

УДК 543.427.4:581.192

DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-76-85

**Применение метода РФА СИ для изучения зависимости
между содержанием химических элементов и биологически
активными фенольными соединениями жимолости синей**

И. Г. Боярских^{1,2}, А. И. Сысо², О. В. Чанкина³

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

² *Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
Новосибирск, Россия*

³ *Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Методом РФА СИ с высокой чувствительностью (10^{-10} г/г) в широком диапазоне концентраций в образцах малой массы (10–30 мг) определены пределы варьирования микро- и макроэлементов в листьях жимолости синей в контрастных геохимических условиях Горного Алтая в связи с вторичным метаболизмом. Увеличение основных классов биологически активных фенольных соединений наблюдалось в местообитаниях с высоким содержанием Са и Sr, вызывающим снижение величины соотношения К/Са в почве. В этих же местообитаниях отмечалось увеличение соотношений Cu/Zn и Fe/Zn и снижение – Fe/Cu и Fe/Ni.

Ключевые слова

РФА СИ метод, химические элементы, жимолость синяя, флавоноиды и гидроксикоричные кислоты

Источник финансирования

Работа выполнена с использованием инфраструктуры ЦКП «СЦСТИ» на базе ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН, под-
держанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0012)

Для цитирования

Боярских И. Г., Сысо А. И., Чанкина О. В. Применение метода РФА СИ для изучения зависимости между со-
держанием химических элементов и биологически активными фенольными соединениями жимолости синей // *Сибирский физический журнал*. 2019. Т. 14, № 3. С. 76–85. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-76-85

**The Use of X-Ray Fluorescence Analysis Using Synchrotron Radiation
to Study the Relationship between Chemical Elements
and Phenolic Compounds in the Blue Honeysuckle Plants**

I. G. Boyarskikh^{1,2}, A. I. Syso², O. V. Chankina³

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

² *Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS
Новосибирск, Россия*

³ *Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

Macro- and trace elements variation limits in the blue honeysuckle leaves, collected in the geochemically contrasting environments in the Altai Mountains, were determined by X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation, and their relationship with plant secondary metabolism analyzed. In content of main classes of biologically active

© И. Г. Боярских, А. И. Сысо, О. В. Чанкина, 2019

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2019. Том 14, № 3
Siberian Journal of Physics, 2019, vol. 14, no. 3

plant phenols were found in habitats with increased Ca and Sr contents, resulting in decreased soil K/Ca ratio. The same habitats were found to have increased Cu/Zn and Fe/Zn ratios and decreased Fe/Cu and Fe/Ni ratios.

Keywords

SR XRF method, chemical elements, blue honeysuckle, flavonoids and hydroxycinnamic acids

Funding

The work, relating to the measurement of spectra was done using the infrastructure of the Shared research facility “Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center (SSTRC)” based on complex “VEPP-4 – VEPP-2000”

For citation

Boyarskikh I. G., Syso A. I., Chankina O. V. The Use of X-Ray Fluorescence Analysis Using Synchrotron Radiation to Study the Relationship between Chemical Elements and Phenolic Compounds in the Blue Honeysuckle Plants. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 76–85. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-76-85

Видовая специфичность элементного состава растений, синтезирующих различные классы биологически активных веществ, представляет существенный интерес для познания механизма биохимических процессов жизнедеятельности растений. Многочисленными исследованиями показано, что синтез в растениях отдельных групп физиологически активных веществ и концентрирование микроэлементов, характерных для разных видов растений, находятся в корреляционной зависимости и представляют единый интегральный фактор их видовой специфичности [1]. Вопросы участия макро- и микроэлементов в биогенезе различных классов биологически активных фенольных соединений (ФС) в лекарственных растениях в настоящее время остаются актуальными в связи с их большим разнообразием и специфичностью функций в физиологических процессах.

Жимолость синяя (*Lonicera caerulea* L. s.l.) сем. *Caprifoliaceae* Juss. – очень пластичный вид, обладающий широкой экологической амплитудой, повсеместно распространен в природе в зоне бореальных лесов. Полезные свойства этого вида определяются набором ФС, основными среди которых являются гидроксикоричные кислоты (ГКК) и флавоноиды – антоцианы, флавонолы, флавоны [2–4], а также содержанием комплекса микро- и макроэлементов [5; 6], причем в листьях уровень накопления ФС за счет высоких концентраций ГКК значительно выше, чем в плодах, что позволяет использовать их в качестве фармацевтического и пищевого сырья. Методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) определена концентрация 26 элементов в листьях *L. caerulea* [5].

Сравнительное изучение индивидуально-группового состава флавоноидов и гидроксикоричных кислот в плодах и листьях растений природной популяции *L. caerulea* Курайского хребта Горного Алтая, проведенное нами ранее [4], показало значительные различия микропопуляций этого вида по содержанию ФС в геоботанически сходных условиях произрастания. Для выявления возможного влияния элементного состава почв на содержание микро- и макроэлементов, а также уровня накопления различных классов ФС в листьях растений было проведено определение содержания химических элементов в системе «почва – растение» методом РФА СИ.

Методика и экспериментальная часть

Исследования проводили в популяции *L. caerulea* на 4-х участках Курайского хребта Горного Алтая (Улаганский р-он, Республика Алтай), северный макросклон, долина реки Сарыачик (левый приток р. Кубадру), на 1 530–1 850 м над уровнем моря (местообитания 1–4).

Для исследований использовался гербарный материал *L. caerulea*, собранный в фазе созревания плодов на выделенных участках и исследованный ранее на содержание ФС. Средняя (репрезентативная) проба составлялась из 20–30 растений *L. caerulea* на каждой пробной площадке. Содержание химических элементов в системе «почва – растение» изучалось методом сопряженного отбора и анализа почвенных и растительных образцов.

Валовое содержание элементов в почвах и растениях определялось методом рентгено-флуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения на станции элементного анализа Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (накопитель ВЭПП-3) [7–9]. Для возбуждения флуоресценции использовалось монохроматизированное синхротронное излучение с энергией 23 кэВ. Время облучения каждого образца составляло от 150 до 400 секунд. Для получения характеристического рентгеновского спектра, относительно энергии квантов, рассчитываются индивидуальные энергетические пики, соответствующие измеряемым элементам, и площади пиков, которые, в свою очередь, соответствуют концентрациям элементов. Концентрацию элементов определяли с использованием метода «внешнего стандарта». В качестве образцов сравнения использовали российские стандарты травяно-злаковой смеси ГСО СОМ1 8242_2003 и байкальского ила БИЛ-1 [10]. Для РФА СИ анализа навеску воздушно-сухого растительного сырья, а также почвы (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). Величина ошибки результатов анализа, полученная путем 15-ти параллельных измерений 3-х одинаковых образцов, для большинства элементов в растительных образцах колеблется в основном в пределах 3–11 %, для V, Co, Ni и Zr – 17, 18, 40 и 60 % соответственно и для почвенных образцов составляет 3–20 % в зависимости от элемента. В этих исследованиях были определены 19 элементов (K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Br, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Pb). Возможности метода РФА СИ, конструкция станции и измерительного комплекса описаны А. В. Дарьиным и Я. В. Ракшун [11] в паспорте станции ¹.

Содержание подвижных форм K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Li, Sr (экстрагент ацетатно-аммонийный буферный раствор с pH 4,8) в почвах анализировали атомно-абсорбционным методом.

Результаты и обсуждение

Исследование разных по высоте местообитаний жимолости синей в долине р. Сарыачик показало значительные различия сформировавшихся в них почв по валовому содержанию макроэлементов Ca, Fe и микроэлементов Ti, Mn, Sr, Zr, V, Zn, Rb, Ni, Cu, Pb, Co, As, Cr, Br и Mo (рис. 1). Эти различия были обусловлены различием почв по составу и свойствам, прежде всего содержанию глинистых частиц и органического вещества. Обогащенные последними почвы местообитаний 1 и 4 отличались наибольшими концентрациями Fe, Ti, Mn, V, Zn, Ni, Cu, As, Co. Для местообитания 4 было характерно высокое содержание в почве Ca (32 353 мг/кг), для местообитания 3 наибольшая концентрация Mo (1,3 мг/кг) и самое низкое содержание Br.

Различие состава и свойств почв разных местообитаний отразилось на содержании в почвах подвижной формы K, Ca, Fe, Mn, Sr, Zn, Ni, Cu, Pb, Co (табл. 1), что предопределяет изменение питания ими растений в зависимости от места произрастания. Выявлена достоверная корреляционная зависимость между валовым содержанием элементов и содержанием их подвижной формы в почве для Ca, Fe и Pb (табл. 2), у других элементов такая зависимость не обнаружена, вероятно, из-за существенного влияния на концентрацию их подвижной формы других факторов, ее определяющих.

Преимуществом метода РФА СИ является возможность анализировать образцы малой массы (10–30 мг), что позволило использовать гербарный материал растений, в образцах которого ранее изучалось содержание полифенолов. В листьях жимолости синей с высокой чувствительностью (10⁻¹⁰ г/г) в широком диапазоне концентраций было определено 19 элементов (рис. 2). Из них макроэлементы Ca, K, Fe и микроэлементы Cu, Co, Mn, Zn, Rb, V, Ni, Mo, Sr и Br относятся к биофильным (эссенциальным) элементам. Микроэлементы Cr, Nb и As отмечались в листьях *L. caerulea* отдельных местообитаний в низких концентрациях.

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

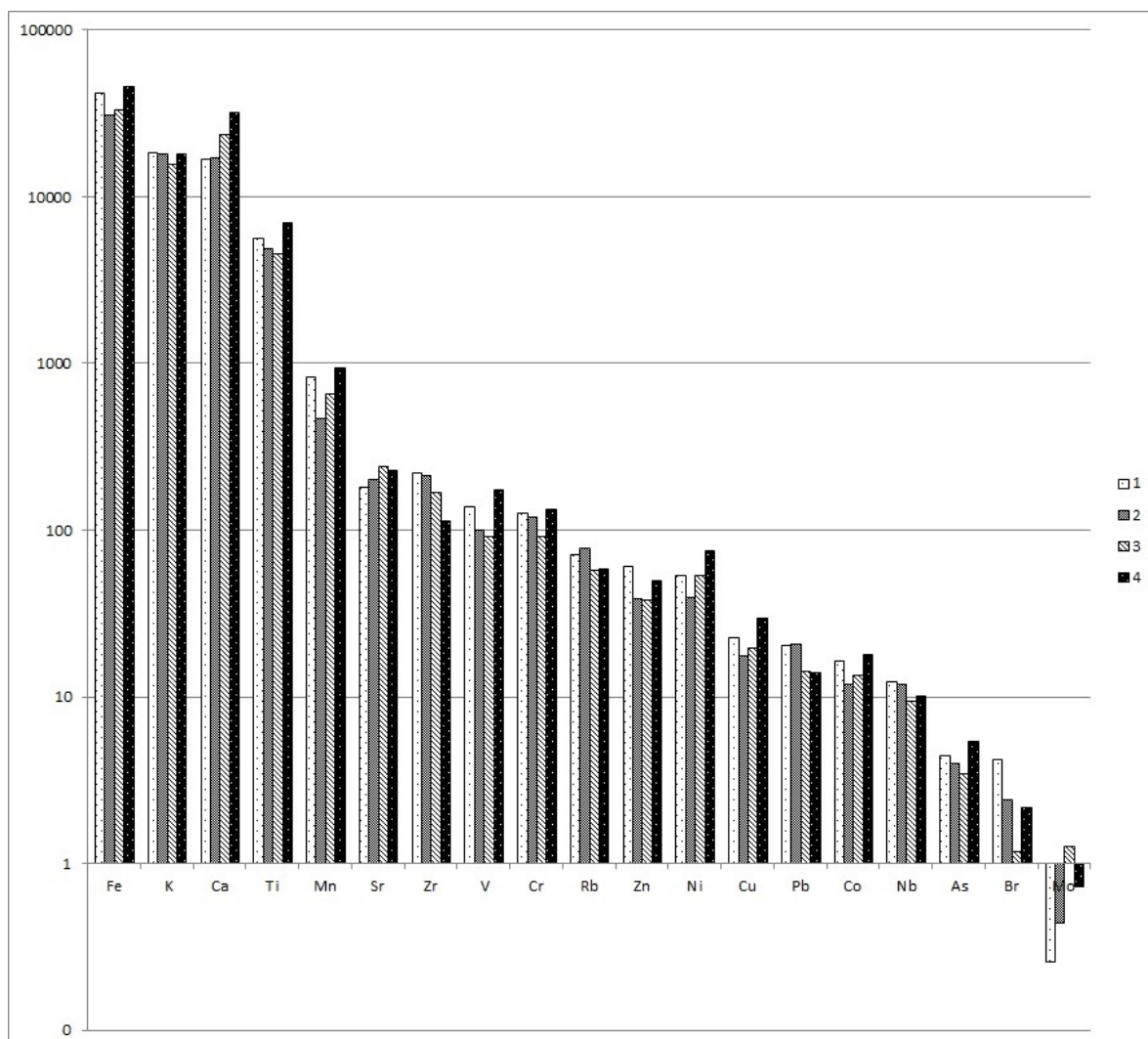


Рис. 1. Валовое содержание макро- и микроэлементов (логарифмическая шкала) в почвах местообитаний (1–4) *L. caerulea* в долине р. Сарыачик

Fig. 1. The total macro- and trace element contents (logarithmic scale) in soils of *L. caerulea* habitats (1–4) in the Saryachik Valley

Таблица 1

Содержание подвижной формы микро- и макроэлементов в почвах различных местообитаний (1–4) жимолости синей (мг/кг воздушно-сухой почвы)

Table 1

The contents of mobile forms of macro- and trace elements in soils of the different habitats of blue honeysuckle (mg/kg of air-dried soil)

Местообитание	K	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Pb	Sr	Co
1	77	1067	310	40	0,6	0,21	1,0	0,00	11,0	0,26
2	50	1232	180	34	0,3	0,24	0,0	0,00	11,0	0,24
3	58	1034	116	17	0,5	0,09	0,1	0,13	8,8	0,10
4	38	350	440	12	0,8	0,23	0,0	0,17	1,5	0,13

Таблица 2

Корреляционная зависимость между валовым содержанием элементов
и содержанием их подвижной формы в почве

Table 2

The correlation coefficients between total
and mobile forms of chemical elements in soil

K	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Pb	Sr	Co
-0,03	-0,94	0,94	-0,34	0,57	0,30	-0,10	-0,99	-0,59	-0,16

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, достоверные на 1–5 %-м уровне значимости.

Note: statistically significant ($P \leq 0.05$) correlation coefficients are highlighted in bold.

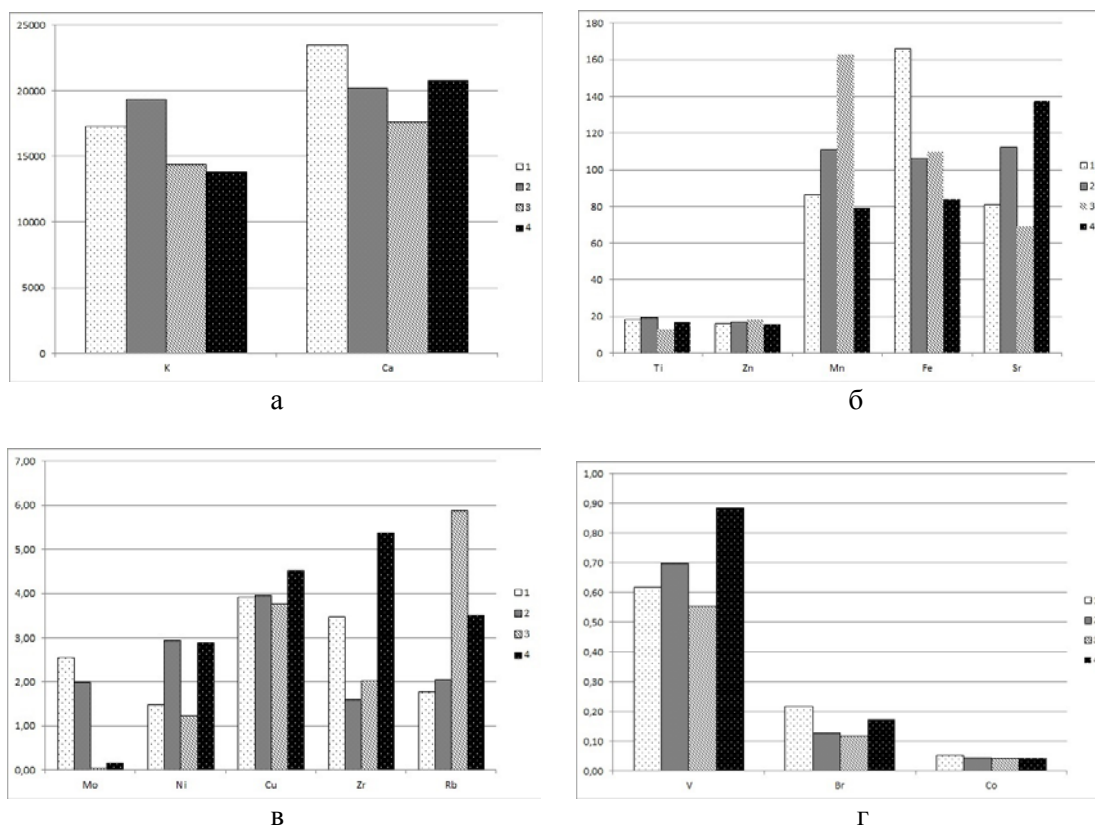


Рис. 2. Содержание макро- и микроэлементов в листьях *L. caerulea* из различных местообитаний (1–4):
а – K, Ca; б – Ti, Zn, Mn, Fe, Sr; в – Mo, Ni, Cu, Zr, Rb; г – V, Br, Co

Fig. 2. Macro- and trace elements' contents in leaves of *L. caerulea* from different habitats (1–4):
а – K, Ca; б – Ti, Zn, Mn, Fe, Sr; в – Mo, Ni, Cu, Zr, Rb; г – V, Br, Co.

Анализ содержания изученных макро- и микроэлементов в листьях растений *L. caerulea*, произрастающих в разных по высоте местообитаниях, показал его значительное варьирование (см. рис. 2). Местообитание 1 отличалось наибольшим содержанием в листьях растений Ca, Fe, Mo и Br, местообитание 2 – K, Ti и Ni, местообитание 3 – Zn, Mn, Rb, местообитание 4 – Sr, Cu, Zr и V.

Соотношение химических элементов является более информативным для физиологии растительного организма по сравнению с количественным содержанием макро- и микроэлементов.

тов [12], наиболее важные соотношения приведены в табл. 3. Соотношение K/Ca характеризуется достаточно постоянной величиной и определяет тип минерального питания растений. В контрастных по элементному составу почвенных условиях соотношение K/Ca в листьях растений изменяется в пределах 0,74–0,96, что позволяет отнести *L. caerulea* к растениям с кальциотрофным типом минерального обмена [13]. Соотношение Fe/Mn, характеризующее взаимосвязь этих элементов-антагонистов в их метаболических функциях в растениях, наиболее адекватным для многих из них считается в диапазоне 1,5–2,5 [12]. Результаты наших исследований выявили минимальную величину соотношения Fe/Mn = 0,7 в листьях *L. caerulea* из местообитания 3, обусловленную высокой концентрацией в них Mn, способного негативно сказаться на выполнении железом его метаболических функций.

Таблица 3

Соотношения микро- и макроэлементов в листьях *L. caerulea*
в зависимости от местообитания (1–4)

Table 3

The ratio of some macro- and trace elements in *L. caerulea* leaves
in different habitats

Местообитание	K/Ca	K/Rb	Fe/Mn	Fe/Zn	Fe/Cu	Fe/Ni	Cu/Zn
1	0,74	9739	1,9	10	42	113	0,24
2	0,96	9496	1,0	6	27	36	0,23
3	0,82	2451	0,7	6	29	89	0,20
4	0,67	3955	1,1	5	19	29	0,28

Биологическое для растений значение рубидия и соотношения K/Rb слабо изучено. Нами обнаружено, что в листьях растений местообитаний 1 и 2 соотношение K/Rb в 2,5–4 раза выше, чем в местообитаниях 3 и 4, из-за большей концентрации K и меньшей – Rb.

Положительная достоверная корреляционная зависимость установлена между валовым содержанием в почве и листьях растений V, Cu и Br, отрицательная – между Zn, Rb и Mo (табл. 4). Корреляционный анализ содержания микро- и макроэлементов в листьях и содержания подвижной формы химических элементов в почве показал существование достоверной зависимости только по Ni.

Среди вторичных метаболитов флавоноиды и гидроксикоричные кислоты занимают особое место и рассматриваются как один из элементов взаимодействия растений со средой. Известно, что они принимают активное участие в окислительно-восстановительных процессах, фотосинтезе и дыхании, передаче сигналов, мужской фертильности, транспорте ауксина, защищают растения от УФ-излучений [14]. ФС участвуют в защите растений от действия множества неблагоприятных экологических факторов, таких как повышенная интенсивность света, низкие и высокие температуры, тяжелые металлы, водный дефицит и т. д. [15; 16].

Для выявления взаимосвязи содержания макро- и микроэлементов с изменением уровня накопления ФС был проведен корреляционный анализ зависимости между суммарным содержанием в органах *L. caerulea* производных ГKK, флавонолов, флавонов и концентрацией отдельных химических элементов, а также величиной ключевых в физиологии растений отношений K/Ca, Fe/Mn, K/Rb, Cu/Zn, Fe/Zn, Fe/Cu и Fe/Ni (табл. 5). В результате было установлено, что увеличение содержания производных ГKK (в частности хлорогеновой кислоты), флавонов и суммы ФС в листьях достоверно связано со значительным уменьшением содержания Mo в листьях и увеличением концентрации Mo в почве. Достоверные корреляционные зависимости выявлены между содержанием производных ГKK и содержанием Cu, Rb и V в листьях растений, значительное уменьшение соотношения K/Rb в листьях также достоверно связано с увеличением хлорогеновой кислоты.

Таблица 4

Корреляционная зависимость между валовым содержанием микро- и макроэлементов в почве и их содержанием в листьях *L. caerulea*

Table 4

Correlation coefficients between the total macro- and trace element contents in *L. caerulea* leaves and soil

К	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Br	Rb	Sr	Zr	Mo	Pb
0,48	-0,30	0,26	0,80	-0,55	0,07	0,25	0,11	0,88	-0,80	0,87	-0,82	0,08	-0,68	-0,88	-0,24

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, достоверные на 5 %-м уровне значимости.
Note: statistically significant ($P \leq 0.05$) correlation coefficients are highlighted in bold.

Таблица 5

Корреляционная зависимость между содержанием различных классов биологически активных соединений и содержаниями макро-и микроэлементов в листьях *L. caerulea* и почвах

Table 5

Correlation coefficients between different biologically active compounds and macro- and trace element contents in *L. caerulea* leaves and soil

Элементы	К	Ca	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Mo	Pb	Fe/Mn	K/Rb	Cu/Zn	Fe/Zn	Fe/Cu	Fe/Ni	K/Ca
Листья																				
ГКК	-0,78	-0,50	0,64	0,02	-0,88	-0,81	0,38	0,69	-0,01	0,57	0,57	-0,90	0,59	-0,63	-0,81	0,45	-0,83	-0,90	-0,63	-0,43
ХК	-0,78	-0,85	-0,16	0,71	-0,52	-0,78	-0,35	-0,06	0,63	0,99	-0,24	-0,92	0,15	-0,74	-0,96	-0,31	-0,61	-0,44	0,00	-0,18
ДХК	-0,52	-0,12	0,92	-0,41	-0,81	-0,56	0,69	0,93	-0,41	0,13	0,87	-0,60	0,65	-0,35	-0,46	0,77	-0,69	-0,88	-0,80	-0,45
Флавонолы	-0,73	-0,39	0,74	-0,11	-0,87	-0,74	0,47	0,78	-0,14	0,45	0,67	-0,83	0,60	-0,55	-0,73	0,56	-0,80	-0,91	-0,68	-0,47
Флавоны	-0,75	-0,73	0,42	0,31	-0,83	-0,93	0,25	0,46	0,28	0,75	0,37	-0,97	0,61	-0,81	-0,90	0,17	-0,90	-0,87	-0,56	-0,23
Сумма ФС	-0,76	-0,63	0,53	0,18	-0,90	-0,89	0,32	0,58	0,15	0,67	0,47	-0,94	0,61	-0,74	-0,86	0,31	-0,88	-0,90	-0,61	-0,32
Почва																				
ГКК	-0,24	0,96	0,42	0,38	0,33	0,36	0,74	0,63	-0,34	-0,77	0,84	0,60	-0,89	-0,36	0,83	1	0,97	-1	-0,89	-0,95
ХК	-0,89	0,58	-0,22	0,07	-0,14	-0,02	0,34	0,08	-0,55	-0,85	0,95	0,99	-0,88	-0,43	0,50	0,67	0,73	-0,61	-0,88	-0,82
ДХК	0,23	0,89	0,68	0,45	0,51	0,48	0,75	0,76	-0,10	-0,47	0,50	0,17	-0,61	-0,20	0,77	0,87	0,80	-0,91	-0,62	-0,71
Флавонолы	-0,10	0,97	0,52	0,43	0,41	0,42	0,78	0,70	-0,25	-0,71	0,76	0,49	-0,84	-0,34	0,84	0,98	0,94	-0,99	-0,84	-0,90
Флавоны	-0,48	0,86	0,14	0,16	0,06	0,12	0,56	0,39	-0,57	-0,78	0,95	0,79	-0,91	-0,26	0,69	0,97	0,99	-0,95	-0,91	-0,94
Сумма ФС	-0,37	0,92	0,27	0,26	0,18	0,23	0,65	0,50	-0,47	-0,77	0,91	0,70	-0,91	-0,30	0,76	1	1	-0,98	-0,91	-0,95

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, достоверные на 1–5 %-м уровне значимости.
Note: statistically significant ($P \leq 0.05$) correlation coefficients are highlighted in bold.

Увеличение основных классов ФС и их суммы наблюдалось в местообитаниях с высоким валовым содержанием Sr и Ca, вызывающим снижение величины соотношения K/Ca в почве. Также в этих местообитаниях отмечалось достоверное увеличение значений соотношений Cu/Zn и Fe/Zn, снижение – Fe/Cu и Fe/Ni (см. табл. 5). Достоверные зависимости были установлены между основными классами ФС и содержанием подвижной формы Mn и Mg в почве.

Заключение

Результаты изучения изменчивости содержания макро- и микроэлементов в растениях и почвах различных местообитаний жимолости синей свидетельствуют о влиянии состава и свойств почв местообитаний растений на их элементный химический и биохимический состав. Кроме того, они позволяют предположить участие биологически активных полифенолов в регуляции поступления эссенциальных микро- и макроэлементов в органы растений. Таким образом, использование РФА СИ метода позволило оценить в образцах малой массы изменение содержания и отношения широкого спектра микро- и макроэлементов в листьях растений, произрастающих на почвах различного элементного состава. Метод подтвердил свою эффективность при изучении физиолого-биохимических эффектов.

Список литературы

1. Бузук Г. Н., Ловкова М. Я., Соколова С. М. Универсальный характер м-образной зависимости между основным и специализированным обменом у лекарственных растений // Вестник фармации. 2006. № 1. С. 22–33.
2. Palikova I., Heinrich J., Bednar P. et al. Constituents and Antimicrobial Properties of Blue Honeysuckle: A Novel Source for Phenolic Antioxidants. *J. Agric. Food Chem.*, 2008, no. 56, p. 11883–11889.
3. Jurikova T., Rop O., Mlcek J. et al. Phenolic Profile of Edible Honeysuckle Berries (Genus *Lonicera*) and Their Biological Effects. *Molecules*, 2012, vol. 17, p. 61–79.
4. Боярских И. Г., Васильев В. Г., Кукушкина Т. А. Содержание флавоноидов и гидроксикоричных кислот в *Lonicera caerulea* (*Caprifoliaceae*) в популяциях Горного Алтая // Раст. ресурсы. 2014. Вып. 1. С. 105–121.
5. Боярских И. Г., Чанкина О. В., Худяев С. А., Сысо А. И. Исследование элементного состава системы почва-растение на примере *Lonicera caerulea* // Изв. РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77 (2). С. 212–215.
6. Боярских И. Г., Чанкина О. В., Сысо А. И., Васильев В. Г. Тренды содержания химических элементов в листьях *Lonicera caerulea* (*Caprifoliaceae*) в связи с их вторичным метаболизмом в природных популяциях Горного Алтая // Изв. РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79 (1). С. 106–110.
7. 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. DOI 10.1134/S0022476616070015
8. Piminov P. A., Baranova G. N., Bogomyagkov A. V. et al. Synchrotron Radiation applications in the Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 19–26. DOI 10.1016/j.phpro.2016.11.005
9. Trounova V. A., Zolotarev K. V., Baryshev V. B., Phedorin M. A. Analytical possibilities of SRXRF station at VEPP-3 SR source. *Nucl. Instr. Meth. Phys.*, 1998, vol. A405, p. 532–536.
10. Арнаутов Н. А. Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ: Метод. рекомендации. Новосибирск, 1990. 220 с.
11. Дарьин А. В., Ракшун Я. В. Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с

использованием синхронного излучения из накопителя ВЭПП-3 // Научный вестник НГТУ. 2013. Т. 2 (51). С. 112–118.

12. **Kabata-Pendias A.** Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. CRC Taylor and Francis Group, 2011, 505 p.
13. **Horak O., Kinzel H.** Typen des Mineralstoffwechsels bei den höheren Pflanzen. *Osterr. Bot. Z.*, 1971, vol. 119, no. 4–5, p. 475–495.
14. **Falcone Ferreyra M. L., Rius S. P., Casati P.** Flavonoids: biosynthesis, biological functions, and biotechnological applications. *Front Plant Sci.*, 2012, vol. 3, p. 1–15.
15. **Michalak A.** Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress review. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2006, vol. 15, p. 523–530.
16. **Edreva A., Velikova V., Tsonev T. et al.** Stress-protective role of secondary metabolites: diversity of functions and mechanisms. *Gen. Appl. Plant Physiol.*, 2008, vol. 34, p. 67–78.

References

1. **Buzuk G. N., Lovkova M. Ya., Sokolova S. M.** Universal character of M-shaped dependence between basic and specialized metabolism in officinal plants. *Vestn. Farm.*, 2006, no. 1, p. 1–11. (in Russ.)
2. **Palikova I., Heinrich J., Bednar P. et al.** Constituents and antimicrobial properties of blue honeysuckle: a novel source for phenolic antioxidants. *J. Agric. Food Chem.*, 2008, no. 56, p. 11883–11889.
3. **Jurikova T., Rop O., Mlcek J. et al.** Phenolic profile of edible honeysuckle berries (genus *Lonicera*) and their biological effects. *Molecules*, 2012, vol. 17, p. 61–79.
4. **Boyarskikh I. G., Vasiliev V. G., Kukushkina T. A.** The content of flavonoids and hydroxycinnamic acids in *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) in populations of Altai Mountains. *Rastit. Resur.*, 2014, iss. 1, p. 105–121. (in Russ.)
5. **Boyarskikh I. G., Chankina O. V., Khudyaev S. A., Syso A. I.** Investigating the elemental composition of a soil–plant system, based on the example of *Lonicera caerulea*. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2013, vol. 77 (2), p. 191–194. (in Russ.)
6. **Boyarskikh I. G., Chankina O. V., Syso A. I., Vasiliev V. G.** Trends in the content of chemical elements in leaves of *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) in connection with their secondary metabolism in the natural populations of the Altai Mountains. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2015, vol. 79 (1), p. 94–97. (in Russ.)
7. **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. DOI 10.1134/S0022476616070015
8. **Piminov P. A., Baranova G. N., Bogomyagkov A. V. et al.** Synchrotron radiation research and application at VEPP-4. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 19–26. DOI 10.1016/j.phpro.2016.11.005
9. **Trounova V. A., Zolotarev K. V., Baryshev V. B., Phedorin M. A.** Analytical possibilities of SRXRF station at VEPP-3 SR source. *Nucl. Instr. Meth. Phys.*, 1998, vol. A405, p. 532–536.
10. **Arnautov N. A.** Standartnye obraztsy khimicheskogo sostava prirodnykh mineral'nykh veshchestv. Metodicheskie rekomendatsii (Nature Minerals: Standard Samples of Chemical Composition. Methodological Recommendations). Novosibirsk, 1990, 220 p. (in Russ.)
11. **Dariin A. V., Rakshun Ya. V.** 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. *Nauchn. Vestn. Novosib. Gos. Tekhn. Uni.*, 2013, vol. 2 (51), p. 112–118. (in Russ.)

12. **Kabata-Pendias A.** Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. CRC Taylor and Francis Group, 2011, 505 p.
13. **Horak O., Kinzel H.** Typen des Mineralstoffwechsel bei den höheren Pflanzen. *Osterr. Bot. Z.*, 1971, vol. 119, no. 4–5, p. 475–495.
14. **Falcone Ferreyra M. L., Rius S. P., Casati P.** Flavonoids: biosynthesis, biological functions, and biotechnological applications. *Front Plant Sci.*, 2012, vol. 3, p. 1–15.
15. **Michalak A.** Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress review. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2006, vol. 15, p. 523–530.
16. **Edreva A., Velikova V., Tsonev T. et al.** Stress-protective role of secondary metabolites: diversity of functions and mechanisms. *Gen. Appl. Plant Physiol.*, 2008, vol. 34, p. 67–78.

Материал поступил в редколлегию

Received

02.09.2019

Сведения об авторах / Information about the Authors

Боярских Ирина Георгиевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (ул. Золотодолинская, 101, Новосибирск, 630090, Россия)

Irina G. Boyarskikh, The Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (101 Zolotodolinskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
irina_2302@mail.ru

Сысо Александр Иванович, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирск, 630090, Россия)

Aleksandr I. Syso, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (8/2 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
syso@mail.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