

Научная статья

УДК 550.47

DOI: 10.2109/2227-9245-2024-30-1-8-17

Элементный состав растений семейства рясковые (*Lemnaceae*)
как индикатор природно-техногенных обстановок территории
Томской области

Анна Юрьевна Барановская¹, Наталья Владимировна Барановская²,
Александр Федорович Судыко³

^{1,2,3}Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
¹kyzmen44@mail.ru, ²nata@tpu.ru, ³sudykoAF@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию
17.10.2023 г.

Одобрена после
рецензирования
14.02.2024 г.

Принята к публикации
15.02.2024 г.

Ключевые слова:

индикатор природно-техногенной обстановки, Томская область, рясковые, химические элементы, геоэкологический мониторинг, инструментальный нейтронно-активационный анализ, индикаторные отношения элементов, геохимия окружающей среды, коэффициент вариации, геохимические аномалии

Статья посвящена изучению индикаторных свойств элементного состава водных растений семейства рясковые (*Lemnaceae*). Данное семейство растений может выступать как оптимальный геоиндикатор по причине наличия широкого ареала распространения, высокой скорости прироста биомассы и устойчивости к экогеохимическим обстановкам окружающей среды. Выполненные исследования затрагивают одну из наиболее актуальных проблем геоэкологии и экогеохимии, поиск объективных индикаторов состояния окружающей среды. Представлены данные по содержанию 28 химических элементов в рясковых, определённых с использованием инструментального нейтронно-активационного анализа. Изучены статистические показатели вариативности химических элементов в зависимости от природно-техногенных обстановок районов Томской области. Объект: водные растения семейства рясковые (*Lemnaceae*). Цель: определение изменения индикаторных показателей содержания и соотношения химических элементов в составе растений семейства рясковые в зависимости от эколого-геохимической обстановки территории Томской области, сформированной в результате комплексного воздействия природно-техногенных факторов среды. С использованием геохимических подходов определена специфика формирования элементного состава водных растений в зависимости от геоэкологической ситуации региона, выявлены индикаторные показатели соотношения редкоземельных и радиоактивных элементов в районах расположения предприятий нефтеперерабатывающей промышленности, ядерно-топливного цикла, а также наличия природных аномалий. Установлено, что отношение La/Ce в рясковых Томской области варьирует в узких пределах от 0,2 до 0,6, среднее значение составляет 0,4. Величина отношения Th/U изменяется в широких диапазонах: от 0,02 до 154. В целом показано, что элементный состав рясковых может свидетельствовать о сложившейся эколого-геохимической ситуации исследуемой территории и служить индикатором состояния окружающей среды.

Благодарности: статья подготовлена на основе материалов, полученных при поддержке межрегионального гранта РФФИ (№ 20-64-47021; 20-67-47005).

Elemental Composition of Plants of the Duckweed Family (*Lemnaceae*) as an Indicator of Natural-Technogenic Conditions in the Tomsk Region

Anna Yu. Baranovskaya¹, Natalia V. Baranovskaya², Alexander F. Sudyko³

^{1,2,3}National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

¹kyzmen44@mail.ru, ²nata@tpu.ru, ³sudykoAF@yandex.ru

Information about the article

Received October 17, 2023

Approved after review
February 14, 2024

Accepted for publication
February 15, 2024

Keywords:

indicator of natural-technogenic situation, Tomsk region, duckweed, chemical elements, geocological monitoring, instrumental neutron activation analysis, indicator ratios of elements, environmental geochemistry, variation coefficient, geochemical anomalies

The work is devoted to the study of the indicator properties of the elemental composition of aquatic plants of the duckweed family (*Lemnaceae*). This plant family can act as an optimal geoindicator due to its wide distribution area, high rate of biomass growth and resistance to eco-geochemical environmental conditions. The carried out research touches upon one of the most pressing problems of geoecology and ecogeochemistry, the search for objective indicators of the state of the environment. The data are presented on the content of 28 chemical elements in duckweeds, determined using instrumental neutron activation analysis. Statistical indicators of the variability of chemical elements depending on the natural and man-made conditions of the regions of the Tomsk region have been studied. The object of the research is aquatic plants of the duckweed family (*Lemnaceae*). The purpose of the research is to determine changes in indicator indexes of the content and ratio of chemical elements in the composition of plants of the duckweed family, depending on the ecological and geochemical situation of the Tomsk region territory, formed as a result of the complex influence of natural and man-made environmental factors. Using geochemical approaches, the formation specifics of the elemental composition of aquatic plants depending on the geo-ecological situation of the region have been determined, indicator indexes of the rare earth and radioactive elements ratio have been identified in the areas where oil refining industry enterprises, the nuclear fuel cycle are located, as well as the presence of natural anomalies. It has been established that the La/Ce ratio in duckweeds of the Tomsk region varies within a narrow range from 0,2 to 0,6, the average value is 0,4. The value of the Th/U ratio varies over a wide range, from 0,02 to 154. In general, it has been shown that the elemental composition of aquatic plants of the duckweed family carries information about the current ecological and geochemical situation of the study area and can serve as an indicator of the environment state.

Acknowledgments: the article was prepared on the basis of materials received with the support of the interregional grant of the Russian Science Foundation (No. 20-64-47021; 20-67-47005).

Введение. При проведении геоэкологических исследований весьма важным вопросом является поиск наиболее чувствительных индикаторов, способных реагировать на изменение природно-техногенной ситуации [8]. В отношении биоиндикации влияние как антропогенных, так и природных факторов на биологические системы и их состояние весьма существенно. Одновременно реакции на воздействие проявляются в соответствии со своей предрасположенностью (возраст, питание, генетическая устойчивость и т. д.).

При этом биоиндикатор имеет ряд преимуществ по сравнению с компонентами неживой природы. Во-первых, они суммируют все биологически важные данные о среде и способны отражать её состояние в целом. Во-вторых, это экономическая целесообразность по сравнению с применением дорогостоящих методов исследования. В-третьих, по состоянию биообъекта можно судить о

степени вредности веществ для живой природы и т. д. [4].

Актуальность. Поиск индикаторов состояния окружающей среды является одной из актуальных проблем геоэкологии и экогеохимии. При этом существенное внимание уделяется именно биообъектам, которые способны дать объективную оценку и установить степень токсикологического воздействия. Учитывая широкий ареал произрастания и высокую аккумуляционную способность растений семейства рясковые, отметим, что их элементный состав является весьма перспективным с точки зрения биогеохимической индикации.

Объект/предмет исследования – водные растения семейства рясковые (*Lemnaceae*).

Цель: определить изменение индикаторных показателей содержания и соотношения химических элементов в составе растений семейства рясковые в зависимости от эко-

лого-геохимической обстановки территории Томской области, сформированной в результате комплексного воздействия природно-техногенных факторов среды.

Задачи исследования:

1) изучить геоэкологическую ситуацию территории Томской области и определить вариативность элементного состава растений семейства рясковые как наиболее чувствительного компонента природно-техногенных систем региона;

2) оценить содержание и распределение химических элементов, в том числе редкоземельных и радиоактивных, и выявить их индикаторное значение в растениях семейства рясковые на территории административных районов Томской области;

3) исследовать зависимость элементного состава, формирующегося в растениях семейства рясковые относительно возможного источника его поступления;

4) выделить региональную геохимическую специализацию растений семейства рясковые на территории Томской области.

Методология и методы исследования. В качестве объекта исследования выбрана смесь двух родов *Lemna* и *Spirodela* водного растения семейства рясковые (*Lemnaceae*). Данные роды семейства относятся к группе плейстофитов, способных образовывать общие фитоценозы и концентрировать большинство химических элементов в одинаковых пределах [6; 15].

В период с 2013 по 2021 г. осуществлялся отбор проб рясковых во время вегетационного периода растения, с июня по август. Пробы растений семейства рясковые отобраны из природных эвтрофных водоёмов, характеризующихся стоячей или слабо текущей водой, на территории 107 населённых пунктов всех 16 административных районов Томской области. Пробоподготовка включала в себя высушивание проб растений при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния и гомогенизацию (пробы истирались в агатовой ступке).

Аналитическим методом в данной работе являлся инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА), который проводился на исследовательском реакторе ИРТ-Т в ядерно-геохимической лаборатории МИНОЦ «Урановая геология» Томского политехнического университета (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.518623 от 10 октября 2011 г., аналитики – ст. науч. сотрудник А. Ф. Судыко и Л. Ф. Богутская). Использо-

мый аналитический метод является высокочувствительным, погрешность обнаружения составляет 10 %.

В связи со статистически значимым отличием распределения всех анализируемых элементов в макрофитах на исследуемой территории от нормального, принято решение в качестве средних значений химических элементов в рясковых на территории Томской области использовать их средние геометрические значения.

Для каждого административного района Томской области определён коэффициент концентрации (K_c) исследуемых элементов в рясковых, который представляет соотношение среднего геометрического значения элемента в макрофите на территории административного района Томской области (C) и среднего геометрического значения этого элемента в рясковых для России в целом (C_{cp}) [1]:

$$K_c = \frac{C}{C_{cp}}$$

Разработанность темы. Растения семейства рясковые (*Lemnaceae*) являются уникальным объектом, который нашёл применение и в фундаментальных и в прикладных науках. Основной причиной активного исследования данных растений послужило их повсеместное распространение, простое морфологическое строение, что делает их устойчивыми к изменению факторов среды обитания и в то же время чувствительными с точки зрения индикации влияния условий среды. Данный макрофит отличается высокой концентрационной способностью по отношению ко многим химическим веществам, что позволяет его применять в том числе и для очистки сточных вод [13; 14].

Территория Томской области находится в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины. Данный регион отличается наличием различных месторождений полезных ископаемых, а также неравномерно распределённой техногенной нагрузкой. В целом по административному делению в области сосредоточено 16 районов.

Учитывая повсеместную встречаемость рясковых на территории Томской области и разноплановость экогеохимической ситуации данного региона, выявление закономерностей формирования регионального элементного состава водных растений, а также определение его индикаторных способностей является основной задачей выполненных исследований.

Результаты исследования и их обсуждение. По результатам анализа элементного состава рясковых получены статистические параметры содержания химических элементов в исследуемых растениях на территории Томской области, которые приведены в табл. 1.

С целью дальнейшего сравнения и расчёта коэффициентов концентрации в табл. 1

приведены также данные о средних геометрических значениях элементов в рясковых по России, ранее полученные авторами [8].

Для Томской области нами рассчитаны K_c и построены геохимические ряды для рясковых каждого административного района относительно среднего по России (табл. 2).

Таблица 1 / Table 1

Статистические параметры распределения химических элементов в растениях семейства рясковые на территории России (на сухое вещество, мг/кг) / Statistical parameters of the chemical elements distribution in plants of the duckweed family on the territory of Russia (on dry substance, mg/kg)

Элемент / Element	Среднее геометрическое по России, мг/кг / Geometric mean for Russia, mg/kg	Среднее геометрическое по Томской области, мг/кг / Geometric mean for the Tomsk region, mg/kg	Минимальное значение по Томской области, мг/кг / Minimum value in the Tomsk region, mg/kg	Максимальное значение по Томской области, мг/кг / Maximum value in the Tomsk region, mg/kg	K_c относительно среднего по России / K_c relative to the Russian average	V, %
Na	3566	3238	520	13617	0,9	67
Ca	17150	14744	4958	75577	0,9	72
Sc	0,2	0,4	0,004	9,5	2	144
Cr	1,8	2,6	0,1	57,	1,4	145
Fe	3908	6423	150	56708	1,6	88
Co	4,7	8,8	0,5	96,5	1,9	128
Zn	31,7	31,7	1,1	341	1	109
As	2,6	3,8	0,3	42,8	1,5	127
Br	15,7	20,8	0,1	179	1,3	100
Rb	16,8	18,3	4,1	61,6	1,1	52
Sr	91,4	84,5	10,0	579	0,9	73
Ag	0,1	0,1	0,01	70,9	1	629
Sb	0,1	0,1	0,01	1,2	1	106
Cs	0,05	0,1	0,0003	3,6	2	145
Ba	95,6	139	9,8	1599	1,5	99
La	0,7	1,5	0,03	18,6	2,1	113
Ce	1,9	3,8	0,08	105	2	147
Nd	0,8	1,3	0,001	13,8	1,6	106
Sm	0,2	0,4	0,01	6,2	2	114
Eu	0,02	0,1	0,001	9,7	5	192
Tb	0,02	0,04	0,0002	0,7	2	134
Yb	0,06	0,11	0,001	1,7	1,8	127
Lu	0,01	0,02	0,001	0,3	2	125
Hf	0,1	0,15	0,001	3,8	1,5	147
Ta	0,01	0,02	0,001	0,5	2	153
Au	0,002	0,003	0,0002	0,03	1,5	125
Th	0,2	0,3	0,0001	7,4	1,5	144
U	0,1	0,1	0,003	5,1	1	162

Геохимические ряды химических элементов в растениях семейства рясковые на территории административных районов Томской области / Geochemical series of chemical elements in plants of the duckweed family on the territory of the administrative districts of the Tomsk region

Наименование района / District name	Кол-во исследованных водоёмов / Number of studied reservoirs	Геохимический ряд / Geochemical series
Александровский / Alexandrovsky	28	Eu ₅₅ – Cs ₆ – Ba ₄ – Ta ₄ – Tb _{3,4} – Cr _{3,1} – Co _{3,1} – Fe ₃ – La ₃ – Hf _{2,9} – Yb _{2,8} – Ce _{2,7} – Sc _{2,6} – Zn _{2,5} – Th _{2,4} – Lu _{2,4} – U _{2,3} – Br _{2,3} – Sm _{2,2} – As _{2,1} – Au ₂ – Nd _{1,9} – Sr _{1,9} – Na _{1,8} – Ag _{1,7} – Rb _{1,5} – Sb _{1,4} – Ca _{0,6}
Каргасокский / Kargasoksky	13	Eu ₄₄ – Co ₇ – Ta _{5,8} – Au _{5,2} – Fe _{4,5} – Lu _{4,2} – Cs _{4,1} – Hf _{3,7} – Yb _{3,7} – As ₃ – Th _{2,8} – Nd _{2,7} – La _{2,5} – U _{2,5} – Ba _{2,3} – Tb _{2,3} – Ce _{2,3} – Sm _{2,2} – Zn ₂ – Sc _{1,8} – Rb _{1,7} – Br _{1,6} – Na _{1,4} – Sr _{1,1} – Ag ₁ – Cr ₁ – Sb _{0,6} – Ca _{0,5}
Парабельский / Parabelsky	11	Eu ₈₅ – Cs ₆ – Co ₆ – Ce ₅ – Tb _{4,5} – Yb _{4,5} – Au _{4,3} – La ₄ – Lu _{3,9} – Fe _{3,9} – Nd _{3,4} – Sm _{3,2} – Sc _{2,8} – Th _{2,8} – Hf _{2,7} – Ta _{2,7} – As _{2,6} – Ba _{2,5} – Cr _{2,4} – Br _{2,4} – Na _{2,3} – Zn _{1,6} – U _{1,5} – Rb _{1,3} – Sb _{1,2} – Ag _{1,1} – Sr ₁ – Ca _{0,6}
Колпашевский / Kolpashevsky	25	Cs _{6,1} – Ta _{5,8} – Eu _{5,2} – Tb _{4,8} – Hf _{4,5} – Yb _{4,5} – Co _{4,1} – Lu ₄ – Cr _{3,8} – Sc _{3,8} – Th _{3,8} – La _{3,5} – Ce _{3,4} – Nd _{3,4} – As _{2,9} – Sm _{2,7} – Sb _{2,4} – Br _{2,4} – Fe _{2,3} – U _{1,6} – Zn _{1,6} – Au _{1,6} – Ag _{1,6} – Ba _{1,6} – Rb _{1,4} – Na _{1,2} – Sr _{1,0} – Ca _{0,8}
Верхнекетский / Verkhneketsky	2	Tb _{3,7} – Cs _{2,6} – Sm _{2,5} – Ta _{2,4} – Nd _{2,4} – Sc _{2,1} – Yb _{1,8} – Ce _{1,8} – Th _{1,7} – Eu _{1,6} – La _{1,6} – Ag _{1,5} – Cr _{1,5} – Lu _{1,4} – Zn _{1,3} – Ba _{1,3} – Sb _{1,3} – Au ₁ – Rb _{0,9} – Co _{0,9} – As _{0,8} – Br _{0,6} – Ca _{0,6} – Fe _{0,6} – Sr _{0,6} – Hf _{0,6} – Na _{0,4} – U _{0,3}
Чаинский / Chainsky	2	Tb _{6,0} – Cs _{5,3} – Ta _{4,4} – Yb _{3,7} – Nd _{3,6} – Sm _{3,5} – U _{3,1} – Ba _{2,9} – Hf _{2,8} – Co _{2,7} – Sc _{2,7} – Cr _{2,7} – Th _{2,5} – Eu _{2,2} – La _{2,1} – Zn _{2,1} – Ce ₂ – Fe _{1,9} – Ag _{1,6} – Na _{1,5} – As _{1,3} – Lu _{1,1} – Rb ₁ – Au ₁ – Sb _{0,8} – Sr _{0,8} – Ca _{0,6} – Br _{0,6}
Молчановский / Molchanovsky	5	Eu _{5,8} – Ta ₅ – Hf _{4,2} – Ce _{3,7} – Tb _{3,7} – Lu _{3,6} – La _{3,6} – Cs _{3,5} – Sc _{3,1} – Nd _{3,1} – Th ₃ – Yb ₃ – Sm _{2,6} – U _{2,4} – Co _{1,8} – Cr _{1,5} – Zn _{1,4} – Ag _{1,3} – Na _{1,3} – Br _{1,3} – Fe _{1,1} – Au ₁ – As ₁ – Rb ₁ – Ba ₁ – Sr ₁ – Sb _{0,9} – Ca _{0,9}
Первомайский / Pervomaysky	9	Cs _{13,6} – Ta _{10,3} – Ce _{8,6} – Th _{8,1} – Sc _{7,6} – Cr _{6,6} – La _{6,6} – Tb _{6,5} – Hf _{6,5} – Yb _{6,4} – Sm _{5,8} – Lu _{5,3} – Nd _{3,8} – Co _{3,4} – Au _{3,3} – U _{2,7} – As _{2,6} – Fe _{2,5} – Br _{2,0} – Ba _{1,9} – Sb _{1,9} – Ag _{1,5} – Ca _{1,3} – Rb _{1,2} – Sr _{1,1} – Zn _{1,1} – Na _{0,8}
Кривошеинский / Krivosheinsky	6	Cs _{4,5} – Eu _{3,3} – Th _{2,8} – La _{2,7} – Sc _{2,7} – Sm _{2,7} – Yb _{2,3} – Ce _{2,2} – Hf _{2,2} – Lu ₂ – Ba _{1,9} – Co _{1,7} – Ta _{1,6} – As _{1,6} – Fe _{1,6} – Sr _{1,5} – Tb _{1,5} – Ag _{1,4} – Nd _{1,4} – Cr _{1,3} – Ca _{1,3} – Au _{1,2} – Sb ₁ – U ₁ – Na _{0,8} – Br _{0,8} – Rb _{0,7} – Zn _{0,7}
Бакcharский / Bakcharsky	10	Eu _{77,5} – Cs _{3,1} – Hf _{2,6} – La _{2,5} – Cr _{2,2} – Nd _{2,1} – Yb _{1,9} – Sc _{1,9} – Co _{1,8} – Br _{1,8} – Ce _{1,8} – Th _{1,4} – Sm _{1,4} – Fe _{1,4} – Ba _{1,2} – Ta _{1,2} – Zn _{1,2} – Sb _{1,1} – Lu _{1,1} – Tb _{1,0} – Au _{0,9} – Ca _{0,9} – U _{0,8} – Rb _{0,8} – As _{0,7} – Na _{0,6} – Sr _{0,6} – Ag _{0,5}
Тегульдетский / Teguldetsky	2	Eu _{8,7} – Ta _{8,5} – Co _{8,8} – Nd ₆ – Sm _{5,9} – As _{5,6} – Tb _{5,3} – La ₅ – Yb _{4,7} – Cs _{4,6} – Br _{4,3} – Ce ₄ – Lu _{3,4} – Hf _{3,3} – Ba _{2,9} – Sb _{2,6} – Sc _{2,6} – Th _{2,5} – Cr _{2,1} – Fe _{1,5} – Ag _{1,2} – U _{1,1} – Au ₁ – Ca ₁ – Zn _{0,9} – Sr _{0,8} – Rb _{0,4} – Na _{0,4}
Асиновский / Asinovsky	6	Eu _{15,2} – Au _{3,5} – Br _{2,2} – Co _{2,2} – Sm _{2,1} – Ta _{2,1} – Yb _{2,1} – La _{1,9} – Cs _{1,8} – Fe _{1,8} – Nd _{1,8} – As _{1,7} – Ce _{1,7} – Tb _{1,6} – Ba _{1,5} – Sc _{1,4} – Lu _{1,3} – Cr _{1,2} – Th _{1,2} – Sb _{1,1} – Sr _{1,0} – Ca _{1,0} – U _{1,0} – Hf _{1,0} – Zn _{0,9} – Ag _{0,9} – Rb _{0,9} – Na _{0,8}
Зырянский / Zyryansky	9	Cs ₆ – Cr ₄ – Eu _{3,9} – Ta _{3,5} – Sm _{3,4} – Yb _{3,3} – La ₃ – Sc _{2,9} – Ce _{2,8} – Tb _{2,6} – Lu _{2,5} – As _{2,5} – Sb _{2,4} – Fe _{2,3} – Th _{2,3} – Nd _{2,1} – Co ₂ – Ba _{1,6} – Br _{1,5} – Zn _{1,5} – Hf _{1,3} – Ca _{1,3} – Sr _{1,3} – U ₁ – Rb ₁ – Au _{0,8} – Ag _{0,6} – Na _{0,6}
Томский / Tomsk	56	Eu _{29,5} – Ag ₂₂ – Cs _{5,1} – Ta _{4,4} – Yb _{3,8} – As _{3,5} – Hf _{3,5} – Lu _{3,4} – Th _{3,2} – La _{3,2} – Cr _{3,2} – Sc _{3,1} – Tb ₃ – Nd ₃ – Sm _{2,8} – Ce _{2,6} – U _{2,3} – Fe _{2,2} – Sb ₂ – Br _{1,9} – Ba _{1,7} – Au _{1,7} – Zn _{1,7} – Co _{1,5} – Ca _{1,4} – Sr _{1,2} – Rb _{1,2} – Na _{1,1}
Шегарский / Shegarsky	6	Ag _{47,5} – Ta _{2,9} – Eu _{1,9} – Co _{1,9} – Yb _{1,7} – Ca _{1,5} – Sc _{1,5} – Lu _{1,5} – La _{1,5} – Nd _{1,4} – Th _{1,4} – Tb _{1,4} – Sm _{1,4} – Na _{1,4} – Au _{1,4} – As _{1,4} – Hf _{1,3} – Ce _{1,3} – Sb _{1,2} – Zn _{1,2} – Fe _{1,2} – Ba _{1,2} – Sr _{1,2} – Rb _{1,1} – Br _{0,9} – Cs _{0,9} – Cr _{0,9} – U _{0,8}
Кожевниковский / Kozhevnikovsky	18	Eu _{53,8} – Ag _{23,2} – Ta _{8,6} – Cs _{6,2} – U _{5,8} – Th _{5,3} – Sc _{5,3} – Tb _{5,1} – Yb _{5,1} – Hf _{4,7} – La _{4,5} – Ce _{4,4} – Lu _{4,1} – Nd _{3,9} – Sm _{3,6} – Cr _{3,4} – Br _{3,2} – As _{2,9} – Au _{2,8} – Co _{2,4} – Fe _{1,8} – Sr _{1,5} – Sb _{1,5} – Ba _{1,5} – Rb _{1,3} – Ca _{1,2} – Zn _{0,9} – Na _{0,9}

В целом для Томской области характерно концентрирование рясковыми Sc, Cs, редкоземельных элементов (РЗЭ) и Та относительно средних по России. При этом каждый административный район имеет своё индивидуальное геохимическое «лицо».

Следует отметить, что в районах с высоким развитием нефтегазодобывающего комплекса (НГДК), к которым можно отнести Александровский, Каргасокский и Парабельский, по результатам элементного состава рясковых можно выделить схожую эколого-геохимическую ситуацию, которая проявляется в высоком содержании в рясковых всей группы анализированных РЗЭ, а также урана, золота, хрома и некоторых других.

Установленные ассоциации, включающие такие элементы, как Sb, Br, As, Au и Cr, являются специфичными в районах размещения месторождений нефти, где осуществляется деятельность по их добыче и переработке. По данным Т. С. Шаховой с соавторами [10], нефть всех нефтегазоносных провинций обогащена по отношению к кларку для верхней континентальной коры такими элементами, как As, Sb, Au, Cr. Эти элементы приведены в качестве индикаторов для территорий НГДК по данным изучения различных компонентов природы (снег, талая вода, сфагновые мхи и лишайники) [7].

Интересным является факт концентрирования и выделения в отдельную ассоциацию вместе с хромом и сурьмой группы РЗЭ. Ранее некоторыми авторами указывалось, что присутствие этой группы на территории расположения предприятий нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отрасли в большей степени связано с техногенной составляющей, в частности с применением катализаторов [Там же].

Вопрос о присутствии РЗЭ в природных средах нефтедобывающих территорий и их индикаторной роли остаётся дискуссионным [10].

Представленные в статье данные показывают, что на территориях НГДК в элементном составе рясковых имеет место уменьшение суммы редкоземельных элементов до 11 по сравнению с 19 для территорий южных районов региона (Кожевниковский и Томский) и 20 – для территорий расположения железорудного бассейна (Колпашевский и Бакчарский районы). Для Колывань-Томской складчатой зоны (КТСЗ) высокие содержа-

ния РЗЭ в различных природных компонентах вследствие геологической специфики отмечают разные исследователи [3].

В целом, рясковые Томской области характеризуются РЗЭ-специализацией, которая выражается в концентрировании преимущественно элементов лёгкой подгруппы. При этом в ряде проб рясковых Кожевниковского и Томского районов обнаружено повышенное содержание U, что может быть связано в первую очередь с многочисленными рудопроявлениями данного элемента в гранитах КТСЗ [2; 10].

Учитывая высокую разносторонность отраслевого развития региона, а также наличие на территории нефтеперерабатывающих заводов, предприятий атомной промышленности и высокоразвитой горнодобывающей отрасли, элементный состав рясковых может иметь высокую индикаторную роль с целью оценки эколого-геохимического состояния региона.

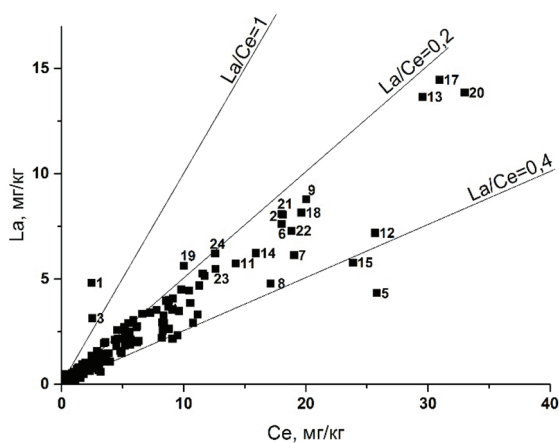
Для выявления эколого-геохимической обстановки и индикации техногенного загрязнения нами использованы величины отношения радиоактивных (Th/U) и редкоземельных элементов (La/Ce) в рясковых, что представлено на рисунке.

La/Ce в рясковых Томской области варьирует в узких пределах от 0,2 до 0,6, среднее значение составляет 0,4. Для рясковых характерно большее концентрирование Ce относительно La. Эта закономерность сохраняется для большинства исследуемых водоемов.

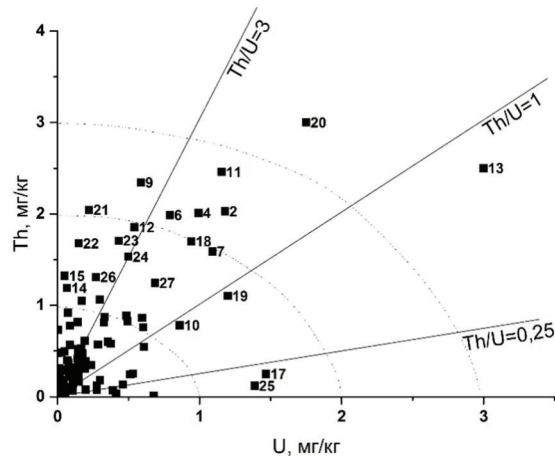
Весьма интересна выявленная ситуация в соотношении La и Ce в рясковых, произрастающих на территории Лугинецкого нефтяного месторождения, где содержание церия существенно больше лантана в исследуемых растениях.

В целом, согласно полученным данным ряда авторов, например В. Д. Страховенко, Е. А. Овдиной [9], Ce/La могут выступать индикаторами зон повышенной проницаемости для восходящих флюидных потоков, которые фиксируют временные интервалы изменения кинематики разломов фундамента (фазы сжатия-растяжения).

Что касается радиоактивных элементов (см. рисунок), то наиболее высокие концентрации Th и U обнаружены для рясковых, произраставших на территории Бакчарского (Th = 7,4 мг/кг, U = 1,1 мг/кг) и Кожевниковского (Th = 4,1 мг/кг, U = 5,1 мг/кг) районов.



а



б

Индикаторные соотношения некоторых радиоактивных и редкоземельных элементов в растениях семейства рясковые (сухое вещество) Томской области: а – соотношение La/Ce; б – соотношение Th/U:

- 1 – с. Новомариинка; 2 – Малореченское нмр.; 3 – с. Тимирязевское (оз. Песчаное); 4 – Крапивинское нмр.; 5 – Лугинецкое нмр.; 6 – с. Парбиг; 7 – оз. Боровое (Колпашевский р-н); 8 – д. Типсино; 9 – с. Сарафановка; 10 – с. Вертикос; 11 – с. Мельниково; 12 – с. Вороново; 13 – с. Осиновка; 14 – п. Тазырбак; 15 – п. Улу-Юл; 16 – с. Бакчар; 17 – с. Зырянка; 18 – с. Батурино; 19 – п. Кузовлево; 20 – д. Чернильшиково; 21 – д. Надежда; 22 – с. Беловодовка; 23 – с. Леботер; 24 – с. Наумовка; 25 – д. Латат; 26 – с. Итатка; 27 – п. Победа /
- Indicator ratios of some radioactive and rare earth elements in plants of the duckweed family (dry matter) Tomsk Region: а – La/Ce ratio; б – Th/U ratio: 1 – vill. Novomariinka; 2 – Malorechenskoe district; 3 – Timiryazevskoe vill. (Peschanoe lake); 4 – Krapivinskoe district; 5 – Luginetskoe district; 6 – vill. Parbig; 7 – lake Borovoe (Kolpashovo district); 8 – Tipsino vill.; 9 – vill. Sarafanovka; 10 – sell. Vertikos; 11 – sell. Melnikovo; 12 – sell. Voronovo; 13 – p. Osinovka; 14 – Tazyrbak sell.; 15 – Ulu-Yul sell.; 16 – vill. Bakchar; 17 – sell. Zyryanka; 18 – sell. Baturino; 19 – Kuzovlevo sell.; 20 – Chernilshikovo vill.; 21 – Nadezhda vill.; 22 – vill. Belovodovka; 23 – sell. Leboter; 24 – sell. Naumovka; 25 – Latat vill.; 26 – vill. Itatka; 27 – Pobeda sell.

Th/U в рясковых, с концентрацией данных элементов больше средних по региону, на территории Томской области можно разделить на три характерные группы:

- 1) Th/U больше 3: характерно для рясковых, произрастающих на территории большинства населённых пунктов Парабельского, Колпашевского, Первомайского и Томского районов;
- 2) Th/U от 1 до 3: характерно для рясковых, произрастающих на территории Бакчарского, Каргасокского районов и некоторых населённых пунктов Томского района;
- 3) Th/U меньше 1: характерно для рясковых, произрастающих на территории Александровского, Молчановского, Асиновского и Кожевниковского районов.

Обнаружение высоких концентраций редкоземельных и радиоактивных элементов в рясковых в южных районах региона может быть в первую очередь аргументировано геологической спецификой территории, при этом не исключается воздействие техногенного фактора [12]. Особенно ярко техногенез проявляется при более детальном исследовании Томского района в части пространственного распределения данных элементов

в макрофите, а также детально изучен в отношении других природных объектов рядом исследователей, например А. Ю. Ивановым, Д. В. Юсуповым и др. [5; 11].

Так, аномалии урана и лютетия на территории Томского района зафиксированы нами в северо-восточной части, примыкающей к Северному промышленному узлу. При средних геометрических значениях ($U = 1$ мг/кг и $Lu = 2$ мг/кг) для Томского района на территории таких населённых пунктов, как Наумовка ($U = 2,5$ мг/кг; $Lu = 4,8$ мг/кг), Надежда ($U = 3,9$ мг/кг; $Lu = 4,8$ мг/кг), Кузовлево ($U = 5,6$ мг/кг; $Lu = 6,1$ мг/кг), Чернильшиково ($U = 21,3$ мг/кг; $Lu = 4,8$ мг/кг), содержание данных элементов в рясковых превышает средние значения в два раза и более. Эти населённые пункты расположены непосредственно в зоне влияния СПУ и, по нашему мнению, испытывают на себе техногенное воздействие.

Выводы. В результате исследований на территории Томской области определены средние концентрации 28 химических элементов в водных растениях семейства рясковые (*Lemnaceae*). Выполнен анализ пространственного распределения исследуемых

элементов в водных растениях на территории Томской области с целью выявления региональной и локальной специфики элементного состава рясковых, который позволил оконтурить зоны с характерным уровнем их накопления.

Латеральное распределение редкоземельных элементов в макрофите на территории исследуемого региона демонстрирует в первую очередь влияние природных факторов.

Определение элементов-индикаторов в рясковых осуществлялось посредством выполнения ряда критериев оценки природной и антропогенной составляющих, к которым относились определение значений соотношения Th/U и La/Ce, сопоставление данных по содержанию РЗЭ в растениях, а также вычисление коэффициентов концентрирования элементов в рясковых относительно средних значений.

По величине соотношения Th/U рясковые на территории Томской области можно разделить на две характерные группы: северная и центральная часть региона представ-

лена преимущественно ториевой природой, в то время как элементный состав растений южных районов характеризуется преобладанием U.

Выявлено, что для рясковых характерно большее концентрирование Ce относительно La. Одновременно La/Ce на территории Томской области варьирует в узких пределах (от 0,2 до 0,6).

Следует обратить внимание на то, что Томский район отличается от остальных районов региона наибольшим спектром элементов в рясковых, концентрации которых кратно превышают средние значения, что может в первую очередь отражать степень воздействия именно промышленных объектов на экогеохимическую обстановку. Также северо-восточная территория данного района, имеющая наибольший техногенный прессинг, характеризуется высокими содержаниями Lu и U в макрофите и увеличением их концентраций по мере приближения к источнику загрязнения.

Список литературы

1. Барановская Н. В., Барановская А. Ю., Судыко А. Ф. Элементный состав растений семейства Рясковые (Lemnaceae) на урбанизированных территориях Российской Федерации // *Геохимия*. 2023. Т. 68, № 68. С. 638–648.
2. Готтих Р. П. Информативность малых элементов в нефтяной геологии // *Георесурсы*. 2012. Т. 47, № 5. С. 24–31.
3. Злобина А. Н. Граниты с повышенным радиационным фоном и некоторые радиоэкологические проблемы в районах их распространения: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.36. Томск, 2019. 38 с.
4. Иванова А. И., Лазарева Г. А., Кузнецова Н. В. Оценка качества воды реки Волгуши по макрофитам // *Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна»*. 2018. № 2. С. 9–15.
5. Иванов А. Ю. Закономерности распределения химических элементов в вертикальном профиле донных отложений слабопроточных водоемов Томского района // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016. Т. 327, № 2. С. 88–101.
6. Капитонова О. А. Материалы к биологии и экологии рясковых (Lemnaceae) Сибири // *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*. 2019. Т. 18, № 1. С. 127–131.
7. Лапин П. С., Оленченко В. В. Проявление интрузивных тел в современном рельефе земной поверхности Колывань-Томской складчатой зоны // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2018. Т. 3. С. 176–183.
8. Робертус Ю. В., Рихванов Л. П. Геоэкологическая обстановка в районе Калгутинского рудника (Республика Алтай) // *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2020. Т. 26, № 1. С. 34–43.
9. Страховенко В. Д., Овдина Е. А. Особенности распределения редкоземельных элементов в водах и донных отложениях малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332, № 10. С. 171–179.
10. Шахова Т. С., Таловская А. В., Язиков Е. Г. Эколого-геохимические особенности снежного покрова (твердой фазы) в районах размещения нефтеперерабатывающих заводов (г. Омск, Ачинск, Павлодар) // *Вопросы естествознания*. 2018. № 4. С. 125–130.
11. Юсупов Д. В., Рихванов Л. П., Судыко А. Ф., Барановская Н. В., Дорохова Л. А. Радиоактивные элементы (торий, уран) в листьях тополя на урбанизированных территориях и их индикаторная роль // *Разведка и охрана недр*. 2019. № 2. С. 61–68.
12. Bau M., Schmidt K., Pack A., Bendel V., Kraemer V. The European Shale: an Improved Data Set for Normalisation of Rare Earth Element and Yttrium Concentrations in Environmental and Biological Samples from Europe // *Applied Geochemistry*. 2018. Vol. 90. P. 142–149.

13. Ceschin S., Crescenzi M., Iannelli M. A. Phytoremediation Potential of the Duckweeds Lemnaminuta and Lemna Minor to Remove Nutrients from Treated Waters // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 1–9.

14. Ekperusi A. O., Sikoki F. D., Nwachukwu E. O. Application of Common Duckweed (Lemna Minor) in Phytoremediation of Chemicals in the Environment: State and Future Perspective // *Chemosphere*. 2019. Vol. 223. P. 285–309.

15. Teles C. C., Mohedano R. A., Tonon G., Belli Filho P., Costa R. H. R. Ecology of Duckweed Ponds Used for Nutrient Recovery from Wastewater // *Water Science and Technology*. 2017. Vol. 75, no. 12. C. 2926–2934.

Reference

1. Baranovskaya N. V., Baranovskaya A. Yu., Sudyko A. F. Elemental composition of plants of the Lemnaceae family in urbanized areas of the Russian Federation. *Geochemistry*, vol. 68, no. 68, pp. 638–648, 2023. (In Rus.)

2. Gottikh R. P. Information content of small elements in petroleum geology. *Georesursy*, vol. 47, no. 5, pp. 24–31, 2012. (In Rus.)

3. Zlobina A. N. Granites with increased background radiation and some radioecological problems in areas of their distribution. Abstract of Dr. Geol.-Mineral Sciences. Tomsk, 2019. (In Rus.)

4. Ivanova A. I., Lazareva G. A., Kuznetsova N. V. Assessment of the water quality of the Volgushi River by macrophytes. *Bulletin of the International University of Nature, Society and Man "Dubna"*, no. 2, pp. 9–15, 2018. (In Rus.)

5. Ivanov A. Yu. Patterns of distribution of chemical elements in the vertical profile of bottom sediments of low-flow reservoirs of the Tomsk region. *News of the Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*, vol. 327, no. 2, pp. 88–101, 2016. (In Rus.)

6. Kapitonova O. A. Materials on the biology and ecology of duckweeds (Lemnaceae) of Siberia. *Problems of botany of Southern Siberia and Mongolia*, vol. 18, no. 1, pp. 127–131, 2019. (In Rus.)

7. Lapin P. S., Olenchenko V. V. Manifestation of intrusive bodies in the modern relief of the earth's surface of the Kolyvan-Tom fold zone. *Interexpo GEO-Siberia*, vol. 3, pp. 176–183, 2018. (In Rus.)

8. Robertus Yu. V., Rikhvanov L. P. Geoecological situation in the area of the Kalgutinsky mine (Altai Republic). *Bulletin of the Transbaikal State University*, vol. 26, no. 1, pp. 34–43, 2020. (In Rus.)

9. Strakhovenko V. D., Ovdina E. A. Features of the distribution of rare earth elements in the waters and bottom sediments of small lakes of the Barabinskaya Lowland and the Kulundinskaya Plain. *News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*, vol. 332, no. 10, pp. 171–179, 2021. (In Rus.)

10. Shakhova T. S., Talovskaya A. V., Yazikov E. G. Ecological and geochemical features of snow cover (solid phase) in the areas where oil refineries are located (Omsk, Achinsk, Pavlodar). *Natural Science Issues*, no. 4, pp. 125–130, 2018. (In Rus.)

11. Yusupov D. V., Rikhvanov L. P., Sudyko A. F., Baranovskaya N. V., Dorokhova L. A. Radioactive elements (thorium, uranium) in poplar leaves in urbanized areas and their indicator role. *Exploration and protection of subsoil*, no. 2, pp. 61–68, 2019. (In Rus.)

12. Bau M., Schmidt K., Pack A., Bendel V., Kraemer V. The European shale: an improved data set for normalisation of rare earth element and yttrium concentrations in environmental and biological samples from Europe. *Applied Geochemistry*, vol. 90, pp. 142–149, 2018. (In Eng.)

13. Ceschin S., Crescenzi M., Iannelli M. A. Phytoremediation potential of the duckweeds Lemnaminuta and Lemna minor to remove nutrients from treated waters. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 1–9, 2020 (In Eng.)

14. Ekperusi A. O., Sikoki F. D., Nwachukwu E. O. Application of common duckweed (Lemna minor) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective. *Chemosphere*, vol. 223, pp. 285–309, 2019. (In Eng.)

15. Teles C. C., Mohedano R. A., Tonon G., Belli Filho P., Costa R. H. R. Ecology of duckweed ponds used for nutrient recovery from wastewater. *Water Science and Technology*, vol. 75, no. 12, pp. 2926–2934, 2017. (In Eng.)

Информация об авторах

Барановская Анна Юрьевна, аспирант, Томский политехнический университет, г. Томск, Россия; kuzmen44@mail.ru. Область научных интересов: геохимия живого вещества, экотоксикология.

Барановская Наталья Владимировна, д-р биол. наук, доцент, профессор Инженерной школы природных ресурсов, Томский политехнический университет, г. Томск, Россия; nata@tpu.ru. Область научных интересов: геохимия живого вещества, экотоксикология.

Судыко Александр Федорович, инженер отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия; sudykoAF@yandex.ru. Область научных интересов: геохимия.

Information about the authors

Baranovskaya Anna Yu., Postgraduate, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; kyzmen44@mail.ru. Area of scientific interests: geochemistry of living matter, ecotoxicology.

Baranovskaya Natalya V., Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor, School of Natural Resources Engineering, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; nata@tpu.ru. Area of scientific interests: geochemistry of living matter, ecotoxicology.

Sudyko Alexander F., Engineer, Geology Department, Natural Resources Engineering School, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; sudykoAF@yandex.ru. Area of scientific interests: geochemistry.

Вклад авторов в статью

Барановская А. Ю. – сбор материалов, оформление библиографии, написание текста, формирование иллюстраций и таблиц.

Барановская Н. В. – разработка методологии исследования, написание текста.

Судыко А. Ф. – проведение аналитического анализа с целью определения элементного состава исследуемого объекта.

The authors' contribution to the article

Baranovskaya A. Yu. – collecting materials, design of the bibliographies, writing text, creating illustrations and tables.

Baranovskaya N. V. – development of research methodology, writing of the text.

Sudyko A. F. – conducting analytical analysis in order to determine the elemental composition of the studied object.

Для цитирования

Барановская А. Ю., Барановская Н. В., Судыко А. Ф. Элементный состав растений семейства рясковые (*Lemnaceae*) как индикатор природно-техногенных обстановок территории Томской области // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30, № 1. С. 8–17. DOI: 10.2109/2227-9245-2024-30-1-8-17.

For citation

Baranovskaya A. Yu., Baranovskaya N. V., Sudyko A. F. Elemental Composition of Plants of the Duckweed Family (*Lemnaceae*) as an Indicator of Natural-Technogenic Conditions in the Tomsk Region // Transbaikalian State University Journal. 2024. Vol. 30, no. 1. P. 8–17. DOI: 10.2109/2227-9245-2024-30-1-8-17.