ХИМИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ. 2017. №1. С. 107–111.
DOI: 10.14258/jcprm.2017011294

УДК 582.539:581.192

СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФИТОМАССЕ НЕКОТОРЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА HYDROCHARITACEAE

© *А.Н. Ефремов[1*], Д.Е. Иминова[2], Е.А. Алехина[1], С.Т. Дюсембаев[2]*

[1]Омский государственный педагогический университет, наб. Тухачевского, 14, Омск, 644099 (Россия), e-mail: stratiotes@yandex.ru
[2]Научный центр радиоэкологических исследований государственного университета им. Шакарима, ул. Физкультурная, 4А, Семей, 071412 (Республика Казахстан)

С использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с целью уточнения элементных профилей отдельных видов выполнено исследование содержания 14 химических элементов (P, Na, Mg, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Se, Pb, Al) у четырех видов семейства Hydrocharitaceae (*Elodea canadensis, Stratiotes aloides, Hydrocharis morsus-ranae*, *Hydrilla verticillata*), произрастающих на территории Западной Сибири.

Несмотря на сходство полученных рядов биологического поглощения элементов выявлен ряд специфических особенностей. Так, *H. morsus-ranae* отличается наиболее низкими концентрациями Fe (135±1) и Mn (24,4±0,4), *E. canadensis* – Al (0,93±0,01), *H. verticillata* − Ca (2890±40). Для *E. canadensis* по сравнению с другими изученными видами характерны более высокие концентрации Na (28400±600), K (13740±90), Ca (4250±40), Fe (750±10) и Mn (185±2), для *S. aloides* − Mg (30850±60), Ca (4490±40) и P (2910±40), для *H. verticillata* −Al (3,20±0,02).

Результаты кластерного анализа по содержанию химических элементов свидетельствуют о значительной обособленности *S. aloides* от остальной части семейства.

Ключевые слова: Hydrocharitaceae, *Stratiotes aloides*, *Elodea canadensis, Hydrocharis morsus-ranae, Hydrilla verticillata,* элементный состав.

Работа выполнена при содействии гранта РФФИ р_урал_а № 15-44-00014.

Введение

Одним из направлений расширения сырьевой базы растительных ресурсов является изучение химического элементного состава, актуальным считается исследование видовой специфичности. Виды растений семейства водокрасовые (Hydrocharitaceae) еще слабо изучены в этом отношении. На территории Западной Сибири семейство Hydrocharitaceae представлено пятью видами [1]. Многие представители семейства являются эдификаторами в пресноводных фитоценозах. Высокой продуктивностью отличаются сообщества с участием элодеи канадской *Elodea canadensis* Michx., телореза алоэвидного *Stratiotes aloides* L. и водокраса обыкновенного *Hydrocharis morsus-ranae* L.; гидрилла мутовчатая *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle – редкий в регионе вид [2].

Установлено, что элементный состав растений определяется наличием элементов в субстрате и видоспецифичными физиологическими процессами, которые и определяют элементный профиль растений [3, 4]. Сравнительные исследования элементных профилей отдельных видов могут быть использованы для уточнения их таксономического положения [5]. В связи с этим исследование элементного состава и особенностей поглощений у растений семейства Hydrocharitaceae представляет научный интерес.

Стоит отметить, что для отдельных представителей семейства Hydrocharitaceae исследование элементного состава уже ранее выполнялось (табл. 1).

Ефремов Андрей Николаевич – научный сотрудник, e-mail: stratiotes@yandex.ru
Иминова Дильраба Екатуновна – менеджер по качеству, e-mail: d.iminova@mail.ru
Алехина Елена Анатольевна – доцент, e-mail: stratiotes@yandex.ru
Дюсембаев Сергазы Турлыбекович – руководитель испытательной региональной лаборатории, e-mail: d.iminova@mail.ru

[*] Автор, с которым следует вести переписку.

Таблица 1. Содержание некоторых химических элементов в фитомассе растений семейства Hydrocharitaceae

Вид	Элементный состав
Elodea canadensis	Южная Чехия: Na – 70, Mg – 0,67−35, Ca – 50, K – 120, Mn – 0,36, Cr – 0,61, P – 7400, N – 1800 мг/кг абсолютно-сухого сырья [6].
Hydrocharis morsus-ranae	Россия, Горьковское водохранилище: K – 2,5, Na – 1,3 % абсолютно-сухого сырья [3]; Чехия: N – 2,94, P – 0,55, K – 3,96, Na – 0,92, Ca – 0,57, Mg – 1,93, Si – 1,81, S – 0,06, Cl – 4,52 % абсолютно-сухого сырья [6].
Hydrilla verticillata	Индия, Гуджарат: Cd – 40, Co – 6,45, Cu – 17,65, Ni – 14,26, Pb – 1,37, Zn – 160,17 мг/кг абсолютно-сухого сырья [7]; США, Флорида: Ca – 10,8 %, P – 0,32, K – 2,7, Mg – 0,59, Na – 1,17, Fe – 1438, Cu – 36, Zn – 50, Mn – 158, Cr – 9,5 % абсолютно-сухого сырья [8].
Stratiotes aloides	Венгрия, оз. Балатон: N – 1,13–1,83, P – 0,07–0,12, K – 4,36–5,42, Na – 0,55–0,77, Ca – 5,06–5,47, Hg – 1,91–2,0, Fe – 0,319–0,587, Mn– 0,243–0,374 % абсолютно-сухого вещества [6]; Польша, оз. Варниак: N – 2,07, P – 0,39, K – 6,38, Ca – 0,57 % абсолютно-сухого вещества [3]; Украина, Киевское водохранилище: P – 0,08, Ca – 0,87, Hg – 0,70 % абсолютно-сухого вещества [3]; Беларусь: P – 0,07–0,12, K – 1,02–2,52, Ca – 1,3–3,2, Hg – 0,8–1,6, Fe – 0,4–0,8, Si – 0,6–0,9, Al – 0,5–1,9 % абсолютно-сухого вещества [3]; Россия, Угличское водохранилище: N – 2,8, P – 0,25, Ca – 1,57, Hg – 0,69 % абсолютно-сухого вещества [3]; Россия, Омская область: Pb − 0,6±0,4, Cd − 0,03±0,01, Zn − 130±50, Ni − 2,7±0,7, Cu − 4,7±0,9, Mn − 1400±500 мг/кг воздушно-сухого вещества, среднегодовое содержание. Способность к накоплению уменьшается в следующем ряду Mn > Zn > Cu > Ni > Pb > Cd [9].

Экспериментальная часть

Материал для исследования был собран в 2014 г. в пойменных водоемах бассейна Иртыша в пределах лесостепной подзоны (табл. 2). Отбор проб растений проводили в фазу цветения – начала плодоношения (вегетации после цветения), в июле–августе. Биотопы, в которых выполнен отбор проб, отличаются сходным гидрологическим и гидрохимическим режимом, что минимизирует влияние разности гидрохимических особенностей субстрата на накопление отдельных элементов растениями.

Исследования выполнены на базе лаборатории органической химии Омского государственного педагогического университета (Россия) и испытательной региональной лаборатории инженерного профиля Научного центра радиоэкологических исследований государственного университета им. Шакарима г. Семей (Казахстан). Отобранные рандомизированным путем средние пробы фитомассы после первичной пробоподготовки хранили в морозильной камере при температуре минус 18–20 °С, перед проведением испытаний пробы высушивали до воздушно-сухого состояния.

Физико-химический анализ содержания элементов выполнен с использованием ГОСТ 31671-2012 [10], НСАМ №512-МС [11] и с учетом рекомендаций, изложенных в работе В.К. Карандашева с соавторами [9]. В качестве стандартного использовался раствор производства фирмы «Varian» IV-ICPMS-71A с концентрацией 10 мкг/мл (48 элементов).

При подготовке проб для анализа образцы высушивали в течение 6−8 ч при температуре 60 °С в сушильном шкафу «SNOL 67/350» (Умега, Литва). Полученную пробу измельчали, навеску массой 0,1 г помещали в фарфоровые тигли с крышками и озоляли в муфельной печи «SNOL 7,2/1100» (Умега, Литва) в течение 6−7 ч при 400−450 °С. Для приготовления аналитических образцов применяли метод микроволнового разложения с помощью системы «Speedwave» (Berghof, Германия). Система микроволнового разложения «Speedwave» позволяет сократить время подготовки пробы до 15–45 мин за счет высоких температур и давления реакционной смеси, получаемых в поле микроволнового излучения. При микроволновом разложении навеску пробы помещали во фторопластовый вкладыш (реакционная емкость) и добавляли 5 мл азотной кислоты. Автоклав герметизировали и помещали в микроволновую печь и разлагали пробу, используя программу разложения (15 мин при 200 °С), рекомендованную производителем. Полученный раствор разбавляли в 10 раз 1% раствором азотной кислоты и измеряли на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ISP-MS 820 (Varian, Австралия). Было исследовано содержание 14 химических элементов (P, Na, Mg, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Se, Pb, Al), содержание 26 элементов (Be, B, S, V, Ni, As, Rb, Sr, Ag, Cd, Cs, Th, U, Ce, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Sm, Tm, Yb) в исследуемом материале находилось ниже предела обнаружения (менее 1×10^{-9}мг/кг).

Таблица 2. Места сбора объектов исследования

Объект исследования	Местонахождение	Местообитание
Stratiotes aloides (побеги), *Hydrocharis morsus-ranae* (побеги)	55°13′ 35″ с. ш., 73°00′ 23″ в. д., Омская область, Любинский район, окрестности с. Любино-Малороссы, долина Иртыша, протока	Глубина 0,0–1,8, грунт черный грубодетритный ил, фитоценоз *Stratiotes aloides aquiherbosa*
Hydrilla verticillata (побеги), *Elodea canadensis* (побеги)	55°13′ 14″ с. ш., 72°59′ 24″ в. д, Омская область, Любинский район, окрестности с. Любино-Малороссы, долина Иртыша, особо охраняемая природная территория «Пойма Любинская», протока	Глубина 0,1–2,5, грунт глинистый с грубо детритным наилком, фитоценозы *Elodea canadensis purum* и *Elodea canadensis* + *Hydrilla verticillata*

Статистическая обработка результатов выполнена средствами пакета Statistica 6.1 (описательная статистика, проверка на нормальность распределения) и PAleontological STatistics 3.08 (кластерный анализ методом парного сравнения) [10].

Обсуждение результатов

Результаты определения содержания химических элементов в фитомассе *E. canadensis, S. aloides, H. morsus-ranae* и *H. verticillata* приведены в таблице 3.

Установлено, что *H. morsus-ranae* отличается наиболее низкими концентрациями Fe (135±1 мг/кг воздушно-сухого вещества) и Mn (24,4±0,4), *H. verticillata* − Ca (2890±40), *E. canadensis* – Al (0,93±0,01). При этом по сравнению с другими изученными видами для *E. canadensis* характерны более высокие концентрации Na (28400±600), K (13740±90), Ca (4250±40), Fe (750±10) и Mn (185±2), для *S. aloides* − Mg (30850±60), Ca (4490±40) и P (2910±40), а *H. verticillata* −Al (3,20±0,02).

Полученные ряды биологического поглощения:

Hydrocharis morsus-ranae Na >K >Ca >Mg **>**P >Fe >**Zn >Mn**>Cu > **Al ≈ Co** > Pb ≈ Cr >Se;

Elodea canadensis Na >K >Ca >Mg **>**P >Fe >**Mn > Zn**>Cu > **Co** > **Al** > Cr ≈ Pb >Se;

Stratiotes aloides **Mg** >**Na**>K >Ca >P >Fe >**Mn ≈ Zn >**Cu > **Al** > **Co** > Cr ≈ Pb >Se;

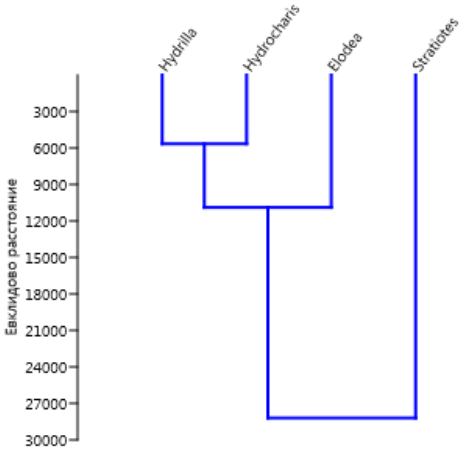
Hydrilla verticillata Na >K >**Mg >Ca>**P >Fe >**Mn >Zn** >Cu > **Al** > **Co** > Cr ≈ Pb >Se;

при общей схожести имеют ряд специфических особенностей. Наблюдается определенное сходство рядов биологического поглощения у исследуемых видов с результатами, полученными в других регионах [3−9].

Исследованные растения семейства Hydrocharitaceae характеризуются относительно высоким содержанием таких макроэлементов, как Na, K, Ca, Mg, P и Fe. Результаты кластерного анализа по содержанию химических элементов свидетельствуют о значительной обособленности от остальной части семейства *S. aloides* (рис.).

Таблица 3. Содержание химических элементов в фитомассе растений семейства Hydrocharitaceae

Элемент	Содержание элементов, мг/кг воздушно-сухого вещества			
	Hydrocharis morsus-ranae (n = 5)	*Elodea canadensis* (n = 5)	*Stratiotes aloides* (n = 5)	*Hydrilla verticillata* (n = 5)
P	1910±40	2440±20	2910±40	1810±20
Na	8710±80	28400±600	13800±200	14200±200
Mg	3380±60	3850±40	30850±60	4440±70
K	7290±90	13740±90	6320±70	7710±80
Ca	3570±60	4250±40	4490±40	2890±40
Cr	0,85±0,02	0,75±0,01	0,78±0,01	0,87±0,02
Mn	24,4±0,4	185±2	47,4±0,5	45,3±0,5
Fe	135±1	750±10	339±3	280±5
Co	1,36±0,02	2,40±0,02	1,68±0,01	2,13±0,02
Cu	18,6±0,2	21,75±0,33	24,3±0,5	27,7±0,3
Zn	69,9±0,9	49,9±0,9	43,4±0,8	37,0±0,5
Se	0,092±0,001	0,087±0,001	0,134±0,002	0,113±0,002
Pb	0,95±0,02	0,52±0,01	0,56±0,01	0,75±0,01
Al	1,61±0,02	0,93±0,01	2,40±0,03	3,20±0,02



Сходство исследуемых представителей Hydrocharitaceae по содержанию химических элементов.

Выводы

У четырех представителей семейства Hydrocharitaceae (*E. canadensis, S. aloides, H. morsus-ranae* и *H. verticillata*) исследовано содержание 14 химических элементов (P, Na, Mg, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Se, Pb, Al).

Несмотря на сходство полученных рядов биологического поглощения элементов выявляется ряд специфических особенностей. *H. morsus-ranae* отличается наиболее низкими концентрациями Fe (135±1) и Mn (24,4±0,4), *E. canadensis* – Al (0,93±0,01), *H. verticillata* − Ca (2890±40). Для *E. canadensis,* по сравнению с другими изученными видами, характерны более высокие концентрации Na (28400±600), K (13740±90), Ca (4250±40), Fe (750±10) и Mn (185±2), для *S. aloides* − Mg (30850±60), Ca (4490±40) и P (2910±40), а для *H. verticillata* −Al (3,20±0,02)

Дальнейшее исследование элементного состава и особенностей поглощения химических элементов растениями семейства Hydrocharitaceae может быть использовано для целей хемосистематики и уточнения порогов толерантности к накоплению отдельных элементов в системе «вода – растение».

Список литературы

1. Гребенюк А.В. Семейство Hydrocharitaceae Juss. // Конспект флоры Азиатской России: сосудистые растения. Новосибирск, 2012. С. 431−432.
2. Свириденко Б.Ф. Флора и растительность водоемов Северного Казахстана. Омск, 2000. 196 с.
3. Ноздрюхина Л.Г., Гринкевич Н.И. Нарушение микроэлементного обмена и пути его коррекции. М., 1980. 280 с.
4. Круглов Д.С. Микроэлементный спектр в хемосистематике рода *Pulmonaria* // Проблемы изучения растительного покрова Сибири: материалы IV Международной научной конференции. Томск, 2010. С. 26–28.
5. Erdtman H.G.H. Chemical principles in chemosystematics // Recen tadvances in phytochemestry / Eds. T.J. Mabry, R.E. Alston, V.C. Reuneckles. New York, 1968. Vol. 1. Pp. 263–268.
6. Дубына Д.В., Стойко С.М., Сытник К.М. и др. Макрофиты – индикаторы изменений природной среды. Киев, 1993. 434 с.
7. Nirmal Kumar J.I., Soni H., Hkumar R.N. Valuation of biomonitoring approach to study lake contamination by accumulation of trace elements in selected aquatic macrophytes: a case study of Kanewal community reserve, Gujarat, India // Applied Ecology and Environmental Research. 2008. Vol. 6(1). Pp. 65–76.
8. Easley J.F., Shirley R.L. Nutrient elements for livestock in aquatic plants // Hyacinth control Journal. 1974. Vol. 12 (82). Pp. 82–85.
9. Ефремов А.Н., Алехина Е.А., Филимонова М.В., Свириденко Б.Ф., Шалыгин С.П., Русак С.Н. Компонентный состав *Stratiotes aloides* (Hydrocharitaceae) водоемах бассейна Среднего Иртыша // Химия растительного сырья. 2012. №4. С. 161–166.
10. ГОСТ 31671-2012 (EN 13805:2002) Продукты пищевые. Определение следовых элементов. Подготовка проб методом минерализации при повышенном давлении. М., 2014. 11 с.
11. НСАМ №512-МС «Определение элементного состава образцов растительного происхождения (травы, листья) атомно-эмиссионным и масс-спектральным методами анализа». М., 2011. 50 с.
12. Карандашев В.К., Туранов А.Н., Орлова Т.А., Лежнев А.Е., Носенко С.В., Золотарева Н.И., Москвина И.Р. Использование метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в элементном анализе объектов окружающей среды // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73, №1. С. 12–22.
13. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4(1). 9 p.

Поступило в редакцию 7 мая 2016 г.

После переработки 2 сентября 2016 г.

Efremov A.N.[1], Eminova D.E.[2], Alekhina E.A.[1], Dyusembaev S.T.[2]* *THE CONTENT OF CHEMICAL ELEMENTS IN BIOMASS OF SOME SPECIES OF THE HYDROCHARITACEAE FAMILY*

[1]*Omsky State Pedagogical University, nab. Tukhachevsky, 14, Omsk, 644099 (Russia), e-mail: stratiotes@yandex.ru*
[2]*Nauchny Centre radioecological State University Studies. Shakarim, ul. Fizkulturnaya, 4A, Semey, 071412 (Republic of Kazakhstan)*

The study of the content of 14 chemical elements (P, Na, Mg, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Cr, Zn, Se, Pb, Al) in five species of the Hydrocharitaceae family growing in the territory of the Western Siberia (*Elodea canadensis, Stratiotes aloides, Hydrocharis morsus-ranae*, *Hydrillaverticillata*) was implemented. Inductively coupled plasma mass spectrometry was used in the study to clarify the elemental profiles of certain species.

Despite the similarity of the obtained series of the biological absorption of elements, a number of specific features are identified. For example, *H. morsus-ranae* has the lowest concentration of Fe (135±1) and Mn (24,4±0,4), *E. canadensis* is characterized by the lowest concentration of Al (0,93±0,01), *H. verticillata* − Ca (2890±40). *E. canadensis* in comparison with other studied species has a higher concentration of Na (28400±600), K (13740±90), Ca (4250±40), Fe (750±10) and Mn (185±2), *S. aloides* is characterized by higher concentration of Mg (30850±60), Ca (4490±40) and P (2910±40), *H. verticillata* −Al (3,20±0,02). The results of the cluster analysis of the chemical element content show the considerable isolation of *S. aloides* from the rest of the family.

Keywords: Hydrocharitaceae, *Stratiotes aloides*, *Elodea canadensis*, *Hydrocharis morsus-ranae*, *Hydrilla verticillata,* elemental composition.

References

1. Grebeniuk A.V. *Konspekt flory Aziatskoi Rossii: sosudistye rasteniia*. [Abstract flora of Asian Russia: vascular plants]. Novosibirsk, 2012, pp. 431−432. (in Russ.).
2. Sviridenko B.F. *Flora i rastitel'nost' vodoemov Severnogo Kazakhstana*. [Flora and vegetation of water bodies in Northern Kazakhstan]. Omsk, 2000, 196 p. (in Russ.).
3. Nozdriukhina L.G., Grinkevich N.I. *Narushenie mikroelementnogo obmena i puti ego korrektsii*. [Violation of microelement exchange and ways of its correction]. Moscow, 1980, 280 p. (in Russ.).
4. Kruglov D.S. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Problemy izucheniia rastitel'nogo pokrova Sibiri»*. [Proceedings of the IV International Conference "Problems of Siberian vegetation"]. Tomsk, 2010, pp. 26–28. (in Russ.).
5. Erdtman H.G.H. *Recen tadvances in phytochemestry,* eds. T.J. Mabry, R.E. Alston, V.C. Reuneckles. New York, 1968, vol. 1, pp. 263–268.
6. Dubyna D.V., Stoiko S.M., Sytnik K.M. i dr. *Makrofity – indikatory izmenenii prirodnoi sredy*. [Macrophytes – indicators of environmental changes]. Kiev, 1993, 434 p. (in Russ.).
7. Nirmal Kumar J.I., Soni H., Hkumar R.N. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2008, vol. 6(1), pp. 65–76.
8. Easley J.F., Shirley R.L. *Hyacinth control Journal*, 1974, vol. 12 (82), pp. 82–85.
9. Efremov A.N., Alekhina E.A., Filimonova M.V., Sviridenko B.F., Shalygin S.P., Rusak S.N. *Khimiia rastitel'nogo syr'ia*, 2012, no. 4, pp. 161–166. (in Russ.).
10. *GOST 31671-2012 (EN 13805:2002) Produkty pishchevye. Opredelenie sledovykh elementov. Podgotovka prob metodom mineralizatsii pri povyshennom davlenii.* [GOST 31671-2012 (EN 13805: 2002) Foodstuffs. Determination of trace elements. Sample preparation method mineralization at elevated pressure]. Moscow, 2014, 11 p. (in Russ.).
11. *NSAM №512-MS «Opredelenie elementnogo sostava obraztsov rastitel'nogo proiskhozhdeniia (travy, list'ia) atomno-emissionnym i mass-spektral'nym metodami analiza».* [NCAY 512-MS "Determining the elemental composition of samples of vegetable origin (grass, leaves) atomic emission and mass spectral analysis methods"]. Moscow, 2011, 50 p. (in Russ.).
12. Karandashev V.K., Turanov A.N., Orlova T.A., Lezhnev A.E., Nosenko S.V., Zolotareva N.I., Moskvina I.R. *Zavodskaia laboratoriia. Diagnostika materialov*, 2007, vol. 73, no. 1, pp. 12–22. (in Russ.).
13. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. *Palaeontologia Electronica*, 2001, vol. 4(1), 9 p.

Received May 7, 2016

Revised September 2, 2016

* Corresponding author.