

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ СЕМЕЙСТВА РЯСКОВЫЕ (Lemnaceae) НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2023 г. Н. В. Барановская^a, *, А. Ю. Барановская^a, **, А. Ф. Судыко^a, ***

^aНациональный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, Томск, 634050 Россия

*e-mail: nata@tpu.ru

**e-mail: kyzmen44@mail.ru

***e-mail: sudykoAF@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.02.2022 г.

После доработки 10.10.2022 г.

Принята к публикации 18.10.2022 г.

Впервые представлены данные по содержанию 28 химических элементов в водных растениях семейства рясковые (Lemnaceae) озер, расположенных на территории 65 населенных пунктов Российской Федерации. Изучены особенности элементного состава и характер пространственного распределения рясковых урбанизированных территорий России, рассчитаны коэффициенты концентрирования исследованных элементов в макрофитах, отобранных в разных регионах, относительно полученных средних оценок. Показано, что элементный состав водных растений семейства рясковые несет информацию о сложившейся эколого-геохимической ситуации исследуемой территории и может служить индикатором состояния окружающей среды.

Ключевые слова: растения семейства рясковые, химический элементный состав, озера урбанизированных территорий России, эколого-геохимические особенности, техногенез

DOI: 10.31857/S0016752523040027, EDN: IVJFSS

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных направлений биогеохимии является геохимическая экология растений, значимость которого особенно возросла в связи с наблюдающимся мощным техногенным преобразованием биосферы (Уфимцева, 2015; Моисеенко, 2017; Ермаков, 2018). Растения являются одним из ключевых звеньев накопления химических элементов в водных экосистемах (Prasad et al., 2018). Произрастая на урбанизированных территориях и подвергаясь в той или иной степени антропогенному воздействию, макрофиты могут выступать индикатором состояния окружающей среды (Farias et al., 2018; Oyedeji et al., 2013).

Водные растения семейства рясковые (Lemnaceae) произрастают на стыке двух сред “вода–атмосфера” и способны накапливать элементы непосредственно из среды обитания, а также, ввиду особенностей строения листца, улавливать пылеаэрозоли из атмосферного воздуха (Teles et al., 2017; Borisjuk et al., 2018). Такое концентрирование элементов данными растениями позволяет использовать их в качестве индикаторов эколого-геохимического состояния окружающей среды.

Первые работы по исследованию элементного состава рясковых как объекта биогеохимических и эколого-геохимических исследований были выполнены еще в 30-х гг. XX столетия сотрудниками Биогеохимической лаборатории (ныне Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, Москва). Полученные результаты демонстрировали значимость информации об элементном составе макрофитов для развития биогеохимии (Бруновский, Кунашева, 1930; Вернадский, Виноградов, 1931).

В настоящий момент растения семейства рясковые активно используются в области биотестирования и экотоксикологии (Mkandawire et al., 2014; Bocuk et al., 2013; Basiglioni et al., 2018; Ceschin et al., 2020; Ekperusi et al., 2020). Внимание большинства исследователей занимает прикладная специализация аккумулятивных способностей водных растений, использование их в качестве фиторемедиаторов сточных вод (Varga et al., 2013; Rofkar et al., 2014; Sasmaz et al., 2016, 2018). При этом работы по изучению индикаторных свойств элементного состава рясковых немногочисленны и требуют особого внимания, исходя из высокой перспективности данных макрофитов в области биогеохимической индикации и мониторинга.

Целью данной работы является определение особенностей элементного состава растений семейства рясковые (*Lemnaceae*), произрастающих в водоемах на урбанизированных территориях Российской Федерации с выявлением элементов-индикаторов природно-техногенных обстановок.

МЕТОДИКА

В качестве объекта исследования выбраны водные растения семейства рясковые (*Lemnaceae*), имеющие обширный ареал распространения на территории России. Наиболее распространенными видами на исследуемой территории являются: *Lemna turionifera* Landolt, *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid, *Lemna minor* L. и *Lemna trisulca* L. (Капитонова, 2019).

Вышеупомянутые виды растений семейства рясковые произрастают преимущественно совместно, образуя общие фитоценозы, с большим или меньшим участием каждого вида в каждом конкретном сообществе растительного континуума, что соответствует одной из выделенных Landolt и Kandeler (1987) ассоциаций видов семейства *Lemnaceae*. Частое совместное произрастание *Lemna minor*, *L. turionifera*, *Spirodela polyrhiza* и *L. trisulca* были отмечены и другими авторами (Wiegand, 1978; Рябова и др., 2009; Chytrý, 2011).

Вопрос концентрирования химических элементов различными видами растений семейства рясковые в настоящий момент остается открытым и требует детальной проработки. В данной работе в качестве объекта исследования использована смесь представителей рясковых, которые произрастают на контакте двух сред “вода–атмосфера”, а именно *Lemna minor*, *L. turionifera* и *Spirodela polyrhiza*, без разделения по видам, учитывая их совместное произрастание, а также концентрирование большинства химических элементов в одинаковых пределах (Вернадский, Виноградов, 1931; Landolt, Kandeler, 1987; Teles et al., 2017). Обитающая в основном в толще воды *Lemna trisulca* (на поверхность поднимается только в период цветения) исключалась в обязательном порядке из анализируемых проб.

Полевые исследования проводились с 2013 по 2017 гг. во время вегетационного периода макрофитов, с июня по август. Отобраны пробы растений семейства рясковых, на территории 65 населенных пунктов Российской Федерации (рис. 1). В каждом населенном пункте осуществлялся отбор проб не менее чем из 2–4 водоемов.

Основная выборка населенных пунктов представляет урбанизированные территории, в состав которых входят города, поселки городского типа или близко расположенные к городам, районные центры с населением более 2000 чел. Исключение составляют три населенных пункта (д. Вехручей

(Респ. Карелия), д. Якшино (Тульская обл.), п. Юган (Респ. Татарстан)), не подходящие под выше обозначенные характеристики.

Пробы представителей семейства рясковые отбирали из природных преимущественно бессточных водоемов, относящихся к эвтрофным, что характерно для мест обитания этих растений (Landolt, Kandeler, 1987; Рябова и др., 2009), с площадью зеркала преимущественно до 500 м².

Пробоподготовка заключалась в проведении видовой идентификации растений, удалении минеральных и биологических включений, видимых невооруженным глазом. Далее пробы растений высушивались при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния и гомогенизировались (истирались в агатовой ступке). Далее пробы развешивались по 100 мг и упаковывались в пакетики из алюминиевой фольги. Промывание проб до высушивания авторами не выполнялось.

Основным аналитическим методом в данной работе являлся инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА), который позволил определить в образцах валовое содержание 28 химических элементов, наиболее качественно определяемых данным методом (ошибка анализа при внутреннем и внешнем контроле составляет 10%). ИНАА проводился на исследовательском реакторе ИРТ-Т в ядерно-геохимической лаборатории МИНОЦ “Урановая геология” Томского политехнического университета (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.518623 от 10.10.2011 г., аналитики – с.н.с. А.Ф. Судыко и Л.Ф. Богутская). Плотность потока тепловых нейтронов в канале облучения составляла 2×10^{13} нейтр./(см² с). Продолжительность облучения проб 20 ч. Измерение производилось на многоканальном анализаторе импульсов АМА 02Ф с полупроводниковым Ge–Li детектором ДГДК-63А. Метод ИНАА, реализуемый в лаборатории, используется также для аттестации стандартных образцов состава (СОС) как отечественных, так и зарубежных (МАГАТЭ, Германия, Япония, Индия и др.). В этом методе анализа сигнал снимается с ядер химических элементов, поэтому физическое состояние пробы не влияет на результат. При анализе образцов рясковых использовались стандарты: ЭК-1 (элодея канадская), БИЛ-1 (байкальский ил) и стандарт ЛБ-1 (лист березы).

В качестве средних значений элементов в рясковых на урбанизированных территориях России определены их средние геометрические значения, по причине статистически значимого отличия распределения всех анализируемых элементов в макрофитах на исследуемой территории от нормального.

Для каждого исследованного населенного пункта определены коэффициенты концентрирования химических элементов в рясковых, кото-



Рис. 1. Точки обора проб растений семейства рясковые на территории Российской Федерации: 1 – г. Калининград, 2 – Прионежский р-н (Респ. Карелия), 3 – г. Санкт-Петербург, 4 – д. Шумилкино (Псковская обл.), 5 – г. Ярославль, 6 – г. Гусь-Хрустальный, 7–10 – п. Косино, г. Солнечногорск, с. Киясово, г. Звенигород (Московская обл.), 11 – г. Мосальск (Калужская обл.), 12 – г. Смоленск, 13 – г. Брянск, 14 – г. Орел, 15 – Дубенский р-н (Тульская обл.), 16 – п. Подгоренский (Воронежская обл.), 17 – г. Тамбов, 18 – г. Волгоград, 19 – г. Кореновск (Краснодарский край), 20 – п. Энем (Респ. Адыгея), 21 – п. Новая Теберда (Респ. Карачаево-Черкесия), 22 – с. Нижняя Саниба (Респ. Северная Осетия-Алания), 23 – г. Ставрополь, 24 – п. Выездное (Нижегородская обл.), 25 – п. Лесной (Пензенская обл.), 26 – г. Саратов, 27 – п. Знаменский (Респ. Марий Эл), 28 – Нурлатский р-н (Респ. Татарстан), 29 – г. Чебоксары, 30 – г. Инза (Ульяновская обл.), 31 – г. Самара, 32 – с. Нижняя Вязовка (Оренбургская обл.), 33, 34 – д. Просница, г. Киров (Кировская обл.), 35 – с. Березовка (Пермский край), 36 – г. Магнитогорск, 37 – г. Курган, 38 – г. Екатеринбург, 39, 40 – г. Когалым, г. Нефтеюганск (ХМАО-Югра), 41 – г. Называевск (Омская обл.), 42–46 – г. Стрежевой, г. Асино, с. Парабель, с. Новый Васюган, с. Тимирязево (Томская обл.), 47 – г. Новосибирск, 48 – г. Камень-на-Оби, 49 – п. Колывань (Новосибирская обл.), 50 – г. Кемерово, 51 – с. Усть-Серта (Кемеровская обл.), 52 – г. Юрга, 53 – г. Барнаул, 54 – г. Бийск, 55 – с. Тюменцево (Алтайский край), 56 – с. Туим (Респ. Хакасия), 57 – г. Красноярск, 58 – г. Иркутск, 59 – г. Тайшет (Иркутская обл.), 60 – г. Улан-Удэ, 61 – с. Газимурский Завод (Забайкальский край), 62 – г. Якутск, 63 – г. Хабаровск, 64 – г. Партизанск (Приморский край), 65 – г. Петропавловск-Камчатский.

рые рассчитывались путем нормирования средней геометрической концентрации элемента в растениях из отдельных регионов к среднему геометрическому данного элемента, вычисленному по всему массиву данных по рясковым.

Для каждого химического элемента определен коэффициент вариации (V) в растениях (соотношение среднеквадратичного отклонения (σ) и среднего содержания элемента (C) в макрофитах):

$$V = \sigma / C \times 100\%.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание всех исследованных элементов в растениях семейства рясковые отличается неоднородностью распределения на исследуемой территории, что может говорить о высокой степени чувствительности исследуемых растений к элементному составу окружающей среды, которая отличается высокой геохимической неоднород-

ностью, связанной со сменой эколого-геохимических ситуаций природного и техногенного характера (рис. 2).

Статистическая обработка полученных аналитических данных приведена в таблице 1.

Относительно полученных значений коэффициентов вариации все исследуемые элементы в рясковых на урбанизированных территориях России могут быть разделены на ряд групп:

1) Элементы близкой к однородной группе распределения с коэффициентом вариации меньше 80% (Na, Ca, Rb).

2) Такие элементы как Вг и Ва со значениями коэффициента вариации 80–100%, образуют группу химических элементов с неоднородным характером распределения.

3) Остальные элементы, к которым относится большинство из определенных, с коэффициентом вариации больше 100%, имеют крайне неравномерное распределение. Особенно это харак-

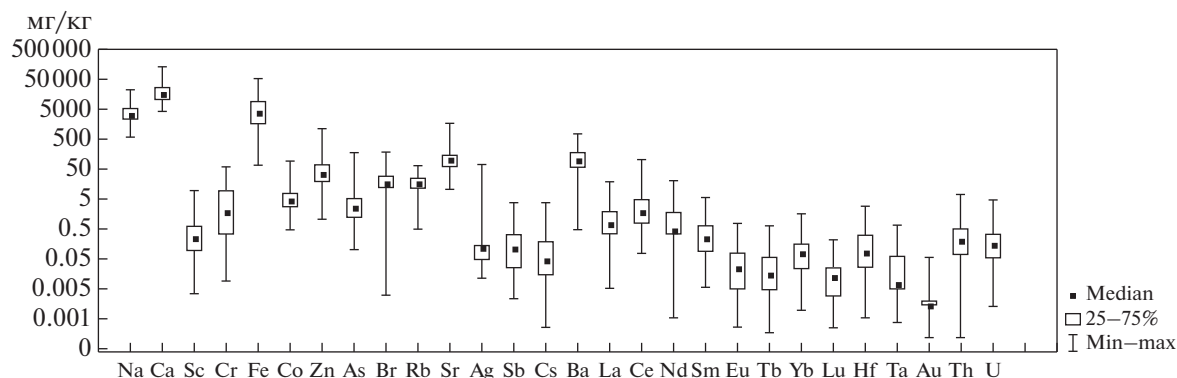


Рис. 2. Интервалы разброса и медианное содержание химических элементов в сухом веществе растений семейства рясковые в озерах, изученных на территории Российской Федерации (мг/кг).

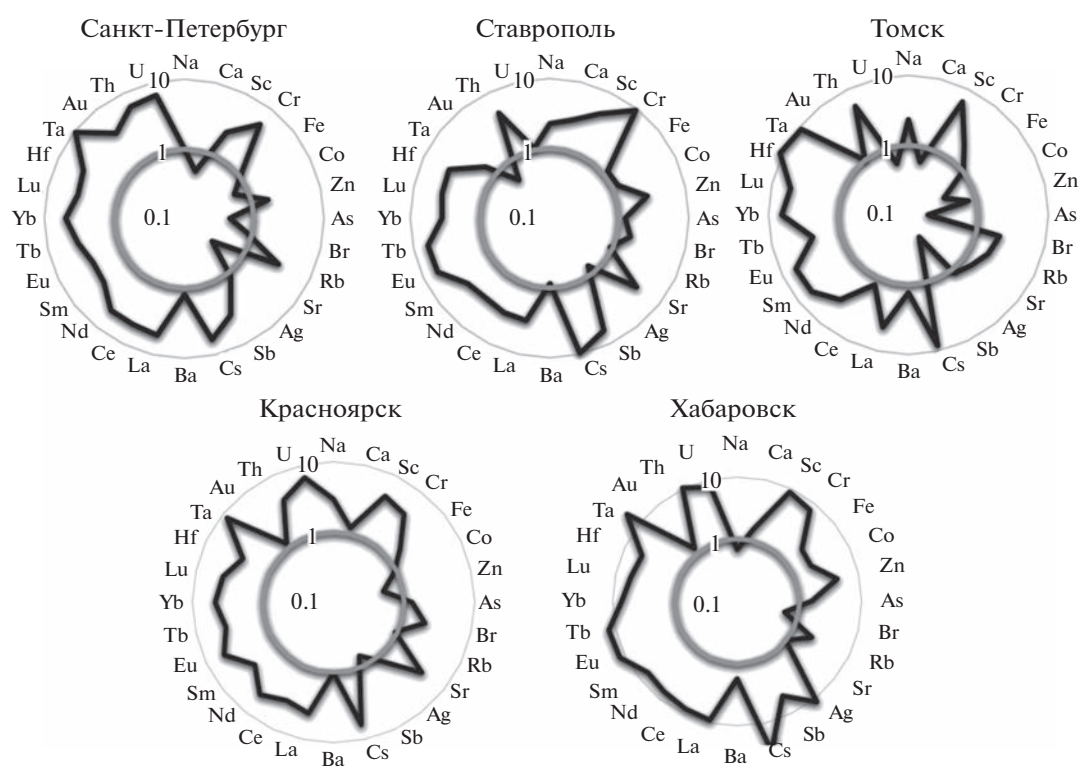


Рис. 3. Коэффициенты концентрирования элементов в растениях семейства рясковые (сухое вещество) для высоко урбанизированных территорий России.

терно для As и Ag, имеющим коэффициент вариации более 200%.

Анализ групп элементов, концентрируемых растениями, показал, что широким спектром элементов, концентрации которых выше среднего (более 20-ти элементов) характеризуются растения водоемов, расположенных в зонах высокой урбанизации и антропогенной нагрузки: гг. Санкт-Петербург, Ставрополь, Хабаровск, Красноярск и Томск. Для данных населенных пунктов можно отметить общие закономерности: концентриро-

вание радиоактивных (за исключением U для Ставрополя и Томска) и редкоземельных элементов (РЗЭ) выше среднего по России, вычисленного по данным настоящего исследования (рис. 3).

В табл. 2 представлены данные об элементах, имеющую высокую степень встречаемости в рясковых того или иного федерального округа с концентрациями выше средних по России. Данная информация носит предварительный характер и требует дальнейшего уточнения, поскольку затрагивает весьма обширные территории Россий-

Таблица 1. Статистические параметры распределения химических элементов в растениях семейства рясовых на территории России (на сухое вещество, мг/кг)

Элемент	Среднее арифметическое (C_a), мг/кг	V , %	Среднее геометрическое C_r , мг/кг	Медиана, мг/кг	Минимальное, мг/кг	Максимальное, мг/кг
Na	4440	71	3566	3537	574	21868
Ca	21738	79	17150	16003	4175	134125
Sc	0.6	167	0.2	0.3	0.003	9.5
Cr	5.8	141	1.0	1.9	0.01	57.8
Fe	7146	123	3908	4293	71.2	50157
Co	7.9	153	4.7	4.5	0.5	96.5
Zn	54.2	160	31.7	36.4	1	1184
As	6.3	249	2.6	2.5	0.1	184
Br	24	89	15.7	18.2	0.003	179
Rb	20.4	59	16.8	17.9	0.5	68
Sr	140	110	91	100	10	1602
Ag	1.4	504	0.1	0.1	0.01	71
Sb	0.3	151	0.1	0.1	0.002	3.9
Cs	0.2	194	0.05	0.05	0.0003	3.6
Ba	136	88	96	103	0.5	791
La	1.5	140	0.7	0.9	0.006	19
Ce	4	199	1.9	2	0.1	105
Nd	1.5	145	0.8	0.5	0.001	19.6
Sm	0.5	139	0.2	0.2	0.006	6.2
Eu	0.06	164	0.02	0.02	0.0003	0.8
Tb	0.05	151	0.02	0.02	0.0002	0.7
Yb	0.2	144	0.06	0.08	0.001	1.6
Lu	0.02	156	0.01	0.01	0.0003	0.2
Hf	0.2	158	0.1	0.08	0.001	2.8
Ta	0.05	162	0.01	0.01	0.0004	0.6
Au	0.003	183	0.002	0.002	0.0001	0.1
Th	0.4	169	0.2	0.2	0.0001	7.4
U	0.3	184	0.1	0.1	0.001	5

ской Федерации при малом количестве образцов, т.е. весьма локальна.

Данные табл. 2, не позволяют определить природную или техногенную составляющую специфики концентрирования элементов рясовыми того или иного федерального округа, по причине необходимости более детального анализа и сопоставления данных по конкретным исследованным городам с фоновыми концентрациями. При этом полученные результаты позволяют выделить предварительные закономерности концентрирования элементов исследуемыми макрофитами в зависимости от территории произрастания.

Центральный и Южный федеральные округа, в состав которых входят такие города как Брянск,

Гусь-Хрустальный, Воронеж, Звенигород, Орел, Ярославль, Волгоград, Кореновск и т.д., характеризуются наименьшим спектром элементов в растениях семейства Lemnaceae, с концентрациями, превышающими среднее по России. В то время как Сибирский и Дальневосточный федеральные округа, в состав которых входят города Новосибирск, Юрга, Кемерово, Томск, Красноярск, Якутск, Хабаровск, Партизанск и т.д., отличаются широким спектром элементов с коэффициентами концентрирования больше 1. Стоит отметить, что в данный спектр также входят редкоземельные (Sc, Tb, Yb, Ce, Lu) и радиоактивные (Cs, Th, U) элементы.

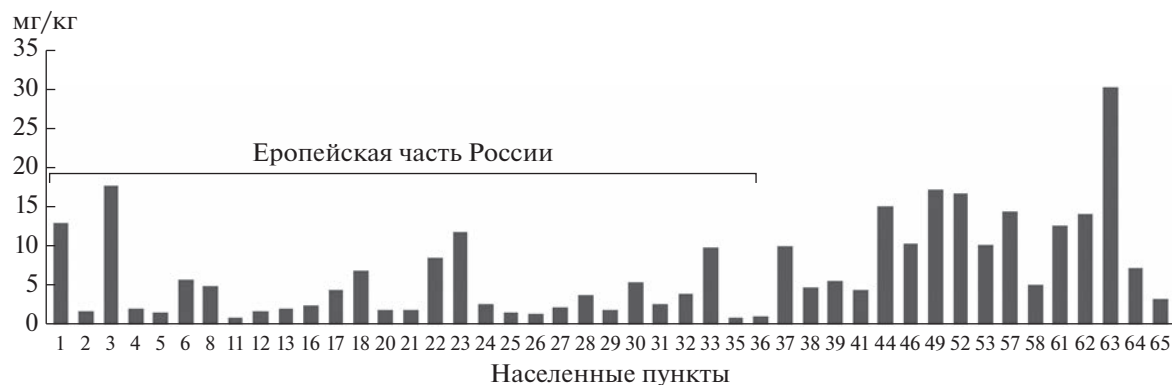


Рис. 4. Распределение суммы РЗЭ в растениях семейства рясковые (сухое вещество, мг/кг) на территории Российской Федерации: Условные обозначения представлены на рис. 1.

Наблюдается дифференциация по накоплению редкоземельных элементов (РЗЭ) в водных растениях на территории Российской Федерации. Европейская часть России характеризуется преимущественно низкими концентрациями РЗЭ в макрофитах, за исключением г. Калининград и г. Санкт-Петербург, в то время как рясковые Уральского, Сибирского и Дальневосточного федеральных округов характеризуются исключительно повышенными содержаниями РЗЭ (рис. 4). Наибольшее суммарное значение РЗЭ (30 мг/кг) в сухом веществе исследуемых растений обнаружено на территории г. Хабаровск.

Исследуемая территория Центральной Сибири, на которой обнаружены высокие содержания РЗЭ в растениях семейства Lemnaceae, характеризуется сложной тектоникой регионов (Забайкалье, Кузнецкое Алатау, Колывань-Томская складчатая зона и т.д.), гранитоидных массивов, и имеет активное развитие коры выветривания с широким площадным распространением и большим количеством выходов ее продуктов на дневную поверхность (Удодов и др., 1971; Поляков и др., 2006;

Злобина и др., 2019). Так, например, окраины Колывань-Томской складчатой зоны являются перспективными на циркон-ильменитовые россыпи и имеют промышленное значение на территории северных и западных ее окраин (юг Томской области, Новосибирская обл.). Это отражено в ряде работ различных авторов (Колубаева, 2015; Лапин, Оленченко, 2018; Янченко и др., 2019).

Немаловажно развитие промышленности в некоторых регионах (Кузбасс, Урал и др.), освоение полиметаллических месторождений, активизирующее горно-обогатительной и горно-перерабатывающей деятельности, что также влияет на формирующуюся эколого-геохимическую обстановку территории.

По данным С.И. Арбузова (2014) месторождения углей Сибири также отличаются редкометальной специализацией (РЗЭ, U, Ge, Zr).

Повышенные содержания РЗЭ в городах европейской части (Калининград, Санкт-Петербург, Ставрополь), по мнению авторов, преимущественно связаны с высокой степенью урбанизации и развития промышленности районов, кото-

Таблица 2. Группы элементов, концентрируемых растениями семейства рясковые федеральных округов России

Федеральный округ	Количество водоемов	Количество проб	$K_k > 1$
Центральный	13	26	Na, Cr, Rb, Th, U
Северо-Западный	4	8	Na, Cr, Zn, Rb, Sb, Cs, Ba, Tb, Ta, Sm
Южный	3	6	Na, Ca, Br, Cs
Северо-Кавказский	3	6	Na, Cr, Br, Sr, Sb, U
Приволжский	12	24	Na, Ca, Br, Sr, Ag, Ta, U
Уральский	5	10	Cr, Co, Sr, Sb, Cs, Eu, Yb, Lu
Сибирский	19	30	Sc, Fe, Sr, Br, Ag, Ba, Cs, Ce, Lu, Hf, Th, U
Дальневосточный	6	12	Sc, Cr, Zn, As, Br, Sr, Ag, Sb, Tb, Yb, Th, U

* K_k — коэффициент концентрирования относительно среднего состава рясковых по России.

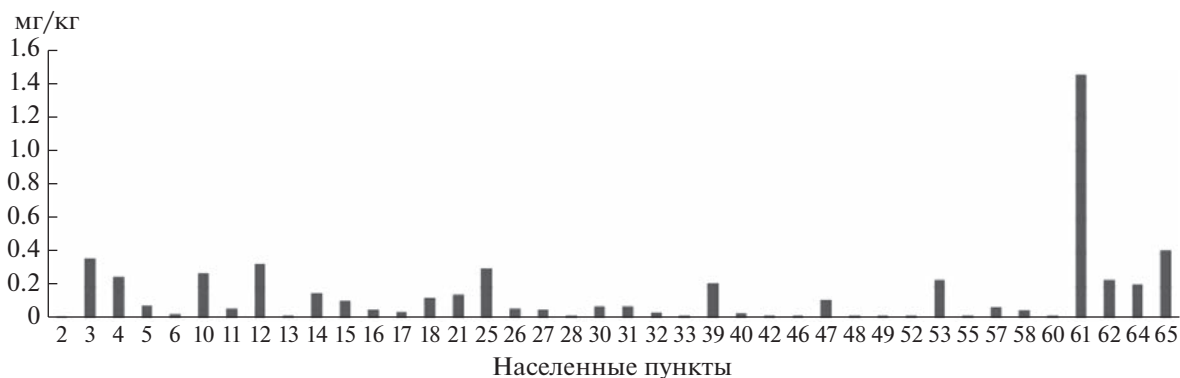


Рис. 5. Распределение сурьмы в растениях семейства рясковые (сухое вещество, мг/кг) на территории Российской Федерации: Условные обозначения представлены на рис. 1.

рые характеризуются такими отраслями, как машиностроение, металлургия, радиоэлектроника, легкая и полиграфическая промышленность.

Стоит обратить внимание на характер распределения сурьмы в рясковых на исследуемой территории. Среднее геометрическое этого элемента в изученных водных растениях составляет 0.1 мг/кг, в то время как в с. Газимурский Завод (Забайкальский край) концентрация Sb возрастает до 2 мг/кг (рис. 5). По нашему мнению, данная ситуация в отношении высоких концентраций сурьмы в растениях Газимурского завода является следствием геологической специфики данного региона. Населенный пункт расположен в Восточно-Забайкальской сурьмяной провинции, отличающейся крупным ресурсным потенциалом по Sb (Павленко, Поляков, 2010).

Наиболее яркими индикаторами техногенеза на фоне изменяющегося содержания элементов в различных средах являются их соотношения (Рихванов и др., 2007; Юсупов и др., 2019).

Использование соотношений элементов нашло широкое применение в геохимических и литолого-геохимических исследованиях. В отношении их индикаторной роли в эко-геохимических исследованиях стоит подчеркнуть следующее:

– Th/U в объектах живой природы, составляющее более 3.5 характеризует воздействие преимущественно природных факторов, а низкие значения, как правило, предприятий ядерно-топливного цикла (Рихванов и др., 2007);

– La/Ce в ряде природных компонентов варьирует в узких пределах и в среднем составляет 0.6 (Рихванов и др., 2007). Изменение данного отношения характерно для зон нефте-газопереработки (Шахова и др., 2018).

Для индикации техногенного загрязнения нами использованы величины отношения радиоактивных (Th/U) и редкоземельных элементов (La/Ce) (рис. 6а, 6б).

На территории России соотношение Th/U в исследуемых водных растениях варьирует в широких пределах, от 0.02 (с. Нижняя Вязовка) до 21 (г. Курган), среднее арифметическое составляет 2, а медианное – 0.8. Максимальные концентрации Th (1.8 мг/кг) и U (1 мг/кг) обнаружены в рясковых г. Хабаровск. Также аномальными концентрациями урана характеризуются макрофиты нефтедобывающего района, г. Нефтеюганск, и составляет 4.6 мг/кг.

Мы предполагаем, что выявленная на территории г. Хабаровска специфика концентрирования обусловлена ее металлогенетическими особенностями, что отмечается некоторыми исследователями (Коковкин, 2013), но при этом исследуемый регион насчитывает около 100 радиационных объектов (организации, осуществляющие деятельность с открытыми радиоактивными веществами, воинские части и т.д.), являющихся потенциальными источниками поступления радиоактивных элементов в окружающую среду. Поэтому не исключен и техногенный источник полученного соотношения (Th/U = 1.8). Такая величина вполне соответствует критерию техногенности Л.П. Рихванова, связанного с предприятиями ЯТЦ (см. выше).

Стоит отметить, что рясковые водоемов высоко урбанизированных городов (Калининграда, Санкт-Петербурга, Волгограда, Барнаула, Красноярска, Хабаровска) характеризуются Th/U больше 1, а также содержанием данных элементов выше средних значений.

Повышенными концентрациями отдельных радиоактивных элементов, например, тория, характеризуются макрофиты городов Юрга (Th = 1 мг/кг; K_к(Th) = 6), Томск (Th = 0.9 мг/кг; K_к(Th) = 5), Ставрополь (Th = 0.8 мг/кг; K_к(Th) = 5), п. Колывань (Th = 0.6 мг/кг; K_к(Th) = 3), а урановой – городов Улан-Удэ (U = 0.7 мг/кг; K_к(U) = 5), Волгоград (U = 0.8 мг/кг; K_к(U) = 6) и Красноярск (U =

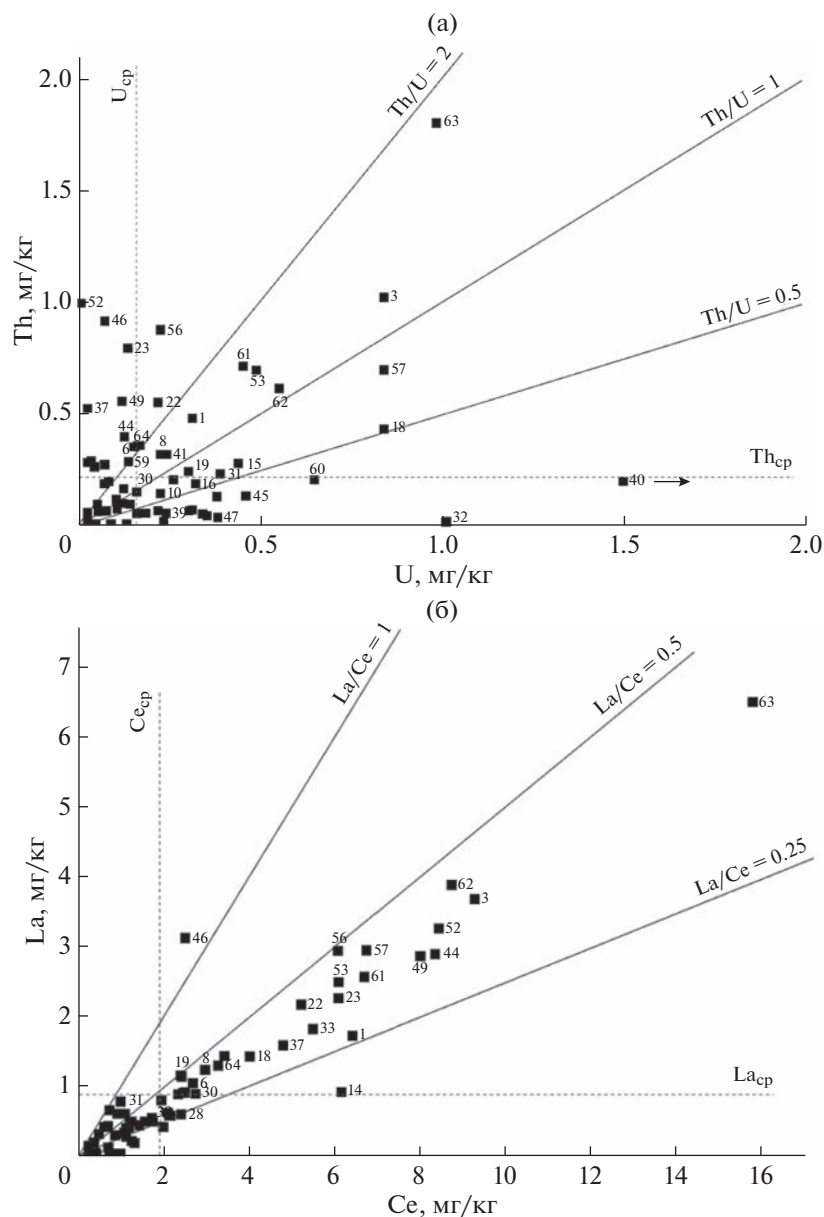


Рис. 6. (а) Соотношение Th/U в растениях семейства рясковые (сухое вещество) урбанизированных территорий России, (б) Соотношение La/Ce в растениях семейства рясковые (сухое вещество) урбанизированных территорий России: Условные обозначения представлены на рис. 1.

$= 0.8$ мг/кг; $K_k(U) = 6$), для которого схожая ситуация концентрирования радиоактивных элементов была обнаружена и для листьев тополя (Юсупов, 2019).

La/Ce отношение в исследуемых макрофитах варьирует в узких пределах от 0.3 до 0.5. Содержание Ce в рясковых исследуемых населенных пунктов всегда больше, чем La, за исключением рясковых из оз. Песчаное с. Тимирязево (Томская область), где La/Ce в растениях составляет 1.2. Преобладание лантана в растениях семейства

рясковых данного объекта наблюдается на фоне преобладания церия в воде озера. Воды оз. Песчаное относятся к пресным с малой минерализацией, гидрокарбонатным кальциевого состава. Полученные данные могут свидетельствовать о том, что элементный состав растений не зависит от типа вод, где они произрастали, несмотря на имеющуюся информацию многих авторов о том, что вода является основным источником поступления элементов в исследуемые растения через корневую систему (Landolt, Kandeler, 1987; Bocuk et al., 2013; Sasmaz et al., 2016). Можно предположить, что

полученные нами результаты не исключают высокую долю влияния терригенной составляющей, сорбцию пыли фитомассой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований впервые было определено среднее содержание 28 химических элементов в водных растениях семейства рясковые (*Lemnaceae*), произрастающих на урбанизированных территориях России.

Для выявления региональной и локальной специфики элементного состава рясковых, а также определения элементов-индикаторов авторами использованы следующие критерии оценки природной и антропогенной составляющих: сопоставление данных по концентрированию РЗЭ макрофитами, соотношениям Th/U и La/Ce, а также вычисление коэффициентов концентрирования элементов в рясковых относительно средних значений.

По результатам сопоставления данных по содержанию РЗЭ и пространственному распределению некоторых микроэлементов в исследованных макрофитах, выявлено, что широким спектром элементов, концентрации которых выше средних величин во всей выборке рясковых, характеризуются населенные пункты, отличающиеся высокой степенью урбанизации и техногенным пресингом (гг. Санкт-Петербург, Ставрополь, Хабаровск, Красноярск и Томск), в то время как природная геохимическая специализация территории отражается в водных растениях повышенными содержаниями элементов, поступающих преимущественно с акцессорными минералами (с. Газимурский Завод).

По величине соотношения радиоактивных элементов в растениях высоко урбанизированные города (Калининград, Санкт-Петербург, Волгоград, Барнаул, Красноярск, Хабаровск) характеризуется Th/U в рясковых меньше 3, что свидетельствует о преобладании техногенной составляющей, а также содержанием данных элементов выше средних значений.

La/Ce отношение в макрофите варьирует в узких пределах: от 0.3 до 0.5. Характерно концентрирование рясковыми Ce больше, чем La, а также изменение данного соотношения в зависимости от влияния терригенной составляющей.

Определено, что природно — техногенная геохимическая специализация районов отражается в локальном концентрировании редкоземельных элементов и сурьмы ассоциированными видами ряски *Lemna minor*, *L. turionifera* и *Spirodela polyrrhiza*, произрастающих в зоне контакта атмосферы с поверхностью водоемов.

Авторы благодарят и выражают особую признательность за рекомендации и незаменимые сове-

ты доктору геол.-минерал. наук, профессору Леониду Петровичу Рихванову и всем, кто бескорыстно помог в сборе материала: Надежде Стрюк (г. Воронеж), Дамиру Робертовичу Каримову (г. Бор), Александру Валерьевичу Тарасову (г. Коломна), Кристине Федосовой (г. Москва), Анастасии Андреевне Зориной (г. Кирово-Чепецк), Дарье Сергеевне Денисовой (г. Орел), Федору Марущак (г. Москва), Екатерине Алексеевне Монаховой (г. Омск), Николаю Владимировичу Торговкину (г. Якутск), Анастасии Олеговне Сороке и Олегу Витальевичу Сороке (г. Тайшет), Агате Андреевне Шилениной (г. Бийск), Никите Алексеевичу Шангину (г. Санкт-Петербург), Екатерине Евгеньевне Михайловой (г. Екатеринбург), Павлу Сергеевичу Шатицафу (г. Партизанск), Анне Кондратьевой (г. Псков), Евгению Анатольевичу Михантьеву (г. Новосибирск), Заурбеку Владимировичу Дзуцеву (г. Владикавказ), Анастасии Георгиевне Воробьевой (г. Владимир), Ольге Валентиновне Мартыновой и ее ученикам (г. Морсальск) и многим другим.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ № 20-64-47021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А., Алексеев А.В. (2013) Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв сельтебных ландшафтов. Ростов н/Д.: Издательство Южного федерального университета, 380 с.
- Арбузов С.И., Машенькин В.С., Рыбалко В.И., Судыко А.Ф. (2014) Редкометалльный потенциал углей Северной Азии (Сибирь, российский Дальний Восток, Казахстан, Монголия). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. (3), 32-36.
- Бруновский Б.К., Кунашева К.Г. (1930) О содержании радия в некоторых растениях. *ДАН СССР*. (20), 537-540.
- Павленко Ю.В., Поляков О.А. (2010) Восточно-Забайкальская сурьмяная провинция. *Вестник Забайкальского государственного университета*. (9), 77-84.
- Вернадский В.И., Виноградов А.П. (1931) О химическом элементарном составе рясков как видовом признаке. *ДАН СССР*. (9), 473-476.
- Глазовский Н.Ф. (1982) *Техногенные потоки веществ в биосфере. Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем*. М.: Наука, 7-28.
- Гула К.Е., Крупская Л.Т., Дербенцева А.М., Волобуева Н.Г. (2012) Использование водных растений в процессе очистки сточных вод золотодобывающих предприятий. *Проблемы региональной экологии*. (5), 144-147.
- Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф., Жадько С.В. (2016) Накопление тяжелых металлов прибрежно-водной растительностью водоемов вблизи г. Жлобина Гомельской области Республики Беларусь. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. (5), 124-132.
- Ермаков В.В., Петрунина Н.С., Тютиков С.Ф., Данилова В.Н., Хушвахтова С.Д., Дегтярев А.П., Кречетова Е.В. (2015) Концентрирование металлов растениями рода *Salix* и их значение при выявлении кадмиевых

- аномалий. *Геохимия*. (11), 978-978. Ermakov V.V., Petrunina N.S., Tyutikov S.F., Danilova V.N. Khushvakh-tova S.D., Degtyarev A.P., Krechetova E.V. (2015) Concen-tration of metals by plants of the genus *Salix* and their im-plica tion in detection of cadmium anomalies. *Geochem. Int.* **53**(11), 951-963.
- Ермаков В.В., Ковальский Ю.В. (2018) Живое веще-ство биосферы: масса и химический элементный со-став. *Геохимия*. (10), 931-944.
- Ermakov V.V., Kovalsky Y.V. (2018) Living Matter of the Biosphere: Mass and Chemical Elemental Composition. *Geochem. Int.* **56**(10), 969-981.
- Злобина А.Н., Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Фар-хутдинов И.М., Нанпинг В. (2019) Радиоэкологическая опасность для населения в районах распространения высокорadioактивных гранитов. *Известия Томского пол-итехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. **330**(3), 111-125.
- Иванова А.И., Лазарева Г.А., Кузнецова Н.В. (2018) Оценка качества воды реки Волгуши по макрофитам. *Вестник Международного университета природы, обще-ства и человека "Дубна"*. **39**(2), 9-15.
- Капитонова О.А. (2019) Материалы к биологии и эко-логии рясковых (Lemnaceae) Сибири. *Проблемы бота-ники Южной Сибири и Монголии*. **1**(18), 127-131.
- Коковкин А.А. (2013) Новейшая структура Сихотэ-Алинского орогена, металлогения Сихотэ-Алинской рудной провинции. *Региональная геология и металлогения*. **53**, 105-113.
- Коломиец Н.Э., Туева И.А., Мальцева О.А., Дмитрук С.Е., Калинин Г.И. (2004) Оценка перспективности неко-рых видов лекарственного растительного сырья с точки зрения их экологической чистоты. *Химия расти-тельного сырья*. (4), 25-28.
- Колубаева Ю.В. (2015) Химический состав подзем-ных вод зоны активного водообмена территории се-верной части Колывань-Томской складчатой зоны. *Вестник Томского государственного университета*. (391), 202-208.
- Лапин П.С., Оленченко В.В. (2018) Проявление ин-трузивных тел в современном рельефе земной поверх-ности Колывань-Томской складчатой зоны. *Интер-экспо Гео-Сибирь*. **2**(3), 176-183.
- Моисеенко Т.И. (2017) Эволюция биогеохимических циклов в современных условиях антропогенных на-грузок: пределы воздействий. *Геохимия* (10), 841-862.
- Moiseenko T.I. (2017) Evolution of biogeochemical cycles under anthropogenic loads: Limits impacts. *Geochem. Int.* **55**(10), 841-860.
- Поляков Г.В., Изох А.Э., Кривенко А.П. (2006) Плати-ноносные ультрамафит-мафитовые формации подвиж-ных поясов Центральной и Юго-Восточной Азии. *Гео-логия и геофизика*. **47**(12), 1227-1241.
- Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Волостнов А.В., Архангельская Т.А., Межибор А.М., Берчук В.В., Иванов А.Ю., Таловская А.В., Шатилова Е.Г., Язи-ков Е.Г. (2007) Радиоактивные элементы в окружаю-щей среде. *Известия Томского политехнического уни-верситета. Инжиниринг георесурсов*. **311**(1), 128-136.
- Рябова В.Н., Васильева В.А. (2009) Восстановление растительности рекультивированных прудов западной ветви водоподводящей системы г. Петергофа. *Вестник Санкт-Петербургского университета*. **3**(3), 146-157.
- Удодов П.А., Паршин П.Н., Левашева Б.М., Лукин А.А., Рассказов Н.М., Копылова Ю.Г., Коробейникова Е.С., Солодовникова Р.С., Фатеев А.Д., Шестаков Б.И. (1971) Гидрогеохимические исследования Колывань-Томской складчатой зоны. Томск: Издательство Том-ского университета, 284 с.
- Уфимцева М.Д. (2015) Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их ре-акции в аномальных биогеохимических провинциях. *Геохимия*. (5), 450-460.
- Шахова Т.С., Таловская А.В., Язиков Е.Г. (2018) Эко-лого-геохимические особенности снежного покрова (твердой фазы) в районах размещения нефтеперераба-тывающих заводов (г. Омск, Ачинск, Павлодар). *Во-просы естествознания*. **4**, 125-130.
- Юсупов Д.В., Рихванов Л.П., Судыко А.Ф., Баранов-ская Н.В., Дорохова Л.А. Радиоактивные элементы (торий, уран) в листьях тополя на урбанизированных территориях и их индикаторная роль. *Разведка и охра-на недр*. (2), 61-68.
- Янченко О.М., Ворошилов В.Г., Тимкин Т.В., Марты-ненко И.В., Мансур З. (2019) Морфология и состав зо-лота кор выветривания Томь-Яйского междуречья. *Известия Томского политехнического университета. Ин-жиниринг георесурсов*. **330**(3), 84-92.
- Basiglioni E., Pintore M., Forni C. (2018) Effects of treated industrial wastewaters and temperatures on growth and en-zymatic activities of duckweed (*Lemna minor* L.). *Ecotoxi-cology and environmental safety*. **153**, 54-59.
- Bocuk H., Yakar A., Turker O.C. (2013) Assessment of *Lemna gibba* L. (duckweed) as a potential ecological indi-cator for contaminated aquatic ecosystem by boron mine ef-fluent. *Ecological indicators*. **29**, 538-548.
- Borisjuk I. N., Peterson A.A., Lv J., Qu G., Luo Q., Shi L., Chen G., Kishchenko O., Zhou Y., Shi J. (2018). Structural and biochemical properties of duckweed surface cuticle. *Frontiers in chemistry*. **6**, 317-324.
- Ceschin S., Crescenzi M., Iannelli M.A. (2020) Phytore-mediation potential of the duckweeds *Lemna minuta* and *Lemna minor* to remove nutrients from treated waters. *En-vironmental Science and Pollution Research*. **27**, 1-9.
- Chytry M., Sumberova K., Hajkova P., Hajek M., Hroudova Z., Navratilova J. (2011). *Vegetace České republiky 3. Vod-ní a mokřadní vegetace*. Praha: Academia, 827 p.
- Ekperusi A.O., Sikoki F.D., Nwachukwu E.O. (2019) Ap-plication of common duckweed (*Lemna minor*) in phytore-mediation of chemicals in the environment: State and fu-ture perspective. *Chemosphere*. **223**, 285-309.
- Farias D.R., Hurd C.L., Eriksen R.S., Macleod C.K. (2018). Macrophytes as bioindicators of heavy metal pollu-tion in estuarine and coastal environments. *Marine Pollu-tion Bulletin*. **128**, 175-184.
- Landolt E., Kandeler R. (1987) Biosystematic investiga-tions in the family of duckweeds (Lemnaceae), Vol. 4: the family of Lemnaceae-a monographic study, Vol. 2 (phyto-chemistry, physiology, application, bibliography). *Veroeff-entlichungen des Geobotanischen Instituts der ETH, Stiftung Ruebel (Switzerland)*, 317 p.

- Mkandawire M., Teixeira J.A., Dudel E.G. (2014) The Lemna bioassay: contemporary issues as the most standardized plant bioassay for aquatic ecotoxicology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. **44**(2), 154-197.
- Prasad M.N., Greger M., Aravind P. (2005) Biogeochemical cycling of trace elements by aquatic and wetland plants: relevance to phytoremediation. Trace elements in the environment, 469-500.
- Rofkar J.R., Dwyer D.F., Bobak D.M. (2014) Uptake and toxicity of arsenic, copper, and silicon in *Azolla caroliniana* and *Lemna minor*. *International J. phytoremediation*. **16**(2), 155-166.
- Oyedeki S., Fatoba P.O., Ogunkunle C.O., Akanbi G.M. (2013) Water hyacinth and duckweed as indicator of heavy metal pollution in River Asa. *J. Ind. Pollut. Control*. **29**(2), 155-162.
- Sasmaz M., Obek E., Sasmaz A. (2016) Bioaccumulation of uranium and thorium by *Lemna minor* and *Lemna gibba* in Pb–Zn–Ag tailing water. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. **97**(6), 832-837.
- Sasmaz M., Obek E., Sasmaz A. (2018) The accumulation of La, Ce and Y by *Lemna minor* and *Lemna gibba* in the Keban gallery water, Elazığ Turkey. *Water and Environment J.* **32**(1), 75-83.
- Teles C.C., Mohedano R.A., Tonon G., Belli Filho P., Costa R.H.R. (2017) Ecology of duckweed ponds used for wastewater treatment. *Water Sci. Technol.* **75**(12), 2926-2934.
- Varga M., Horvatić J., Čelić A. (2013) Short term exposure of *Lemna minor* and *Lemna gibba* to mercury, cadmium and chromium. *Central European J. Biology*. **8**(11), 1083-1093.
- Wiegand G. (1978) Der soziologische konnex der 47 häufigsten makrophyten der gewässer mitteleuropas. *Vegetatio*. **38**(3), 165-174.