

© С. А. БАНАРЬ<sup>1</sup>, В. А. ГОРСКАЯ<sup>2</sup>, Н. В. КОБЕЛЕВА<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Институт наук о Земле СПбГУ,

<sup>2</sup>Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»  
svetlana-banar@mail.ru

УДК 574.21

**СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВЫСШИХ ВОДНЫХ  
РАСТЕНИЯХ ОЗЕР БОЛЬШОГО СОЛОВЕЦКОГО ОСТРОВА**

**THE LEVEL OF CHEMICAL ELEMENTS IN HIGHER AQUATIC  
PLANTS OF LAKES OF THE BIG SOLOVSKI ISLAND**

*Рассмотрено содержание микроэлементов (Fe, Mn, Zn, Cu, Sr, Rb) и макроэлементов (K, Ca, P, S) в ряде высших водных растений озер Большого Соловецкого острова. Дана характеристика биогеохимических особенностей макрофитов разных экологических групп — гигрофитов (осока, сабельник), гидрофитов (рдест) и аэрогидатофитов (кубышка), произрастающих в исследованных озерах. Обсуждены коэффициенты биологического накопления химических элементов у изученных растений. Полученные данные о содержании микро- и макроэлементов в исследованных макрофитах сопоставляются с элементным составом высших водных растений озер Ленинградской области.*

*The article examines the level of trace elements (Fe, Mn, Zn, Cu, Sr, Rb) and macroelements (K, Ca, P, S) in a range of higher aquatic plants of lakes of the Big Solovki Island. We characterized biogeochemical features of macrophytes of different ecological groups - hygrophytes (Carex acuta L., Comarum palustre L.), hydrophytes (Potamogeton perfoliatus L.) and aerogidatophytes (Nuphar lutea (L.) Smith.) growing in the studied lakes. Coefficients of biological accumulation of chemical elements of the studied plants were discussed. The obtained data regarding the content of trace elements and macroelements in the investigated macrophytes are compared to element composition of aquatic plants of lakes in the Leningrad region.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** Макрофиты, водные экосистемы, биогеохимия.  
**KEY WORDS.** Biogeochemistry, macrophytes, water ecosystems.

**Введение.** Соловецкие острова высоких широт можно рассматривать как удобный (при этом слабоизученный) модельный объект для проведения широкого спектра экологических исследований. Они обладают достаточно высокой природно-ландшафтной репрезентативностью для характеристики структуры и состояния природных сообществ Севера России.

Водоёмы, занимающие среднюю площадь 0,076 км<sup>2</sup>, что составляет 12-15% территории архипелага, являются одним из ключевых средообразующих компонентов природной среды Соловков, на которые приходится основная рекреационная нагрузка [8]. Поэтому, несомненно, актуально изучение состояния водных

экосистем в условиях северных ландшафтов, которые наиболее чувствительны к происходящим изменениям.

Принимая во внимание специфику организации, структуры и функционирования водных экосистем Соловецких островов, целесообразно предложить в качестве индикатора макрофиты и их сообщества. Высшая водная растительность является одной из самых перспективных групп для фитомониторинга. Неоспоримое значение макрофитной растительности как индикатора тех или иных процессов, происходящих в водоеме, подчеркивалось многими исследователями [2; 5-7; 9].

Отсутствие литературных сведений о высших водных растениях озер Соловецких островов подтверждает актуальность выбранной тематики.

В задачи настоящего исследования входило рассмотрение биогеохимической деятельности макрофитов разных эколого-морфологических групп в отношении аккумуляции ими ряда химических элементов.

**Материалы и методы исследования.** Объектами исследования явились четыре вида макрофитов, произрастающих в озерах Большого Соловецкого острова, и относящихся к экологическим группам прибрежно-водных укореняющихся гидрофитов (осока острая *Carex acuta* L. и сабельник болотный *Comarum palustre* L.), погруженных укореняющихся гидрофитов (рдест пронзеннолистный *Potamogeton perfoliatus* L.) и аэрогидатофитов (кубышка желтая *Nuphar lutea* (L.) Smith.). Выбор растений определялся их распространенностью и высокой численностью в пределах исследуемых озер.

Пробы растений (летья) отбирали сопряженно с пробами воды в озерах Долгое (1), Большое Карзино (2), Плотичье (3), Щучье (4), Круглое Орлово (5), Средний Перт (6), Святое (7), Большое Лобское (8) и Западное Лобское (9), Нижний Перт (10) в июне 2013 г. (см. рис.).

Концентрации Fe, Mn, Zn, Cu, Sr, Rb, K, Ca, P и S в растительных пробах определяли бесстандартным рентгеноспектральным методом. Бесстандартный метод фундаментальных параметров предназначен для определения количественного состава анализируемого образца (массовых долей составляющих его химических элементов) на основании измеренных интенсивностей линий рентгеновской флюоресценции этих элементов. Пробы растений перед проведением анализов высушивали, измельчали и озоляли при температуре 450 °С в муфельной печи.

**Результаты и обсуждение.** Химический анализ отобранных растений показал, что концентрации химических элементов в листьях макрофитов исследованных озер Большого Соловецкого острова варьируют в широких пределах в зависимости как от их видовой принадлежности, так и среди растений одного вида, произрастающих в разных водоемах.

Валовое содержание микроэлементов у различных видов и экологических групп макрофитов показано в табл. 1.

По содержанию в растениях химические элементы подразделяются на три группы: элементы повышенной концентрации (Mn, Fe), средней (Zn, Sr, Rb) и низкой (Cu).



Рис. Объекты исследования Большого Соловецкого острова  
Масштаб: 1-90000

В общем виде ряд накоплений химических элементов в макрофитах Соловецких озер можно представить следующим образом: *Nuphar lutea* — Fe > Mn > Rb > Sr > Zn > Cu, *Potamogeton perfoliatus* — Fe > Mn > Sr > Zn > Rb > Cu, *Carex acuta* — Mn > Fe > Zn > Rb > Sr > Cu, *Comarum palustre* — Mn > Fe > Sr > Zn > Rb > Cu.

Из этого следует, что стабильными для всех исследуемых видов являются элементы повышенной концентрации (Fe, Mn), в отличие от других химических элементов в ряде накоплений их макрофитами, которые не имеют строгих последовательностей и пределов аккумуляирования и зависят от видовой принадлежности растений.

Особенно высокие показатели накопления и наибольший размах их колебаний в пределах вида были установлены для Fe и Mn. Для этих же металлов отмечались и наибольшие межвидовые различия в их аккумуляции растениями. Концентрации Mn и Fe, обнаруженные у рдеста пронзеннолистного, достигали 2565,8 и 16373,6 мг/кг сухого вещества соответственно.

Таблица 1

Диапазоны концентраций микроэлементов, мг/кг сухого вещества, в листьях макрофитов (в числителе приведены минимальная и максимальная концентрация для данного вида, в знаменателе — средняя концентрация)

Растение	Fe	Mn	Zn	Cu	Sr	Rb
Кубышка	601,4-2109 <b>990</b>	412,7-1753,9 <b>824,1</b>	113-195,3 <b>148,1</b>	24,5-45,9 <b>34,6</b>	81,6-355,1 <b>206,9</b>	172,3-546,7 <b>262</b>
Рдест	23391,1-16373,6 <b>9356,4</b>	696-2565,8 <b>1630,9</b>	371,4-524,9 <b>448,2</b>	91,3-118,2 <b>104,8</b>	692-832,4 <b>762,2</b>	639-151,9 <b>395,5</b>
Осока	376,8-561,6 <b>469,2</b>	499,4-649 <b>574,2</b>	177,1-193,5 <b>185,3</b>	36,3-37,5 <b>36,9</b>	54,5-87,4 <b>71</b>	154,4-162,3 <b>158,4</b>
Сабельник	1287-3258 <b>2409,3</b>	1969,2-3792,6 <b>2848,7</b>	227,6-464,4 <b>336,2</b>	80,7-464,4 <b>102,3</b>	60,2-528,5 <b>356,4</b>	103,2-345 <b>244,8</b>

Диапазоны варьирования Zn, Sr и Rb оказались более узкими, чем для Fe и Mn. Можно отметить высокие содержания Zn (524,9 и 195,3 мг/кг у рдеста и кубышки), наблюдаются также высокие концентрации Sr (832,4 и 528,5 мг/кг у рдеста и сабельника) и Rb (639 и 546,7 мг/кг у рдеста и кубышки). Содержание Cu у обследованных растений было наименьшим по отношению к другим химическим элементам и изменялось от 34,6 мг/кг у кубышки до 104,8 мг/кг у рдеста.

Важной составляющей биогеохимической деятельности водных растений в природных условиях является аккумуляция и депонирование ими биогенных элементов. Проведенное исследование показало, что из четырех изученных элементов (K, Ca, P, S) в листьях макрофитов наиболее интенсивно аккумулируются Ca и K, содержание которых у кубышки составляло 50 528,7 мг/кг и 20 120,5 мг/кг соответственно (табл. 2). У осоки и сабельника концентрации макроэлементов убывали в ряду K > Ca > P > S, у кубышки — Ca > K > P > S, у рдеста — Ca > K > S > P. Подобная закономерность в целом отвечает уровням физиологической востребованности данных микроэлементов у макрофитов [5].

Таблица 2

Среднее содержание макроэлементов в макрофитах озер Большого Соловецкого острова (мг/кг сухого вещества)

Название растения	P	S	K	Ca
Кубышка	4747,3	1264,4	20120,5	50528,7
Рдест	3460,4	3972,5	23211,3	26300,5
Осока	1664,0	1269,6	28861,5	6784,5
Сабельник	3571,8	1364,8	39876	18324,4

Коэффициент биологического накопления (КБН<sub>1</sub>), представляющий собой отношение концентрации элемента в растении к кларку литосферы [8], выявляет общие закономерности видовой специфики накопления химических элементов растениями. Относительно кларка в литосфере во всех изученных высших вод-

ных растениях накапливались следующие элементы: Mn, Cu, Zn, Sr. Самые высокие значения КБН<sub>1</sub> демонстрируют рдест пронзеннолистный (цинк — 40, медь — 16, стронций — 16,8) и сабельник болотный (цинк — 60, медь — 29,8, стронций — 13,5).

Такой же порядок накопления элементов относительно кларка в литосфере был выявлен в водоемах Ленинградской области [3]. Возможно, это связано с тем, что медь, цинк и марганец относятся к химическим элементам, которые входят в состав ферментных комплексов любых растений не зависимо от географического положения, несмотря на его содержание в среде [7].

В свою очередь макрофиты обеднены железом (КБН<sub>1</sub> < 1). Накопление железа относительно кларка в литосфере отсутствует не только в исследованных озерах Большого Соловецкого острова, но и в изученных водоемах Ленинградской области [3].

Таблица 3

**Содержание химических элементов, мг/кг сухого вещества, в макрофитах озер Ленинградской области и озер Большого Соловецкого острова**

Элемент	Озера Ленинградской области по [1]	Озера Большого Соловецкого острова
Fe	1231,9	3306,2
Mn	1252,6	1469,5
Zn	159,7	279,5
Cu	253,8	69,7
Sr	351,4	349,1
P	4743,3	3360,9
S	1264,4	1967,8
K	20120,5	28017,3
Ca	50528,7	25484,5

Сопоставление полученных результатов по содержанию химических элементов в листьях исследованных водных растений с элементным составом макрофитов озер Ленинградской области показывает, что **Fe, Mn, Zn, S, K** накапливают в большей степени макрофиты, произрастающие в озерах Большого Соловецкого острова, а **Cu, P, Ca** — **высшие водные растения водоемов Ленинградской области** (табл. 3).

Установленные при этом различия в аккумулярующей деятельности представителей гигрофитов и гидрофитов оцениваются с позиций их биогеохимической специализации и исходя из представлений о «барьерном» или «безбарьерном» типах накопления химических элементов в растениях [7]. Проведенные исследования на изученных озерах Большого Соловецкого острова подтверждают эту закономерность: средние концентрации химических элементов последовательно возрастают в ряду: гигрофиты — аэрогидатофиты — погруженные гидрофиты.

**Выводы.** На основании полученных данных было установлено, что различные виды высших водных растений избирательно накапливают химические элементы. Наибольшая концентрация микро- и макроэлементов зарегистрирована в листьях рдеста пронзеннолистного, кубышки желтой и сабельника болотного.

Коэффициенты биологического накопления выявляют определенные закономерности в приоритетах поглощения микроэлементов различными видами макрофитов. Так, цинк, марганец, медь и стронций имеют наиболее высокие значения КБН<sub>1</sub>, в то время как железо слабо вовлекается в биологический круговорот веществ.

Анализ степени накопления химических элементов видами макрофитов, которые относятся к разным экологическим группам (аэрогидатофиты, гидрофиты, гигрофиты), показывает определенные различия. Полученные результаты подтвердили ранее отмеченные закономерности, что химические элементы более накапливают погруженные гидрофиты, в меньшей степени аэрогидатофиты и гигрофиты [7].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банарь С. А., Горская В. А., Бердник К. А. Биогеохимия макрофитов водоемов Ленинградской области // Антропогенная трансформация геопространства: история и современность. Волгоград, 2014. С. 10-14.
2. Бурдин К. С., Золотухина Е. Ю. Тяжелые металлы в водных растениях (аккумуляция и токсичность). М.: Диалог-МГУ, 1998. 202 с.
3. Горская В. А., Банарь С. А. Оценка экологического состояния водоемов методом биоиндикации // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследования. 2012. № 1. Новосибирск. С. 30-34.
4. Кочеткова А. И. О некоторых закономерностях накопления тяжелых металлов высшей водной растительностью на Волгоградском водохранилище // Вестник Волгоградского государственного университета. Сер. 3. Экон. Экол. 2012. № 1. С. 11-15.
5. Куриленко В. В., Осмоловская Н. Г. Биоиндикаторная роль высших водных растений при диагностике загрязнений водных экосистем на примере малых водоемов г. Санкт-Петербурга // Водные ресурсы. 2007. Т. 34. № 6. С. 757-764.
6. Куриленко В. В., Зайцева О. В., Новикова Е. И. Основы экогеологии, биоиндикации и биотестирования водных экосистем / под ред. В. В. Куриленко. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 448 с.
7. Лычагина Н. Ю., Касимов Н. С., Лычагин М. Ю. Биогеохимия макрофитов дельты Волги // Геология Прикаспия. 1998. Вып. 4. 83 с.
8. Малюга Д. П. Биогеохимический метод поисков рудных месторождений. М., 1963. 264 с.
9. Натытник А. А., Никишин Н. А. Озерно-канальные водохозяйственные системы Соловецких островов памятники истории и культуры в гидросфере // Изучение памятников истории и культуры. М., 1990. Вып. 1. С. 124-140.
10. Панин М. С., Свицерский А. К. Поиск гидатофитов как объекта биогеохимического мониторинга тяжелых металлов в водотоках (на примере рек бассейна Иртыша) // Сиб. экол. журн. 2001. Т. 8. № 2. С. 205-211.

#### REFERENCES

1. Banar, S. A., Gorskaya, V. A., Berdник, K. A. Biogeochemistry of macrophytes of ponds in Leningrad region // Anthropogenic Transformation of Geospace: Past and Present. Volgograd. 2014. Pp. 10-14.
2. Burdin, K. S., Zolotukhina, E. Yu. Heavy Metals in Aquatic Plants (Accumulation and Toxicity). Moscow: Dialog-MGU, 1998. 202 p.
3. Gorskaya, V. A., Banar, S. A. Assessment of the ecological state of ponds by the method of the bioindicathion // New Word in Science and Its Application: Hypothesis and Testing Results of the Research. 2012. № 1. Novosibirsk. Pp. 30-34.

4. Kochetkova, A. I. Some regularities of heavy metal accumulation by the aquatic vegetation at the Volgograd Reservoir // Bulletin of Volgograd State University. Series 3. Economy. Ecology. 2012. № 1. Pp. 11-15.

5. Kurylenko, V. V., Osmolovskaia, N. G. Bioindicator role of higher aquatic plants in the diagnosis of contamination of aquatic ecosystems on the example of small water ponds in St. Petersburg // Water Resources 2007. Vol. 34. № 6. Pp. 757-764.

6. Kurylenko, V. V., Zaitseva, O. V., Novikova, E. I. Basis of ecogeology, bioindication and biological testing of aquatic ecosystems / Ed. V. V. Kurylenko. Saint Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University, 2004. 448 p.

7. Lychagina, N. Y., Kasimov, N. S., Lychagin, M. Y. Biogeochemistry of macrophytes of the Volga delta // Geology of the Caspian Sea Region. 1998. Vol. 4. Pp. 83.

8. Malyuga, D. P. Biogeochemical Method of Live Ore Find. Moscow, 1963. 264 p.

9. Natytnik, A. A., Nikishin, N. A. Lake-channel water systems of Solovki islands: historical and cultural monuments in the hydrosphere // Study of historical and cultural monuments. Moscow, 1990 Issue 1. Pp. 124-140.

10. Panin, M. S., Svidersky, A. K. Finding gidatophytes as objects of biogeochemical monitoring of heavy metals in water streams (by the example of the Irtysh river basin) // Siberian Ecological Journal. Vol. 2001. 8. № 2. Pp. 205-211.

#### Авторы публикации

**Светлана Александровна Банарь** — доцент кафедры биogeографии и охраны природы Института наук о Земле СПбГУ, г. Санкт-Петербург, кандидат географических наук

**Валентина Алексеевна Горская** — аспирант кафедры гидрогеологии и инженерной геологии НМСУ «Горный», г. Санкт-Петербург

**Нэлли Васильевна Кобелева** — доцент кафедры биogeографии и охраны природы Института наук о Земле СПбГУ, г. Санкт-Петербург, кандидат биологических наук

#### Authors of the publication

**Svetlana A. Banar** — Cand. Geogr. Sci., Associate Professor, Department of Biogeography, Saint Petersburg State University

**Valentina A. Gorskaya** — postgraduate student, Department of Hydrogeology and Engineering Geology, National Mineral Resources University «Mining University»

**Nelli V. Kobeleva** — Cand. Biolog. Sci., Associate Professor, Department of Biogeography, Saint Petersburg State University