

Элементный состав растений Горного Алтая

Е. П. Храмова¹, О. В. Чанкина², С. Я. Сыева³, В. А. Костикова¹
Я. В. Ракшун⁴, Д. С. Сороколетов⁴

¹ *Центральный сибирский ботанический сад СО РАН
Новосибирск, Россия*

² *Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
Новосибирск, Россия*

³ *Горно-Алтайский научно-исследовательский институт сельского хозяйства –
филиал Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий
Барнаул, Россия*

⁴ *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Впервые проведены исследования элементного состава шести видов кустарников из трех семейств, произрастающих в Горном Алтае, и в образцах почв из мест их обитания методом РФА СИ. Наиболее высокое накопление макро- и микроэлементов свойственно растениям рода *Caragana* из сем. Fabaceae, низкое – представителям *Potentilla* и *Sibiraea* из сем. Rosaceae. Показано, что содержание Br, Y, Mo, Nb, Zr, Ti, Rb, Co, Sr, Fe, Ni и V в надземных органах представителей разных таксонов варьирует на высоком уровне (величина их соотношения $C_{\max}/C_{\min} > 5$), а содержание Mn, Cu и Pb – на малом ($1,5 \leq C_{\max}/C_{\min} \leq 2,5$) и очень малом уровне ($C_{\max}/C_{\min} \leq 1,5$).

Ключевые слова

элементный состав, рентгенофлуоресцентный анализ с синхротронным излучением, кустарники, Горный Алтай

Источник финансирования

Часть работы выполнена в ИЯФ СО РАН с использованием оборудования ЦКП "СЦСТИ" на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4М – ВЭПП-2000", в рамках государственного задания ЦСБС СО РАН «Оценка морфогенетического потенциала популяций растений Северной Азии экспериментальными методами», при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-44-040204 p_a.

Для цитирования

Храмова Е. П., Чанкина О. В., Сыева С. Я., Костикова В. А., Ракшун Я. В., Сороколетов Д. С. Элементный состав растений Горного Алтая // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 86–96. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-86-96

The Element Composition of the Mountain Altai Plants

E. P. Khramova¹, O. V. Chankina², S. Ya. Syeva³, V. A. Kostikova¹
Ya. V. Rakshun⁴, D. S. Sorokoletov⁴

¹ The Central Siberian Botanical Garden SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

² Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

³ Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies, Russia, Barnaul
Barnaul, Russian Federation

⁴ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

A study has been first made on the element composition of both the plants of six species, belonging to three families, growing in the Mountain Altai, and the samples of soil from their habitat using the method of X-ray fluorescence analysis, involving synchrotron radiation (SRXRF). The highest accumulation of macro- and microelements is typical of the representatives of *Caragana* of the *Fabaceae* family, the lowest content was recorded for the representatives of *Potentilla* and *Sibiraea* of the *Rosaceae* family. The amount of elements - Br, Y, Mo, Nb, Zr, Ti, Rb, Co, Sr, Fe, Ni and V varies within a wide range ($C_{\max}/C_{\min} > 5$), Mn, Cu and Pb - within small ($1,5 \leq C_{\max}/C_{\min} \leq 2,5$) and with very small ($C_{\max}/C_{\min} \leq 1.5$) range.

Keywords

element composition, X-ray fluorescence analysis with synchrotron radiation, bushes, the Mountain Altai

Funding

The part of the work was done using the infrastructure of the Shared research facility "Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center (SSTRC)" based on complex "VEPP-4 - VEPP-2000" of BINP SB RAS, and as part of the state assignment of the CSBG SB RAS "Estimation of the morphogenetic potential of plant populations of North Asia using experimental methods" and with partial supported by RFBR (Grant N 16-44-040204 p_a).

For citation

Khramova E. P., Chankina O. V., Syeva S. Ya., Kostikova V. A., Rakshun Ya. V., Sorokoletov D. S. The Element Composition of the Mountain Altai Plants. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 86–96. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-86-96

Введение

Растения являются наилучшим источником макро- и микроэлементов и оказывают несомненный терапевтический эффект в лечении как человека, так и животных в усваиваемой форме и в наборе, свойственном живой природе в целом. Недостаток или избыток микроэлементов приводит к ряду эндемий.

Сведения по содержанию минеральных веществ кустарников *Potentilla*, *Sibiraea*, *Caragana* и *Myricaria*, обитающих в Горном Алтае, в литературных источниках, на наш взгляд, отсутствуют либо носят разрозненный характер и не дают объективного представления о видах растений разных таксонов. Также следует учитывать, что в процессе эволюции у каждого вида растений генетически закрепились определенные концентрации химических элементов, что позволяет считать элементный состав растений важным систематическим признаком [1–5]. Растения, отобранные для изучения, принадлежат к 3-м семействам – *Rosaceae*, *Tamaricaceae* и *Fabaceae*, характеризуются высокой биологической активностью, используются в современной фармации, пищевой промышленности, а также служат кормовой базой для скота в Республике Алтай [6; 7].

Появление нового поколения измерительной аппаратуры позволяет определять в биологических объектах химические элементы почти всей периодической системы Д. И. Менделеева, роль и значение большинства из которых в жизни растений еще предстоит раскрыть.

В зарубежной и отечественной практике метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) биологических объектов используется редко, обычно для этих целей применяют другие аналитические методы (ААС, АЭА, ИСП-МС и др.) [8–10]. Однако растительный материал является наиболее сложным объектом в плане селективности, содержание элементов варьирует в широком диапазоне, а все эти методы подразумевают химическое или термическое воздействие на пробу, что не исключает потерю элементов при вскрытии или загрязнение материала реактивами [11]. Следует отметить несомненные преимущества РФА перед другими методами: неdestructивность, панорамность, возможность использования малых навесок, относительно несложная пробоподготовка, которые особенно важны при исследовании новых видов. Возможность одновременного определения многих элементов с достаточно высокой чувствительностью, хорошей точностью и воспроизводимостью [12–14] вкупе с относительной простотой обработки экспериментальных спектров позволяют достаточно оперативно получать данные о составе образцов.

Существенный вклад в развитие источников синхротронного излучения внес ИЯФ СО РАН (Новосибирск), а институты СО РАН – в развитие методов его применения для решения задач химии, катализа, биологии, геологии и материаловедения [15].

Сравнительно редкое использование метода РФА для анализа растительного материала связано, главным образом, с недостаточным количеством паспортизированных образцов, которые могут служить образцами сравнения при анализе методом «внешнего стандарта». Поэтому поиск оптимальных образцов сравнения (стандартов) может послужить развитию метода РФА. Использование синхротронного излучения (СИ) существенно улучшает возможности метода. Во-первых, высокая яркость источников СИ позволяет значительно сократить время набора экспериментального спектра, повысив экспрессность метода, а поляризация излучения увеличивает чувствительность, что важно при поиске оптимальных стандартов. Во-вторых, возможность перестройки энергии возбуждения в диапазоне рабочих энергий станции [16] открывает дополнительные перспективы при анализе концентрации тех химических элементов, которые могут служить маркерами различных видов растений¹.

Цель работы – выявление особенностей состава и содержания элементов видов растений разных таксонов, установление видов с высоким содержанием макро- и микроэлементов и оценка возможности использования растительных образцов в качестве стандартов.

Пробоподготовка и эксперимент

Материалом исследований служили образцы растений 6-ти видов растений из 3-х семейств, собранные в июле 2017 г.: *Potentilla fruticosa* L. (лапчатка кустарниковая) из сем. Rosaceae и *Myricaria longifolia* (Willd.) Ehrenb. (мирикария длиннолистная) из сем. Tamaricaceae собраны в Юго-Восточном Алтае в окрестности с. Бельтир (Кош-Агачский район) в долине р. Талдура ($H = 2\ 084$ м над ур. м.). *Sibiraea altaiensis* (Laxm.) Schneid. (сибирка алтайская) из сем. Rosaceae встречается в России только на территории Алтая, является эндемиком. Образцы собраны в 2-х популяциях в Центральном Алтае: в Онгудайском районе в окрестности с. Ело в урочище Берозёк в долине р. Ело ($H = 1\ 250$ м над ур. м.) и в Усть-Коксинском районе в окрестности с. Сугаш, в отрогах Коргонского хребта у подножья Кырлыкского перевала ($H = 1\ 270$ м над ур. м.). Растения рода *Caragana* из сем. Fabaceae представлены 3-мя видами: *Caragana bungei* Ledeb. (карагана Бунге), *Caragana pygmaea* (L.) DC. subsp. *altaica* (Kom.) Bongareva (карагана алтайская), произрастающие в Юго-Восточном Алтае в Чуйской степи в окрестности с. Кош-Агач ($H = 2\ 207$ м над ур. м.), и *Caragana pygmaea* (L.) DC (карагана карликовая), обитающая в окрестности с. Чуй-Оозы Онгудайского района.

¹ Экспериментальная станция: <http://ssrc.inp.nsk.su/CKP/stations/passport/3/>.

Анализировали листья и стебли кустарников *Potentilla*, *Sibireae*, *Caragana* и *Myricaria*, а также образцы почв из 4-х местообитаний изучаемых растений. Средний образец составляли 20–30 особей в стадии цветения – начала плодоношения. Образцы почвы были взяты из корнеобитаемого слоя (10–15 см) общеизвестным методом «конверта» согласно ГОСТу 17.4.4.02-2017².

Навеску воздушно-сухого растительного сырья и почв (1 г) измельчали в агатовой ступке. Затем образцы прессовали в форме таблетки диаметром ~ 1 см, весом 30 мг (с поверхностной плотностью 0,04 г/см²). Определение элементов проводили методом РФА СИ на станции элементного анализа (накопитель ВЭПП-3) Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ СО РАН. Измерения образцов проводились при энергии возбуждающего излучения 23 кэВ, время каждого измерения составляло от 300 до 500 с для растительных и почвенных навесок. Монохроматизация синхротронного излучения осуществлялась при помощи монохроматора на основе кремниевого кристалла типа «бабочка» с рабочими плоскостями (111). Регистрация флуоресцентного излучения осуществлялась при помощи детектора PentaFET (Oxford Instruments) с энергетическим разрешением ~ 135 эВ (на K α линии Fe – 5,9 кэВ). Основные характеристики экспериментальной станции и методические аспекты работы описаны в [16].

Обработка полученных спектров проводилась в программе AXIL методом наименьших квадратов. Концентрация элементов была определена с использованием метода «внешнего стандарта». Предел обнаружения составлял от 10⁻⁸ г/г. В качестве образцов сравнения использовали российские стандарты травно-злаковой смеси ГСО СОРМ1 и байкальского ила БИЛ-1 [17]. Величина ошибки – воспроизводимость результатов анализа получена путем измерения 10-ти параллельных измерений стандартного образца СОРМ1 и 5-ти – образца БИЛ-1 в 3-х повторностях одинаковых образцов. Для большинства элементов в растительных образцах воспроизводимость по образцу СОРМ1 колебалась в основном в пределах 5–11 %, для титана, ванадия и иттрия – 19–26 %, для свинца, кобальта, ниобия и никеля – 35–40 %, для хрома – 64 %. При этом предел обнаружения составлял 0,01–0,07 ppm для Co, Br, Mo, Rb и Pb, 0,1–0,9 ppm – для Sr, Cu, Zn, Ni, Zr, Fe Mn и свыше 1 ppm для остальных элементов. Для стандартного образца БИЛ-1 воспроизводимость варьировала для большинства элементов от 3 до 12 %, для Pb и Mo – 14 %, для Zr – 16 %. Предел обнаружения Mo, Nb, Co, Zr, Sr, Br, Y, Rb и Pb составил от 0,1 до 0,5 ppm, для остальных элементов – выше 1 ppm.

Результаты и обсуждение

При анализе различий между образцами почв из разных местообитаний использовали отношения максимальных и минимальных значений содержания *i*-го элемента ($v = C_{\max}/C_{\min}$), характеризующие ширину выборки (рис. 1). Наименьшую изменчивость в этом плане представляют концентрации Ti, K, Cr, Pb, Fe, Mn и Co, наибольшую – Br, As и Mo. Количественной мерой различий послужили отношения кларков элементов, предложенные Н. С. Касимовым и Д. В. Власовым [18]. По величине показателя химические элементы разделены ими на 4 группы с большим ($C_{\max}/C_{\min} > 5$), средним ($2,5 \leq C_{\max}/C_{\min} \leq 5$), малым ($1,5 \leq C_{\max}/C_{\min} \leq 2,5$) и очень малым ($C_{\max}/C_{\min} \leq 1,5$) диапазоном.

По высокому содержанию Br (17 мг/кг) и Mo (0,7 мг/кг) выделяются почвы местообитаний *P. fruticosa*, As (20–50 мг/кг) – *C. bungei* и *C. pygmaea subsp. altaica* (табл. 1). Содержание остальных элементов в образцах достаточно стабильно, различия варьируют в диапазоне 1,5–2,5 раза.

² ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.

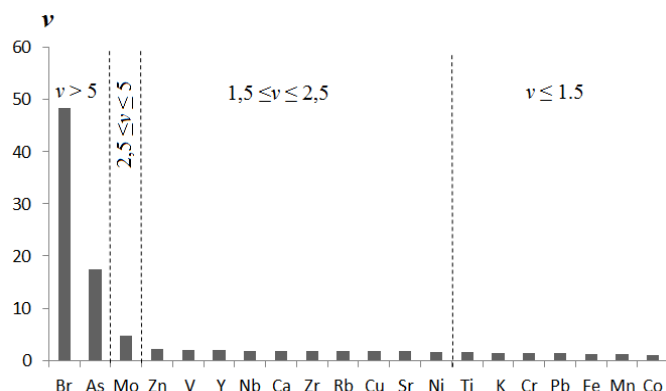


Рис. 1. Соотношения максимальных к минимальным значениям концентраций ($v = C_{\max}/C_{\min}$) в образцах почв из разных местообитаний растений

Fig. 1. Ratios of maximal and minimal concentrations ($v = C_{\max}/C_{\min}$) in the samples of soil taken from the different ecotopes of plants

Таблица 1

Содержание элементов в почве из точек отбора растений в Горном Алтае (К, Са, Fe даны в мг/г от сухой массы, остальные элементы – мг/кг)

Table 1

Contents of elements in the soils of the habitats of the Mountain Altai plants (K, Ca, and Fe are given in mg/g of dry solid matter, the other elements are in mg/kg)

Элемент	Точки отбора почвенных образцов			
	№ 1 ¹	№ 2	№ 3	№ 4
K	18 ± 1 ²	12 ± 1	14 ± 1	12 ± 1
Ca	36 ± 3	21 ± 2	38 ± 3	28 ± 2
Ti	2916 ± 146	2145 ± 107	3253 ± 163	3211 ± 161
V	65 ± 5	46 ± 4	94 ± 8	66 ± 5
Cr	43 ± 3	36 ± 2	49 ± 3	47 ± 3
Mn	701 ± 28	579 ± 23	675 ± 27	724 ± 29
Fe	27 ± 1	23 ± 1	29 ± 1	26 ± 1
Co	12 ± 1	11 ± 1	12 ± 1	12 ± 1
Ni	36 ± 1	32 ± 1	25 ± 1	41 ± 2
Cu	33 ± 2	20 ± 1	26 ± 1	19 ± 1
Zn	82 ± 4	39 ± 2	52 ± 3	52 ± 3
As	6,0 ± 0,2	2,8 ± 0,1	49,7 ± 1,5	20,0 ± 0,6
Br	16,9 ± 1,4	0,4 ± 0,0	1,0 ± 0,1	1,6 ± 0,1
Rb	60 ± 5	35 ± 3	59 ± 5	62 ± 6
Sr	234 ± 16	200 ± 14	160 ± 11	133 ± 9
Y	27 ± 3	17 ± 2	18 ± 2	33 ± 4
Zr	141 ± 23	131 ± 21	80 ± 13	112 ± 18
Nb	8 ± 1	6 ± 1	5 ± 0	9 ± 1
Mo	0,7 ± 0,1	0,2 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,2 ± 0,0
Pb	18 ± 2	17 ± 2	13 ± 2	13 ± 2

¹ Местообитание растений: № 1 – *Potentilla fruticosa*; № 2 – *Myricaria longifolia*; № 3 – *Caragana bungei*; № 4 – *Caragana pygmaea subsp. altaica* [Plant habitats: 1 – *Dasiphora fruticosa*; 2 – *Myricaria longifolia*; 3 – *Caragana bungei*; 4 – *Caragana pygmaea subsp. altaica*]

² Среднее значение ± стандартное отклонение [Mean value ± standard deviation].

Сравнительный анализ содержания элементов в листьях растений показал, что в меньшей мере варьирует содержание Mn (рис. 2). В малом диапазоне изменяется концентрация Pb ($v = 2,3$), на среднем уровне варьируют Cr, As, Ca, Zn Cu и K. Количество остальных элементов колеблется в широком диапазоне ($v > 5$). По наибольшему содержанию Y и Cr выделяются листья *M. longifolia*, Br, Mo, Sr, Cu Ca – листья *C. pygmaea*, Fe, Ti, Co, Ni, Zn, Rb и Zn – листья *C. pygmaea subsp. altaica* (табл. 2). Наибольшая сумма макроэлементов (K + Ca) установлена в листьях *S. altaiensis* вне зависимости от местообитания (35–37 мг/г), наименьшая (16 мг/г) – в листьях *P. fruticososa*. По максимальному суммарному содержанию микроэлементов в листьях выделяется *C. pygmaea subsp. altaica* (1 126 мг/кг), несколько ниже в листьях *C. pygmaea* и *M. longifolia* (768 и 688 мг/кг соответственно). Минимальная сумма микроэлементов обнаружена в листьях *S. altaiensis* (351 мг/кг).

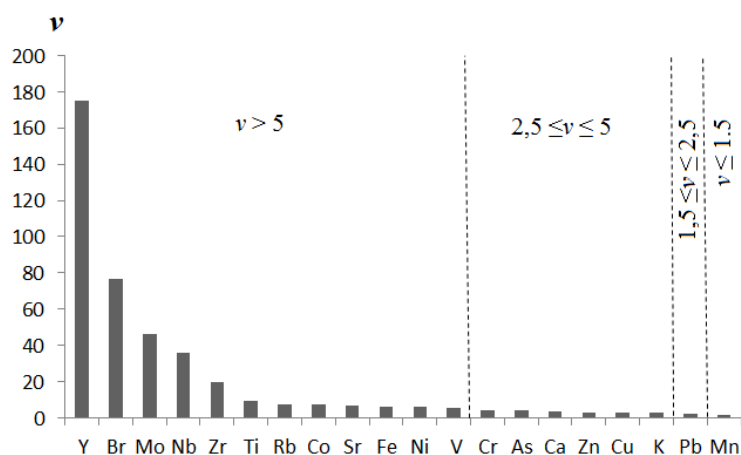


Рис. 2. Соотношения максимальных к минимальным значениям концентраций ($V = C_{\max}/C_{\min}$) в листьях растений

Fig. 2. Ratio between maximal and minimal concentrations ($V = C_{\max}/C_{\min}$) in plant leaves

Таблица 2

Содержание элементов в листьях и стеблях растений Горного Алтая
(K и Ca даны в мг/г от сухой массы, остальные элементы – мг/кг)

Table 2

Content of elements in the leaves and stems of the Mountain Altai plants
(K and Ca are given in mg/g of dry solid matter, the other elements are in mg/kg)

Элемент	<i>P. fruticososa</i>	<i>S. altaiensis</i> ¹	<i>S. altaiensis</i> ²	<i>M. longifolia</i>	<i>C. bungei</i>	<i>C. pygmaea</i>	<i>C. pygmaea subsp. altaica</i>
Листья [Leaves]							
K	8 ± 0^3	17 ± 1	21 ± 1	12 ± 1	16 ± 1	9 ± 0	11 ± 1
Ca	7 ± 1	17 ± 1	16 ± 1	10 ± 1	18 ± 1	26 ± 2	13 ± 1
Ti	14 ± 4	9 ± 2	7 ± 2	8 ± 2	5 ± 1	7 ± 2	44 ± 2
V	$0,1 \pm 0,0$	$0,5 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,0$	$0,3 \pm 0,1$
Cr	н.о. ⁴	н.о.	н.о.	5 ± 3	н.о.	н.о.	4 ± 3

Окончание табл. 2

Элемент	<i>P. fruticosa</i>	<i>S. altaiensis</i> ¹	<i>S. altaiensis</i> ²	<i>M. longifolia</i>	<i>C. bungei</i>	<i>C. pygmaea</i>	<i>C. pygmaea</i> subsp. <i>altaica</i>
Mn	80 ± 3	102 ± 4	87 ± 3	72 ± 3	77 ± 3	95 ± 4	102 ± 4
Fe	222 ± 9	146 ± 6	114 ± 5	304 ± 12	178 ± 7	179 ± 7	726 ± 29
Co	0,1 ± 0,0	н.о.	н.о.	0,1 ± 0,0	н.о.	н.о.	0,2 ± 0,1
Ni	1,6 ± 0,6	0,8 ± 0,3	0,8 ± 0,3	4,1 ± 1,6	2,1 ± 0,8	3,2 ± 0,1	4,6 ± 0,2
Cu	4,9 ± 0,2	4,9 ± 0,2	5,9 ± 0,3	9,3 ± 0,5	5,3 ± 0,3	13,3 ± 0,7	7,1 ± 0,4
Zn	25 ± 1	20 ± 1	27 ± 1	21 ± 1	23 ± 1	48 ± 2	54 ± 3
As	0,1 ± 0,0	0,6 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,4 ± 0,0
Br	1,1 ± 0,1	0,3 ± 0,0	0,3 ± 0,03	10,8 ± 0,9	2,2 ± 0,2	20,5 ± 1,6	7,5 ± 0,6
Rb	14 ± 1	5 ± 0	5 ± 0	26 ± 2	6 ± 1	4 ± 0	28 ± 2
Sr	83 ± 6	57 ± 4	97 ± 7	189 ± 13	70 ± 5	386 ± 27	128 ± 9
Y	0,8 ± 0,1	1,1 ± 0,1	н.о.	33 ± 4	н.о.	0,4 ± 0,0	2,1 ± 0,2
Zr	4,3 ± 0,7	0,7 ± 0,1	1,1 ± 0,2	3,2 ± 0,5	3,7 ± 0,6	5,7 ± 0,9	13,3 ± 2,1
Nb	1,0 ± 0,1	1,6 ± 0,1	1,0 ± 0,1	н.о.	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,0	2,1 ± 0,2
Mo	0,4 ± 0,0	0,6 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,4 ± 0,0	н.о.	1,5 ± 0,1	0,1 ± 0,0
Pb	0,9 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,1 ± 0,2	1,7 ± 0,2	0,9 ± 0,1	1,9 ± 0,3	2,0 ± 0,3
Стебли [Stems]							
K	11 ± 1	7 ± 0	6 ± 0	13 ± 1	16 ± 1	12 ± 1	8 ± 0
Ca	6 ± 0	8 ± 1	6 ± 0	3 ± 0	21 ± 2	19 ± 1	23 ± 2
Ti	13 ± 1	10 ± 1	5 ± 0	5 ± 0	24 ± 1	10 ± 0	68 ± 3
V	0,4 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,1 ± 0,0	0,7 ± 0,1
Cr	1,4 ± 0,9	2,0 ± 1,3	0,6 ± 0,4	1,0 ± 0,6	6,3 ± 0,4	2,0 ± 1,3	7,4 ± 0,4
Mn	64 ± 3	37 ± 1	35 ± 1	17 ± 1	36 ± 1	56 ± 2	85 ± 3
Fe	162 ± 6	78 ± 3	59 ± 2	94 ± 4	371 ± 15	282 ± 11	1029 ± 41
Co	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,04 ± 0,02	0,11 ± 0,04	0,08 ± 0,03	0,33 ± 0,12
Ni	1,7 ± 0,1	0,7 ± 0,0	0,8 ± 0,0	5,0 ± 0,2	6,6 ± 0,3	6,9 ± 0,3	4,5 ± 0,2
Cu	5,9 ± 0,3	4,5 ± 0,2	4,6 ± 0,2	8,3 ± 0,4	5,3 ± 0,3	7,7 ± 0,4	6,4 ± 0,3
Zn	40 ± 2	29 ± 1	25 ± 1	15 ± 1	28 ± 1	32 ± 2	44 ± 2
As	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	1,1 ± 0,0	0,3 ± 0,1	0,4 ± 0,01	0,1 ± 0,0	0,4 ± 0,0
Br	3,9 ± 0,3	0,04 ± 0,0	0,1 ± 0,0	11,7 ± 0,9	6,2 ± 0,5	30,4 ± 2,4	7,2 ± 0,6
Rb	22 ± 2	4 ± 0	3 ± 0	20 ± 2	5 ± 0	4 ± 0	18 ± 2
Sr	110 ± 8	46 ± 3	64 ± 4	82 ± 6	91 ± 6	246 ± 17	200 ± 15
Y	1,5 ± 0,2	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,01	3,8 ± 0,5	0,7 ± 0,1	0,4 ± 0,0	4,5 ± 0,6
Zr	4,6 ± 0,7	0,3 ± 0,0	0,4 ± 0,1	2,2 ± 0,4	7,0 ± 1,1	8,5 ± 1,4	21,8 ± 3,5
Nb	0,4 ± 0,0	2,4 ± 0,2	1,5 ± 0,1	0,1 ± 0,0	1,5 ± 0,1	0,5 ± 0,0	1,5 ± 0,1
Mo	0,2 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,0	4,8 ± 0,5	0,5 ± 0,1
Pb	0,6 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,5 ± 0,2	1,3 ± 0,2	1,7 ± 0,2	1,0 ± 0,1	2,2 ± 0,3

¹ Растения собраны в Усть-Коксинском районе [Plants collected in Ust-Koksinsky district].² Растения собраны в Онгудайском районе [Plants collected in Ongudai district].³ Среднее значение ± стандартное отклонение [Mean value ± standard deviation].⁴ н.о. – концентрация элемента ниже предела обнаружения (0,01 мг/кг) [b.l. is element concentration below the detection limit (0,1mg/kg)].

В стеблях разных видов растений содержание Cu варьирует на малом уровне ($v = 1,8$), а остальных элементов – на среднем и высоком (рис. 3). Наиболее значительные различия отмечены в содержании Br, Zr, Y, Mo в стеблях растений, максимальное накопление этих элементов свойственно представителям рода *Caragana*. В целом наибольшая сумма макроэлементов (K + Ca) отмечена в стеблях растений рода *Caragana*, а наименьшая – в стеблях *S. altaiensis*. Суммарное содержание микроэлементов также выше в стеблях растений рода *Caragana*, ниже – в стеблях *S. altaiensis* по сравнению с остальными видами.

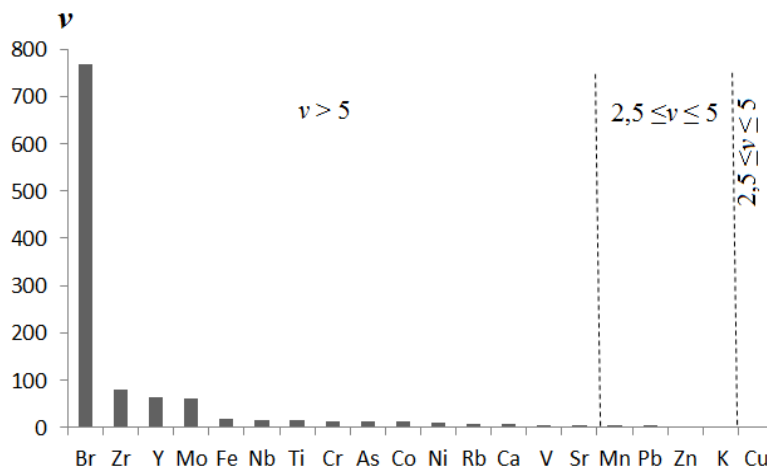


Рис. 3. Соотношения максимальных к минимальным значениям концентраций ($V = C_{\max}/C_{\min}$) в стеблях растений

Fig. 3. Ratio of maximal and minimal concentrations ($V = C_{\max}/C_{\min}$) in plant stems

Таким образом, установлено, что содержание большинства химических элементов в надземных органах представителей разных таксонов варьирует на высоком уровне. По высокому содержанию Ca, Fe, Sr, Mn, Zn, Ti, Zr, Mo и Co выделяются листья и стебли растений рода *Caragana*, преимущественно *C. pygmaea subsp. altaica*; по Y, Rb, Br, Cu, Cr и Ni – листья *M. longifolia*, K – листья *S. altaiensis*. Различия в содержании элементов в надземных органах у видов растений разных таксонов зависят от множества факторов, в том числе связаны с содержанием элементов в почве и таксономической принадлежностью.

Можно заключить, что наиболее высокое накопление макро- и микроэлементов свойственно представителям рода *Caragana* из сем. *Fabaceae*, низкое – представителям *Potentilla* и *Sibiraea* из сем. *Rosaceae*, произрастающих в обследованных местообитаниях Юго-Восточного и Центрального Алтая.

Полученные данные по содержанию 20 элементов в образцах различных видов растений достоверны и могут быть включены в базы данных химического состава растений.

Список литературы

1. Ильин В. Б., Сысо А. И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 231с.
2. Чупарина Е. В., Гуничева Т. Н. Состояние и проблемы рентгенофлуоресцентного анализа растительных материалов // Аналитика и контроль. 2004. Т. 8, № 3. С. 211–226.
3. Рождественская Т. А., Ельчинова О. А., Пузанов А. В. Элементный химический состав растений Горного Алтая и факторы, его определяющие // Биоразнообразие, про-

- блемы экологии Горного Алтая и сопредельных территорий: настоящее, прошлое и будущее: Материалы Междунар. конф. Горно-Алтайск, 2008. С. 110–114.
4. **Алексеева-Попова Н. В., Дроздова И. В.** Микроэлементный состав растений полярного Урала в контрастных геохимических условиях // *Экология*. 2013. № 2. С. 90–98.
 5. **Watanabe T., Broadley M. R., Jansen S., White P. J., Takada J., Satake K., Takamatsu T., Tuah S. J., Osaki M.** Evolutionary control of leaf element composition in plants. *New Phytologist.*, 2007, vol. 174, p. 516–523.
 6. Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Семейства Actinidiaceae – Malvaceae, Euphorbiaceae – Haloragaceae / Отв. ред. А. Л. Буданцев. СПб.; М.: Тов-во научных изданий КМК, 2009. Т. 2. С. 207–208.
 7. Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Семейства Fabaceae – Apiaceae / Отв. ред. А. Л. Буданцев. СПб.; М.: Тов-во научных изданий КМК, 2009. Т. 3. С. 28.
 8. **Masson P., Dalix T. & Bussi re S.** Determination of Major and Trace Elements in Plant Samples by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, vol. 41, no. 3, p. 231–243. DOI 10.1080/00103620903460757
 9. **Yildiz D., Kula I., Ay G., BaslaR S. and Dogan Y.** Determination of Trace Elements in the Plants of Mt. Bozdag, Izmir, Turkey. *Arch. Biol. Sci.*, 2010, vol. 62 (3), p. 731–738. DOI 10.2298/ABS1003731Y
 10. **Отмахов В. И., Рабцевич Е. С., Петрова Е. В., Шилова И. В., Шелег Е. С., Бабенков Д. Е.** Элементный анализ лекарственных растений Сибири методом дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии с многоканальным анализатором эмиссионных спектров // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85 (1 (II)). С. 60–66. DOI 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-60-66
 11. **Чупарина Е. В., Мартынов А. М.** Применение неdestructивного РФА для определения элементного состава лекарственных растений // *Журнал аналитической химии*. 2011. Т. 66, № 4. С. 399–405.
 12. **Мазалов Л. Н.** Рентгеновские спектры. Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2003. 329 с.
 13. **Trunova V. A., Sidorina A. V., Zolotarev K. V.** Using external standard method with absorption correction in SRXRF analysis of biological tissues. *X-ray spectrometry*, 2015, vol. 44, no. 4, p. 226–229.
 14. **Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V. et al.** Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 19–26.
 15. **Kulipanov G. N., Mezentsev N. A., Pindyurin V. F.** Synchrotron radiation in Novosibirsk: The first 13 years. *Journal of Structural Chemistry*, 2016, vol. 57, no. 7, p. 1277–1287.
 16. **Дарьин А. В., Ракшун Я. В.** Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. 2013. № 2 (51). С. 112–118.
 17. **Арнаутов Н. А.** Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ: Метод. рекомендации. Новосибирск, 1990. 220 с.
 18. **Касимов Н. С., Власов Д. С.** Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // *Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География*. 2015. № 2. С. 7–17.

References

1. **И'ин В. В., Сысо А. И.** Mikrojelementy i tjazhelye metally v pochvah i rastenijah Novosibirskoj oblasti. Novosibirsk, Nauka, 2001. 231 p. (in Russ.)

2. **Chuparina E. V., Gunicheva T. N.** Sostojanie i problemy rentgenofluorescentnogo analiza rastitel'nyh materialov [State and Problems of X-Ray fluorescence analysis of Plants materials]. *Analitika & kontrol'*, 2004, vol. 8, № 3, p. 211–226. (in Russ.)
3. **Rozhdestvenskaya T. A., El'chinina O. A., Puzanov A. V.** Elementnyj himicheskij sostav rastenij Gornogo Altaya i faktory, ego opredelyayushchie // Bioraznoobrazie, problemy jekologii Gornogo Altaja i sopredel'nyh territorij: nastojashhee, proshloe i budushhee: materialy mezhdunar. konf. Gorno-Altajsk, 2008, p. 110–114. (in Russ.)
4. **Alexeeva-Popova N. V., Drozdova I. V.** Micronutrient composition of plants in the Polar Urals under contrasting geochemical conditions. *Russian Journal of Ecology*, 2013, № 2, p. 90–98. (in Russ.)
5. **Watanabe T., Broadley M. R., Jansen S., White P. J., Takada J., Satake K., Takamatsu T., Tuah S. J., Osaki M.** Evolutionary control of leaf element composition in plants. *New Phytologist.*, 2007, vol. 174, p. 516–523.
6. Rastitel'nye resursy Rossii: Dikorastushhie cvetkovye rastenija, ih komponentnyj sostav i biologicheskaja aktivnost'. Semejstva Actinidiaceae – Malvaceae, Euphorbiaceae – Haloragaceae Vol. 2. A. L. Budancev editor. St. Peterburg: Moscow: Tovarishestvo nauchnyh izdanij KMK, 2009, p. 207–208. (in Russ.)
7. Rastitel'nye resursy Rossii: Dikorastushhie cvetkovye rastenija, ih komponentnyj sostav i biologicheskaja aktivnost'. Semejstva Fabaceae – Apiaceae. Vol. 3. A. L. Budancev editor. St. Peterburg: Moscow: Tovarishestvo nauchnyh izdanij KMK, 2010, p. 28. (in Russ.)
8. **Masson P., Dalix T. & Bussi re S.** Determination of Major and Trace Elements in Plant Samples by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, vol. 41, no. 3, p. 231–243. DOI 10.1080/00103620903460757
9. **Yildiz D., Kula I., Ay G., Baslar S. and Dogan Y.** Determination of Trace Elements in the Plants of Mt. Bozdag, Izmir, Turkey. *Arch. Biol. Sci.*, 2010, vol. 62 (3), p. 731–738. DOI 10.2298/ABS1003731Y
10. **Otmakhov V. I., Rabtsevich E. S., Petrova E. V., Shilova I. V., Sheleg E. S., Babenkov D. E.** Elemental analysis of Siberian medicinal plants using arc atomic emission spectrometry with a multichannel analyzer of emission spectra. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2019, vol. 85 (1 (II)), p. 60–66. (in Russ.) DOI 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-60-66
11. **Chuparina E. V., Martynov A. M.** Application of Nondestructive X-Ray Fluorescence Analysis to Determine the Element Composition of Medicinal Plants. *Journal of Analytical Chemistry*, 2011, vol. 66, № 4, p. 399–405. (in Russ.)
12. **Mazalov L. N.** Rentgenovskie spektry. Novosibirsk, 2003, 329 p. (in Russ.)
13. **Trunova V. A., Sidorina A. V., Zolotarev K. V.** Using external standard method with absorption correction in SRXRF analysis of biological tissues. *X-ray spectrometry*, 2015, vol. 44, no. 4, p. 226–229.
14. **Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V. et al.** Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 19–26.
15. **Kulipanov G. N., Mezentsev N. A., Pindyurin V. F.** Synchrotron radiation in Novosibirsk: The first 13 years. *Journal of Structural Chemistry*, 2016, vol. 57, no. 7, p. 1277–1287.
16. **Darin A. V., Rakshun Y. V.** Metodika vypolnenija izmerenij pri opredelenii jelementnogo sostava obrazcov gornyh porod metodom rentgenofluorescentnogo analiza s ispol'zovaniem sinhrotronnogo izlucheniya iz nakopitelja VJePP-3 [Method of measurement during determination of the elemental composition of rock samples by X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation from the VEPP-3 storage ring]. *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State University*, 2013, № 2 (51), p. 112–118. (in Russ.)
17. **Arnautov N. A.** Standartnye obrazcy himicheskogo sostava prirodnyh mineral'nyh veshhestv. Metodicheskie rekomendacii. Novosibirsk, 1990, 220 p. (in Russ.)

18. **Kasimov N. S., Vlasov D. V.** Klarki himicheskikh jelementov kak jetalony sravnenija v ekogeohimii. [Clarks of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry]. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*, 2015, № 2, p. 7–17. (in Russ.)

*Материал поступил в редколлегию
Received
02.09.2019*

Сведения об авторах / Information about the Authors

Храмова Елена Петровна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (ул. Золотодолинская, 101, Новосибирск, 630090, Россия)

Elena P. Khramova, Central Siberian Botanical Gardens SB RAS (101 Zolotodolinskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

khramova@ngs.ru

Чанкина Ольга Васильевна, научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия)

Olga V. Chankina, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (3 Institutetskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

chankina@ns.kinetics.nsc.ru

Сыева Серафима Яковлевна, кандидат биологических наук, руководитель филиала, Горно-Алтайский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный Алтайский научный центр агробιοтехнологий» (ул. Катунская, 2, с. Майма, Республика Алтай, 649100, Россия)

Serafima Ya. Syeva, Gorno-Altay research Institute of agriculture – branch of Federal Altai Scientific Centre of Agro-BioTechnologies (Maima village, Altai Republic, Russian Federation)

serafima-altai@mail.ru

Костикова Вера Андреевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (ул. Золотодолинская, 101, Новосибирск, 630090, Россия)

Vera A. Kostikova, Central Siberian Botanical Gardens SB RAS (101 Zolotodolinskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

serebryakovava@mail.ru

Ракшун Яков Валерьевич, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Yakov V. Rakshun, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

Ya.V.Rakshun@inp.nsk.su

Сороколетов Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Dmitry S. Sorokoletov, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)