

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КУСТАРНИКАМИ ГОРНОГО АЛТАЯ

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

¹Центральный сибирский ботанический сад СО РАН,
630055, Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101, e-mail: khramova@ngs.ru
²Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН,
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3

³Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий,
649100, Республика Алтай, Майминский р-н, с. Майма, ул. Катунская, 2

Определены состав и содержание 20 химических элементов семи видов кустарников из трех семейств, произрастающих в Горном Алтае, и в образцах почв из мест их обитания. Наиболее высокое накопление макро- и микроэлементов свойственно представителям рода *Caragana* из сем. *Fabaceae*, низкое – видам растений *Comarum*, *Sibireae* и *Dasiphora* из сем. *Rosaceae*, а также *Myricaria* из сем. *Tamaricaceae*. Полукустарник *Comarum salesovianum* из сем. *Rosaceae* выделяется по повышенному накоплению микроэлементов в стеблях по сравнению с кустарниками, за исключением *Caragana pygmaea* subsp. *altaica*. Показано, что содержание Br, Y, Mo, Nb, Zr, Ti, Rb, Co, Sr, Fe, Ni и V в листьях и стеблях и дополнительно Mn, Ca, Cr и As в стеблях представителей разных таксонов варьирует в большом диапазоне (величина их соотношений $C_{\max}/C_{\min} > 5$), содержание Cr, As, Ca, Zn, Cu, K в листьях и Pb, Zn, K в стеблях – в среднем ($2.5 \leq C_{\max}/C_{\min} \leq 5$), Pb в листьях и Cu в стеблях – в малом ($1.5 \leq C_{\max}/C_{\min} \leq 2.5$), а Mn в листьях растений – в очень малом диапазоне ($C_{\max}/C_{\min} \leq 1.5$).

Ключевые слова: *Dasiphora*, *Comarum*, *Sibireae*, *Caragana*, *Myricaria*, элементный состав, Горный Алтай.

FEATURES OF THE ACCUMULATION OF MINERAL ELEMENTS OF THE MOUNTAIN ALTAI SHRUBS

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

¹Central Siberian Botanical Gardens, SB RAS,
630090, Novosibirsk, Zolotodolinskaya str., 101, e-mail: khramova@ngs.ru
²Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, SB RAS,
630090, Novosibirsk, Institutskaya str., 3

³Gorno-Altay Research Institute of Agriculture – Branch of Federal Altai Scientific Centre of Agro-BioTechnologies,
649100, Altai Republic, Maima village, Katunskaya str., 2

Reliable data on the contents of 20 elements in different organs of plants of seven species of the genus *Dasiphora*, *Comarum*, *Sibireae*, *Caragana* and *Myricaria* were obtained for the first time. The highest accumulation of macro- and microelements is typical of the representatives of *Caragana* of the *Fabaceae* family. The lowest content was recorded in the stems of *Sibireae* and *Dasiphora* (*Rosaceae*), and *Myricaria* (*Tamaricaceae*). Trace in the stems of *Comarum salesovianum* is distinguished by an increased accumulation of compared with shrubs, with the exception of *Caragana pygmaea* subsp. *altaica*. The amount of elements in leaves and stems of plants – Br, Y, Mo, Nb, Zr, Ti, Rb, Co, Sr, Fe, Ni and V and additionally in stems Mn, Ca, Cr and As varies within a wide range ($C_{\max}/C_{\min} > 5$), Cr, As, Ca, Zn, Cu, K in leaves and Pb, Zn, K in stems – within a middle range ($2.5 \leq C_{\max}/C_{\min} \leq 5$), in leaves of plants Pb, in stems Cu – within small ($1.5 \leq C_{\max}/C_{\min} \leq 2.5$) and in leaves of plants Mn with very small ($C_{\max}/C_{\min} \leq 1.5$) range.

Key words: *Dasiphora*, *Comarum*, *Sibireae*, *Caragana*, *Myricaria*, element composition, the Mountain Altai.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование элементного состава растений, произрастающих в естественных условиях, происходит при одновременном воздействии большого числа факторов, вследствие чего изучение закономерностей поглощения химических элементов ими представляет большую сложность (Ковалевский, 1969). Одним из важных факторов, влияющих на

химизм растений, является видовая принадлежность растений. Из литературы известно, что в процессе эволюции у каждого вида растений генетически закрепились определенные концентрации химических элементов, что позволяет считать элементный состав растений важным систематическим признаком (Ковалевский, 1969; Thompson et

al., 1997; Ильин, Сысо, 2001; Broadley et al., 2004; Чупарина, Гуничева, 2004; Watanabe et al., 2007; Рождественская и др., 2008; Алексеева-Попова, Дроздова, 2013).

Для изучения влияния видовой принадлежности растений на содержание в них элементов выбраны семь видов кустарниковых растений из трех семейств – *Rosaceae*, *Tamaricaceae* и *Fabaceae*, произрастающих в Юго-Восточном и Центральном Алтае.

Кустарники *Dasiphora fruticosa* L. = *Potentilla fruticosa* L. = *Pentaphylloides fruticosa* (L.) O. Schwarz (курильский чай кустарниковый), *Comarum salesovianum* (Steph.) Asch. et Graebn. (сабельник Залесова) и *Sibiraea altaiensis* (Laxm.) Schneid. (сибирка алтайская) из сем. *Rosaceae*; *Myricaria longifolia* (Willd.) Ehrenb. (мирикария длиннолистная) из сем. *Tamaricaceae*; *Caragana bungei* Ledeb. (карагана Бунге), *Caragana pygmaea* (L.) DC. (карагана карликовая) и *Caragana pygmaea* (L.) DC. subsp. *altaica* (Kom.) Bongareva (карагана алтайская) из сем. *Faba-*

ceae, обитающие в Горном Алтае, характеризуются высокой биологической активностью, используются в современной фармации, пищевой промышленности, а также служат кормовой базой для скота в Республике Алтай (Растительные ресурсы..., 2009, 2010; Ligaa et al., 2005). Наиболее подробно из вышеуказанных кустарников исследован элементный состав *D. fruticosa* (Храмова и др., 2000; Khramova et al., 2003; Ельчинова и др., 2008; Рождественская и др., 2008). Остальные виды практически не изучены, в литературных источниках сведения по содержанию минеральных веществ в них отсутствуют либо носят разрозненный характер, что не дает объективного представления об особенностях накопления элементов видами растений разных таксонов.

Цель работы заключалась в выявлении особенностей минерального состава кустарников разных таксонов и установлении видов с высоким содержанием макро- и микроэлементов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом исследований служили образцы семи видов растений из трех семейств, собранные в июле 2017 г. в генеративный период (табл. 1). Следует отметить, что *D. fruticosa* и *C. salesovianum* являются близкородственными видами, отличительным признаком которых служит жизненная форма – кустарник и полукустарник (Флора СССР, 1941; Флора Сибири..., 1988). *D. fruticosa* и *C. salesovianum*, а также *M. longifolia* отобраны в Юго-Восточном Алтае в окрестности с. Бельтир (Кош-Агачский район) в долине р. Талдура. *S. altaiensis*, встречающаяся в России только на территории Алтая, собрана в двух популяциях в Центральном Алтае: в урочище Берозек в долине р. Ело в окрестности с. Ело Онгудайского района и в отрогах Коргонского хребта у подножия Кырлыкского перевала

в окрестности с. Сугаш Усть-Коксинского района. Растения рода *Caragana* представлены тремя видами – *C. bungei* и *C. pygmaea* subsp. *altaica*, произрастающие в Юго-Восточном Алтае в Чуйской степи в окрестности с. Кош-Агач, и *C. pygmaea*, обитающая в окрестности с. Чуй-Оозы Онгудайского района.

Анализировали листья и стебли кустарников, а также образцы почв из местообитаний изучаемых растений. Средний образец составляли из 20–30 особей в стадии цветения – начала плодоношения. Образцы почвы были взяты из корнеобитаемого слоя (10–15 см) методом “конверта”.

Определение элементов в растительных и почвенных образцах проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием

Таблица 1

Местообитания кустарниковых видов в Горном Алтае

Семейство	Вид	Местообитание	Географические координаты		Н, м над ур. м.
			N	E	
<i>Rosaceae</i>	<i>Dasiphora fruticosa</i>	Юго-Восточный Алтай, Кош-Агачский р-н, окр. с. Бельтир, правый берег р. Талдура	49°57'33"	87°55'10"	2084
	<i>Comarum salesovianum</i>	Там же	49°57'33"	87°55'10"	2084
	<i>Sibiraea altaiensis</i>	Центральный Алтай, Онгудайский р-н, окр. с. Ело	50°49'22"	85°18'28"	1250
	<i>Sibiraea altaiensis</i>	Центральный Алтай, Усть-Коксинский р-н, окр. с. Сугаш	50°37'58"	84°54'59"	1285
<i>Tamaricaceae</i>	<i>Myricaria longifolia</i>	Юго-Восточный Алтай, Кош-Агачский р-н, окр. с. Бельтир, левый берег р. Талдура	49°57'33"	87°55'10"	2084
<i>Fabaceae</i>	<i>Caragana bungei</i>	Юго-Восточный Алтай, Кош-Агачский р-н, окр. с. Кош-Агач	50°01'08"	88°38'54"	1760
	<i>Caragana pygmaea</i> subsp. <i>altaica</i>	Там же	50°01'08"	88°38'54"	1760
	<i>Caragana pygmaea</i>	Центральный Алтай, Онгудайский р-н, окр. с. Чуй-Оозы	50°24'20"	86°43'25"	801

синхротронного излучения (РФА СИ) на станции элементного анализа (накопитель ВЭПП-3) Сибирского центра синхротронного и терагерцевого излучения ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск). Навеску воздушно-сухого растительного сырья и почв (1 г) измельчали в агатовой ступке. Затем образцы прессовали в форме таблетки диаметром ~1 см, массой – 30 мг (с поверхностной плотностью 0.04 г/см²). Измерения образцов проводили при энергии возбуждающего излучения 23 кэВ. Время каждого измерения для растительных и почвенных навесок составляло от 300 до 500 секунд. Монохроматизацию синхротронного излучения осуществляли при помощи монохроматора на основе кремниевого кристалла типа “бабочка” с рабочими плоскостями (111). Флуоресцентное излучение регистрировали 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 опубликованы ранее (Дарьин, Ракшун, 2013).

Полученные спектры обрабатывали в программе AXIL, предназначенной для энергодисперсионного спектрометрического анализа, с исполь-

зованием нелинейного метода наименьших квадратов. Концентрацию элементов определяли с использованием метода “внешнего стандарта”. Предел обнаружения составлял от 10⁻⁸ г/г. В качестве образцов сравнения использовали российские стандарты травозлаковой смеси ГСО СОРМ1 и байкальского ила БИЛ-1 (Арнаутов, 1990). Величина ошибки – воспроизводимость результатов анализа – получена путем 10 параллельных измерений стандартного образца СОРМ1 и 5 измерений стандартного образца БИЛ-1 в трех повторностях. Для большинства элементов воспроизводимость по образцу СОРМ1 колебалась в основном в пределах 5–11 %; для титана, ванадия и иттрия – 19–26 %; для свинца, кобальта, ниобия и никеля она – 35–40 %, хрома – 64 %. При этом предел обнаружения для Co, Br, Mo, Rb и Pb составлял 0.01–0.07 ppm, для Sr, Cu, Zn, Ni, Zr, Fe, Mn – 0.1–0.9 ppm 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 %, Zr – 16 %. Предел обнаружения Mo, Nb, Co, Zr, Sr, Br, Y, Rb и Pb изменяется от 0.1 до 0.5 ppm, для остальных элементов – выше 1 ppm.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Минеральный состав представителей родов *Dasiphora*, *Comarum*, *Sibireae*, *Myricaria* и *Caragana*, обитающих в Горном Алтае, определяется не менее чем 20 элементами. Результаты определения их содержания показали своеобразие кустарников разных таксонов.

Прежде всего следует отметить, что почвы из точек отбора растительных образцов по содержанию элементов варьируют незначительно (табл. 2).

При анализе различий между образцами почв из разных местообитаний использованы отношения максимальных и минимальных значений содержания *i*-го элемента ($v = C_{\max}/C_{\min}$), характеризующие ширину выборки (рис. 1). Количественной мерой различий послужили отношения элементов, предложенные Н.С. Касимовым и Д.В. Власовым (2015). По величине показателя химические элементы разделены ими на четыре 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. Наименьшую изменчивость, в этом плане представляют концентрации K, Cr, Fe и Co, наибольшую – Br, As и Mo (см. рис. 1). По высокому содержанию Br (17 мг/кг) выделяются почвы местообитаний *D. fruticosa*, As (20–50 мг/кг) – *C. bungei* и *C. pygmaea* subsp. *altaica*, Mo (0.8 мг/кг) – *C. salesovianum* (см. табл. 1). Содержание остальных элементов в образцах достаточно стабильно, различия варьируют в диапазоне 1.5–2.5.

Сравнительный анализ кустарников различных таксономических групп показал, что в целом элементный состав исследуемых растений сходен, варьирование состава отмечено в основном в листьях для таких элементов, как Cr, Co, Y, Nb, Mo, и в концентрациях, близких к пределу обнаружения (0.1 мг/кг) (табл. 3).

Наибольшая сумма макроэлементов (K + Ca) установлена в листьях *S. altaicensis* вне зависимости от местообитания (35–37 мг/г), в основном за счет повышенного содержания калия, наименьшая (15 мг/г) – в листьях *D. fruticosa*. Наиболее высокое количество кальция свойственно двум представителям рода *Caragana* – *C. bungei* и *C. pygmaea*.

По максимальному суммарному содержанию микроэлементов в листьях выделяется *C. pygmaea* subsp. *altaica* (1126 мг/кг), несколько ниже в листьях *C. pygmaea* и *M. longifolia* (768 и 688 мг/кг соответственно). Минимальная сумма микроэлементов обнаружена в листьях *S. altaicensis* (351 мг/кг) вне зависимости от местообитания.

Сравнивая содержание отдельных элементов в листьях, можно отметить, что в меньшей мере изменяется Mn (рис. 2). В малом диапазоне колеблется концентрация Pb ($v = 2.3$), на среднем уровне варьируют Cr, As, Ca, Zn Cu и K. Количество остальных элементов изменяется в широком диапазоне ($v > 5$). По наибольшему содержанию Y и Cr выделяются листья *M. longifolia*; Br, Mo, Sr, Cu и

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

Элемент	1*	2	3	4	5
K	18 ± 1**	17 ± 1	12 ± 1	14 ± 1	12 ± 1
Ca	36 ± 3	20 ± 1	21 ± 2	38 ± 3	28 ± 2
Ti	2916 ± 146	3382 ± 167	2145 ± 107	3253 ± 163	3211 ± 161
V	65 ± 5	62 ± 5	46 ± 4	94 ± 8	66 ± 5
Cr	43 ± 3	49 ± 3	36 ± 2	49 ± 3	47 ± 3
Mn	701 ± 28	954 ± 37	579 ± 23	675 ± 27	724 ± 29
Fe	27 ± 1	30 ± 1	23 ± 1	29 ± 1	26 ± 1
Co	12 ± 1	13 ± 1	11 ± 1	12 ± 1	12 ± 1
Ni	36 ± 1	44 ± 2	32 ± 1	25 ± 1	41 ± 2
Cu	33 ± 2	26 ± 1	20 ± 1	26 ± 1	19 ± 1
Zn	82 ± 4	76 ± 4	39 ± 2	52 ± 3	52 ± 3
As	6.0 ± 0.2	13 ± 0.4	2.8 ± 0.1	49.7 ± 1.5	20.0 ± 0.6
Br	16.9 ± 1.4	3 ± 0.2	0.4 ± 0	1.0 ± 0.1	1.6 ± 0.1
Rb	60 ± 5	63 ± 6	35 ± 3	59 ± 5	62 ± 6
Sr	234 ± 16	177 ± 13	200 ± 14	160 ± 11	133 ± 9
Y	27 ± 3	46 ± 5	17 ± 2	18 ± 2	33 ± 4
Zr	141 ± 23	143 ± 23	131 ± 21	80 ± 13	112 ± 18
Nb	8 ± 1	10 ± 1	6 ± 1	5 ± 0	9 ± 1
Mo	0.7 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.2 ± 0	0.3 ± 0	0.2 ± 0
Pb	18 ± 2	24 ± 3	17 ± 2	13 ± 2	13 ± 2

* Вид растений: 1 – *Dasiphora fruticosa*; 2 – *Comarum salesovianum*; 3 – *Myricaria longifolia*; 4 – *Caragana bungei*; 5 – *Caragana pygmaea* subsp. *altaica*.

** Среднее значение ± стандартное отклонение.

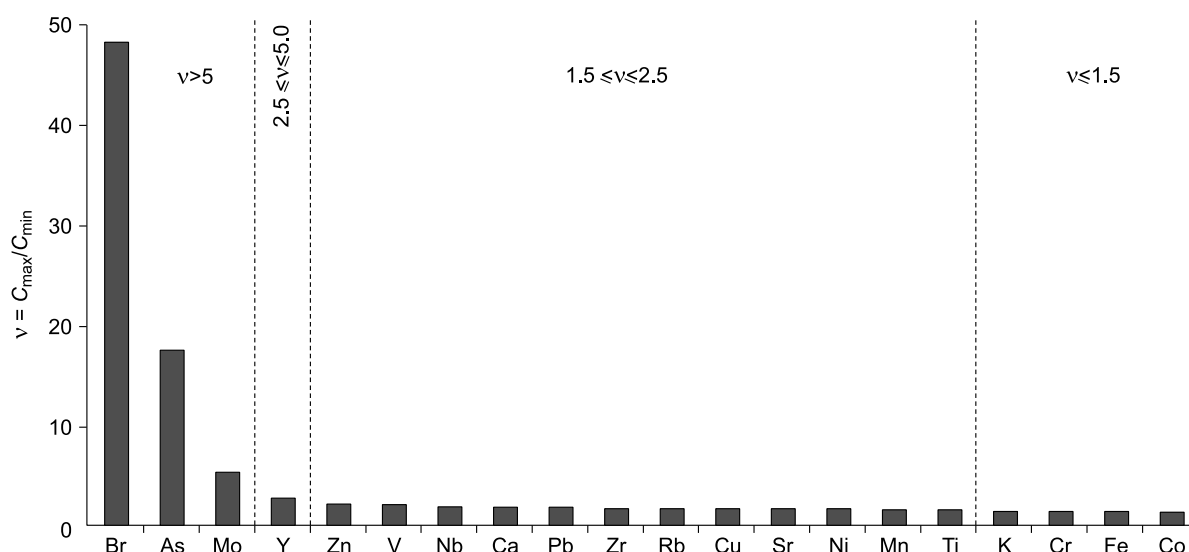


Рис. 1. Соотношения максимальных к минимальным значениям концентраций элементов ($v = C_{\max}/C_{\min}$) в образцах почв из разных местообитаний растений.

Са – листья *C. pygmaea*; Fe, Ti, Co, Ni, Zn, Rb и Zn – листья *C. pygmaea* subsp. *altaica*.

В стеблях разных видов растений на малом уровне ($v = 2$) варьирует содержание Cu, а остальных элементов – на среднем и высоком (рис. 3). Наиболее значительные различия отмечены в содержании Br, Zr, Y и Mo в стеблях растений, максимальное накопление этих элементов свойственно представителям рода *Caragana* (см. табл. 3).

Наибольшая сумма макроэлементов (K + Ca) отмечена в стеблях растений рода *Caragana* (36 мг/г), а наименьшая – в стеблях *S. altaicensis* (12–15 мг/г). В целом виды растений рода *Caragana* (сем. *Fabaceae*) выделяются по более высокому содержанию Са, причем в стеблях их концентрация выше по сравнению с листьями (рис. 4). У представителей других семейств содержание кальция выше в листьях, чем в стеблях.

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

Элемент	<i>Dasiphora fruticosa</i>	<i>Comarum salesovianum</i>	<i>Sibireae altaiensis</i> ¹	<i>Sibireae altaiensis</i> ²	<i>Myricaria longifolia</i>	<i>Caragana bungei</i>	<i>Caragana pygmaea</i>	<i>Caragana pygmaea</i> subsp. <i>altaica</i>
<i>Листья</i>								
K	8 ± 1 ³	14 ± 1	17 ± 1	21 ± 1	12 ± 1	16 ± 1	9 ± 0	11 ± 1
Ca	7 ± 1	8 ± 1	17 ± 1	16 ± 1	10 ± 1	18 ± 1	26 ± 2	13 ± 1
Ti	14 ± 4	10 ± 1	9 ± 2	7 ± 2	8 ± 2	5 ± 1	7 ± 2	44 ± 2
V	0.1 ± 0	0.2 ± 0.01	0.5 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.1 ± 0	0.3 ± 0.1
Cr	Н.о. ⁴	2.8 ± 0.2	Н.о.	Н.о.	5 ± 3	Н.о.	Н.о.	4 ± 3
Mn	80 ± 3	106 ± 4	102 ± 4	87 ± 3	72 ± 3	77 ± 3	95 ± 4	102 ± 4
Fe	222 ± 9	311 ± 14	146 ± 6	114 ± 5	304 ± 12	178 ± 7	179 ± 7	726 ± 29
Co	0.1 ± 0	0.1 ± 0	Н.о.	Н.о.	0.1 ± 0	Н.о.	Н.о.	0.2 ± 0.1
Ni	1.6 ± 0.6	1.9 ± 0.1	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	3.7 ± 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	27 ± 1	20 ± 1	27 ± 1	21 ± 1	23 ± 1	48 ± 2	54 ± 3
As	0.1 ± 0	0.2 ± 0	0.6 ± 0	0.5 ± 0	0.3 ± 0	0.2 ± 0	0.5 ± 0	0.4 ± 0
Br	1.1 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.3 ± 0	0.3 ± 0.03	10.8 ± 0.9	2.2 ± 0.2	20.5 ± 1.6	7.5 ± 0.6
Rb	14 ± 1	9 ± 1	5 ± 0	5 ± 0	26 ± 2	6 ± 1	4 ± 0	28 ± 2
Sr	83 ± 6	55 ± 4	57 ± 4	97 ± 7	189 ± 13	70 ± 5	386 ± 27	128 ± 9
Y	0.8 ± 0.1	0.89 ± 0.10	1.1 ± 0.1	Н.о.	33 ± 4	Н.о.	0.4 ± 0	2.1 ± 0.2
Zr	4.3 ± 0.7	6 ± 1	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	1.9 ± 0.2	1.6 ± 0.1	1.0 ± 0.1	Н.о.	0.2 ± 0	0.1 ± 0	2.1 ± 0.2
Mo	0.4 ± 0	0.1 ± 0	0.6 ± 0.1	0.7 ± 0.1	0.4 ± 0	Н.о.	1.5 ± 0.1	0.1 ± 0
Pb	0.9 ± 0.1	1.0 ± 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
K + Ca	15	22	34	37	22	34	35	24
(сумма макроэлементов)								
Сумма микроэлементов	453	538	351	351	688	376	768	1126
<i>Стебли</i>								
K	11 ± 1	12 ± 1	7 ± 0	6 ± 0	13 ± 1	16 ± 1	12 ± 1	8 ± 0
Ca	6 ± 0	7 ± 1	8 ± 1	6 ± 0	3 ± 0	21 ± 2	19 ± 1	23 ± 2
Ti	13 ± 1	36 ± 2	10 ± 1	5 ± 0	5 ± 0	24 ± 1	10 ± 0	68 ± 3
V	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.1 ± 0	0.7 ± 0.1
Cr	1.4 ± 0.9	3.0 ± 0.2	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	109 ± 4	37 ± 1	35 ± 1	17 ± 1	36 ± 1	56 ± 2	85 ± 3
Fe	162 ± 6	511 ± 23	78 ± 3	59 ± 2	94 ± 4	371 ± 15	282 ± 11	1029 ± 41
Co	0.04 ± 0.01	0.16 ± 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	2.5 ± 0.1	0.7 ± 0	0.8 ± 0	5.0 ± 0.2	6.6 ± 0.3	6.9 ± 0.3	4.5 ± 0.2
Cu	5.9 ± 0.3	4.1 ± 0.2	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	33 ± 2	29 ± 1	25 ± 1	15 ± 1	28 ± 1	32 ± 2	44 ± 2
As	0.1 ± 0.0	0.21 ± 0.01	0.2 ± 0	1.1 ± 0	0.3 ± 0.1	0.4 ± 0.01	0.1 ± 0	0.4 ± 0
Br	3.9 ± 0.3	3.2 ± 0.2	0.04 ± 0	0.1 ± 0	11.7 ± 0.9	6.2 ± 0.5	30.4 ± 2.4	7.2 ± 0.6
Rb	22 ± 2	10 ± 1	4 ± 0	3 ± 0	20 ± 2	5 ± 0	4 ± 0	18 ± 2
Sr	110 ± 8	87 ± 6	46 ± 3	64 ± 4	82 ± 6	91 ± 6	246 ± 17	200 ± 15
Y	1.5 ± 0.2	2.0 ± 0.2	0.1 ± 0	0.1 ± 0.01	3.8 ± 0.5	0.7 ± 0.1	0.4 ± 0	4.5 ± 0.6
Zr	4.6 ± 0.7	32 ± 5	0.3 ± 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	1.7 ± 0.2	2.4 ± 0.2	1.5 ± 0.1	0.1 ± 0	1.5 ± 0.1	0.5 ± 0	1.5 ± 0.1
Mo	0.2 ± 0	0.17 ± 0.02	0.3 ± 0	0.1 ± 0	0.2 ± 0	0.1 ± 0	4.8 ± 0.5	0.5 ± 0.1
Pb	0.6 ± 0.1	1.0 ± 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
K + Ca	17	19	15	12	16	37	31	31
(сумма макроэлементов)								
Сумма микроэлементов	431	836	215	202	268	590	693	1501

¹ Растения собраны в Усть-Коксинском районе.

² Растения собраны в Онгудайском районе.

³ Среднее значение ± стандартное отклонение.

⁴ Н.о. – концентрация элемента ниже предела обнаружения (0.01 мг/кг).

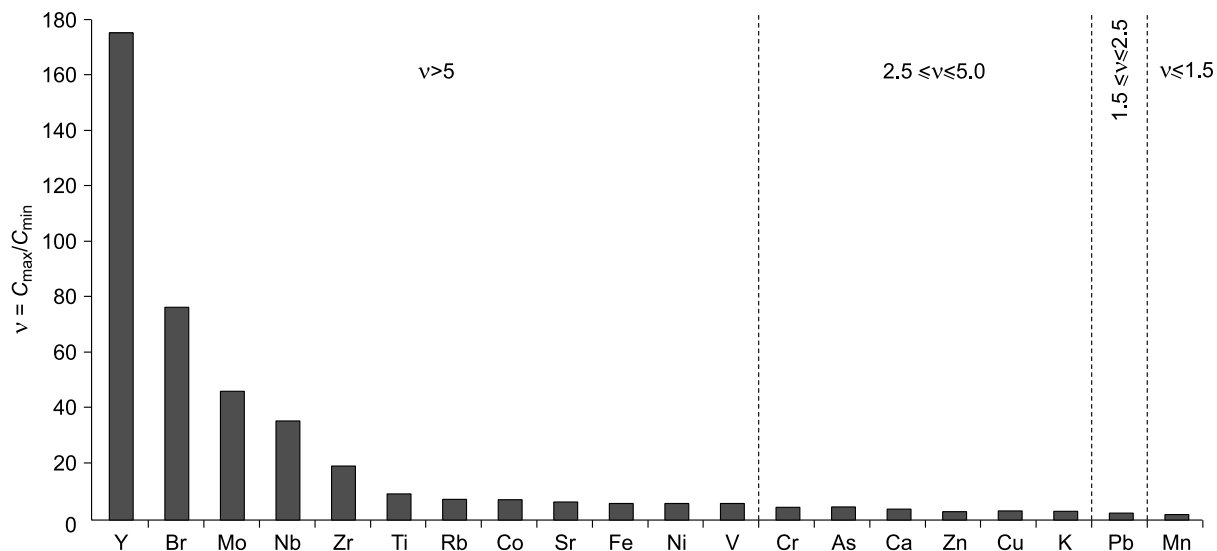


Рис. 2. Соотношения максимальных к минимальным значениям концентраций ($v = C_{\max}/C_{\min}$) в листьях растений.

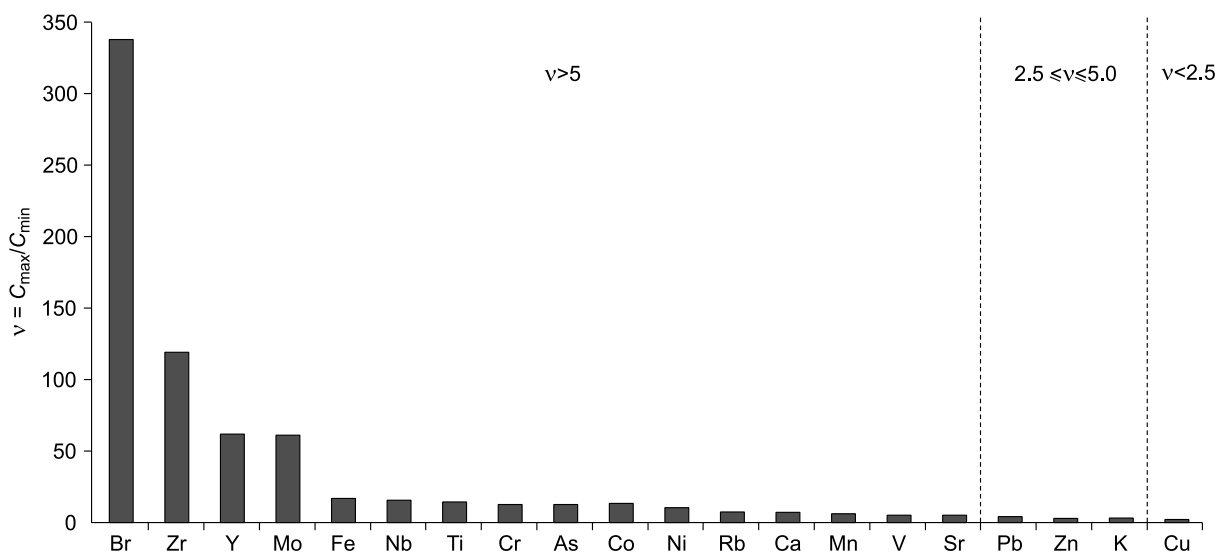


Рис. 3. Соотношения максимальных к минимальным значениям концентраций ($v = C_{\max}/C_{\min}$) в стеблях растений.

Полученные нами данные находят подтверждение в работе M.R. Broadley с соавторами (2004), где приводятся сведения о накоплении кальция разными представителями семейств *Fabaceae* и *Rosaceae* на примере большого числа видов растений разных семейств и таксонов более высокого ранга, установлены филогенетически обусловленные закономерности варьирования макроэлементов, в частности, кальция.

Суммарное содержание микроэлементов также выше в стеблях растений рода *Caragana* (1501 мг/кг) по сравнению с остальными видами. Минимум суммы микроэлементов отмечен в стеблях *S. altaiensis* (202–215 мг/кг). Следует отметить, что среди представителей *Rosaceae* по повышенному суммарному накоплению микроэлементов в листьях и стеблях (538 и 836 мг/кг соответственно) вы-

деляется *C. salesovianum*, что, возможно, связано с полукустарниковой жизненной формой растения.

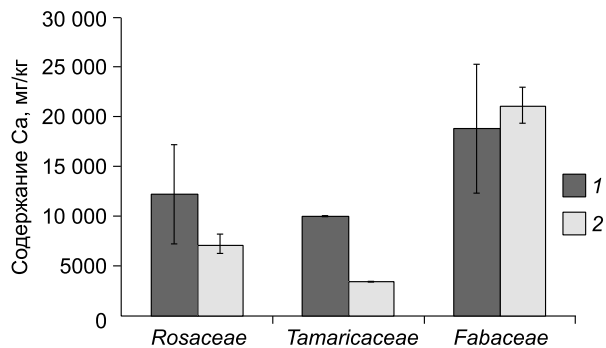


Рис. 4. Содержание кальция в листьях (1) и стеблях (2) кустарников разных таксонов, обитающих в Горном Алтае.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования методом РФА СИ определен элементный состав кустарниковых растений – представителей родов *Dasiphora*, *Comarum*, *Sibireae*, *Myricaria* и *Caragana* из Горного Алтая. Обнаружено не менее 20 элементов в листьях и стеблях 7 видов растений из 3 семейств, из них в 6 видах – впервые.

Наиболее высокое накопление макро- и микроэлементов свойственно представителям рода *Caragana* из сем. *Fabaceae*, низкое – видам растений *Sibireae* и *Dasiphora* из сем. *Rosaceae*, а также *Myricaria* из сем. *Tamaricaceae*. Полукустарник *C. salesovianum* из сем. *Rosaceae* выделяется по повышенному накоплению микроэлементов в стеблях по сравнению с кустарниками, за исключением *C. pugnata* subsp. *altaica*.

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. pugnata* subsp. *al-*

taica; 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, зависящие от множества факторов, в том числе связаны с содержанием элементов в почве и таксономической принадлежностью.

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

Работа выполнена в рамках государственного задания Центрального сибирского ботанического сада СО РАН “Оценка морфогенетического потенциала популяций растений Северной Азии экспериментальными методами” при использовании оборудования ЦКП “СЦСТИ” на базе ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН, поддержанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0012), при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16-44-040204 p_a.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеева-Попова Н.В., Дроздова И.В.** Микроэлементный состав растений полярного Урала в контрастных геохимических условиях // Экология. 2013. № 2. С. 90–98.
- Арнаутов Н.А.** Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ: Метод. рекомендации / Н.А. Арнаутов. Новосибирск, 1990. 220 с.
- 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 // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2013. № 2 (51). С. 112–118.
- Ельчиногова О.А., Рождественская Т.А., Черных Е.Ю.** Микроэлементы – биофилы и тяжелые металлы в лекарственных растениях Северного Алтая // Биоразнообразии, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных территорий: настоящее, прошлое и будущее: материалы междунар. конф. Горно-Алтайск, 2008. С. 51–56.
- Ильин В.Б.** Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области / В.Б. Ильин, А.И. Сысо. Новосибирск, 2001. 231 с.
- Касимов Н.С., Власов Д.В.** Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 2015. № 2. С. 7–17.
- Ковалевский А.Л.** Основные закономерности формирования химического состава растений // Биогеохимия растений. 1969. Вып. 2. С. 6–28.
- Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Семейства Actinidiaceae – Malvaceae, Euphorbiaceae – Haloragaceae / отв. ред. А.Л. Буданцев. СПб.; М., 2009. Т. 2. С. 207–208.**
- Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Семейства Fabaceae – Apiaceae / отв. ред. А.Л. Буданцев. СПб.; М., 2010. Т. 3. С. 28.**
- Рождественская Т.А., Ельчиногова О.А., Пузанов А.В.** Элементный химический состав растений Горного Алтая и факторы, его определяющие // Биоразнообразии, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных территорий: настоящее, прошлое и будущее: материалы междунар. конф. Горно-Алтайск, 2008. С. 110–114.
- Флора Сибири. Rosaceae / под ред. А.В. Положий, Л.И. Малышева. Новосибирск, 1988. Т. 8. С. 35–38.**
- Флора СССР / под ред. В.Л. Комарова, Б.К. Шишкина, С.В. Юзепчука. М.; Л., 1941. Т. 10. С. 68–78.**
- Храмова Е.П., Куценогий К.П., Шкель Н.М., Ковальская Г.А., Чанкина О.В.** Элементный состав *Pentaphylloides fruticosus* (L.) O. Schwarz, произрастающего в Горном Алтае // Раст. ресурсы. 2000. Вып. 4. С. 59–67.
- Чупарина Е.В., Гуничева Т.Н.** Состояние и проблемы рентгенофлуоресцентного анализа растительных материалов // Аналитика и контроль. 2004. Т. 8, № 3. С. 211–226.

- Broadley M.R., Bowen H.C., Cotterill H.L., Hammond J.P., Meacham M.C., Mead A., White P.J.** Phylogenetic variation in the shoot mineral concentration of angiosperms // *J. Experimental Bot.* 2004. V. 55, No. 396. P. 321–336. DOI: 10.1093/jxb/erh002
- Khramova E.P., Koutzenogij K.P., Kovalskaya G.A., Chankina O.V.** Trace elements in different *Pentaptyloides fruticosa* ecotypes // *Trace and Microprobe Technique.* 2003. V. 21. P. 133–145.
- Ligaa U.** Medicinal Plants of Mongolia Used in Western and Eastern Medicine / U. Ligaa, B. Davaasuren, N. Ninjil. Ulaanbaatar, 2005. 378 p.
- Thompson K., Parkinson J.A., Band S.R., Spencer R.E.** A comparative study of leaf nutrient concentrations in a regional herbaceous flora // *New Phytol.* 1997. V. 136. P. 679–689.
- Watanabe T., Broadley M.R., Jansen S., White P.J., Takada J., Satake K., Takamatsu T., Tuah S.J., Osa-ki M.** Evolutionary control of leaf element composition in plants // *New Phytol.* 2007. V. 174. P. 516–523. DOI.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02078.x

Поступила в редакцию 12.05.2019 г.,
после доработки – 02.06.2019 г.,
принята к публикации 25.07.2019 г.