

Химический элементный состав *Elodea canadensis* Michx. 1791. и его использование для оценки антропогенного загрязнения литорали оз. Байкал

Chemical elemental composition of *Elodea canadensis* Michx. 1791. and its use for the assessment of anthropogenic pollution of the littoral of Lake Baikal

Куликова Н. Н., Чебыкин Е. П., Сутурин А. Н.

Kulikova N. N., Chebykin E. P., Suturin A. N.

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия. E-mail: kulikova@lin.irk.ru
Limnological Institute Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Реферат. Методом ИСП-МС изучен химический элементный состав инвазионного вида *Elodea canadensis* Michx. на участках литорали Байкала с различной степенью антропогенной нагрузки. Установлено, что в составе *E. canadensis* из макроэлементов преобладают $K > Ca > Na > P > Mg \geq S \geq Cl$, из микроэлементов – $Fe, Mn > Si, Sr > Al, Ba, Zn > Br, V$. Содержание Ca, Sr, Mg, B и Si в образцах *E. canadensis* характеризуется наименьшей вариативностью, содержание $Na, P, Cl, K, V, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Cd, I, Pb$ отличается более сильной вариацией. Наибольшая неоднородность распределения характерна для литофильных элементов ($Be, Al, Ti, Cr, Mn, Y, Zr, Nb, REE$ (редкоземельных), Hf, Ta, W, Th), а также Fe, Co, Sn, Sb, Bi . Максимальное содержание Na, Cl, K и P , ассоциированное с поступлением хозяйственно-бытовых стоков в прибрежную зону, обнаружено в пробах *E. canadensis*, собранных в губе Фролихе и на участках литорали, сопряженных с населенными пунктами Гремячинск, Максимиha, Нижнеангарск. Повышенный уровень Zn, Cd, Pb также характерен для образцов, собранных на участках литорали с высокой антропогенной нагрузкой (п. Листвянка, Бугульдейка, Нижнеангарск, с. Максимиha и Гремячинск).

Ключевые слова. Литораль оз. Байкал, населенные пункты и туристические объекты, химический элементный состав, *Elodea canadensis*.

Summary. The ICP-MS method was used to study chemical elemental composition of the invasive species *Elodea canadensis* Michx. at Lake Baikal littoral sites with different degree of anthropogenic load. It is found out that dominant macroelements in *E. canadensis* are $K > Ca > Na > P > Mg \geq S \geq Cl$, dominant microelements are $Fe, Mn > Si, Sr > Al, Ba, Zn > Br, V$. The content of Ca, Sr, Mg, B and Si in *E. canadensis* samples are characterized by the least variability, and $Na, P, Cl, K, V, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Cd, I, Pb$ contents are more variable. The maximal heterogeneity in distribution is characteristic for lithophilous elements ($Be, Al, Ti, Cr, Mn, Y, Zr, Nb, REE$ (rare earth), Hf, Ta, W, Th) as well as for Fe, Co, Sn, Sb, Bi . Maximal contents of Na, Cl, K and P associated with income of household waste waters into the near-shore zone is found in *Elodea* samples collected in Frolikha vent and at littoral sites adjacent to such populated areas as Gremyachinsk, Maksimikha, Nizhneangarsk. The elevated level of Zn, Cd, Pb is characteristic as well for the samples collected at the littoral sites with a high anthropogenic charge (Listvyanka settl., Bugul'deyka, Nizhneangarsk, Maksimikha village and Gremyachinsk).

Key words. Littoral of Lake Baikal, populated areas and tourist sites, chemical elemental composition, *Elodea canadensis*.

Введение. Появление нового для озера Байкал растения, *Elodea canadensis* Michx. (элодея канадская), отмечено в семидесятые годы прошлого столетия (Кожова и др., 1985). В настоящее время *E. canadensis* встречается во всех трех котловинах Байкала не только в заливах и прибрежно-соровой зоне, но и на участках открытых побережий озера, защищенных от волнения (Кравцова и др., 2010). Высокая поглотительная способность, неподвижная природа водных растений делает их особенно эффективным биоиндикатором загрязнения водных экосистем, так как они представляют реальные уровни загрязнения, присутствующие на территории произрастания (Лычагина и др., 1998; Дайнеко, Тимофеев, 2013; Манасыпов и др., 2018).

Объекты и методы исследований. Пробы воды и *E. canadensis* (26 проб) отбирали в июле, августе 2017–2020 гг. в мелководной зоне оз. Байкал (рис. 1). Воду отбирали пластиковыми шприцами и фильтровали через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм в стерильные полипропилено-

вые пробирки. В качестве консерванта использовали дважды очищенную суббуйлинговой перегонкой HNO_3 70 %. Образцы элодеи промывали в прибрежной и байкальской фильтрованной воде. Для удаления остатков загрязнений отмытые растения просматривали под биноклем МБС-10, ополаскивали дистиллированной водой и доводили до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при 60 °С, до постоянной массы – при 105 °С. Подготовку проб к анализу выполняли способом кислотной минерализации (HNO_3 – 70 %, H_2O_2 – 30 %). Элементный состав всех проб определяли методом ИСП-МС. Анализ выполняли на масс-спектрометре Agilent 7500 CE фирмы Agilent Technologies с квадрупольным масс-анализатором в Центре коллективного пользования «Ультрамикрoанализ» при ЛИН СО РАН в соответствии с разработанными ранее методиками (Чебыкин и др., 2012). Правильность определений оценивали, используя аттестованный стандартный образец состава элодеи канадской (ЭК-1) (ГСО 8921-2007. URL: <http://www.igc.irk.ru/ru/item/2433-ek-1-gso-8921-2007-co-koomet-0065-2008-ru>), стандартный образец состава глубинной байкальской воды (Suturin et al., 2003).

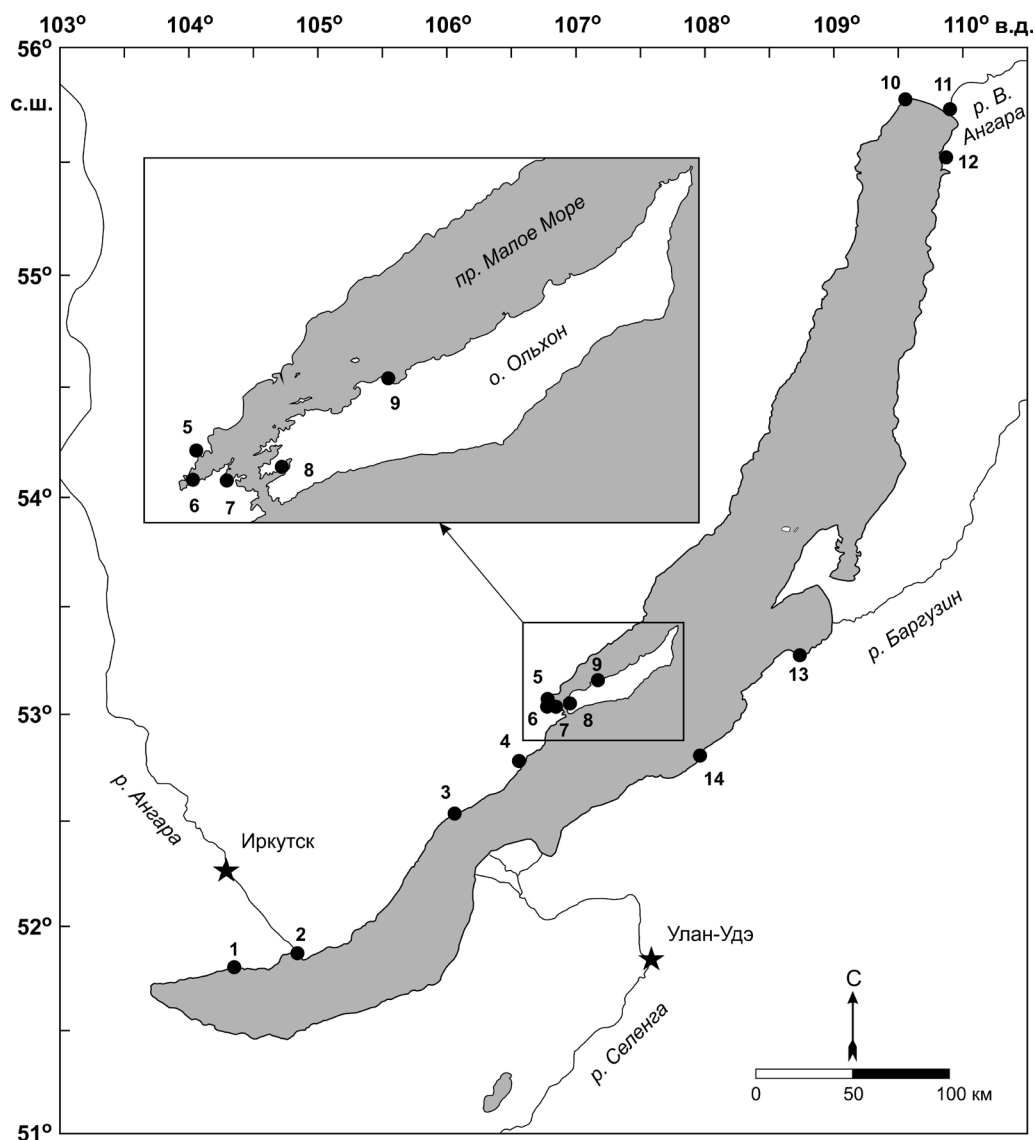


Рис. 1. Карта-схема отбора проб воды и *Elodea canadensis* Michx. Условные обозначения: 1 – р. Большая Половинная (N51°48'12.33», E104°21'13.81»); 2 – п. Листвянка (N51°51'51.19», E104°50'39.88»); 3 – п. Бугульдейка (N52°31'35.77», E106°3'35.43»); 4 – р. Анга (N52°46'36.87», E106°33'34.95»); 5 – зал. Шида (N53°3'49.38», E106°47'5.8»); 6 – зал. Мухур, т/б Тогот (N53°1'41.4», E106°46'39.25»); 7 – бух. Куркутская (N53°1'47.36», E106°50'48.54»); 8 – зал. Загли (N53°2'6.98», E106°57'6.56»); 9 – оз. Ханхой (N53°9'6.99», E107°10'24.49»); 10 – п. Нижнеангарск, порт, пристань (N55°46'9.75», E109°33'22.12»); 11 – р. Верхняя Ангара, дельта (N55°43'28.09», E109°54'9.66»); 12 – губа Фролиха (N55°30'47.4», E109°52'10.77»); 13 – п. Максимиha (N53°16'4.7», E108°44'17.73»); 14 – п. Гремячинск (N52°47'58.18», E107°57'49.79»).

Статистическая обработка данных проведена в программах MS Excel 2007 и Statistica 8. Из выборочной совокупности полученных данных выделены однородные группы значений. Для проверки выделенной группы на однородность использовали коэффициент вариации (Тевелева, 2021). Выборочная совокупность считается однородной при $CV \leq 33\%$ (Бочаров, Печинкин, 1998). Результаты представлены в виде средних содержаний, стандартных отклонений, медианы, максимальных и минимальных значений. Кластеризация станций отбора проб *E. canadensis* выполнена методом *k*-средних по четырем переменным: содержанию в составе элодеи Na, Cl, K, P. Для определения количества кластеров последовательно анализировали качество разбиения полученных данных на 2, 3, 4 и 5 кластеров. Максимально координаты центров отличались при разбиении на 5 кластеров.

Цель данной работы – определение элементного состава *E. canadensis* и его использование для оценки загрязнения литорали поверхностным и грунтовым стоком с территорий населенных пунктов и центров рекреации.

Результаты и обсуждение. Элементы минерального питания водные растения поглощают преимущественно из воды (Кокин, 1982), поэтому их элементный состав может представлять реальные уровни загрязнения водной среды при антропогенном воздействии.

Элементный состав *E. canadensis*, собранной в различных частях литорали озера, по содержанию большинства определяемых элементов отличается сильной вариацией. Наибольшая неоднородность в составе элодеи характерна для литофильных элементов (Be, Al, Ti, Cr, Mn, Y, Zr, Nb, PЗЭ (редкоземельных), Hf, Ta, W, Th), а также Fe, Co, Sn, Sb, Bi (табл. 1, 2).

Большинство из них относятся к малоподвижным элементам со слабой водной миграцией. Высокое содержание металлов в макрофитах в существенной мере связано с осаждением на них тонкодисперсной взвеси и коллоидальных гидроксидов металлов (Barnett, Ashrof, 1985). Элодея с самым высоким содержанием перечисленных элементов характерна для участков литорали, береговая зона которых сложена рыхлыми осадочными породами. В условиях интенсивных гидродинамических процессов, характерных для Байкала, такие породы относительно легко разрушаются и являются постоянным источником тонкодисперсной взвеси, которая частично скапливается в зарослях макрофитов. Самые низкие содержания литофильных элементов, особенно PЗЭ, характерны для элодеи из оз. Ханхой, отделенного от Байкала песчаной косой. Максимальная концентрация малоподвижных элементов установлена в ризоидах элодеи.

Сильная вариация в составе элодеи содержания элементов, подвижных в водной среде, очевидно, обусловлена пространственно-временной неоднородностью элементного состава воды. Однородный ряд значений содержания элементов в составе элодеи, собранной на участках литорали Южного, Среднего и Северного Байкала, характерен лишь для Ca, Sr, Mg, B, Si ($CV \leq 33\%$); а также – Li, S, Mo (85–90 % проб) (табл. 1). В листьях элодеи к приведенному перечню добавляется K и U, в стеблях – Sc, в ризоидах, которые отличаются наиболее высокой вариабельностью элементного состава, однородный ряд представлен только концентрацией Mg. Содержание в исследуемых пробах других подвижных элементов (Na, P, Cl, K, V, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Cd, I, Pb) отличается более сильной вариацией ($CV > 40\%$) (табл. 1).

В элементном составе элодеи преобладает K, его содержание колеблется от 10400–25000 (зал. Шида) до 64000 мкг/г сухой массы на участке литорали в районе с. Гремячинск. Содержание следующего элемента, Ca, – примерно в 1,5–2 раза меньше. В целом, макроэлементы по уровню содержания можно расположить в следующий ряд: $K > Ca > Na > P > Mg \geq S \geq Cl$. Преобладание K и Ca установлено также в элементном составе листьев и стеблей. В составе ризоидов нередко – $K, Fe > Ca, Na > P, S, Cl, Mg$. Из микроэлементов элодея в наибольшем количестве поглощает и накапливает Fe, $Mn > Si, Sr > Al, Ba, Zn > Br, B$ (табл. 1).

Все станции отбора проб элодеи граничат с территориями населенных пунктов или рекреационными зонами. Из-за изношенности и неэффективности большинства объектов коммунальной инфраструктуры прибрежных населенных пунктов или ее отсутствия, из-за резко возросшего в последние 10–15 лет количества туристов (только зарегистрированных – около 3 млн в год), значительно увеличился поток в мелководную зону Байкала загрязненных поверхностных и грунтовых вод. Сброс недостаточно очищенных сточных вод или полное отсутствие очистных сооружений в населенных пунктах и зонах рекреации входят в число основных источников загрязнения Байкальской природной территории (Национальное информационное агентство Экология. URL: <https://nia.eco/2020/05/12/2900/>). В составе за-

грязненных сточных вод присутствуют нефтепродукты, сульфаты, хлориды, нитраты, фосфаты, взвешенные вещества, синтетические поверхностно-активные вещества, тяжелые металлы (Cu, Ni, Zn, Pb, Cd) (Государственный доклад, 2018).

Из-за активных гидродинамических процессов (Верболов, 1996), непосредственное содержание элементов в воде мелководной зоны, загрязняемой хозяйственно-бытовыми стоками, подвержено значительным колебаниям и не отражает реальное поступление загрязнителей в прибрежную зону (рис. 2). Способность элодеи извлекать из воды и концентрировать элементы растворенных соединений с различной интенсивностью, в зависимости от условий местообитания, делает возможным выделить участки, на которых были собраны образцы *E. canadensis* с высоким, средним или низким содержанием одних и тех же элементов. Для содержания таких элементов характерна относительно высокая степень варьирования (C_{max}/C_{min}). Для K, Na, Cl эта величина – 6–9; P, Zn, Cd, Pb – 10–30. Большая часть этих элементов мигрирует в водной среде в форме растворенных соединений и относится к очень подвижным (Cl), подвижным (Na), подвижным и слабоподвижным (K, P, Zn, Cd, Pb) элементам (Войткевич и др., 1990), т. е. различная степень их концентрации в составе элодеи связана в основном с элементным составом воды исследуемых участков литорали, загрязняемых хозяйственно-бытовыми стоками населенных пунктов или туристических объектов.

Таблица 1

Содержание химических элементов в составе *Elodea canadensis* Michx., мкг/г сухой массы

Элемент	Среднее ± стандартное отклонение	CV, %	Min–max (26)	Медиана	ЭК-1*
Li (23)	0,41 ± 0,10	25,7	0,23–3,10	0,41	1,02 ± 0,08
B (26)	11,7 ± 3,0	28,7	5,10–17,0	12,1	26,2 ± 2,8
Na (14)	8160 ± 2100	26,0	1570–13000	5400	5400 ± 580
Mg (26)	1760 ± 450	25,5	950–2500	1800	2400 ± 230
Al (11)	42,3 ± 13,6	32,2	4,60–290	64,0	440 ± 50
Si (26)	105 ± 30	28,7	60–160	100	110 ± 30
P (15)	2500 ± 800	31,4	530–10500	2300	2100 ± 210
S (23)	1800 ± 560	31,3	780–4300	4300	3100 ± 270
Cl (15)	2060 ± 640	31,1	370–3300	1350	1400 ± 440
K (18)	23100 ± 7600	32,7	10400–64000	27500	27200 ± 3100
Ca (26)	12700 ± 2500	19,8	7600–18600	12100	22700 ± 2400
V (14)	1,16 ± 0,37	31,8	0,13–2,70	0,88	2,45 ± 0,19
Cr (17)	0,89 ± 0,29	32,2	0,21–1,84	0,80	3,22 ± 0,21
Mn (9)	260 ± 70	27,1	40–2000	260	400 ± 40
Fe (11)	190 ± 55	28,9	110–7700	460	2100 ± 140
Co (17)	0,93 ± 0,30	32,2	0,40–4,00	1,22	1,18 ± 0,11
Ni (15)	3,13 ± 0,73	23,2	0,64–4,50	2,35	2,87 ± 0,20
Cu (21)	3,46 ± 0,87	25,2	0,92–4,50	3,20	8,00 ± 0,44
Zn (17)	28,2 ± 9,2	32,5	7,90–92,0	30,0	12,7 ± 1,00
Ga (16)	0,041 ± 0,013	31,1	0,023–0,15	0,057	0,18 ± 0,02
Ge (14)	0,012 ± 0,004	31,2	0,002–0,043	0,012	0,024 ± 0,003
As (13)	0,18 ± 0,06	31,9	0,11–4,50	0,34	0,65 ± 0,07
Se (17)	0,071 ± 0,023	32,9	0,040–0,13	0,13	0,19 ± 0,03
Br (16)	12,6 ± 3,8	30,4	7,2–38,0	17,7	21,5 ± 2,6
Rb (17)	1,11 ± 0,36	32,8	0,48–3,70	1,27	2,02 ± 0,14
Sr (26)	97,1 ± 22,5	23,1	50–130	97,5	130 ± 10
Y (12)	0,078 ± 0,023	29,8	0,010–0,47	0,13	0,83 ± 0,07

Продолжение табл. 1

Элемент	Среднее \pm стандартное отклонение	CV, %	Min–max (26)	Медиана	ЭК-1*
Zr (20)	0,032 \pm 0,010	31,3	0,006–0,080	0,030	0,42 \pm 0,11
Nb (12)	0,0063 \pm 0,0021	32,7	0,001–0,046	0,0090	0,069 \pm 0,007
Mo (22)	0,77 \pm 0,22	28,1	0,31–2,00	0,83	0,89 \pm 0,008
Cd (19)	0,060 \pm 0,019	30,9	0,012–0,17	0,062	0,073 \pm 0,009
Sn (17)	0,0088 \pm 0,0028	32,1	0,0018–0,030	0,0080	0,028 \pm 0,005
Sb (17)	0,014 \pm 0,005	30,5	0,0025–0,24	0,011	0,072 \pm 0,022
I (23)	2,39 \pm 0,78	32,5	1,13–6,30	2,50	2,62 \pm 0,48
Ba (18)	38,9 \pm 12,5	32,2	22,0–115	47,5	59,0 \pm 4,6
Hf (16)	0,0020 \pm 0,0006	29,9	0,0004–0,0060	0,0018	0,0080 \pm 0,0026
Ta (15)	0,0008 \pm 0,0002	30,0	0,0002–0,0035	0,0007	0,0015 \pm 0,0004
W (10)	0,020 \pm 0,006	31,3	0,009–14,2	0,050	0,12 \pm 0,02
Hg (14)	0,023 \pm 0,007	31,5	0,005–0,090	0,019	0,029 \pm 0,011
Pb (11)	0,35 \pm 0,10	29,5	0,09–3,10	0,26	1,12 \pm 0,24
Bi (13)	0,0014 \pm 0,0004	32,1	0,0005–0,022	0,0023	0,015 \pm 0,003
Th (13)	0,023 \pm 0,006	25,0	0,0013–0,14	0,025	0,20 \pm 0,02
U (15)	0,44 \pm 0,14	31,7	0,22–4,10	0,60	1,05 \pm 0,09

Примеч.: в первой колонке в скобках – количество проб; * – стандартный образец состава элодеи канадской – ЭК-1 (образцы элодеи канадской отобраны в 1999, 2001, 2002 гг. в южной части залива Мухур) (ГСО 8921-2007. URL: <http://www.igc.irk.ru/ru/item/2433-ek-1-gso-8921-2007-co-koomet-0065-2008-ru>).

Из выборочной совокупности полученных данных по содержанию в составе элодеи Na, Cl, K выделено по 2 ряда однородных значений: 1) относительно низкие (преобладают пробы элодеи со станций, граничащих с территориями туристических объектов пролива Малого моря и о. Ольхон), 2) более высокие содержания (величина средних и медианных значений примерно в 2–2,6 раз больше).

Таблица 2

Содержание редкоземельных элементов в составе *Elodea canadensis* Michx., мкг/г сухой массы

Элемент	Среднее \pm стандартное отклонение	CV, %	Min–max (26)	Медиана	ЭК-1*
La (13)	0,16 \pm 0,05	32,9	0,32–0,73	0,21	1,30
Ce (12)	0,30 \pm 0,10	32,1	0,026–5,00	0,47	2,27 \pm 0,20
Pr (13)	0,029 \pm 0,009	32,8	0,0025–0,51	0,47	0,27 \pm 0,02
Nd (12)	0,10 \pm 0,03	32,4	0,0070–1,58	0,15	1,02 \pm 0,08
Sm (12)	0,018 \pm 0,006	31,7	0,0030–0,18	0,026	0,19 \pm 0,02
Eu (19)	0,0064 \pm 0,0019	30,5	0,0032–0,28	0,0075	0,028 \pm 0,003
Gd (12)	0,019 \pm 0,006	30,5	0,0019–0,24	0,030	0,20 \pm 0,01
Tb (12)	0,0023 \pm 0,0007	28,7	0,0020–0,019	0,0032	0,026 \pm 0,002
Dy (12)	0,012 \pm 0,004	31,5	0,0011–0,073	0,018	0,14 \pm 0,012
Ho (12)	0,0024 \pm 0,0008	31,3	0,0004–0,014	0,0035	0,027 \pm 0,002
Er (12)	0,0063 \pm 0,0019	30,2	0,001–0,039	0,0090	0,078 \pm 0,005
Tm (11)	0,0022 \pm 0,0006	26,6	0,0001–0,0054	0,0015	0,011 \pm 0,001
Yb (12)	0,011 \pm 0,003	28,5	0,0010–0,036	0,0080	0,064 \pm 0,005
Lu (16)	0,0012 \pm 0,0004	32,0	0,0001–0,0057	0,0015	0,0099 \pm 0,0009

Примеч.: в первой колонке в скобках – количество проб.

Совокупность данных содержания фосфора в пробах элодеи представлена тремя однородными рядами: 1) низкими значениями (элодея со станций заливов Шида и Мухур), 2) средними (пробы со станций, граничащих и с населенными пунктами, и с туристическими объектами), 3) высокими (в основном станции, сопряженные с населенными пунктами). Максимальная концентрация этих элементов характерна для проб элодеи, собранных на участках вблизи пос. Листвянки, Нижнеангарска, с. Гремячинска, в губе Фролихе, в устье р. Максимихи (пос. Максимиха) (рис. 2).

В результате кластерного анализа методом *k*-средних по четырем переменным (содержанию в пробах элодеи Na (Var1), Cl (Var2), K (Var3), P (Var4)) станции отбора проб элодеи объединили в пять групп. На наличие существенных различий между средними значениями переменных для пяти выделенных групп указывают низкий уровень внутригрупповой (Within SS), более высокий межгрупповой (Between SS) дисперсий признаков, высокие значения *F*-критерия (*F*) и уровень значимости (signif. *p*) < 1 % (табл. 3).

Таблица 3

Результаты дисперсионного анализа
(количество случаев: 26, количество переменных: 4, количество кластеров: 5)

Variable	Between SS	df	Within SS	df	F	signif. p
Var1	18.29666	4	6.703341	21	14.32979	0.000009
Var2	20.57751	4	4.422491	21	24.42784	0.000000
Var3	19.59743	4	5.402565	21	19.04402	0.000001
Var4	20.02806	4	4.971943	21	21.14813	0.000000

В первую группу вошли четыре станции: залив Шида, глубина отбора 0,8 м, пос. Нижнеангарск 1,4 и 1,8 м, дельта р. В. Ангары. Суммарное содержание Na, Cl, K, P – 50900 мкг/г сухой массы. Элодея этих участков отличается относительно высоким содержанием Cl и K. Во второй группе (пос. Листвянка, зал. Загли, глубина отбора – 2 и 2,2 м, оз. Ханхой, устье р. Бугульдейки, р. Б. Половинная, р. Анга) станции, на которых собрана элодея с повышенным содержанием Na, а суммарное содержание Na, Cl, K, P – 38250 мкг/г сухой массы. Третья группа представлена двумя станциями, с. Гремячинск и устье р. Максимихи. Для элодеи этой группы характерно наиболее высокое содержание Na, K, P и Cl. Суммарное содержание указанных элементов в составе элодеи этих станций наибольшее – 78400 мкг/г сухой массы. Элодея четвертой группы станций (губа Фролиха, пос. Нижнеангарск, глубина отбора 2,1, 2,4 м) отличается от элодеи третьей группы меньшим содержанием фосфора. Суммарное содержание Na, Cl, K, P – 59700 мкг/г. Элодея пятой группы (бух. Куркутская, зал. Мухур, глубина отбора 0,8, 0,6 м, урез, залив Шида, 1,5, 1,1, 0,9 м) – с самым низким содержанием указанных элементов. Их суммарное содержание в сухой массе элодеи – 22100 мкг/г.

Минимальное содержание Zn, Cd, Pb характерно для элодеи из оз. Ханхой, зал. Загли (глубина 2,2 м) и зал. Мухур (глубина 0,8 м). Наибольшая аккумуляция Zn и Pb установлена в пробах, собранных на участках литорали, граничащих с Листвянкой, Бугульдейкой, Нижнеангарском (глубина 1,4 м), Максимихой, Гремячинском. Самое высокое содержание Cd отличает элодею из р. В. Ангары, участков литорали вблизи Нижнеангарска (глубина, 2,1, 2,4 м) и Гремячинска. В преобладающей части проб значения содержания Zn и Cd образуют однородные ряды и характеризуются средними значениями (табл. 1).

Средняя концентрация Pb ($0,15 \pm 0,05$ мкг/г сухой массы) установлена в составе элодеи, собранной преимущественно вблизи территорий туристических объектов Малого моря и о. Ольхон. В пробах элодеи, собранных на участках литорали, сопряженных с населенными пунктами, Pb – примерно в два раза больше (рис. 2).

Таким образом, *E. canadensis*, растущая на участках литорали, в притоках и устьях рек, сопряженных с территориями населенных пунктов (особенно п. Нижнеангарск, с. Гремячинск, Максимиха, п. Листвянка), более интенсивно, чем элодея участков, сопряженных с территориями туристических объектов, поглощает и аккумулирует Na, Cl, K, P, Zn, Cd, Pb. Повышенный уровень концентрации Na, Cl, K, P характерен также для элодеи, собранной в губе Фролиха.

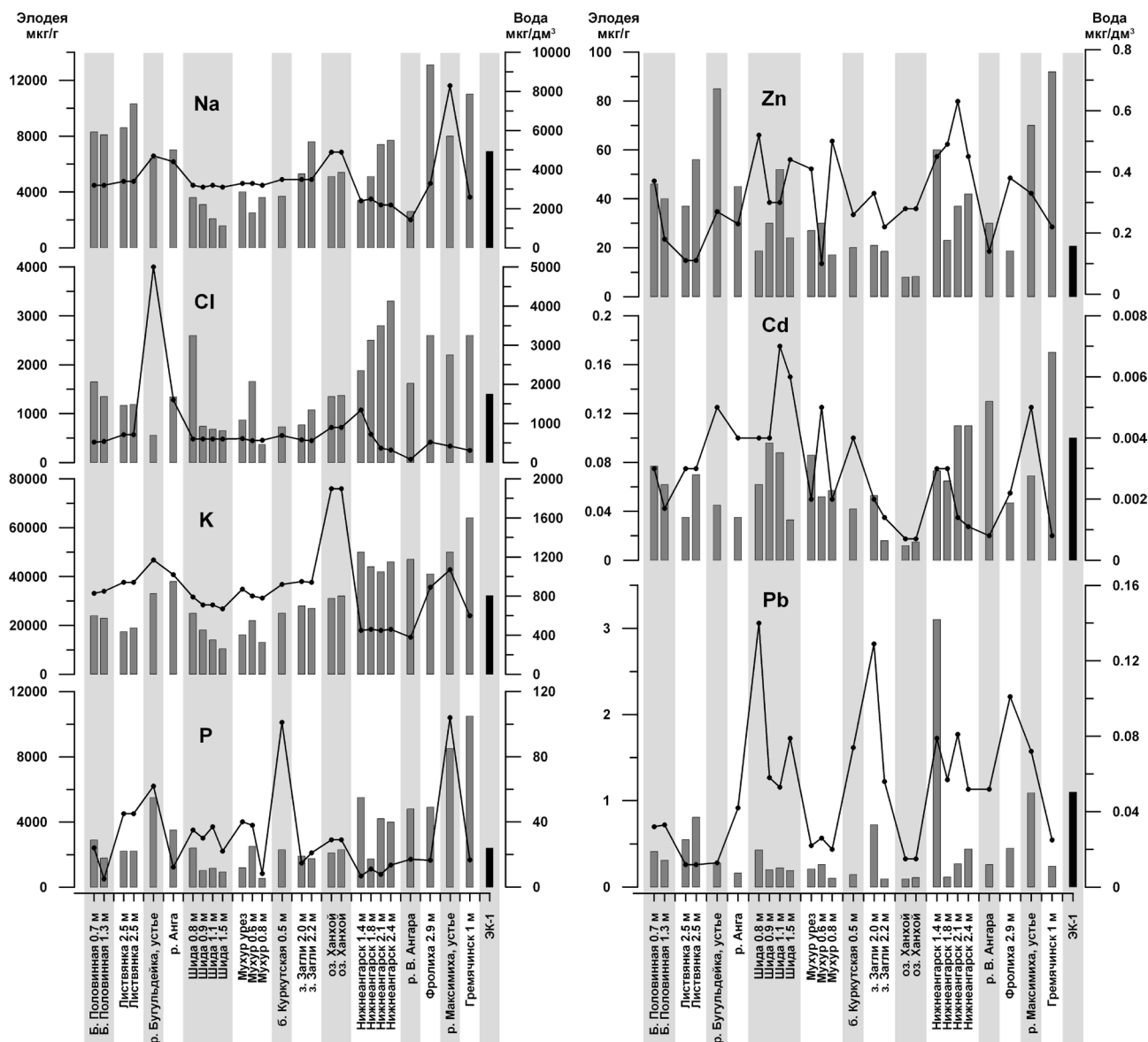


Рис. 2. Содержание Na, Cl, K, P; Zn, Cd, Pb в пробах *Elodea canadensis* Michx. (мкг/г сухой массы) в воде (мкг/дм³) и стандартном образце ЭК-1.

Заключение. В составе *Elodea canadensis* Michx. – $K > Ca > Na > P > Mg \geq S \geq Cl$; из микроэлементов преобладают $Fe, Mn > Si, Sr > Al, Ba, Zn > Br, V$.

Elodea canadensis, растущая на участках литорали, в притоках и устьях рек, сопряженных с территориями населенных пунктов (п. Нижнеангарск, с. Гремячинск, Максимиха, п. Листвянка), более интенсивно, чем элодея участков, сопряженных с территориями туристических объектов, поглощает и аккумулирует Na, Cl, K, P, Zn, Cd, Pb.

Из всего ряда проб, собранных на участках литорали вблизи туристических объектов, самым высоким содержанием Na, Cl, K, P выделяется элодея из губы Фролиха.

Сильная вариация значений содержания Na, Cl, K, P, Zn, Cd, Pb в составе *E. canadensis* в большой степени связана с различным уровнем притока этих элементов с поверхностными и грунтовыми водами с территорий населенных пунктов и рекреационных центров. Очевидно, сток в прибрежную зону наиболее загрязненных хозяйственно-бытовых вод, с повышенным уровнем содержания указанных элементов характерен для крупных поселков и туристических объектов с очень интенсивной антропогенной нагрузкой.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проекты 0345-2019-0010, 0279-2021-0008).

Авторы выражают благодарность экипажу НИС «Академик В. А. Коптюг» и водолазам ЛИИ СО РАН за помощь в проведении экспедиционных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- Бочаров П. П., Печинкин А. В.** Теория вероятностей. Математическая статистика. – М.: Гардарики, 1998. – 328 с.
- Верболов В. И.** Течения и водообмен в Байкале // Водные ресурсы, 1996. – Т. 23, № 4. – С. 413–423.
- Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2017 году». Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. – Иркутск: АНО «КЦ Эксперт», 2018. – 340 с.
- ГСО 8921-2007. URL: <http://www.igc.irk.ru/ru/item/2433-ek-1-gso-8921-2007-co-koomet-0065-2008-ru>
- Войткевич Г. В., Кокин А. В., Мирошников А. Е., Прохоров В. Г.** Справочник по геохимии. – М.: Недра, 1990. – 480 с.
- Дайнеко Н. М., Тимофеев С. Ф.** Оценка состояния прибрежно-водной растительности Гомельского района // Известия Гомельского гос. ун-та, 2013. – №5 (80). – С. 63–70.
- Кожова О. М., Паутова В. Н., Тимофеева С. С.** Элодея канадская в оз. Байкал // Гидробиол. журн., 1985. – Т. 20, № 1. – С. 82–84.
- Кокин К. А.** Экология высших водных растений. – М.: Изд-во МГУ. 1982. – 158 с.
- Кравцова Л. С., Ижболдина Л. А., Механикова И. В., Помазкина Г. В., Белых О. И.** Натурализация *Elodea canadensis* Mich. в озере Байкал // Российский Журнал Биологических Инвазий, 2010. – № 2. – С. 2–16.
- Лычагина Н. Ю., Касимов Н. С., Лычагин М. Ю.** Биогеохимия макрофитов дельты Волги. – М.: Геогр. ф-т МГУ, 1998. – 84 с.
- Манасытов Р. М., Покровский О. С., Широкова Л. С., Кирпотин С. Н., Зиннер Н. С.** Элементный состав макрофитов термокарстовых озер Западной Сибири // Известия Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов, 2018. – Т. 329, № 8. – С. 50–65.
- Национальное информационное агентство Экология. URL: <https://nia.eco/2020/05/12/2900/?ysclid=lgbrrrvb> ia813622237 (дата обращения: 11 апреля 2023 г.).
- Тевелева Е. А.** Выделение однородных групп из единой выборочной совокупности геохимических данных // Мониторинг, наука и технологии, 2021. – № 2 (48). – С. 65–69.
- Чебыкин Е. П., Сороковикова Л. М., Томберг И. В., Воднева Е. Н., Рассказов С. В., Ходжер Т. В., Грачёв М. А.** Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития, 2012. – Т. 20, № 5. – С. 613–631.
- Barnett B. E., Ashroft C. R.** Heavy metals in *Fucus vesiculosus* in the humber estuary // Environ. Pollut., 1985. – Vol. 9, No. 3. – P. 193–213.
- Suturin A. N., Paradina L. F., Epov V. N., Semenov A. R., Lozhkin V. I., Petrov L. L.** Preparation and assessment of a candidate reference sample of lake Baikal deep water // Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy, 2003. – Vol. 58. – P. 277–288.