

## КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ

УДК 58.02: 546.1

# ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА НЕКОТОРЫХ ВИДОВ МАКРОФИТОВ ОЗ. БАЙКАЛ

© 2024 г. О. А. Белых

Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия,  
e-mail: olga.belykh@klgtu.ru

Поступила в редакцию 09.01.2024 г.

После доработки 05.04.2024 г.

Принята к публикации 19.06.2024 г.

Представлены результаты определения содержания 21 химического элемента методом рентгенофлуоресцентного анализа в пяти видах макрофитов, собранных на западном побережье оз. Байкал в Иркутской области. Обсуждаются особенности элементного состава и накопления тяжелых металлов в высших водных растениях, произрастающих в заливах, испытывающих в летнее время рекреационную нагрузку. Установлено, что растения накапливают в значительных количествах Fe и Mn, некоторые виды (*Elodea canadensis* Michx. и *Polygonum amphibium* (L.) S.F. Grey) Sr, содержание Cu во всех исследованных видах макрофитов превышает ПДК. Полученные данные могут быть использованы для мониторинга состояния прибрежных экосистем.

*Ключевые слова:* *Potamogeton pectinatus*, *Potamogeton perfoliatus*, *Myriophyllum spicatum*, *Polygonum amphibium*, *Elodea canadensis*, макрофиты, элементный состав, антропогенное воздействие, оз. Байкал

DOI: 10.31857/S0033994624030086, EDN: PTPWQE

В настоящее время озеро Байкал является одним из приоритетных объектов социально-экономического развития Сибирского федерального округа. В то же время, это уникальный природный объект, биота которого легко уязвима в условиях антропогенного воздействия [1]. Побережье Малого моря отличается биологическим и ландшафтным разнообразием и является наиболее интересным для изучения. Данная территория принадлежит Прибайкальскому национальному парку. Здесь функционируют туристические базы, кемпинги, располагается значительное число неорганизованных туристов, отдыхающих, как на берегу, так и на воде.

Наблюдения за акваторией Малого моря в период активного туристического сезона выявили некоторые виды макрофитов, более чувствительные к антропогенному воздействию на берегах Байкала, их можно рассматривать в качестве потенциальных индикаторов состояния водных экосистем. Однако химический состав макрофитов, как отражение экологических изменений на Байкальской природной территории до сих пор не изучался. Есть мнение, что увеличение фито-

массы водных растений в прибрежной части водоема может служить признаком трансформации экосистем водоемов и водотоков [2, 3]. Экологическое значение макрофитов состоит в создании оптимальных условий для жизни гидробионтов и сохранения биоразнообразия [4–6]. Кроме того, изучение элементного состава макрофитов необходимо для понимания биофильтрационных функций водной растительности и вносит вклад в мониторинг содержания поллютантов [7–10].

Целью работы было определение элементного состава и индикаторных свойств некоторых видов макрофитов озера Байкал для оценки степени антропогенного воздействия на уникальный водный объект.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследований — побережье озера Байкал вблизи территории и в зоне влияния базы отдыха «Зама», расположенной на территории Ольхонского района Иркутской области. Исследуемый участок расположен на предгорном шлейфе. Зона сильного климатического влияния

Байкала включает прибрежную полосу шириной до 2 км, устьевые участки ручьевых долин, а также обращенные к озеру и опускающиеся практически до береговой линии склоны, до абсолютной высоты примерно 800 метров. На крутых склонах, обращенных к Байкалу, сформировались дерновые степные почвы. Эти почвы относятся к холодным, длительно промерзающим, несмотря на достаточную теплообеспеченность летнего периода. Среднегодовая температура воды в южной части озера составляет  $+0.6^{\circ}\text{C}$ , в средней  $+0.5^{\circ}\text{C}$ , в северной  $+0.4^{\circ}\text{C}$ . В местности Калтыгей средняя годовая температура воды положительная  $+0.7^{\circ}\text{C}$ . Переход температуры через  $0^{\circ}\text{C}$  отмечается осенью в конце октября — начале ноября, весной в конце февраля — начале марта. Температура воздуха над озером определяется температурой подстилающей водной поверхности и повторяет ход ее изотерм. В течение года средняя температура воздуха над поверхностью Байкала меняется от  $-21^{\circ}\text{C}$  зимой до  $+15^{\circ}\text{C}$  летом в открытой части озера и от  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+17^{\circ}\text{C}$  в прибрежных частях. Минерализация озера Байкал составляет 100–120 мг/л. Вода озера содержит растворенные соединения кальция, магния, натрия, калия, а также сульфаты, хлориды и др. Этот уровень минерализации соответствует нижней границе умеренной минерализации (от 61 до 500 мг/л) и делает воду Байкала чистой и пригодной для питья.

Ближайшие источники вредных атмосферных выбросов находятся в поселках Зама и Онгурен. Вредные вещества попадают в атмосферу также от местного и транзитного автотранспорта (особенно в летний период) и от бытовых печей частного сектора. Территория по классификации рекреационного использования отнесена к классу соответствия «поселковый». Уровень использования территории в течение дня высокий. Существенным фактором использования береговой полосы является наличие сети дорог для проезда транспорта, поселка Зама, баз отдыха. Вдоль южного берега озера расположено 11 стоянок для палаток, 15 стоянок на галечной косе, 9 съездов к воде. Рекреационная емкость территории (по текущей емкости, ТЕ) составляет 190 человек (до 10 человек на 19 стоянках). Дополнительным фактором являются частое присутствие пасущегося скота и лошадей. Сеть оборудованных тропинок к объектам инфраструктуры отсутствует. По периметру участка имеется металлическое ограждение, препятствующее попаданию на территорию базы диких и сельско-

хозяйственных животных. В соответствии со статьей 17 закона «Об охране озера Байкал» (Государственный учет объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду Байкальской природной территории) база отдыха может быть отнесена к IV категории объектов, не оказывающих заметного воздействия на окружающую среду. Объект подлежит федеральному экологическому надзору. Деятельность базы отдыха является источником отходов пищевых продуктов, относящихся к V классу опасности. Состояние растительности на территории удовлетворительное, заметно участие синантропных видов.

Объектами исследования были виды: *Potamogeton pectinatus* L. (рдест гребенчатый), *Potamogeton perfoliatus* L. (рдест пронзеннолистный), *Myriophyllum spicatum* L. (уруть колосистая), *Polygonum amphibium* (L.) S. F. Grey (горец земноводный), *Elodea canadensis* Michx. (элодея канадская). Сбор материала проводили в период полевых работ 2021–2022 гг. в прибрежной зоне Малого моря в пределах участка рекреационного назначения (табл. 1). Параллельно изучали динамику содержания некоторых тяжелых металлов (ТМ) в спектре микроэкологических условий в пелагиали западного побережья оз. Байкал. Отбор проб наземных частей рдеста гребенчатого проводили в пунктах: 1 — Базарная; 2 — Куркутская; 3 — Бурлюк; 4 — Улан; 5 — Мухур; 6 — Тутай; 7 — Шактура; 8 — Шида; 9 — Улирба; 10 — Онтхой; 11 — Хунжир-Наганский; 12 — Сарма.

Сбор растительного материала осуществляли в поверхностном слое литорали озера. Среднюю пробу составляли из 3–5 экземпляров, объединяя соответствующие части растений. Сушку производили в помещении до воздушно-сухого состояния. Среднюю пробу растительного материала измельчали в ручной кофемолке и истирали в агатовой ступке с добавлением нескольких капель этилового спирта. Из средней пробы отбирали навеску 2 г, которую дотирали до мелкодисперсного состояния. В металлический цилиндр вносили 0.5 г растертого материала, добавляли дозированное количество борной кислоты и прессовали таблетку-излучатель на гидравлическом прессе. Содержание 21 химического элемента в различных частях макрофитов определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Измерения выполнены на волновом рентгеновском спектрометре S4 Pioneer (Bruker AXS, Germany). Погрешность метода РФА составляет 3–5% [11]. Полу-

**Таблица 1.** Координаты пунктов и сроки сбора растительного материала на территории Ольхонского района  
**Table 1.** Coordinates of points and terms of plant material collection on the territory of Olkhonsky district

Вид Species	Координаты пункта сбора растительного материала Coordinates of the col- lection point for plant material	Части растения Part of plant	Месяцы / Months			
			V	VI	VII	VIII
<i>Potamogeton pectinatus</i>	N53,03169804° E106,80864600°	Побеги, соцветия, плоды Shoots, inflorescences, fruits	+	+	+	+
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	N53,13672404° E107,18428502°	Побеги, плоды Shoots, fruits	+			+
<i>Myriophyllum spicatum</i>	N53,22511900° E107,41079698°	Побеги Shoots		+		+
<i>Polygonum amphibium</i>	N53,03174003° E106,80789901°	Побеги, соцветия, плоды, корни Shoots, inflorescences, fruits, roots	+	+	+	+
<i>Elodea canadensis</i>	N53,004080° E106,420162°	Побеги Shoots		+	+	

ченные результаты сравнивали с литературными данными по *Ranunculus circinatus* Sibth. [12].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На химический состав растений оказывает влияние характеристики среды, в которой они произрастают. Пути поступления химических элементов в водные растения — это абсорбция корнями, если они присутствуют, и внекорневым путем из окружающей водной среды. Поверхностные воды Байкала имели минерализацию от 59.69 до 123.30 мг/дм<sup>-3</sup> и по классификации О. А. Алекина [13] относятся к маломинерализованным гидрокарбонатного класса, группы кальция, типа I.

В табл. 2 представлены сведения о содержании химических элементов в поверхностных водах оз. Байкал фоновых участков [14], в местности Калтыгей и на техногенно загрязненном участке Южного Байкала [15]. Из данных таблицы видно, что содержание в воде большинства элементов варьирует либо на низком ( $C_v = 13\text{--}25\%$ ), либо на среднем ( $C_v = 26\text{--}44\%$ ) уровне. К первым относятся Pb, Zn, Br, Rb, Al, S, Cr, ко вторым — Cu, Sr, Mn, Co. Содержание элементов в воде может изменяться при катастрофических нарушениях, вызванных природными или антропогенными факторами. Полученные нами данные для местности Калтыгей и литературные сведения свидетельствуют об отсутствии превышений норм, установленных как для токсичных тяжелых металлов (ТМ), негативно влияющих на растения даже в относительно невысоких концен-

трациях (Cd, Hg, Pb), так и для микроэлементов, необходимых для нормальной жизнедеятельности растительного организма, но являющихся токсичными при повышенном их уровне (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn). Установленные концентрации в отобранных пробах на порядок ниже законодательно установленных значений ПДК. Концентрации Mg, Zn, Pb оказались на уровне предела обнаружения прибора во всех пробах. Ввиду отсутствия постоянной системы мониторинговых наблюдений на оз. Байкал, можно условно принять приведенные величины как показатели качества байкальской воды. Сравнительный анализ данных показывает, что фон Байкала неоднороден и зависит во многом от района озера, впадающих притоков, от использования водоема и прибрежных зон человеком. За последние годы посещаемость туристами оз. Байкал возросла в несколько раз, статистические данные о туристическом потоке на оз. Байкал свидетельствуют, что он растет ежегодно на 40%. Более 3 млн. человек посетили озеро Байкал в 2023 г., примерно две трети этого потока пришлось на Малое море.

Для озера характерна пространственно-временная неоднородность развития планктона (явление пэтчинга) и макрофитов. В результате рекреационной деятельности может происходить фрагментация или уничтожение местообитаний макрофитов, что приводит к изменениям видового богатства, обилия видов и структуры сообществ.

Среднее содержание химических элементов в макрофитах оз. Байкал в сравне-

**Таблица 2.** Содержание микроэлементов (мкг/дм<sup>3</sup>) в пробах воды оз. Байкал (собственные и литературные данные [13–15])

**Table 2.** The content of microelements (µg/dm<sup>3</sup>) in water samples from Lake Baikal

Элементы Elements	Фоновый Байкал (2019)* Background Baikal (2019)* n = 78	Южный Байкал (2015)** Southern Baikal (2015)** n = 30	Калтыгей (2019–2020) n = 12	C, %	ПДК <sup>1</sup> <sub>КБ</sub> <sup>***</sup> мкг/дм <sup>3</sup> MPC <sub>КБ</sub> <sup>***</sup> µg/dm <sup>3</sup>	ПДК <sup>2</sup> <sub>ВОЗ</sub> мкг/дм <sup>3</sup> , WHO MAC, µg/dm <sup>3</sup>
Al	4.823 ± 0.016	12.95 ± 0.07	5.468 ± 0.015	21	200–500	200
Fe	3.745 ± 0.034	7.467 ± 0.093	6.875 ± 0.072	34	300	300
Mn	2.147 ± 0.061	1.875 ± 0.056	1.46 ± 0.013	40	100	400
S	1920 ± 136	1862 ± 127	1509 ± 102	22	10000	–
Cr	0.094 ± 0.007	0.379 ± 0.014	0.108 ± 0.004	23	50	–
Co	0.214 ± 0.004	0.139 ± 0.003	0.148 ± 0.003	44	100	200
Ni	0.170 ± 0.003	0.116 ± 0.004	0.187 ± 0.005	20	20	70
Ba	20.175 ± 1.212	22.130 ± 0.943	19.167 ± 0.862	22	700	700
Cu	1.014 ± 0.006	1.137 ± 0.007	1.342 ± 0.007	28	1000	2000
Zn	1.105 ± 0.005	0.970 ± 0.003	0.682 ± 0.004	14	1	–
Br	23.11 ± 1.06	12.56 ± 0.95	25.54 ± 1.37	16	200	–
Rb	4.437 ± 0.068	6.257 ± 0.0753	3.231 ± 0.039	20	100 <sup>3</sup>	–
Sr	165.4 ± 11.2	122.8 ± 12.3	96.7 ± 8.4	38	7000	–
Pb	0.272 ± 0.003	0.415 ± 0.006	0.211 ± 0.003	13	30	100

Примечание: <sup>1</sup> ПДК КБ – предельно допустимые значения химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, утвержденные Главным государственным санитарным врачом РФ. Постановление от 27.04.2003 года №78; <sup>2</sup> ПДК ВОЗ – рекомендованные Всемирной организацией здравоохранения параметры в отношении химических веществ, которые находясь в питьевой воде, могут оказывать воздействие на здоровье; <sup>3</sup> рубидий хлорид. Прочерк означает, что данное вещество в списке нормируемых отсутствует. \* [14]; \*\* [15]; \*\*\* [16].

Note: <sup>1</sup> MPC KB – permissible limits for the content of chemicals in water of water bodies for domestic, drinking and cultural water use, approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation. Resolution No. 78 of April 27, 2003; <sup>2</sup> WHO MAC – parameters recommended by the World Health Organization for chemicals that, when present in drinking water, may have an impact on health; <sup>3</sup> rubidium chloride. A dash means that this substance is not on the list of regulated substances. \* [14]; \*\* [15]; \*\*\* [16].

нии с литературными сведениями представлено в табл. 3. Содержание большинства изученных биогенных элементов в исследуемых видах колеблется в узких пределах. Вариабельность концентрации биогенных элементов у растений в экосистеме Малого моря невысока (Cv = 6–22%). Это говорит о сбалансированности химического состава видов и обеспеченности условий нормального роста и развития растений. Максимальное содержание Na, Mg, S, Cr отмечается у *Myriophyllum spicatum*, а максимум содержания Si, Fe, Sr у *Elodea canadensis*, что указывает на их повышенную способность к аккумуляции ряда химических элементов.

Содержание макроэлементов в макрофитах оз. Байкал (табл. 3) можно представить в виде убывающих рядов: *Elodea canadensis*: Ca > Fe > P = K >>

S > Si > Na > Mg > Cl; *Myriophyllum spicatum*: Ca > P > K > S > Fe > Na > Mg > Si > Cl; *Potamogeton perfoliatus*: Ca > K > Fe > S > Na > P > Mg > Si > Cl; *Potamogeton pectinatus*: K > Fe > S > Ca > Na > P > Mg > Si > Cl; *Polygonum amphibium*: Ca > Fe > K > S > P > Na > Mg > Si > Cl.

Из приведенных данных следует, что как последовательность убывающих концентраций макроэлементов, так и сами концентрации в побегах макрофитов существенно различались. Среди исследуемых видов максимальное содержание Ca отмечено у *Polygonum amphibium*, P, K, S, Na, Mg у *Myriophyllum spicatum*, Fe и Si у *Elodea canadensis*. Минимальные значения содержания макроэлементов зарегистрированы: Ca, P у *Potamogeton pectinatus*, K, S, Si у *Polygonum amphibium*, Fe P. *perfoliatus*, Na, Mg, Cl у *Elodea canadensis*.

Таблица 3. Среднее содержание химических элементов в макрофитах оз. Байкал  
Table 3. The average of content of chemical elements in macrophytes of Lake Baikal

Элементы Elements	<i>Elodea canadensis</i> n = 16	<i>Myriophyllum spicatum</i> n = 12	<i>Potamogeton perfoliatus</i> n = 12	<i>Potamogeton pectinatus</i> n = 15	<i>Polygonum amphibium</i> n = 15	Cv, %	<i>Ranunculus scirpinatus</i> Sibth.*	Избыточное или токсичное содержание ** Excessive or toxic content **	ПДК мкг/г*** MPC µg/kg**
Содержание, % Content,									
Na	0.138 ± 0.0031	0.331 ± 0.004	0.224 ± 0.003	0.234 ± 0.004	0.152 ± 0.003	13	—	—	—
Mg	0.068 ± 0.007	0.114 ± 0.008	0.094 ± 0.008	0.103 ± 0.008	0.082 ± 0.007	15	—	> 1.50	—
Al	0.005 ± 0.002	0.005 ± 0.002	0.049 ± 0.009	0.011 ± 0.006	0.016 ± 0.006	21	—	0.050	0.5
Si	0.173 ± 0.010	0.087 ± 0.009	0.075 ± 0.009	0.056 ± 0.008	0.047 ± 0.008	—	—	—	—
K	0.525 ± 0.012	0.613 ± 0.012	0.581 ± 0.012	0.563 ± 0.012	0.482 ± 0.011	12	—	> 6.0	—
P	0.527 ± 0.007	0.683 ± 0.007	0.195 ± 0.003	0.167 ± 0.005	0.178 ± 0.005	15	—	> 1.0	—
S	0.420 ± 0.008	0.562 ± 0.008	0.393 ± 0.009	0.401 ± 0.008	0.353 ± 0.009	22	—	> 1.0	—
Cl	0.011 ± 0.008	0.021 ± 0.008	0.023 ± 0.008	0.031 ± 0.007	0.029 ± 0.008	—	—	0.050-0.10	—
Ca	0.722 ± 0.020	0.982 ± 0.031	0.644 ± 0.025	0.342 ± 0.020	0.991 ± 0.029	17	—	> 5.0	—
Fe	0.605 ± 0.006	0.498 ± 0.005	0.425 ± 0.005	0.439 ± 0.005	0.595 ± 0.006	16	0.569	> 0.50	0.2-0.5
Содержание, мкг/г, Content, µg/g									
Mn	311 ± 64	283 ± 60	456 ± 65	587 ± 62	309 ± 63	40	518	300-5000	100-500
Cu	81.3 ± 1.9	34.7 ± 1.8	20.3 ± 1.5	28.2 ± 1.6	101.4 ± 2.0	32	7.6	20	80-100
Cr	7.1 ± 1.2	11.5 ± 2.8	4.4 ± 0.8	10.4 ± 2.7	5.4 ± 0.9	19	5.1	5-30	5-10
Ni	6.2 ± 0.9	5.1 ± 0.9	4.3 ± 0.9	6.0 ± 0.9	4.0 ± 0.8	18	5.0	10	5-10
Zn	24.4 ± 8.9	28.2 ± 8.6	31.3 ± 8.1	36.6 ± 8.2	20.6 ± 8.0	14	9	100	5000
Br	32.3 ± 8.2	25.5 ± 8.0	32.6 ± 8.2	30.4 ± 8.1	24.2 ± 8.0	9	—	—	—
Rb	5.5 ± 2.1	6.2 ± 2.2	8.3 ± 2.3	7.4 ± 2.5	4.4 ± 2.0	12	—	—	—
Zr	25.9 ± 8.0	34.2 ± 8.3	26.7 ± 8.1	31.6 ± 8.6	52.3 ± 8.9	44	—	—	—
Pb	9.2 ± 2.6	8.1 ± 2.5	4.3 ± 2.1	7.4 ± 2.4	4.4 ± 2.3	13	—	5-10	—
Ti	64.8 ± 2.6	92.7 ± 3.3	68.9 ± 2.7	73.5 ± 2.8	77.1 ± 2.7	23	—	—	—
Sr	295 ± 40	122 ± 44	78 ± 23	165 ± 43	247 ± 35	—	—	—	—

Примечание. <sup>1</sup> Среднее значение и ошибка. \* [12, 17]; \*\* [18, 19]; \*\*\* [16]. Проверк означает отсутствие данных.  
Note. <sup>1</sup> Mean and standard error. \* [12, 17]; \*\* [18, 19]; \*\*\* [16].

При оценке качества окружающей среды особое внимание уделяется содержанию токсичных элементов, представляющих наибольшую опасность для биоты. Согласно полученным нами результатам (табл. 3), наблюдаются следующие последовательности их содержания в исследованных видах: *Elodea canadensis*: Mn > Sr > Cu > Ti > Zr > Zn > Pb > Cr > Ni > Rb; *Myriophyllum spicatum*: Mn > Sr > Ti > Cu > Zr > Zn > Cr > Pb > Rb > Ni; *Potamogeton perfoliatus*: Mn > Sr > Ti > Zn > Zr > Cu > Rb > Cr > Pb = Ni; *Potamogeton pectinatus*: Mn > Sr > Ti > Zn > Zr > Cu > Cr > Rb = Pb > Ni; *Polygonum amphibium*: Mn > Sr > Cu > Ti > Zr > Zn > Cr > Rb = Pb > Ni.

Среди микроэлементов и потенциально токсичных металлов максимальное содержание Mn, Zn, Rb отмечено у *Potamogeton pectinatus*, Cu у *Polygonum amphibium*, Ti, Cr у *Myriophyllum spicatum*, Sr, Pb, Ni у *Elodea canadensis*. Минимальные концентрации зарегистрированы Mn у *Myriophyllum spicatum*, Cu, Zr, Cr, Pb, Sr у *Potamogeton perfoliatus*, Zn, Rb, Ni у *Polygonum amphibium*, Ti у *Elodea canadensis*.

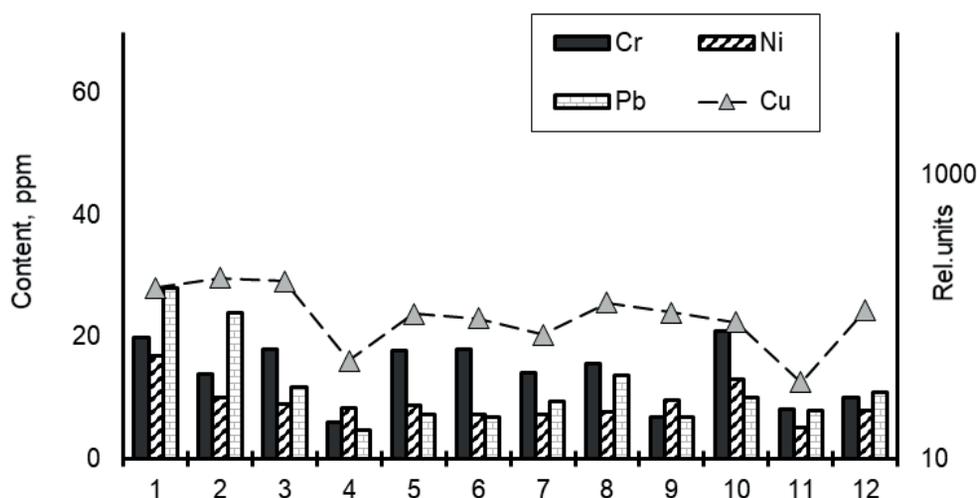
Для наиболее токсичного металла свинца, построен ряд убывания концентраций: *Elodea canadensis* → *Myriophyllum spicatum* → *Potamogeton pectinatus* → *P. perfoliatus* = *Polygonum amphibium*. Исследуемые виды в убывающем ряду содер-

жания меди располагаются следующим образом: *Polygonum amphibium* → *Elodea canadensis* → *Myriophyllum spicatum* → *Potamogeton pectinatus* → *P. perfoliatus*. Наиболее активно накапливают цинк побеги рдеста гребенчатого. Следует отметить повышенное содержание Sr во всех исследуемых видах макрофитов, которое варьирует от 78 до 295 мкг/г.

С учетом выявленной накопительной активности исследованных видов и способности к биофильтрации можно рекомендовать в качестве потенциальных видов-индикаторов загрязнения водной среды *Elodea canadensis* и *Polygonum amphibium*.

На обследованной территории уровень варьирования содержания большей части элементов у исследованных видов находится на среднем уровне ( $C_v = 17-25\%$ ). Повышенное и высокое варьирование содержания ( $C_v = 26-44\%$ ) отмечены для Mn, Cu, Zr. Обращает на себя внимание существенный размах варьирования содержания Cu (20.3–101.4 мкг/г).

При значительном антропогенном прессе, который испытывают рекреационные территории в летний период, в водосборы попадает много остатков антропогенной деятельности способных аккумулироваться в биологических объектах. В связи с этим, для некоторых представителей эндемичной биоты



**Рис. 1.** Среднее содержание некоторых тяжелых металлов в *Potamogeton pectinatus* в разных местах отбора проб на западном побережье оз. Байкал: 1 – Базарная; 2 – Куркутская; 3 – Бурлюк; 4 – Улан; 5 – Мухур; 6 – Тутай; 7 – Шакура; 8 – Шиды; 9 – Улирба; 10 – Онтхой; 11 – Хунжир-Наганский; 12 – Сарма.

**Fig. 1.** Average of content of heavy metals in *Potamogeton pectinatus* depending on the sampling location on the west coast of Lake Baikal: 1 – Bazarnaya; 2 – Kurkutsкая; 3 – Burlyuk; 4 – Ulan; 5 – Mukhur; 6 – Tutai; 7 – Shaktura; 8 – Shida; 9 – Ulirba; 10 – Onthoi; 11 – Khunzhir-Nagansky; 12 – Sarma.

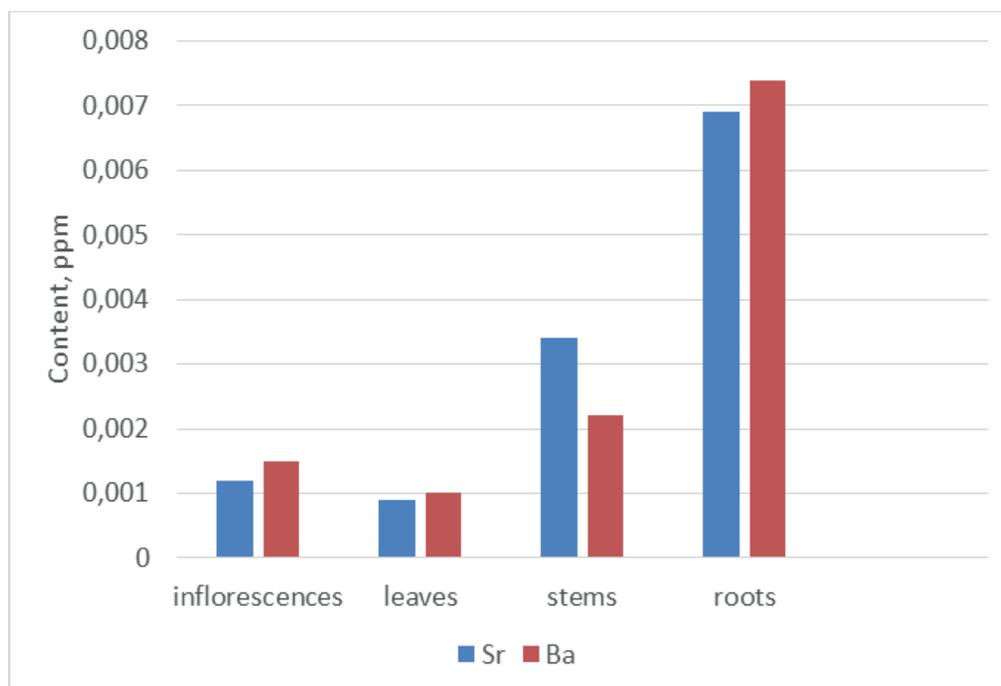


Рис. 2. Содержание Sr и Ba в разных органах *Polygonum amphibium*.  
 Fig. 2. Content of Sr and Ba in different organs of *Polygonum amphibium*.

(рачек *Epischura baikalensis*) создаются благоприятные условия, чтобы перерабатывать органику, попадающую с рекреационных территорий.

Наибольшее превышение ПДК для меди отмечено в *Polygonum amphibium* и *Elodea canadensis* (табл. 3). Отметим, что *Elodea canadensis* инвазивный вид, который за несколько десятилетий широко расселился в южной литорали озера, и это вызывает тревогу среди экологов. Полученные данные говорят о том, что макрофиты оз. Байкал выполняют функцию естественного биофильтра, депонирующего биогенные элементы, а также токсические вещества, поступающие с водосборной площади в летнее время. Виды, осуществляющие биофильтрацию и имеющие более развитую фотосинтезирующую поверхность, соответственно содержат больше тяжелых металлов. Из исследованных нами видов оба вида рдестов *Potamogeton perfoliatus* и *Potamogeton pectinatus* накапливают максимальные концентрации Mn (587 и 456 мкг/г соответственно), что выше примерно в 2 раза, чем у *Myriophyllum spicatum* (283 мкг/г). На территории Бурятии, в растениях из оз. Гусино содержание марганца в *Myriophyllum spicatum* L. составляет  $471 \pm 5$  мг/кг, тогда как у *Ranunculus circinatus* Sibth. —  $6439 \pm 84$  мг/кг, то есть выше на порядок [12, 17].

Данные о среднем содержании некоторых ТМ в *Potamogeton pectinatus* (рдест гребенчатый) в спектре микроэкологических условий в пелагиали западного побережья оз. Байкал показаны на рис. 1. Выявлены различия в содержании Sr, Ni, Pb, Cu в надземных частях рдеста в прибрежных акваториях. Содержание Sr в большинстве пунктов обследования превышает ПДК (10 мкг/г), а содержание Ni и Cu, в основном, меньше ПДК. Достаточно высокое содержание Pb обнаружено в наиболее посещаемых бухтах Базарная (9.7 мкг/г) и Куркутская (7.6 мкг/г), в которых превышение содержания этого элемента по сравнению с содержанием в других пунктах (5.6–5.0 мкг/г) составило в 1.5 раза. Установлено, что увеличение туристического потока в летнее время при отсутствии необходимой инфраструктуры на водоохранной территории по сравнению с фоновыми нагрузками, влечет конвертирование химических сбросов антропогенной природы в фитомассу водных растений [20].

Различия в накоплении ТМ в разных органах водных растений представляют интерес для выявления путей их поглощения и передвижения. С этой целью определяли содержание Sr и Ba в различных органах *Polygonum amphibium* (рис. 2). Минимальными значениями содержа-

ния обоих металлов характеризуются листья, а максимальные их концентрации зарегистрированы в корнях. Интересно отметить, что в листьях содержание Sr больше по сравнению с Ba, а в корнях наблюдается обратное соотношение этих металлов. Анализ полученных данных показывает, что оба металла поступают в растение из грунта, задерживаются в корнях и слабо передвигаются в надземные части рдеста гребенчатого.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Озеро Байкал является прохладным и мало-минерализованным, общая минерализация составляет 123.91 мг/дм<sup>3</sup>. На момент исследования концентрации химических элементов и ионов тяжелых металлов в озере не превышали ПДК, за исключением меди. Результаты анализа содержания химических элементов в макрофитах оз. Байкал, проведенного в заповеднике «Прибайкальский национальный парк» в период 2020–2022 гг., показали различия в содержании некоторых ТМ в зависимости от места сбора и биологического вида растений. Это позволяет сделать вывод, что антропогенное загрязнение на берегах озера оказывает влияние на элементный состав водных растений.

Изученные виды: *Potamogeton pectinatus* L., *Potamogeton perfoliatus* L., *Myriophyllum spicatum*

L., *Polygonum amphibium* (L.) S. F. Grey., *Elodea canadensis* Michx. реагировали на антропогенную нагрузку водного объекта в разной степени. С учетом выявленной накопительной активности исследованных видов и способности к биофильтрации можно рекомендовать в качестве потенциальных видов-индикаторов загрязнения водной среды *Elodea canadensis* и *Polygonum amphibium*. *Elodea canadensis* с учетом ее биологии особенно перспективна как модельный объект для биотестирования, поскольку она больше других видов аккумулирует тяжелые металлы.

Результаты исследования могут быть использованы для создания информационной основы химического мониторинга экологической безопасности и принятия решений для предотвращения отрицательных последствий туристической деятельности для озера Байкал. Необходимо продолжение постоянных биогеохимических исследований в мониторинговом режиме, особенно в районах рекреационной нагрузки на оз. Байкал.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю признательность за участие в полевых работах по Малому морю сотрудникам ФГБУН «Заповедное Прибайкалье» к.б.н. А. В. Мокрому и Л. Н. Молдавской, за ценные советы и рекомендации при выполнении работы – д.т.н., профессор В. А. Верхозина (ИРНИТУ) и к.х.н., с.н.с. Е. В. Чупариной (ИГ им. А. П. Виноградова СО РАН).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды в Иркутской области: 2021 г.» <https://irkobl.ru/sites/ecology/2954%20Иркутск%20Природа%20Макет.pdf>
2. Кривина Е. С., Тарасова Н. Т. 2018. Изменения таксономической структуры фитопланктона малых водоемов после прекращения техногенной эксплуатации / Е.С. Кривина, Н.Т. Тарасова. – Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 160(2): 292–307. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35740605>
3. Анциферова Г. А., Русова Н. И., Шевырев С. Л., и др. 2020. Трансформации природных водоемов как эталон состояния водных экосистем особо охраняемых и антропогенно-нагруженных территорий. – Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. (4): 53–60. <https://doi.org/10.17308/geo.2020.4/3065>
4. Азовский М. Г., Чепинога В. В. 2007. Флора высших растений озера Байкал. Иркутск. 157 с.
5. Лебедева О. А., Гарин Э. В., Беляков Е. А. 2015. Образование наземной формы у *Batrachium circinatum* (Sibth.) Sprach. (*Ranunculaceae* Juss.) в условиях колеблющегося уровня воды. – Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 12(8): 1442–1444. <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=8169>
6. Верхозина В. А., Белых О. А., Верхозина Е. В. 2022. Изменение бактериального сообщества в литоральной зоне экосистемы южной части озера Байкал под воздействием антропогенной нагрузки. – Известия Байкальского гос. университета. 32(2): 397–406. [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2022.32\(2\).397-406](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2022.32(2).397-406)

7. Квеститадзе Г. И., Хатисашвили Г. А., Садуншвили Т. А. 2005. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях. М. 199 с.
8. Белых О. А. 2014. Экологический мониторинг травянистого покрова Южной Сибири. Иркутск. 150 с.
9. Белых О. А., Глызин Л. А., Константинова Е. А., Глызина О. Ю. 2019. Фильтрационные возможности сообщества *Lubomirskia baicalensis* в условиях модельного эксперимента. — Известия Байкальского гос. университета. 29(2): 179–184. [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2019.29\(2\).179-184](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2019.29(2).179-184)
10. Ali S., Abbas Z., Rizwan M., Zaheer I. E., Yavaş İ., Ünay A., Abdel-Daim M. M., Bin-Jumah M., Hasanuzzaman M., Kalderis D. 2020. Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: A review. — Sustainability. 12(5): 1927. <https://doi.org/10.3390/su12051927>
11. Чупарина Е. В., Мартынов А. М. 2011. Применение неструктивного РФА для определения элементного состава лекарственных растений. — Журнал аналитической химии. 66(4): 399–405. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16311412>
12. Жигжитжапова С. В., Дыленова Е. П., Никитина Е. П. и др. 2022. Тяжелые металлы и жирнокислотный состав растений *Ranunculus circinatus* Sibth. (Ranunculaceae) из дельты реки Селенги. — Химия растительного сырья. (40): 171–179. <https://doi.org/10.14258/jcprtm.20220411286>
13. Алекин О. А., Семенов А. Д., Скопинцев Б. А. 1973. Руководство по химическому анализу вод суши / Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Гидрохим. ин-т. 3-е изд. Л. 269 с.
14. Гребенищикова В. И., Кузьмин М. И., Демьянович В. М. 2024. Разнонаправленная динамика химического состава воды Байкальской экосистемы (Байкал, притоки, исток р. Ангара). — Геология и геофизика. 65(3): 386–400. <https://doi.org/10.15372/GIG2023162>
15. Каницкая Л. В., Мокрый А. В., Белых О. А., Смирнова Е. В. 2015. Оценка экологической пригодности водотоков города Байкальска для развития туризма. — Фундаментальные исследования. (7–3): 463–467. <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38759>
16. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. (утв. Минприроды РФ 30.11.1992). <https://docs.cntd.ru/document/901797511>
17. Жигжитжапова С. В., Павлов В. Г., Ширеторова В. Г. и др. 2019. Содержание металлов в водных растениях оз. Гусиное. — Вода: химия и экология. 1–2: 34–40. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37613772>
18. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. 1989. Микроэлементы в почвах и растениях. М. 439 с.
19. Ильин В. Б., Сысо А. И. 2001. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 229 с.
20. Манасыпов Р. М., Кирпотин С. Н., Покровский О. С., Широкова Л. С. 2012. Особенности элементного состава озерных вод и макрофитов термокарстовых экосистем субарктики Западной Сибири. — Вестник Томского государственного университета. Биология. 3(19): 186–198. <https://elibrary.ru/item.asp?id=18037927>

## Features of the Elemental Composition of Some Lake Baikal Macrophytes

© 2024. O. A. Belykh

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia  
e-mail: olga.belykh@klgtu.ru

**Abstract.** The content of 21 chemical elements in four types of macrophytes collected on the coast of Lake Baikal in the Irkutsk region in 2020–2021 was studied. The article discusses the features of the elemental composition of biogenic elements and the accumulation of heavy metals in higher aquatic plants growing in the bays, which experience high summer recreational pressure. In summer, macrophytes of the lake Baikal perform the function of a natural biofilter, depositing biogenic elements and toxic substances from the catchment area. The studied species of *Potamogeton pectinatus* L., *Potamogeton perfoliatus* L., *Myriophyllum spicatum* L., *Polygonum amphibium* (L.) S.F. Grey., *Elodea canadensis* Michx can serve as indicators of eutrophication of water bodies. It was established that no excess of MPC was observed in the objects of study. The experiment can serve as a justification for the use of the XRF method (X-ray fluorescence analysis) as a means of monitoring the state of coastal ecosystems. The results of the study are important for creating an information base for chemical monitoring and decision-making to prevent the negative consequences of tourism and the environmental safety of Lake Baikal.

*Keywords:* *Potamogeton pectinatus*, *Potamogeton perfoliatus*, *Myriophyllum spicatum*, *Polygonum amphibium*, *Elodea canadensis*, macrophytes, elemental composition, anthropogenic impact, Lake Baikal

## ACKNOWLEDGMENTS

The author expresses her sincere gratitude to the staff of the Pribaikalsky National Park A.V. Mokriy, Cand. Biol. Sci., and L. N. Moldavskaya for participation in field work in the Maloe More Strait, to V. A. Verkhozina, Dr. Tech. Sci., Professor of Irkutsk National Research Technical University and E.V. Chuparina, Cand. Biol. Sci., senior researcher at The Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS for their valuable advice and recommendations in the course of research.

## REFERENCES

1. *State report* «On the state and protection of the environment in the Irkutsk region: 2021». <https://irkobl.ru/sites/ecology/2954%20Иркутск%20Природа%20Макет.pdf> (In Russian)
2. Krivina E. S., Tarasova N. G. 2018. Changes in the taxonomic structure of phytoplankton inhabiting small water bodies as a consequence of the technogenic impact. – *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki.* 160(2): 292–307. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35740605> (In Russian)
3. Antsiferova G. A., Rusova N. I., Shevyrev S. L. et al. 2020. Transformation of natural water bodies as a standard of the state of aquatic ecosystems of specially protected and urbanized territories. – *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology.* 4: 53–60. <https://doi.org/10.17308/geo.2020.4/3065>
4. Azovskij M. G., Chepinoga V. V. 2007. [Flora of the higher plants of Lake Baikal]. Irkutsk. 157 p. (In Russian)
5. Lebedeva O. A., Garin E. V., Belyakov E. A. 2015. The formation of land forms in *Batrachium circinatum* (Sibth.) Spach. (Ranunculaceae Juss.) under conditions of fluctuating water levels. – *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 12(8): 1442–1444. <https://applied-research.ru/en/article/view?id=8169> (In Russian)
6. Verkhozina V. A., Belykh O. A., Verkhozina E. V. 2022. Changes in the bacterial community in the littoral zone of the ecosystem of the southern part of Lake Baikal under the influence of anthropogenic load. – *Bulletin of Baikal State University.* 32(2): 397–406. [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2022.32\(2\).397-406](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2022.32(2).397-406) (In Russian)
7. Kvesitadze G. I., Khatisashvili G. A., Sadunishvili T. A. 2005. [Metabolism of anthropogenic toxicants in higher plants]. Moscow. 199 p. (In Russian)
8. Belykh O. A. 2014. [Ecological monitoring of grass cover in Southern Siberia]. Irkutsk. 150 p. (In Russian)
9. Belykh O. A., Glyzin L. A., Konstantinova E. A., Glyzina O. Yu. 2019. Filtration capacities of *Lubomirskia baicalensis* biocenosis in condition of a model experiment. – *Bulletin of Baikal State University.* 29(2): 179–184. [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2019.29\(2\).179-184](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2019.29(2).179-184) (In Russian)
10. Ali S., Abbas Z., Rizwan M., Zaheer I. E., Yavaş İ., Ünay A., Abdel-Daim M. M., Bin-Jumah M., Hasanuzzaman M., Kalderis D. 2020. Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: A review. – *Sustainability.* 12(5): 1927. <https://doi.org/10.3390/su12051927>
11. Chuparina E. V., Martynov A. M. 2011. Application of non-destructive X-ray fluorescence analysis to determine the elemental composition of medicinal plants. – *J. Analyt. Chem.* 66(4): 389–395. <https://doi.org/10.1134/S106193481104006X> (In Russian)
12. Zhigzhitzhapova S. V., Dylenova E. P., Nikitina E. P. et al. 2022. Heavy metals and fatty acid composition of *Ranunculus circinatus* (Sibth.) Spach (Ranunculaceae) from the delta of the Selenga River. – *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya.* (40): 171–179. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220411286> (In Russian)
13. Alekin O. A., Semenov A. D., Skopincev B. A. 1973. [Rukovodstvo po himicheskomu analizu vod sushi / Gl. upr. gidrometeorol. sluzhby pri Sovete Ministrov SSSR. Hidrohim. in-t]. 3-e izd. Leningrad. 269 p. (In Russian)
14. Grebenshchikova V. I., Kuzmin M. I., Demyanovich V. M. 2024. Different dynamics of the chemical composition of water in the Baikal ecosystem (Baikal, its tributaries, and the source of the Angara River. – *Russ. Geol. Geophys.* 65(3): 353–365. <https://doi.org/10.2113/RGG20234650>

15. *Kanickaya L. V., Mokryy A. V., Belykh O. A., Smirnova E. V.* 2015. Environmental assessment of Baikalsk Area rivers for tourism and recreation development. – *Fundamental Research*. (7–3): 463–467. <https://fundamental-research.ru/en/article/view?id=38759> (In Russian)
16. [*Criteria for assessing the environmental situation of territories to identify zones of ecological emergencies and disasters* (approved by The Ministry of Natural Resources of the Russian Federation on 30.11.1992)]. <https://docs.cntd.ru/document/901797511> (In Russian)
17. *Zhigzhitzhapova S. V., Pavlov V. G., Shiretorova V. G. et al.* 2019. Metal content in aquatic plants of Lake Gusinoe. – *Water: Chemistry and Ecology*. 1–2: 34–40. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37613772> (In Russian)
18. *Kabata-Pendias A., Pendias H.* 1989. Trace elements in soils and plants. Moscow. 439 p. Transl. from English. (In Russian)
19. *Ilyin V. B., Syso A. I.* 2001. [Trace elements and heavy metals in soils and plants of the Novosibirsk region.]. Novosibirsk. 229 p. (In Russian)
20. *Manasyrov R. M., Kirpotin S. N., Pokrovsky O. S., Shirokova L. S.* 2012. Features of the elemental composition of lake waters and macrophytes in thermokarst subarctic ecosystems of Western Siberia. – *Tomsk State University Journal of Biology*. 3(19): 186–198. <https://elibrary.ru/item.asp?id=18037927> (In Russian)