Химия растительного сырья. 2025. №4. OnLine First.
Khimiya rastitel'nogo syr'ya, 2025, no. 4, OnLine First.
DOI: 10.14258/jcprm.20250416830

УДК 574.927:581.192: 582.973:581.52:631.411:577.13:543.544.5.68.7

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ОРГАНАХ *LONICERA CAERULEA* SUBSP. *ALTAICA* (CAPRIFOLIACEAE) В ВЫСОТНОМ ГРАДИЕНТЕ И ИХ КОРРЕЛЯЦИИ С СОДЕРЖАНИЕМ ПОЛИФЕНОЛОВ

© ***И.Г. Боярских[1,2*], Т.И. Сиромля[2]***

[1] Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, ул. Золотодолинская, 101, Новосибирск, 630090, Россия, irina_2302@mail.ru
[2] Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 8/2, Новосибирск, 630090, Россия

Изучена изменчивость в высотном градиенте содержания макро- и микроэлементов в листьях и стеблях растений популяции *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Мульта (Республика Алтай). По результатам атомно-эмиссионного спектрометрического анализа выявлено значительное варьирование содержания химических элементов в растениях в зависимости от места их произрастания. Установлены положительные корреляции между высотой произрастания и содержанием Ni, Cu и Zn в листьях, K, Ni, Pb и Y в стеблях растений и интенсивностью накопления K, Ca, Mg и Sr. В высотном градиенте содержание Ca, Mg, Na, Ba, Cr, Cd, Mo, Pb, Sr, V и Y и интенсивность накопления Cu, Fe, Na и Zn, наоборот, статистически значимо снижались. Физиологически важные соотношения элементов Cu/Zn, K/Ca и Fe/Mn в листьях растений изменялись незначительно, в пределах 0.2–0.6; 0.8–1.9 и 0.5–2.0 соответственно, при этом величина K/Ca в органах растений с высотой статистически значимо увеличивалась, а Ca/Na в листьях – уменьшалась. Установленные методом высокоэффективной жидкостной хроматографии уровни накопления флавонов связаны статистически значимыми разнонаправленными корреляциями с содержанием Co и K в листьях, Na, Zn и Ni в стеблях, с интенсивностью накопления в органах биофильных элементов Cu и Mg, а также соотношениями K/Na в листьях и Ca/Na в стеблях. Для содержания производных гидроксикоричных кислот установлены значимые отрицательные корреляции с содержанием Cu, Fe, Co, Mn и положительные с содержанием La и Mo в листьях. С уровнем накопления флавонолов связаны отрицательными корреляциями содержание Cd, Na, Mn и Zn, положительными – соотношение K/Na в стеблях. Содержание в почве подвижных форм Cu и Ni (экстрагент ацетатно-аммонийный буферный раствор с pH 4,8) статистически значимо связано с флавонами, а содержание Cr – с гидроксикоричными кислотами.

Ключевые слова: *Lonicera caerulea* subsp. *altaica*, высотный градиент, макро- и микроэлементы, флавонолы, флавоны, гидроксикоричные кислоты, Горный Алтай.

Для цитирования: Боярских И.Г., Сиромля Т.И. Изменчивость содержания макро- и микроэлементов в органах *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* (Caprifoliaceae) в высотном градиенте и их корреляции с содержанием полифенолов // Химия растительного сырья. 2025. №4. OnLine First. https://doi.org/10.14258/jcprm.20250416830.

Введение

Вид *Lonicera caerulea* L. (жимолость синяя) семейства Caprifoliaceae широко распространен в Евразии и Северной Америке в бореальной лесной зоне. Плоды *L. caerulea* являются функциональным продуктом питания в связи с высоким содержанием биологически активных стимулирующих здоровье компонентов – витамина C, фенольных соединений (ФС) [1–5], иридоидов [5, 6], макро- и микроэлементов [7]. Условия произрастания оказывают влияние на изменение профилей вторичных метаболитов и содержание макро- и микроэлементов в органах растений этого вида [3, 8, 9]. Между содержанием отдельных классов ФС в плодах и листьях существует статистически значимая корреляция, причем суммарное содержание биологически активных фенольных соединений в листьях было значительно выше, чем в плодах [3]. Исследования M. Minami с соавторами [10] показали, что экстракты листьев и стеблей *L. caerulea* более эффективны

* Автор, с которым следует вести переписку.

при лечении стрептококковой инфекции, чем экстракты плодов. Это позволило сделать предположение о возможном использовании листьев и стеблей этого вида в качестве лекарственного сырья и показало актуальность изучения диапазона изменчивости их биохимического состава.

Изучение зависимости между экотипом растений, используемых для заготовки лекарственного растительного сырья и их биохимическим составом, остается одним из актуальных направлений исследований. До сих пор недостаточно изучено изменение элементного состава в растениях разных высотных поясов, где гидротермические и другие условия произрастания существенно различаются. Получены данные по увеличению концентрации Ni и Cu в листьях, а также Ca, Zn и Cd в стеблях *L. caerulea* в верхнем лесном поясе [7, 8]. С высотой увеличивалась концентрация Zn, Cu, Fe и Mn в листьях спаржи кистевидной [11], содержание элементов Ca, Sr, B, Mn, Ni, Cu и Cd в корневищах *Rhodiola crenulata* также положительно коррелировало с высотой произрастания растений [12].

Получены результаты исследований, показывающие разнонаправленную зависимость между высотой произрастания растений и содержанием отдельных компонентов и классов полифенолов [12–15], также установлены только положительные зависимости с высотой [16–20], в том числе показана видовая специфичность изменения профиля ФС в высотном градиенте [21, 22].

Известно, что многие минеральные элементы тесно связаны с повышением стрессоустойчивости растений, например, Ca, Sr, B, Mn, Ni, Cu и Cd [12]. Некоторые исследования показали, что они тесно связаны с составом флавоноидов и их содержанием [8, 12, 23, 24]. Также были выявлены зависимости между содержанием макро- и микроэлементов в плодах, листьях и стеблях растений с их репродуктивными характеристиками в природной популяции *L. caerulea* Горного Алтая [25].

С увеличением высоты над уровнем моря местообитания растений изменяется широкий спектр климатических условий их произрастания [26]. Считается, что УФ-В излучение является основным фактором, влияющим на увеличение содержания ФС на больших высотах [13, 16]. Однако есть данные об увеличении скорости биосинтеза ФС у различных видов растений под воздействием понижения температуры в период роста растений в отсутствие УФ-В-излучения [27]. Согласно ранее полученным данным, изменение в высотном градиенте (Семинский хр., 1285–1750 м н.у.м.) содержания в почве подвижных в ацетатно-аммонийном буфере форм соединений отдельных макро- и микроэлементов приводит к изменению интенсивности накопления биофильных элементов растениями и разнонаправленной зависимости их содержания с уровнем накопления отдельных компонентов и классов ФС в листьях растений [8].

В долине р. Мульта (Усть-Коксинский р-он, Республика Алтай) нами было проведено изучение популяционной изменчивости количественных показателей индивидуально-группового состава биологически активных ФС в экстрактах листьев *L. caerulea* subsp. *altaica* в высотном градиенте в более широком диапазоне 1070–1850 м н.у.м. [28]. Была показана разнонаправленная корреляция между содержанием отдельных классов полифенолов и высотой произрастания растений.

Цель данной работы – изучение изменчивости содержания макро- и микроэлементов в системе почва-растение в популяциях *L. caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Мульта (Республика Алтай), а также оценка возможных линейных зависимостей между элементным составом растений (почв) и индивидуально-групповым составом ФС в высотном градиенте на выделенном профиле.

Экспериментальная часть

Исследования проведены в 2019 г. в Республике Алтай (Усть-Коксинский р-н), в долине реки Мульта, Катунский хр., южн. макросклон (50°09' с.ш., 85°27' в.д.) в пределах геоботанической подпровинции Центральный Алтай. Пробные площадки были выбраны на высотном профиле 1072–1850 м н.у.м в ценопопуляциях *L. caerulea* subsp. *altaica*. Ценопопуляция (ЦП) 1 – на высоте 1072 м н.у.м. (50°07' с.ш., 85°57' в.д.) в елово-лиственничном разнотравно-злаковом лесу (урочище Широкая пола); ЦП 2 – 1242 м н.у.м. (50°05' с.ш., 85°54' в.д.) в березово-елово-кедрово-лиственничном злаково-разнотравном лесу (урочище Сочина пола); ЦП 3 – 1265 м н.у.м. (50°04' с.ш., 85°53' в.д.) в березово-елово-кедрово-лиственничном злаково-разнотравном лесу (Черная речка 1); ЦП 4 – 1651 м н.у.м. (50°01' с.ш., 85°50' в.д.) в лиственнично-елово-кедровом злаково-разнотравном лесу (кочкарник (низменное место, покрытое кочками) в устье р. Куйгук); ЦП 5 – 1660 м н.у.м. (49°58' с.ш., 85°50' в.д.) в елово-кедрово-лиственничном разнотравно-злаковом лесу (Средне-Мультинское озеро); ЦП 6 – 1690 м н.у.м. (49°57' с.ш., 85°51' в.д.) в лиственнично-елово-кедровом разнотравно-злаковом лесу (устье р. Поперечная); ЦП 7 – 1701 м н.у.м. (49°56' с.ш., 85°51' в.д.) в

лиственнично-елово-кедровом разнотравно-злаковом лесу; ЦП 8 – 1850 м н.у.м. (49°55' с. ш., 85°55' в. д.) в елово-кедровом разнотравно-злаковом лесу (Верхне-Мультинское озеро).

В выделенных ЦП для анализа содержания макро- и микроэлементов в системе почва-растения производили сопряженный отбор почвенных и растительных образцов методом квадрата и формировали средние пробы. Объекты исследования – стебли и листья растений *L. caerulea* subsp. *altaica*, а также почва в зоне корневого питания растений (0–30 см).

Отбор проб проводили в период начала созревания плодов *L. caerulea* subsp. *altaica* в течение 10 дней для обеспечения одинаковой фазы сезонного развития растений. Листья и стебли растений высушивали в естественных условиях до воздушно-сухого состояния. Средние пробы листьев использовали также для анализа на содержание ФС методом высокоэффективной жидкостной хроматографии [28].

Содержание Al, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Ga, Fe, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sc, Si, Sr, Ti, V, Y, Yb, Zn, Zr в растительных и почвенных образцах изучали после сухого озоления методом атомно-эмиссионного спектрометрического анализа (дуговой аргоновый двухструйный плазмотрон (Россия); спектрометр PGS-2 (Германия); многоканальный анализатор эмиссионных спектров (Россия)). Содержание подвижных форм микроэлементов (экстрагент – ацетатно-аммонийный буферный раствор с pH 4.8) в почвах анализировали атомно-абсорбционным методом (FAAS) с использованием спектрометра AAnalyst 400 (PerkinElmer). Данные приведены в пересчете на воздушно-сухое вещество. В качестве стандартов были использованы образцы дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы САДПП-09/3 (ОСО № 18809), чернозема выщелоченного среднесуглинистого САЧвП-05/2 (ОСО № 28813), листа березы (ЛБ-1, ГСО 8923-2007), травосмеси (Тр-1, ГСО 8922-2007) и элодеи канадской (ЭК-1, ГСО 8921-2007). Полученные результаты определения ХЭ в стандартах укладывались в их аттестованные значения.

Интенсивность биологического накопления элементов органами растений оценивали по значениям коэффициентов биологического накопления (КБН), рассчитываемых как отношение содержания элемента в сухом веществе растений к концентрации подвижной формы элемента в почве, извлекаемой из почвы ацетатно-аммонийным буфером. Это отношение также называют коэффициентом биогеохимической подвижности Bx. Он характеризует доступность элементов растениям и степень использования ими подвижных форм элементов, содержащихся в почве [29].

Статистический анализ полученных данных выполнен с применением пакетов прикладных программ Excel 10 и STATISTICA 7. Распределение исследуемых химических элементов внутри отдельных популяций соответствовало нормальному закону, дисперсии были однородны, что позволило рассчитать средние арифметические значения содержания элементов ($\overline{X}$) и стандартные отклонения (S). Корреляционный анализ выполнен по методу Пирсона [30], критические уровни значимости приведены в тексте статьи.

Участки исследования находятся на территории Катунского заповедника и его приграничной территории, что обеспечивало отсутствие техногенного загрязнения и его возможного влияния на изменение элементного состава и вторичного метаболизма растений.

Обсуждение результатов

В результате ранее проведенных исследований в долине р. Мульта были установлены разнонаправленные линейные зависимости между уровнем накопления классов и отдельных компонентов ФС и высотой произрастания растений *L. caerulea* subsp. *altaica* (рис. 1 по данным И.Г. Боярских и В.А. Костиковой [28]). Одним из факторов, оказывающих влияние на изменение вторичного метаболизма в вертикальном градиенте, может быть элементный состав почв.

Известно, что все факторы почвообразования и распределения горных почв подчиняются закону вертикальной зональности [31], согласно которому с высотой меняются и климат, и растительность. Почвенный покров также формируется в условиях разнообразных рудопроявлений, химический состав которых определяет минеральный состав и кислотность почв [32].

Результаты общего анализа почв изученного профиля показали, что по содержанию кремнезема почвы в основном сформированы на средних породах (SiO_2 = 53–64%). С высотой произрастания уменьшалось содержание отдельных элементов минерального питания растений. Статистически значимым снижение концентрации было для Ba, Cr и Cu при $p \leq 0.05$, B – при $p \leq 0.01$ и Mn – при $p \leq 0.001$.

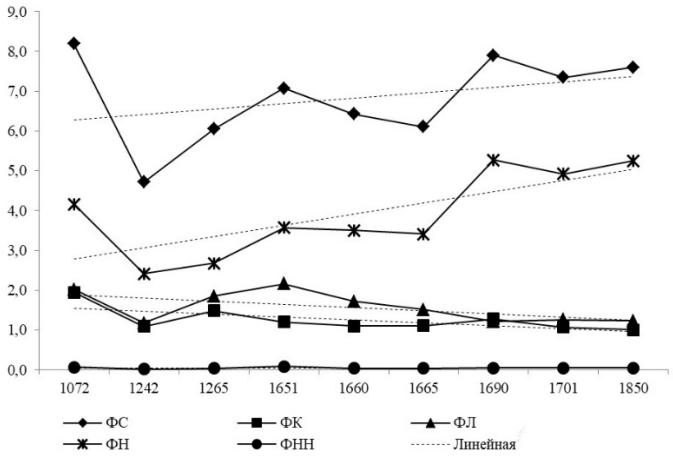


Рис. 1. Изменение содержания отдельных классов ФС в экстрактах из листьев *L. caerulea* subsp. *altaica* в зависимости от высоты произрастания: По оси абсцисс – абсолютная высота места отбора проб, м; по оси ординат – площадь хроматографических пиков, %. ФС – суммарное содержание полифенолов; ФК – фенолкарбоновые кислоты; ФЛ – флавонолы; ФН – флавоны, ФНН – флавононы. Линии на графике – прямые линии тренда. По данным И.Г. Боярских и В.А. Костиковой [28]

Общее содержание в почве K статистически значимо при $p \leq 0.05$ положительно коррелировало с уровнем накопления хлорогеновой кислоты в листьях растений и отрицательно при $p \leq 0.01$ с отдельными компонентами флавонов. Между содержанием P установлены положительные зависимости с лютеолином и отрицательные с витексином, значимые при $p \leq 0.05$. Содержание B, Pb и Mo положительно связано с отдельными компонентами флавонов ($p \leq 0.05$), а содержание Be – с отдельными флавонолами ($p \leq 0.01$). На суммарное содержание ФС и флавонов оказывает значимое влияние La ($p \leq 0.01$) и Y ($p \leq 0.05$) (табл. 1).

Для климата горных областей характерны более низкие температуры, чем для климата равнин на соответствующих широтах. Также здесь отмечается понижение атмосферного давления, повышение влажности воздуха и солнечной радиации. Это сказывается на многих процессах, протекающих в почвах, в том числе изменяется подвижность и, соответственно, доступность для растений химических элементов [33]. Данный фактор может также влиять на изменение вторичного метаболизма растений [8].

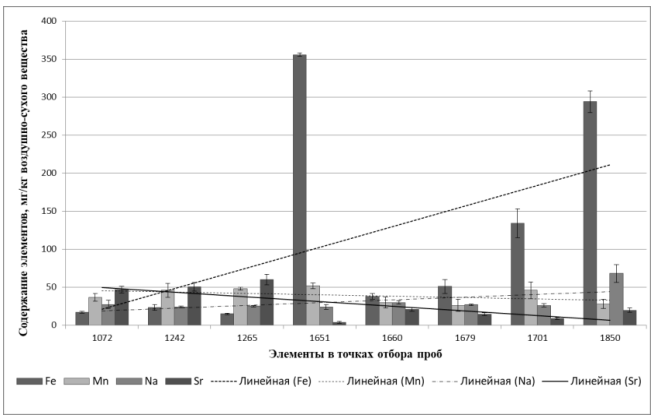
Результаты анализа содержания подвижной формы микроэлементов в почвах показали значительную разницу между точками отбора проб по изученному профилю (рис. 2). В почвах из верхних по профилю популяций *L. caerulea* subsp. *altaica* отмечалось значимое увеличение содержания подвижных форм Cu, Fe, Zn, Cd и Pb, (рис. 2, табл. 2), уровни значимости представлены в таблице 2. Это может быть связано с изменением гидротермического режима, усиливающего процессы выщелачивания, а также с неоднородностью минералогического состава подстилающих пород, что отмечалось и в исследованиях почв Горного Крыма и Кавказа [34, 35].

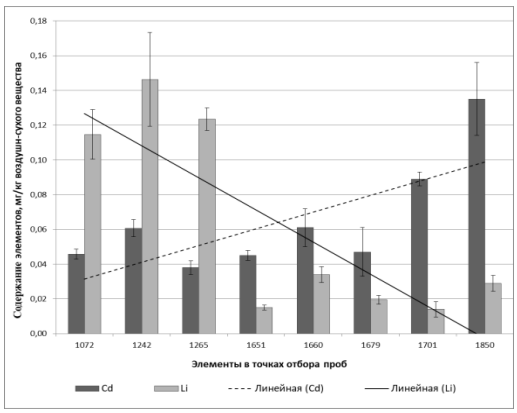
Уменьшение с высотой произрастания растений содержания подвижной формы Sr ($p<0.05$) значимо положительно коррелировало с уровнем накопления в листьях хлорогеновой кислоты. Положительными корреляциями содержание Cu связано с отдельными флавонами ($p<0.001$), а также с их суммой и суммарной величиной ФС при $p<0.01$, содержание Ni положительно коррелирует с суммарным содержанием флавонов при $p<0.05$ (табл. 1).

Таблица 1. Значимые корреляции между содержанием классов ФС в экстрактах листьев растений и микроэлементов в почвах

Классы ФС	Общее содержание элементов в почве		Содержание подвижной в ААБ формы элементов в почве		КБН	
	La	*Y*	Cu	Ni	Cu	Zn
1	**0.73****	**0.59***	**0.67****	0.36	**-0.61***	0.05
2	0.43	0.33	0.15	-0.38	-0.31	0.16
3	-0.02	0.10	0.18	-0.12	0.05	-0.30
4	**0.70****	**0.52***	**0.65****	**0.57***	**-0.61***	0.10
5	-0.03	0.01	-0.37	0.35	0.23	**0.52***

Примечание. 1 – суммарное содержание полифенолов, 2 – суммарное содержание фенолкарбоновых кислот, 3 – суммарное содержание флавонолов, 4 – суммарное содержание флавонов, 5 – суммарное содержание флавононов. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, достоверные на уровне значимости (p) 1^{**}–5^{*}%.





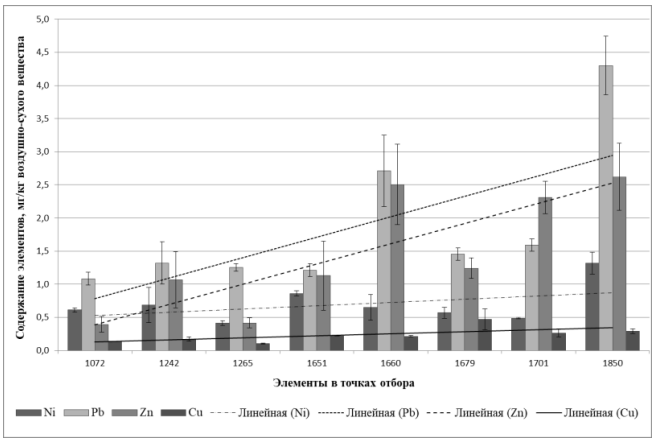


Рис. 2. Распределение содержания подвижных форм макро- и микроэлементов в почве популяций в долине р. Мульта в высотном градиенте, (x ± Sx). Линии на графике – прямые линии тренда

Таблица 2. Значимые корреляции между высотой произрастания растений и содержанием подвижной формы микроэлементов в почвах

Cd	Cu	Fe	Li	Pb	Sr	Zn
0.55*	0.64**	0.64**	-0.85***	0.62*	-0.82***	0.76***

Примечание: коэффициенты корреляции, достоверные на 0.1% – ***, 1% – ** и 5% – * уровнях значимости.

Результаты анализа уровней накопления макро- и микроэлементов в листьях и стеблях *L. caerulea* subsp. *altaica* (табл. 3) показали, что во всех изученных популяциях концентрация макроэлементов в листьях значительно выше, чем в стеблях, что подтверждает полученные ранее результаты [8]. На распределение по органам растений Cu, Fe и Na оказывает влияние местонахождение популяции *L. caerulea* subsp. *altaica.* В двух верхних точках содержание Cu и Fe в листьях в 1.5–2 раза больше, чем в стеблях, в отдельных популяциях ниже по профилю отмечается значительное увеличение Fe в стеблях, равномерное распределение Cu по органам отмечается на трех нижних участках профиля. Содержание Na увеличивается в стеблях растений трех верхних популяций. Концентрации Mn и Zn всегда значительно выше в стеблях. Из микроэлементов в листьях по сравнению со стеблями в больших количествах накапливаются Ni, Sr и Li.

С увеличением высоты отмечалась тенденция уменьшения содержания в листьях растений Ca, Mg, Na, Ba, Cr, Cd, Mo, Pb, Sr, V и Y (значимые значения приведены в таблице 4). Напротив, содержание Ni, Cu и Zn в листьях, а также K, Ni, Pb и Y в стеблях положительно коррелировало с высотой произрастания растений. Увеличение в высотном градиенте концентрации Ni и Cu в листьях растений уже отмечалось нами ранее [7, 8]. Увеличение содержания с высотой Ni, Zn и Cu в органах растений отмечают и в работах [11, 12].

Соотношения физиологически важных элементов в органах растений отражают степень пропорциональности или диспропорции в макро- и микроэлементном обеспечении процессов метаболизма и поэтому могут быть более объективными показателями состояния и функционирования растений. Величина отношения Fe/Mn, являющаяся индикатором фотосинтеза [36], в высотном градиенте уменьшалась с высотой произрастания растений от 2.2 до 0.5 (табл. 5). Также отмечена тенденция увеличения с высотой

произрастания растений величины соотношений, связанных с транспортными функциями – K/Ca и K/Na в листьях и стеблях растений и уменьшение величины отношения Ca/Na в листьях растений. Статистически значимым было увеличение с высотой величины отношения K/Ca в листьях ($p<0.01$) и в стеблях ($p<0.001$), а также снижение величины отношения Ca/Na в листьях ($p<0.05$). Соотношение K/Ca в листьях растений в высотном градиенте изменялось в пределах 0.8–1.9 (табл. 5). Соотношение микроэлементов Cu/Zn, связанных с процессами ферментосинтеза [37, 38], по вертикальному профилю долины р. Мульта варьировало в пределах 0.22–0.62. Ранее мы отмечали очень незначительные диапазоны изменчивости величины этого соотношения для *L. caerulea* в популяциях Горного Алтая (0.2–0.3) [8]. Высокая величина соотношения Cu/Zn установлена в листьях растений из популяции в устье р. Куйгук, в низменном месте, покрытом кочками; возможно, слишком высокое соотношение связано с нарушениями в поступлении Zn.

Таблица 3. Среднее содержание макро- и микроэлементов в органах *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* в зависимости от места произрастания

Элементы	Орган	Высота над уровнем моря (м)							
		1072	1242	1265	1651	1660	1679	1701	1850
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
г/кг воздушно-сухого вещества									
Ca	лист	14.3±0.8	19.6±1.2	13.2±0.9	9.5±1.0	16.6±0.8	12.5±0.2	12.6±0.8	8.7±0.5
	стебель	5.5±0.3	6.0±0.2	6.6±0.1	4.2±0.1	4.3±0.2	6.5±0.1	6.1±0.5	6.0±0.2
K	лист	13.0±2.7	15.8±3.3	13.7±4.3	10.0±2.1	12.9±1.4	17.1±0.8	19.6±1.4	16.6±2.1
	стебель	6.8±0.3	6.5±0.5	8.0±0.7	7.8±0.5	7.9±0.1	11.2±0.6	11.9±0.2	11.0±1.1
Mg	лист	3.5±0.5	4.3±0.6	3.2±0.3	2.5±0.1	3.6±0.4	3.3±0.4	3.03±0.4	2.3±0.2
	стебель	0.9±0.1	1.4±0.3	1.2±0.1	0.9±0.5	0.7±0.2	1.1±0.0	0.9±0.5	1.3±0.8
P	лист	1.9±0.2	2.8±0.6	2.9±0.8	1.8±0.2	2.0±0.1	2.4±0.4	4.1±0.4	2.2±0.3
	стебель	1.0±0.1	1.3±0.3	1.1±0.1	1.0±0.2	0.4±0.0	1.0±0.3	0.8±0.1	1.1±0.5
мг/кг воздушно-сухого вещества									
Al	лист	42±7	46±4	37±8	34±5	56±2	41±3	47±3	33±4
	стебель	43±5	92±12	94±13	30±4	82±8	137±7	74±0.9	44±1
B	лист	18±1	25±5	20±3	14±4	19±5	21±1	16±3	17±4
	стебель	8±1	12±4	11±1	7±1	8±1	11±1	9±1	11±1
Ba	лист	98±6	139±11	76±7	69±4	118±6	82±5	90±7	48±8
	стебель	58±16	111±25	77±6	67±5	48±11	93±7	84±6	69±10
Be	лист	0.013±0.003	0.014±0.001	0.012±0.002	0.008±0.001	0.017±0.001	0.015±0.004	0.016±0.001	0.011±0.001
	стебель	0.005±0.001	0.009±0.002	0.008±0.001	0.005±0.001	0.005±0.001	0.012±0.001	0.009±0.002	0.008±0.001
Cd	лист	0.09±0.02	0.20±0.05	0.18±0.04	0.05±0.01	0.30±0.02	0.07±0.00	0.04±0.00	0.12±0.02
	стебель	0.08±0.00	0.16±0.04	0.11±0.02	0.05±0.01	0.09±0.02	0.17±0.04	0.17±0.03	0.36±0.05
Co	лист	0.03±0.00	0.02±0.00	0.05±0.00	0.01±0.00	0.10±0.02	0.02±0.00	0.02±0.00	0.08±0.01
	стебель	0.02±0.00	0.03±0.00	0.04±0.01	0.04±0.01	0.07±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.06±0.01
Cr	лист	0.42±0.05	0.48±0.10	0.39±0.02	0.24±0.05	0.40±0.02	0.33±0.02	0.42±0.10	0.28±0.01
	стебель	0.18±0.03	0.38±0.12	0.31±0.02	0.13±0.01	0.23±0.03	0.40±0.07	0.25±0.05	0.22±0.01
Cu	лист	5.0±0.7	6.0±0.4	4.4±0.3	7.9±0.2	8.2±0.4	6.6±1.2	7.6±0.8	8.2±0.6
	стебель	6.0±0.9	5.0±0.9	4.2±0.4	4.3±0.5	5.7±0.8	5.2±0.6	5.2±0.2	4.6±0.1
Fe	лист	68±10	70±7	66±3	63±5	61±3	57±5	70±3	85±2
	стебель	45±1	73±6	83±11	34±1	71±8	96±8	56±6	54±1
Ga	лист	0.13±0.02	0.08±0.00	0.07±0.01	0.07±0.01	0.10±0.02	0.08±0.01	0.08±0.01	0.09±0.02
	стебель	0.03±0.00	0.04±0.01	0.04±0.01	0.04±0.01	0.05±0.01	0.07±0.00	0.05±0.01	0.05±0.01
La	лист	0.28±0.02	0.20±0.02	0.19±0.05	0.19±0.02	0.20±0.01	0.27±0.06	0.18±0.05	0.13±0.01
	стебель	0.05±0.01	0.09±0.02	0.08±0.01	0.06±0.01	0.07±0.01	0.32±0.07	0.10±0.01	0.07±0.01
Mn	лист	35±10	66±18	77±13	51±3	35±2	64±11	71±12	157±22
	стебель	94±22	113±3	226±52	81±8	126±16	187±43	143±15	349±25
Mo	лист	0.74±0.18	0.38±0.10	0.10±0.02	0.10±0.02	0.20±0.05	0.17±0.03	0.10±0.02	0.10±0.02
	стебель	0.09±0.00	0.14±0.02	0.09±0.00	0.10±0.00	0.10±0.01	0.07±0.01	0.10±0.02	0.10±0.00
Na	лист	32±5	33±2	28±2	23±1	37±3	28±2	27±1	28±1
	стебель	28±1	35±3	43±10	14±1	28±1	48±5	54±3	59±1
Ni	лист	1.66±0.04	0.87±0.23	1.07±0.28	4.10±0.19	2.02±0.35	2.30±0.56	2.13±0.05	2.36±0.04
	стебель	0.78±0.15	0.45±0.06	0.90±0.07	0.81±0.10	1.80±0.22	3.44±1.01	1.17±0.05	1.52±0.17
Pb	лист	0.16±0.02	0.14±0.02	0.12±0.01	0.10±0.02	0.10±0.01	0.11±0.02	0.10±0.02	0.10±0.01
	стебель	0.11±0.03	0.49±0.02	0.39±0.06	0.10±0.01	0.70±0.11	0.78±0.13	0.30±0.01	0.20±0.04

Окончание таблицы 3

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
Sc	лист	0.05±0.01	0.04±0.01	0.04±0.01	0.03±0.00	0.10±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.02±0.00
	стебель	0.02±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00	0.04±0.00	0.05±0.01	0.02±0.00
Si	лист	584±64	879±155	546±40	262±34	430±32	282±32	183±21	152±18
	стебель	132±15	271±45	281±28	71±8	240±41	377±32	182±18	118±14
Sr	лист	69±10	100±9	78±5	63±8	97±4	73±8	59±2	31±5
	стебель	43±1	64±18	57±5	46±2	42±14	57±7	41±3	32±1
Ti	лист	2.8±0.6	3.1±0.5	2.6±0.3	2.2±0.1	3.2±0.2	3.0±0.4	3.0±0.1	3.0±0.4
	стебель	3.1±0.6	6.7±2.0	6.8±1.3	2.4±0.5	5.2±0.4	11.0±2.1	4.5±0.4	3.7±0.5
V	лист	0.34±0.01	0.39±0.02	0.35±0.01	0.19±0.01	0.40±0.02	0.27±0.01	0.31±0.04	0.27±0.01
	стебель	0.19±0.01	0.30±0.03	0.31±0.01	0.15±0.03	0.25±0.01	0.37±0.02	0.28±0.04	0.21±0.03
Y	лист	0.06±0.01	0.01±0.00	0.11±0.01	0.01±0.00	0.10±0.03	0.05±0.01	0.04±0.00	0.07±0.01
	стебель	0.03±0.00	0.06±0.01	0.09±0.02	0.01±0.00	0.06±0.01	0.13±0.01	0.09±0.01	0.04±0.00
Zn	лист	17±2	23±1	15±4	13±3	22±6	24±1	30±5	37±3
	стебель	27±1	37±3	27±3	23±1	24±1	46±8	35±1	58±1
Zr	лист	0.7±0.2	0.9±0.1	0.7±0.2	0.3±0.0	0.9±0.1	0.7±0.2	0.9±0.1	0.6±0.1
	стебель	0.5±0.0	0.8±0.2	0.9±0.2	0.4±0.0	0.5±0.0	1.1±0.1	0.9±0.32	0.8±0.1

Таблица 4. Значимые корреляции между высотой произрастания растений и содержанием макро- и микроэлементов в органах растений

Орган	Ca	Cr	Cu	K	Mg	Mo	Na	Ni	Pb	Si	V	Y	Zn
Лист	-0.60*	-0.56*	0.54*	0.15	-0.50*	-0.56*	-0.47*	0.57*	-0.49*	-0.78***	-0.63**	-0.51*	0.5*
Стебель	-0.34	-0.11	-0.13	0.66*	-0.41	-0.39	0.01	0.54*	0.45*	-0.05	0.04	0.55*	0.06

Примечание: коэффициенты корреляции, достоверные на 0,1% – ***, 1% – ** и 5% – * уровнях значимости.

Таблица 5. Изменение физиологически важных соотношений в листьях растений в высотном градиенте в долине р. Мульта

Отношение содержания химических элементов	Орган	Высота над уровнем моря (м)							
		1072	1242	1265	1651	1660	1679	1701	1850
K/Ca	лист	0.9	0.8	1.1	1.1	0.8	1.4	1.6	1.9
	стебель	1.3	1.0	1.2	1.8	1.8	1.7	2.0	1.8
Ca/Na	лист	451	590	466	418	452	442	467	306
	стебель	197	180	164	308	155	138	112	103
Cu/Zn	лист	0.3	0.3	0.30	0.6	0.4	0.3	0.3	0.2
	стебель	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
Fe/Mn	лист	2.2	1.3	0.9	1.2	1.7	1.1	1.0	0.5
	стебель	0.5	0.7	0.4	0.4	0.6	0.7	0.4	0.2
K/Na	лист	399	478	497	443	351	604	725	583
	стебель	246	189	195	569	281	238	220	188

Для выявления взаимосвязи содержания макро- и микроэлементов в листьях и стеблях растений и изменением уровня накопления биологически активных полифенолов был проведен корреляционный анализ зависимости между содержанием в экстрактах листьев *L. caerulea* subsp. *altaica* суммы гидроксикоричных кислот, флавонолов, флавонов, флавононов и содержанием отдельных макро- и микроэлементов, величиной отношений ключевых в физиологии растений элементов K/Ca, K/Na, Ca/Na, Fe/Mn и Cu/Zn (табл. 6), а также интенсивностью накопления органами растений макро- и микроэлементов (табл. 1). В результате было установлено, что изменение суммарного содержания гидроксикоричных кислот в экстрактах листьев статистически значимо связано тесными отрицательными корреляционными зависимостями с содержанием в листьях растений Cu, Fe, Mn и Co ($p<0.05$) и положительно – с содержанием La ($p<0.01$) и Mo ($p<0.05$). Содержание флавонолов в экстрактах листьев связано значимыми при $p<0.01$ положительными корреляциями с содержанием La в листьях и при $p<0.05$ с величиной отношений K/Na в стеблях растений. Увеличение в высотном градиенте содержания флавонов связано тесными положительными корреляционными зависимостями с содержанием K ($p<0.01$), величиной отношения K/Na ($p<0.05$) в листьях, содержанием Na, Ni, Zn ($p<0.05$) в стеблях растений. Отрицательные корреляции установлены между содержанием флавонов и величиной отношений Ca/Na ($p<0.01$) в стеблях, а также содержанием Co ($p<0.05$) в листьях растений. С содержанием флавононов отрицательными корреляциями связаны содержание Be, Cr и K в стеблях растений.

Наиболее интенсивно во всех изученных популяциях *L. caerulea* subsp. *altaica* растения поглощали микроэлементы Cu и Zn (рис. 3), что подтверждает ранее полученные результаты [7, 8].

Интенсивность накопления Sr в высотном градиенте значимо увеличивалась с высотой места нахождения популяции (табл. 7), интенсивность накопления микроэлементов Cu, Fe, Na и Zn с высотой уменьшалась.

По всей вероятности, неоднородность макро- и микроэлементного состава почв на изученном профиле ведет за собой изменение интенсивности накопления и содержания в органах, а также величину соотношений основных биофильных элементов растений.

КБН Cu значимо при $p<0.05$ отрицательно коррелировал с суммарным содержанием ФС и содержанием флавонов (табл. 1). Положительные корреляции установлены между КБН Zn и содержанием флавононов ($p<0.05$).

Таблица 6. Значимые корреляции между содержанием классов ФС в экстрактах листьев растений и макро- и микроэлементов в растениях

Элементы	Классы ФС				
	1	2	3	4	5
Содержание элементов в листьях					
Co	**-0.62***	**-0.53***	-0.04	**-0.57***	0.43
Cu	0.15	**-0.54***	0.18	0.29	-0.14
Fe	-0.13	**-0.53***	-0.15	0.08	0.27
K	0.50	-0.10	-0.18	**0.66****	0.09
La	**0.56***	**0.68****	**0.64****	0.10	-0.22
Mn	-0.09	**-0.56***	-0.48	0.26	0.07
Mo	0.21	**0.55***	0.42	-0.09	0.20
K/Na	0.45	0.09	-0.21	**0.55***	0.06
Содержание элементов в стеблях					
Be	0.14	0.28	-0.21	0.16	**-0.59***
Cd	0.00	-0.22	**-0.57***	0.29	-0.29
Cr	0.04	0.37	-0.06	-0.04	**-0.53***
K	0.09	-0.15	-0.29	0.28	**-0.60***
Na	0.21	-0.17	**-0.62****	**0.52***	-0.16
Mn	0.07	-0.37	**-0.58***	0.41	0.10
Ni	**0.61****	0.27	0.25	**0.52***	-0.42
Zn	0.29	-0.23	**-0.53***	**0.59***	-0.10
Ca/Na	-0.41	0.02	0.38	**-0.62****	0.04
K/Na	-0.12	-0.07	**0.52***	-0.30	0.08

Примечание. 1 – суммарное содержание полифенолов, 2 – суммарное содержание фенолкарбоновых кислот, 3 – суммарное содержание флавонолов, 4 – суммарное содержание флавонов, 5 – суммарное содержание флавононов. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, достоверные на уровне значимости 1**– 5*%.

Таблица 7. Значимые корреляции между высотой произрастания растений и интенсивностью накопления макро- и микроэлементов растениями

Cu	Fe	Na	Pb	Sr	Zn
-0.61*	-0.83***	-0.62*	-0.71**	0.55*	-0.71**

Примечание: коэффициенты корреляции, достоверные на 0.1% – ***, 1% – ** и 5% – * уровнях значимости.

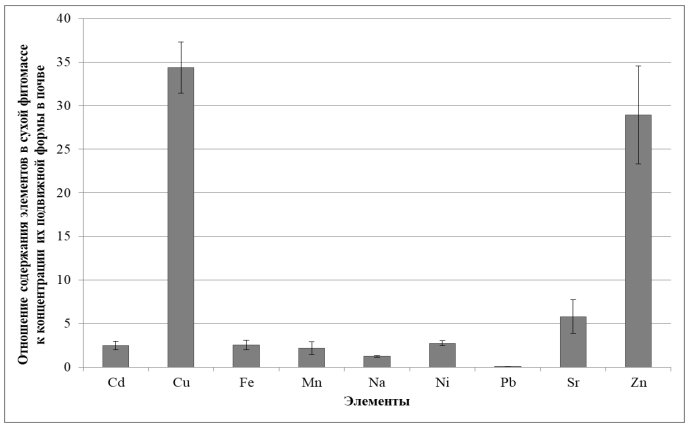


Рис. 3. Коэффициент биологического накопления микроэлементов листьями растений *L. caerulea* subsp. *altaica* (логарифмическая шкала), (x±Sx)

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что с увеличением высоты произрастания над уровнем моря в листьях растений *L. caerulea* subsp. *altaica* увеличивается содержание микроэлементов Ni, Cu и Zn, в стеблях – K, Ni, Pb и Y, а также усиливается интенсивность накопления K, Ca, Mg и Sr. Содержание Ca, Mg, Na, Ba, Cr, Cd, Mo, Pb, Sr, V и Y и интенсивность накопления микроэлементов Cu, Fe, Na и Zn в высотном градиенте, наоборот, статистически значимо снижались. Физиологически важные соотношения элементов Cu/Zn, K/Ca и Fe/Mn в листьях растений изменялись незначительно, в пределах 0.2–0.6; 0.8–1.9 и 0.5–2.0 соответственно, при этом величина отношения K/Ca в органах растений с высотой значимо увеличивалась, а Ca/Na в листьях – уменьшалась.

Установлены статистически значимые корреляции между содержанием элементов в органах растений (почвах) и уровнем накопления отдельных классов полифенолов. Содержание флавонов связано разнонаправленными корреляциями с содержанием Co и K в листьях, Na, Zn и Ni в стеблях, с интенсивностью накопления в органах биофильных элементов Cu и Mg, а также соотношениями K/Na в листьях и Ca/Na в стеблях. Содержание гидроксикоричных кислот статистически значимо отрицательно коррелирует с содержанием Cu, Fe, Co, Mn и положительно – с содержанием La и Mo в листьях. Содержание флавонолов связано отрицательными корреляциями с содержанием Cd, Na, Mn и Zn, положительными – с соотношением K/Na в стеблях. Содержание в почве подвижных форм Cu и Ni значимо связано с содержанием флавонов, а содержание Cr – с содержанием гидроксикоричных кислот.

Выявленные корреляции между уровнем накопления макро- и микроэлементов и биологически активных полифенолов позволяют предположить наличие влияния изменений элементного состава почв и органов растений в вертикальном градиенте на изменение вторичного метаболизма растений. Одновременно и изменение уровня накопления компонентов ФС может влиять на интенсивность поступления элементов минерального питания в органы растений. Полученные результаты указывают на взаимозависимость этих процессов.

Высокий уровень изменчивости содержания отдельных макро- и микроэлементов в органах растений в условиях горного рельефа показывают необходимость контроля элементного состава лекарственного сырья при его заготовках в природных популяциях.

Благодарности
Авторы выражают благодарность администрации ФГБУ «Государственный природный биосферный заповедник «Катунский» за помощь в организации исследований.

Финансирование
Работа выполнена в рамках государственного задания Института почвоведения и агрохимии СО РАН и Центрального сибирского ботанического сада СО РАН (проект № АААА-А21-121011290027-6).

Конфликт интересов
Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ
Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Palikova I., Heinrich J., Bednar P., Marhol P., Kren V., Cvak L., Valentova K., Ruzicka F., Hola V., Kolar M., Simanek V., Ulrichova J. Constituents and antimicrobalpropeties of blue honeysuckle: A novel sourse for phenolic antioxidants // J. Agric. Food Chem. 2008. Vol. 56. Pp. 11883–11889. https://doi.org/10.1021/jf8026233.
2. Jurikova T., Rop O., Mlcek J., Sochor J., Balla S., Szekeres L., Hegedusova A., Hubalek J., Adam V., Kizek R. Phenolic profile of edible honeysuckle berries (genus *Lonicera*) and their biological effects // Molecules. 2012. Vol. 17. Pp. 61–79. https://doi.org/10.3390/molecules17010061.
3. Боярских И.Г. Васильев В.Г. Кукушкина Т.А. Содержание флавоноидов и гидроксикоричных кислот в *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) в популяциях Горного Алтая // Растительные ресурсы. 2014. №1. С. 105–121.
4. Celli G.B., Ghanem A., Su Ling Brooks M. Haskap berries (*Lonicera caerulea* L.) – a critical review of antioxidant capacity and health-related studies for potential value-added products // Food Bioprocess Technol. 2014. Vol. 7. Pp. 1541–1554. https://doi.org/10.1007/s11947-014-1301-2.

5. Kucharska A.Z., Sokół-Łętowska A., Oszmiański J., Piórecki N., Fecka I. Iridoids, phenolic compounds and antioxidant activity of edible honeysuckle berries (*Lonicera caerulea* var. *kamtschatica* Sevast.) // Molecules. 2017. Vol. 22(3). 405. https://doi.org/10.3390/molecules22030405.
6. Oszmiański J., Kucharska A.Z. Effect of pre-treatment of blue honeysuckle berries on bioactive iridoid content // Food Chemistry. 2018. Vol. 240. Pp. 1087–1091. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.049.
7. Боярских И.Г., Сысо А.И, Худяев С.А. Изменчивость элементного состава *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) в популяциях Горного Алтая // Растительные ресурсы. 2013. №4. С. 571–585.
8. Боярских И.Г., Сысо А.И., Сиромля Т.И. Изменчивость содержания химических элементов и биологически активных полифенолов в органах *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* (Caprifoliaceae) в высотном градиенте // Сибирский экологический журнал. 2019. №6. С. 727–741. https://doi.org/10.15372/SEJ20190608.
9. Senica M., Bavec M., Stampara F., Mikulic-Petkovseka M. Blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* subsp. *edulis* (Turcz. ex Herder) Hultén.) berries and changes in their ingredients across different locations // J. Sci. Food Agric. 2018. Vol. 98. Pp. 3333–3342. https://doi.org/10.1002/jsfa.8837.
10. Minami M., Nakamura M., Makino T. Effect of Lonicera caerulea var. emphyllocalyx fruit on biofilm formed by porphyromonas gingiva // Hindawi Bio Med Research International. 2019. Vol. 2019. 1797930. https://doi.org/10.1155/2019/1797930.
11. Negi J.S., Singh P., Nee Pant G.J., Rawat M.S.M., Pandey H.K. Variation of trace elements contents in *Asparagus racemosus* (Willd) // Biological Trace Element Research. 2009. Vol. 135(1-3). Pp. 275–282. https://doi.org/10.1007/s12011-009-8485-8.
12. Dong T., Sha Y., Liu H., Sun L. Altitudinal variation of metabolites, mineral elements and antioxidant activities of *Rhodiolacrenulata* (Hook.f. & Thomson) H.Ohba // Molecules. 2021. Vol. 26. 7383. https://doi.org/10.3390/molecules26237383.
13. Spitaler R., Schlorhaufer P.D., Ellmerer E.P., Merfort I., Bortenschlager S., Stuppner H., Zidorn C. Altitudinal variation of secondary metabolite profiles in flowering heads of Arnica montana cv. ARBO // Phytochemistry. 2006. Vol. 67. Pp. 409–417. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2005.11.018.
14. Rieger G., Mu¨ller M., Guttenberger H., Bucar F. Influence of altitudinal variation on the content of phenolic compounds in wild populations of *Calluna vulgaris*, *Sambucusnigra*, and *Vacciniummyrtillus* // J. Agric. Food Chem. 2008. Vol. 56. Pp. 9080–9086. https://doi.org/10.1021/jf801104e.
15. Храмова Е.П. Фенольные соединения надземной части *Pentaphylloidesfruticosa* (Rosaceae), произрастающего в Горном Алтае // Растительные ресурсы. 2014. №50(4). С. 627–639.
16. Alonso-Amelot M.E., Oliveros-Bastidas A., Calcagno-Pisarelli M.P. Phenolics and condensed tannins of high altitude Pteridiumarachnoideum in relation to sunlight exposure, elevation, and rain regime // BiochemSyst Ecol. 2007. Vol. 35. Pp. 1–10. https://doi.org/10.1016/j.bse.2006.04.013.
17. Ganzera M., Guggenberger M., Stuppner H., Zidorn C. Altitudinal variation of secondary metabolite profiles in flowering heads of *Matricariachamomilla* cv. BONA // Planta Med. 2008. Vol. 74. Pp. 453–457. https://doi.org/10.1055/s-2008-1034326.
18. Xenophontos M., Stavropoulos I., Avramakis E., Navakoudis E., Dornemann D., Kotzabasis K. Influence of the habitat altitude on the (proto)hypericin and (proto)pseudohypericin levels of *Hypericum* plants from Crete // Planta Med. 2008. Vol. 74. Pp. 1496–1503. https://doi.org/10.1055/s-2008-1081337.
19. Ni Q., Wang Z., Xu G., Gao Q., Yang D., Morimatsu F., Zhang Y. Altitudinal variation of antioxidant components and capability in Indocalamuslatifolius (Keng) McClure leaf // J. Nutr. Sci. Vitaminol. 2013. Vol. 59. Pp. 336–342.
20. Senica M., Stampar F., Veberic R., Mikulic-Petkovsek M. The higher the better? Differences in phenolics and cyanogenic glycosides in Sambucusnigra leaves, flowers and berries from different altitudes // J. Sci. Food Agric. 2017. Vol. 97. Pp. 2623–2632. https://doi.org/10.1002/jsfa.8085.
21. Чанишвили Ш., Бадридзе Г., Рапава Л., Джанукашвили Н. Влияние высотного фактора на содержание антиаксидантов в листьях некоторых травянистых растений // Экология. 2007. №56. С. 395–401.
22. Sharaf A.E.-M.A., Khafagi O.-M.A., Hatab E.-B.E., Moursy M.M. Effect of altitudinal gradients on the content of carbohydrate, protein, proline and total phenols of some desert plants in Saint Katherine Mountain, South Sinai, Egypt // Middle-East Journal of Scientific Research. 2013. Vol. 14. Pp. 122–129. https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.14.1.2006.
23. Acuña-Avila P.E., Vásquez-Murrieta M.S., Hernández M.O.F., López-Cortéz M.D.S. Relationship between the elemental composition of grapeyards and bioactive compounds in the Cabernet Sauvignon grapes Vitisvinífera harvested in Mexico // Food Chem. 2016. Vol. 203. Pp. 79–85. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.031.
24. Hanaka A., Dresler S., Wójciak-Kosior M., Strzemski M., Kováˇcik J., Latalski M., Zawi´slak G., Sowa I. The impact of long-and short-term Strontium treatment on metabolites and minerals in *Glycine max* // Molecules. 2019. Vol. 24. 3825. https://doi.org/10.3390/molecules24213825.
25. Boyarskikh I.G., Syromlya T.I. Features of the Accumulation of Macro- and Microelements in the organs of Lonicera caerulea L. plants and their effect on the reproductive characteristics in the zone of geological disjunctive disturbances (the Altai Mountains, the Kyzyl-Yaryk River) // Chemistry for Sustainable Development. 2022. Vol. 30. Pp. 341–353. https://doi.org/10.15372/CSD2022.
26. Körner C. Alpine plant life. Functional plant ecology of high mountain ecosystems. Springer. Berlin, 1999. 344 p.

27. Bilger W., Rolland M., Nybakken L. UV screening in higher plants induced by low temperature in the absence of UV-B radiation // Photochemical & Photobiological Sciences. 2007. Vol. 6. Pp. 190–195. https://doi.org/10.1039/b609820g.
28. Боярских И.Г., Костикова В.А. Изменение индивидуально-группового состава полифенолов в листьях растений *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* (Caprifoliaceae) в высотном градиенте // Химия растительного сырья. 2024. №1. С. 195–203. https://doi.org/10.14258/jcprm.20240112977.
29. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М., 1999. 610 с.
30. Glantz S.A. Primer of Biostatistics. 7th ed. New York, 2012. 320 p.
31. Докучаев В.В. К учению о зонах природы: Горизонтальные и вертикальные почвенные зоны. СПб, 1899. 28 с.
32. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск, 2007. 277 с.
33. Сысо А.И., Колпащиков Л.А., Ермолов Ю.В., Черевко А.С., Сиромля Т.И. Элементный химический состав почв и растений Западного Таймыра // Сибирский экологический журнал. 2014. №6. С. 855–862.
34. Костенко И.В., Опанасенко Н.Е. Сравнительная характеристика горно-лесных и горно-луговых почв Долгоруковской яйлы (Горный Крым) // Почвоведение. 2020. №7. С. 791–802.
35. Сутормина Э.Н., Турун П.П., Полушковский Б.В. Территориальное распределение геохимических показателей почв среднегорных и высокогорных ландшафтов Тебердинского государственного биосферного заповедника // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2021. №15(2). С. 108–116. https://doi.org/10.31161/1995-0675-2021-15-2-108-116.
36. Kabata-Pendias A. Trace Elements in soils and plants. 4th ed. BocaRaton: CRCPress, 2011. 505 p. https://doi.org/10.1201/b10158.
37. Аржанова П.В., Елпатьевский В.С. Геохимия ландшафтов и техногенез. М., 1990. 196 с.
38. Битюцкий Н.П. Микроэлементы высших растений. СПб, 2020. 368 с.

Поступила в редакцию 24 января 2025 г.

После переработки 11 февраля 2025 г.

Принята к публикации 9 апреля 2025 г.

Boyarskikh I.G.[1,2*], *Siromlya T.I.*[2] VARIABILITY OF MACRO- AND TRACE ELEMENTS CONTENT IN LONICERA CAERULEA SUBSP. ALTAICA (CAPRIFOLIACEAE) AS RELATED TO THE POLYPHENOLS CONTENT AND HABITAT ALTITUDE

[1] *Central Siberian Botanical Garden SB RAS, st. Zolotodolinskaya, 101, Novosibirsk, 630090, Russia, irina_2302@mail.ru*
[2] *Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, ave. Lavrentyeva, 8/2, Novosibirsk, 630090, Russia*

To study the variability of macro- and trace elements content in the soil-plant system in *Lonicera caerulea* subsp. *Altaica* populations and chemical elements relationship with polyphenolic compounds composition at different habitat altitudes in the River Multa valley (Mountain Altai) soil and plant samples were collected at eight study sites at the altitudes from 1072 up to 1850 m a.s.l. The samples collected were analyzed by atomic emission spectrometry; the mobile forms of trace elements were determined in acetate-ammonium buffer (pH 4.8) atomic absorption spectrometry. The polyphenol content in phytomass was determined by HPLC. Correlation analysis was performed between the chemical elements content and individual classes and groups of polyphenols.

The data analysis revealed significant variation of chemical elements content in plants as related with their growing site location. The content of Ni, Cu and Zn in leaves, K, Ni, Pb and Y in stems and the accumulation rate of K, Ca, Mg and Sr were found to be positively correlated with the altitude, whereas the content of Ca, Mg, Na, Ba, Cr, Cd, Mo, Pb, Sr, V and Y, as well as the accumulation rate of Cu, Fe, Na and Zn, on the contrary, showed statistically significant decrease with the altitude. Physiologically meaningful ratios of some elements, such as Cu/Zn, K/Ca and Fe/Mn in leaves varied little, ranging 0.2-0.6; 0.8-1.9 and 0.5-2.0, respectively. The K/Ca ratio in plant organs showed statistically significant increase with the altitude, whereas the Ca/Na in leaves decreased. The flavons accumulation rates had statistically significant positive or negative correlations with Co and K content in leaves, Na, Zn and Ni in stems, with accumulation rate of such biophilic elements as Cu and Mg, as well as with K/Na in leaves and Ca/Na in stems. The hydrocinnamic acid derivatives were shown to have statistically significant correlation with some elements, i.e. negative with Cu, Co and Mn content, and positive with La and Mo content in leaves. The accumulation rate of flavonols was negatively correlated with Cd, Na, Mn and Zn and positively correlated with K/Na ratio in stems. Soil content of mobile Cu and Ni showed statistically significant correlation with the flavons content, whereas labile Cr was correlated with hydrocinnamic acids.

Keywords: *Lonicera caerulea* subsp. altaica, altitude gradient, macro-and trace elements, flavonols, flavons, hydrocinnamic acid, the Mountain Altai.

For citing: Boyarskikh I.G., Siromlya T.I. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 4, OnLine First. (in Russ.). https://doi.org/10.14258/jcprm.20250416830.

* Corresponding author.

References

1. Palikova I., Heinrich J., Bednar P., Marhol P., Kren V., Cvak L., Valentova K., Ruzicka F., Hola V., Kolar M., Simanek V., Ulrichova J. *J. Agric. Food Chem*., 2008, vol. 56, pp. 11883–11889. https://doi.org/10.1021/jf8026233.
2. Jurikova T., Rop O., Mlcek J., Sochor J., Balla S., Szekeres L., Hegedusova A., Hubalek J., Adam V., Kizek R. *Molecules*, 2012, vol. 17, pp. 61–79. https://doi.org/10.3390/molecules17010061.
3. Boyarskikh I.G. Vasil'yev V.G. Kukushkina T.A. *Rastitel'nyye resursy*, 2014, no.1, pp. 105–121. (in Russ.).
4. Celli G.B., Ghanem A., Su Ling Brooks M. *Food Bioprocess Technol*., 2014, vol. 7, pp. 1541–1554. https://doi.org/10.1007/s11947-014-1301-2.
5. Kucharska A.Z., Sokół-Łętowska A., Oszmiański J., Piórecki N., Fecka I. *Molecules*, 2017, vol. 22(3), 405. https://doi.org/10.3390/molecules22030405.
6. Oszmiański J., Kucharska A.Z. *Food Chemistry*, 2018, vol. 240, pp. 1087–1091. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.049.
7. Boyarskikh I.G., Syso A.I, Khudyayev S.A. *Rastitel'nyye resursy*, 2013, no.4, pp. 571–585. (in Russ.).
8. Boyarskikh I.G., Syso A.I., Siromlya T.I. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2019, no. 6, pp. 727–741. https://doi.org/10.15372/SEJ20190608. (in Russ.).
9. Senica M., Bavec M., Stampara F., Mikulic-Petkovseka M. *J. Sci. Food Agric*., 2018, vol. 98, pp. 3333–3342. https://doi.org/10.1002/jsfa.8837.
10. Minami M., Nakamura M., Makino T. *Hindawi Bio Med Research International*, 2019, vol. 2019, 1797930. https://doi.org/10.1155/2019/1797930.
11. Negi J.S., Singh P., Nee Pant G.J., Rawat M.S.M., Pandey H.K. *Biological Trace Element Research*, 2009, vol. 135(1-3), pp. 275–282. https://doi.org/10.1007/s12011-009-8485-8.
12. Dong T., Sha Y., Liu H., Sun L. *Molecules*, 2021, vol. 26, 7383. https://doi.org/10.3390/molecules26237383.
13. Spitaler R., Schlorhaufer P.D., Ellmerer E.P., Merfort I., Bortenschlager S., Stuppner H., Zidorn C. *Phytochemistry*, 2006, vol. 67, pp. 409–417. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2005.11.018.
14. Rieger G., Mu¨ller M., Guttenberger H., Bucar F. *J. Agric. Food Chem*., 2008, vol. 56, pp. 9080–9086. https://doi.org/10.1021/jf801104e.
15. Khramova Ye.P. *Rastitel'nyye resursy*, 2014, no. 50(4), pp. 627–639. (in Russ.).
16. Alonso-Amelot M.E., Oliveros-Bastidas A., Calcagno-Pisarelli M.P. *BiochemSyst Ecol*., 2007, vol. 35, pp. 1–10. https://doi.org/10.1016/j.bse.2006.04.013.
17. Ganzera M., Guggenberger M., Stuppner H., Zidorn C. *Planta Med*., 2008, vol. 74, pp. 453–457. https://doi.org/10.1055/s-2008-1034326.
18. Xenophontos M., Stavropoulos I., Avramakis E., Navakoudis E., Dornemann D., Kotzabasis K. *Planta Med*., 2008, vol. 74, pp. 1496–1503. https://doi.org/10.1055/s-2008-1081337.
19. Ni Q., Wang Z., Xu G., Gao Q., Yang D., Morimatsu F., Zhang Y. *J. Nutr. Sci. Vitaminol*., 2013, vol. 59, pp. 336–342.
20. Senica M., Stampar F., Veberic R., Mikulic-Petkovsek M. *J. Sci. Food Agric*., 2017, vol. 97, pp. 2623–2632. https://doi.org/10.1002/jsfa.8085.
21. Chanishvili Sh., Badridze G., Rapava L., Dzhanukashvili N. *Ekologiya*, 2007, no. 56, pp. 395–401. (in Russ.).
22. Sharaf A.E.-M.A., Khafagi O.-M.A., Hatab E.-B.E., Moursy M.M. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 2013, vol. 14, pp. 122–129. https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.14.1.2006.
23. Acuña-Avila P.E., Vásquez-Murrieta M.S., Hernández M.O.F., López-Cortéz M.D.S. *Food Chem*., 2016, vol. 203, pp. 79–85. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.031.
24. Hanaka A., Dresler S., Wójciak-Kosior M., Strzemski M., Kováˇcik J., Latalski M., Zawi´slak G., Sowa I. *Molecules*, 2019, vol. 24, 3825. https://doi.org/10.3390/molecules24213825.
25. Boyarskikh I.G., Syromlya T.I. *Chemistry for Sustainable Development*, 2022, vol. 30, pp. 341–353. https://doi.org/10.15372/CSD2022.
26. Körner C. *Alpine plant life. Functional plant ecology of high mountain ecosystems*. Springer. Berlin, 1999, 344 p.
27. Bilger W., Rolland M., Nybakken L. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2007, vol. 6, pp. 190–195. https://doi.org/10.1039/b609820g.
28. Boyarskikh I.G., Kostikova V.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2024, no.1, pp. 195–203. https://doi.org/10.14258/jcprm.20240112977. (in Russ.).
29. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М., 1999. 610 с. (in Russ.).
30. Glantz S.A. Primer of Biostatistics. 7th ed. New York, 2012. 320 p.
31. Dokuchayev V.V. *K ucheniyu o zonakh prirody: Gorizontal'nyye i vertikal'nyye pochvennyye zony*. [Towards the doctrine of natural zones: Horizontal and vertical soil zones]. St. Petersburg, 1899, 28 p. (in Russ.).
32. Syso A.I. *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoy Sibiri*. [Patterns of distribution of chemical elements in parent rocks and soils of Western Siberia]. Novosibirsk, 2007, 277 p. (in Russ.).
33. Syso A.I., Kolpashchikov L.A., Yermolov Yu.V., Cherevko A.S., Siromlya T.I. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2014, no. 6, pp. 855–862. (in Russ.).
34. Kostenko I.V., Opanasenko N.Ye. *Pochvovedeniye*, 2020, no. 7, pp. 791–802. (in Russ.).

35. Sutormina E.N., Turun P.P., Polushkovskiy B.V. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Yestestvennyye i tochnyye nauki*, 2021, no. 15(2), pp. 108–116. https://doi.org/10.31161/1995-0675-2021-15-2-108-116. (in Russ.).
36. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in soils and plants. 4th ed*. BocaRaton: CRCPress, 2011, 505 p. https://doi.org/10.1201/b10158.
37. Arzhanova P.V., Yelpat'yevskiy V.S. *Geokhimiya landshaftov i tekhnogenez*. [Geochemistry of landscapes and technogenesis]. Moscow, 1990, 196 p. (in Russ.).
38. Bityutskiy N.P. *Mikroelementy vysshikh rasteniy*. [Microelements of Higher Plants]. St. Petersburg, 2020, 368 p. (in Russ.).

Received January 24, 2025

Revised February 11, 2025

Accepted April 9, 2025

Сведения об авторах

Боярских Ирина Георгиевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, irina_2302@mail.ru

Сиромля Татьяна Ивановна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, tgulkina@yandex.ru

Information about authors

Boyarskikh Irina Georgievna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, irina_2302@mail.ru

Siromlya Tatyana Ivanovna – Doctor of Biological Sciences, Leading Research Fellow, tgulkina@yandex.ru