методикам биометрии (Лакин, 1980).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате определения концентраций тяжелых металлов с помощью атомно-абсорбционного спектрометра были получены следующие данные (табл. 1).

На основе вышеуказанных данных (табл. 1) можно отметить, что микроэлементный состав *Myriophyllum spicatum* в большей степени концентрирует тяжелые металлы, чем *Zostera marina* и *Polysiphonia*. Данная закономерность может являться следствием видовых особенностей данного растения. Для определения особенностей накопления тяжелых металлов в выбранных растениях можно составить убывающие ряды концентраций элементов в Северном Каспии:

Fe>Mn>Zn>Cu>Ni>Pb>Co>Cd=Cr – *Zostera marina*;

Fe>Zn>Mn>Cu>Ni>Pb>Cr>Co>Cd – *Polysiphonia*;

Fe>Zn>Mn>Cu>Ni>Pb>Cr>Co>Cd – *Myriophyllum spicatum*.

Следует отметить, что особенно интенсивно в организмах макрофитов Северного Каспия аккумулируется железо, которое является важным микроэлементом, катализируя процессы обмена кислорода у водных растений. Его повышенное содержание в водных растениях исходит из того, что оно поступает в водные экосистемы благодаря его выносу с водосборных площадей и проникновению из подземных вод. Данные концентрации подтверждаются и в других исследованиях (Виноградов, 2001; Загрязняющие вещества..., 2017; Махлун, 2017).

Таблица 1

Содержание микроэлементов в водных растениях Северного Каспия

Элемент	Вид растения и содержание микроэлемента (мг/кг сухого вещества)		
	<i>Zostera marina</i>	<i>Polysiphonia</i>	<i>Myriophyllum spicatum</i>
Fe	348,42±11,2	320,15±14,3	573,36±18
Zn	34,59±3,4	38,70±3,9	68,80±6,4
Mn	152,17±6,8	28,86±3,5	58,22±7,4
Cu	4,31±0,5	5,94±0,6	12,13±1,2
Ni	2,51±0,8	4,91±1,1	9,18±1,6
Pb	2,30±0,4	3,12±0,5	7,99±0,7
Cr	0,28±0,05	2,66±0,6	4,54±1,1
Cd	0,28±0,1	0,68±0,1	1,29±0,2
Co	0,77±0,1	1,82±0,3	2,45±0,2

Примечание к таблице. Приведены среднее значение ± стандартное отклонение.

Такой жизненно важный элемент, как марганец влияет на рост и развитие растений. П. Н. Линник (1986) в своих работах утверждал, что пониженное содержание кобальта ведет к повышению количества марганца в организмах растений, т.к. между ионами кобальта и марганца существует такое явление, как антагонизм. Данный факт можно наблюдать в представленных выше рядах концентраций элементов (табл. 1), в которых содержание марганца (152,17 мг/кг; 28,86 мг/кг; 58,22 мг/кг) преобладает над содержанием кобальта (0,77 мг/кг; 1,82 мг/кг; 2,45 мг/кг) более чем в 20 раз у всех рассмотренных растений в морской среде. Способность марганца и цинка избирательно накапливаться в морских макрофитах возможно связана с участием этих элементов в обмене веществ, при увеличении концентрации марганца происходит повышение интенсивности фотосинтеза. Без марганца (и железа) ассимиляция азота растениями не имеет места, так как марганец играет существенную роль в этих явлениях, участвуя в ферментативных процессах восстановления нитратов. Под влиянием марганца повышается солеустойчивость некоторых растений (Войнар, 1960). В водных растениях роль цинка определяется его влиянием на ключевые реакции фотосинтеза, на превращение соединений (Войнар, 1960). При совместном действии цинка и кадмия, а также цинка и меди характерен синергизм (Персикова, Решецкий, 2015). Эту закономерность можно проследить на меди, пропорционально увеличению которого приводит к повышению показателей цинка.

Также было изучено содержание микроэлементов у представителей высших водных растений в дельте Волге: *Potamogeton lucens*, *Potamogeton perfoliatus*, *Zostera marina*, *Myriophyllum spicatum* (табл. 2).

В ходе исследований можно составить убывающие ряды концентраций элементов в водных растениях в дельте Волги:

Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>Ni>Cr>Co>Cd – *Zostera marina*;

Fe>Mn>Pb>Zn>Cu>Cd>Cr>Co>Ni – *Potamogeton lucens*;

Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>Co>Cd>Cr> – *Potamogeton perfoliatus*;

Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>Cr>Ni>Co>Cd – *Myriophyllum spicatum*.

Исходя из таблицы, можно говорить о том, что в водных растениях дельты Волги, как и в растениях Северного Каспия активно накапливается железо и марганец, что связано с особенностями накопления этих элементов в водных растениях (Линник, Набиванец, 1986).

Таблица 2

Содержание микроэлементов в высших водных растениях дельты Волги

Элемент	Вид растения и содержание микроэлемента (мг/кг сухого вещества)			
	<i>Zostera marina</i>	<i>Potamogeton lucens</i>	<i>Potamogeton perfoliatus</i>	<i>Myriophyllum spicatum</i>
Fe	363,16±16,5	10,84±0,6	199,43±9,1	409,64±17,8
Mn	229,95±10,4	4,01±0,6	48,03±2,6	249,14±11,2
Zn	11,88±1,1	0,16±0,01	3,94±0,5	11,34±0,6
Pb	3,27±0,2	1,49±0,1	1,28±0,1	3,96±0,4
Cu	2,77±0,3	0,15±0,05	0,89±0,1	2,71±0,3
Ni	2,52±0,3	0,01±0,001	0,01±0,002	2,04±0,3
Cr	0,63±0,1	0,09±0,01	0,06±0,01	2,16±0,6
Co	0,54±0,1	0,01±0,01	0,32±0,05	1,09±0,2
Cd	0,06±0,01	0,09±0,01	0,09±0,01	0,05±0,01

Примечание к таблице. Приведены среднее значение ± стандартное отклонение..

Во многом убывающие ряды концентраций тяжелых металлов в дельте Волги повторяют ряды концентраций Северного Каспия, только в гораздо меньших значениях, за исключением марганца. Это также подтверждено в работе А. В. Махлун (2017), в которой говорится, что у речных макрофитов элементом с высоким значением КБП является марганец.

Проведено сравнение микроэлементного состава высших водных растений, ими являются *Zostera marina* и *Myriophyllum spicatum*, произрастающих в дельте Волги и Северном Каспии (табл. 3).

Таблица 3

Содержание микроэлементов в высших водных растениях в дельте Волге и Северном Каспии

Элемент	Вид растения и содержание микроэлемента (мг/кг сухого вещества)			
	<i>Zostera marina</i> (дельта)	<i>Zostera marina</i> (Северный Каспий)	<i>Myriophyllum spicatum</i> (дельта)	<i>Myriophyllum spicatum</i> (Северный Каспий)
Fe	363,16±16,5	348,42±11,2	409,64±17,8	573,36±18
Mn	229,95±10,4	152,17±3,8	249,14±11,2	58,22±7,4
Zn	11,88±1,1	34,59±3,4	11,34±0,6	68,80±6,4
Cu	2,77±0,3	4,31±0,5	2,71±0,3	12,13±1,2
Ni	2,52±0,3	2,51±0,8	2,04±0,3	9,18±1,6
Pb	3,27±0,2	2,30±0,4	3,96±0,4	7,99±0,7
Cr	0,63±0,1	0,28±0,05	2,16±0,6	4,54±1,1
Co	0,54±0,1	0,77±0,1	1,09±0,2	2,45±0,2
Cd	0,06±0,01	0,28±0,1	0,05±0,01	1,29±0,2

Примечание к таблице. Приведены среднее значение ± стандартное отклонение..

В *Zostera marina* наблюдается превышение показателей в Северном Каспии над дельтой по таким элементам: Cu, Zn, Cd, Co. В дельте преобладают Pb, Mn, Fe, Cr. Концентрация Ni осталась на том же уровне. Превышение концентраций в Северном Каспии над дельтой Волги по таким элементам, как кобальт было в 1,4 раза, медь в 1,6 раза, цинк в 2,9 раза, кадмия в 4,6 раза. В дельте Волги отмечается концентрирование свинца в 1,4 раза, марганца в 1,5 раза, хрома в 2,2 раза.

В *Myriophyllum spicatum* в Северном Каспии преобладают все металлы, за исключением марганца. Аккумуляция железа превышала аналогичный показатель в дельте в 1,4 раза, свинца в 2 раза, хрома в 2,1 раза, кобальта в 2,2 раза, меди и никеля в 4,5 раза, цинка в 6,1 раза, кадмия в 25,8 раза. Единственным элементом, который активнее накапливался в дельте стал марганец, концентрация которого была в 4,3 раза выше морского аналога.

В водных экосистемах с уменьшением pH среды происходит десорбция катионных форм металлов с поверхности твердых частиц взвешенного вещества или донных отложений и поступление их в воду. При увеличении pH среды до определенной величины растворенные катионные формы металлов адсорбируются на твердых частицах взвеси или осаждаются в их составе (Fassa et al., 2011). В отличие от катионных форм растворимость и миграция в воду анионных форм металлов имеет противоположно направленную зависимость от изменения pH среды – при увеличении pH происходит растворимость, а в кислой среде анионные формы металлов активно сорбируются или осаждаются в донных отложениях (Fassa et al., 2011).

Используя данные Каспийского морского научно-исследовательского центра (Бюллетень..., 2020; Ежегодный бюллетень..., 2020) можно провести сравнение pH морской среды Северного Каспия и пресноводных водотоков реки Волги. Среднее значение кислотности в Северном Каспии составило 8,43, а в вершине дельты, где проходил отбор пресноводных проб 8,1.

Проанализировав представленные данные, можно предположить, что тяжелые металлы такие, как Cu, Zn, Cd, Co являются катионами, а марганец анионом. Из этого следует, что Cu, Zn, Cd, Co в морских водах (более щелочных) активно сорбируются и осаждаются в донных отложениях, в более кислотных пресных водах происходит обратная реакция, повышается растворимость данных металлов. Марганец осаждается в донных отложениях более кислотной среды дельты Волги и растворяется в щелочной окружающей среде Северного Каспия. Следует отметить, что в представителях пресноводных высших водных растений (*Myriophyllum spicatum*, *Zostera marina*) концентрирование марганца происходит в 4,3 и 7,1 раза (соответственно) больше, чем в морских растениях, что соответствует динамике этого элемента в грунтах моря и реки (Виноградов, 2001). Также одной из причин повышенных значений марганца в пресноводных растениях, произрастающих на небольших глубинах в активном фотическом слое, по сравнению с морскими более глубоководными растениями, является различная интенсивность фотосинтетических процессов у растений, произрастающих на различных глубинах водоемов. Можно сделать предположение, что свою специфику накопления имеет хром и свинец, заключающуюся в видовых особенностях накопления микроэлементов, представленных высших водных растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Живые организмы, обладая свойством к обмену веществ, создают свой химический элементарный состав, являющийся видоспецифичным признаком и остающимся неизменным в определённых пределах. Организмы могут концентрировать одни элементы, причем иногда в количествах, превышающих их содержание в окружающей среде, в разы больше (организмы-концентраторы). Другие организмы строго контролируют накопление элементов в своем организме и, таким образом, создают свою внутреннюю среду, которая обеспечивает оптимальный уровень для жизнедеятельности.

В результате было выяснено, что микроэлементный состав *Myriophyllum spicatum* в большей степени концентрирует тяжелые металлы, чем *Zostera marina*, *Potamogeton lucens*, *Potamogeton perfoliatus* и *Polysiphonia*, что связано с особенностями накопления

микроэлементов в данном водном растении. Исходя из построенных убывающих рядов концентрации тяжелых металлов и имеющихся данных, было выяснено, что все рассмотренные макрофиты отмечаются высокими концентрациями железа, как в дельте Волги, так и в Северном Каспии, что связано с особенностью накопления данного микроэлемента в грунтах водоемов. Во многом убывающие ряды концентраций тяжелых металлов в дельте Волги повторяют ряды концентраций Северного Каспия, только в гораздо меньших значениях, за исключением марганца. Проведено сравнение микроэлементного состава высших водных растений, ими являются *Zostera marina* и *Myriophyllum spicatum*, произрастающих в дельте Волги и Северном Каспии. Морские растения, в отличие от произрастающих в дельте, накапливают больше цинка, меди, кадмия и кобальта. Речные гидрофиты концентрируют больше марганца, жизненно важного для роста и процесса фотосинтеза. Помимо рН среды на повышенные значения марганца в пресноводных растениях влияет глубина произрастания, так в дельте Волги максимальная глубина сбора составляет в среднем не более метра, в активном фотическом слое. Сбор морских растений осуществляется на различных глубинах Северного Каспия, в диапазоне 4–12 метров. Специфика накопления таких элементов, как хром и свинец связана с видовыми особенностями рассматриваемых растений.

Список литературы

- Бгатов А. В. Биогенная классификация химических элементов // Философия науки. – 1999. – № 2 (6). – С. 23–34.
- Брицке М. Э. Атомно-абсорбционный спектрохимический анализ. – М.: Химия, 1982. – 223 с.
- Бюллетень о состоянии и загрязнении устьевой области р. Волги за 2020 г. [Электронный ресурс]. – Каспийский морской научно-исследовательский центр. – 2019. – Режим доступа: <http://www.caspianmonitoring.ru/wp-content/uploads/2021/11/НТО-Бюллетень-УО-2020-для-сайта.pdf> (просмотрено 17.01.2022 г.).
- Виноградов А. П. Химический элементарный состав организмов моря: монография. – Москва: Наука, 2001. – 620 с.
- Войнар А. И. Биологическая роль микроэлементов в организме животных и человека. – Москва: Высшая школа, 1960. – 240 с.
- ГОСТ 30178-96 Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов. М.: Стандартформ, 2010. – 8 с.
- Громов В. В. Водная и прибрежно-водная растительность авандельты Северного Каспия: авандельта р. Волги, калмыцкое и казахское побережье // Journal of Siberian Federal University. – Biology. – 2010. – № 3. – С. 250–266.
- Громов В. В. Водная и прибрежно-водная растительность авандельты р. Волги и Северного Каспия // Journal of Siberian Federal University. Biology. – 2009. – №3. – С. 250–266.
- Дайнеко Н. М., Тимофеев С. Ф., Жадько С. В. Содержание тяжелых металлов в различных экологических группах прибрежно-водной растительности Мозырского района // Ученый XXI века. – 2015. – № 12 (13). – С. 12–17.
- Ежегодный бюллетень о состоянии и загрязнении морской среды российского сектора Каспийского моря за 2020 г. [Электронный ресурс]. - Каспийский морской научно-исследовательский центр. – 2019. – Режим доступа: http://www.caspianmonitoring.ru/wp-content/uploads/2021/06/Бюллетень-море-за-2020_редакция_на-сайт.pdf (просмотрено 17.01.2022 г.).
- Загрязняющие вещества в водах Волжско-Каспийского бассейна / [Отв. ред. В. Ф. Бреховских, Е. В. Островская]. – Астрахань: Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2017. – 408 с.
- Катунин Д. Н., Курочкина Т. Ф., Попова О. В. и др. Содержание загрязняющих веществ в водоемах Волго-Каспийского бассейна // Рыбохозяйственные исследования на Каспии. – Результаты НИР за 2001 год. – Астрахань: КаспНИРХ, 2002. – С. 5–13.
- Лакин Г. Ф. Биометрия: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1980. – 293 с.
- Линник П. Н., Набиванец Б. И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. – Ленинград: Гидрометеоздт, 1986. – 272 с.
- Махлун, А. В. Микроэлементный состав донных сообществ авандельты Волги и западной части Северного Каспия: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Севастополь, 2017. – 24 с.
- Насибулина Б. М., Курочкина Т. Ф., Шаплыгина Ю. Н. Основные биотопы экотонного сообщества // Ecologia. – 2012. – № 2. – С. 57–61.
- Перельман А. И. Геохимия ландшафта. – Москва: Высшая Школа, 1979. – 341 с.
- Персикова, Т. Ф., Рещецкий Н. П. Тяжелые металлы и окружающая среда: лекция для студентов сельхозвузов. – Горки: Бел. с/х академия, 2015. – 40 с.

Facca C., Pellegrino N., Ceoldo S., Tibaldo M., Sfriso A. Trophic Conditions in the Waters of the Venice Lagoon (Northern Adriatic Sea, Italy) // The Open Oceanography Journal. – 2011. – N 5. – P. 1–13.

Imantaev A. B. The content of trace elements in higher aquatic plants of the Volga Delta and the Northern Caspian // Ekosistemy. 2022. Iss. 29. P. 51–57.

Higher aquatic plants play an important role among the biotic components of aquatic ecosystems. They act as ideal indicators for comparing the trace element composition between different reservoirs. This article compares the content of heavy metals in higher aquatic vegetation (*Potamogeton lucens* and *Potamogeton perfoliatus*, *Zostera marina*, *Myriophyllum spicatum* and *Polysiphonia*) in the Volga Delta and in the Northern Caspian. The method of atomic absorption spectrometry was used, according to the methodology, GOST 30178-96 to determine the concentration of heavy metals (copper, zinc, manganese, lead, cobalt, nickel, iron, chromium, cadmium). As a result of the study, the data were obtained on the concentrations of trace elements in the aquatic organisms under consideration, their content was analyzed, patterns in the accumulation of trace elements by aquatic plants were revealed. Decreasing series of heavy metal concentrations were compiled for the Volga Delta and the Northern Caspian. Moreover, the author determined the metals accumulating in aquatic plants more than others, namely iron, manganese and zinc. It is concluded that the trace element composition of *Myriophyllum spicatum* concentrates heavy metals to a greater extent than other higher aquatic plants which is due to its specific features. The comparison of the trace element composition of higher aquatic plants, namely *Zostera marina* and *Myriophyllum spicatum*, growing both in the Volga Delta and in the Northern Caspian Sea was made. The study found that marine plants, unlike those growing in the delta, accumulate more zinc, copper, cadmium and cobalt. River hydrophytes concentrate more manganese. The peculiarities of the accumulation of such elements as chromium and lead are related to the specific features of the plants under consideration.

Key words: heavy metals, higher aquatic plants, trace elements, concentration, Volga delta, Northern Caspian Sea, species features.

Поступила в редакцию 18.02.22
Принята к печати 25.02.22