

УДК 581.192: 581.145.21:582.971.1 +581.52

DOI: 10.15372/KhUR2022389

EDN: MLLMQX

Особенности накопления макро- и микроэлементов в органах растений *Lonicera caerulea* L. и их влияние на репродуктивные характеристики в зоне геологических дизъюнктивных нарушений (Горный Алтай, р. Кызыл-Ярык)

И. Г. БОЯРСКИХ^{1,2}, Т. И. СИРОМЛЯ²¹Центральный сибирский ботанический сад СО РАН,
Новосибирск (Россия)

E-mail: irina_2302@mail.ru

²Институт почвоведения и агрохимии СО РАН,
Новосибирск (Россия)

(Поступила 25.02.22; после доработки 02.06.22)

Аннотация

Проведен сравнительный анализ макро- и микроэлементного состава плодов, листьев и стеблей растений на предмет содержания элементов минерального питания в почвах в природной популяции алтайского под-вида жимолости синей (*Lonicera caerulea* subsp. *altaica*) в локальной зоне сгущения дизъюнктивных геологических структур в долине р. Кызыл-Ярык (Горный Алтай, Северо-Чуйский хр.). Установлено значительное варьирование общего содержания в почвах макро- и микроэлементов Ca, Al, K, Na, Sr, P, Mn, Ba, B, Zn, Cu, Cr и Ni, подвижных форм Ca, Sr, Fe, Mn, Cu, Cr, Ni, Co, Na и кислотности почв (pH 4.5–6.7) на участках, различающихся по объемной активности эманионного поля радона (262–1162 Бк/м³). Микропопуляции *L. caerulea* subsp. *altaica* на этих участках различались по уровню накопления в органах растений Cu, K, P, Na, Mo, Cr, P, Sr, Si и по физиологически важным соотношениям Cu/Zn, Fe/Mn и K/Ca. Увеличение величины соотношения Cu/Zn в органах растений значимо влияло на снижение размеров плодов, числа семян в них, их всхожести и на повышение энергии прорастания семян. Энергия прорастания семян также значимо положительно связана с уровнем накопления в листьях и стеблях Ca, Mg, Cr, Cu, Sr, Pb и с соотношением Fe/Cu. Значимо отрицательно с энергией прорастания семян связано содержание K в плодах.

Ключевые слова: жимолость синяя, макро- и микроэлементы, репродуктивная способность, активный тектонический разлом

ВВЕДЕНИЕ

Жимолость синяя (*Lonicera caerulea* L. сем. *Caprifoliaceae* Juss.) относится к важным ресурсным видам растений. Ценность этого вида обусловлена сверхдлинным сроком созревания плодов, высоким содержанием в органах растений биологически активных соединений [1], макро- и микроэлементов [2], которые проявляют антиоксидантную, противоопухолевую, иммуномоду-

лирующую, противовоспалительную, антимикробную, антидиабетическую, противогрибковую, кардиозащитную, антиаллергическую и другие виды активности [2–4].

Элементы минерального питания растений в составе органических веществ являются строительным материалом клетки и ее органелл, необходимы для создания электрохимических потенциалов и выполнения осмотических функций, участвуют в ферментативных реакциях [5].

Концентрация макроэлементов в органах растений хотя и колеблется в зависимости от вида, но находится в близких пределах. По содержанию микроэлементов виды растений могут различаться весьма значительно [6]. Видовая специфичность растений по микроэлементному составу и уровню их накопления и распределения по органам представляет как теоретический, так и практический интерес для использования в медицине. В последнее десятилетие большое количество исследований направлено на изучение биохимического состава плодов жимолости синей, выделение новых биологически активных соединений, определение их состава. Данных по содержанию макро- и микроэлементов в плодах *L. caerulea* мало, и они часто противоречивы [3]. Предполагается, что значительное варьирование минерального состава может быть связано с различиями в климатических и почвенных условиях выращивания.

Согласно ранее проведенным исследованиям, на территории Горного Алтая алтайский подвид жимолости синей (*L. caerulea* subsp. *altaica* Pall.) произрастает на склонах различной экспозиции и на разных высотах бореального вертикального пояса, которые характеризуются различной величиной инсоляции, тепло- и влагообеспеченности местообитаний. Участки произрастания *L. caerulea* subsp. *altaica* сложены разными горными породами, часто с рудопроявлениями, в зонах локальных геофизических и геохимических аномалий, оказывающих влияние на химический состав почв, почвенных вод, почвенного и приземного воздуха, а также минеральный состав растений [7–10]. В одной из популяций *L. caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Кызыл-Ярык (Северо-Чуйский хр.) в локальной сейсмоактивной зоне на участках, различающихся по объемной активности эманионного поля радона ($262\text{--}1162\text{ Бк/м}^3$), проведено изучение изменчивости характеристик генеративной сферы растений [11], а также проанализирован диапазон варьирования содержания макро- и микроэлементов в органах растений [12]. Установленная гетерогенность популяции *L. caerulea* subsp. *altaica* по комплексу репродуктивных характеристик позволила предположить влияние недифференцированного комплекса факторов, связанных с активными тектоническими процессами, на формирование и развитие репродуктивных органов растений. Поскольку участок находится в зоне сгущения дизъюнктивных нарушений геологических пород [13, 14], отдельные микропо-

пуляции (популяционные локусы) *L. caerulea* subsp. *altaica* могут различаться по минеральному составу почв.

Цель данной работы – изучение уровня накопления и распределения макро- и микроэлементов в вегетативных и генеративных органах *L. caerulea* subsp. *altaica* в зоне сгущения активных тектонических разломов в долине р. Кызыл-Ярык в зависимости от элементного состава почв, а также выявление корреляций между содержанием макро- и микроэлементов в растениях и почвах и репродуктивными характеристиками растений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проведены в 2017 г. в Республике Алтай, Кош-Агачском районе ($50^{\circ}05'$ с. ш., $87^{\circ}57'$ в. д., 1976–2030 м над уровнем моря), на 1-км профиле долины р. Кызыл-Ярык (рис. 1) [12], в зоне сочленения активных сейсмогенерирующих разломов – границ Северо-Чуйского хребта, Курайской межгорной впадины и Чаган-Узунского массива, разделяющего Курайскую и Чуйскую впадины [13, 14]. Для выбора ключевых участков с контрастными геохимическими характеристиками использовали геологическую карту [15]. Для уточнения на местности зон активных разломов и возможных зон повышенной трещиноватости в местах пересечения разломов была проведена радоновая съемка выделенного профиля. Известно, что эманирование радона из глубин осуществляется по зонам трещиноватости и разломным зонам, поэтому активность эманионного поля радона отчетливо отображает расположение разломных зон [16]. Регистрация объемной активности радона проведена с помощью детектора-индикатора радона SIRAD M106N (ООО “СИНМОП”, Россия). Использовали максимальное показание суточных измерений, поскольку временные вариации объемной активности радона имеют периодичность порядка 12, 24 ч и около 14 сут [16]. Уровень активности подпочвенного радона на участке исследования был достаточно высоким по сравнению с верхней границей нормы (50 Бк/м^3) и изменялся в пределах $262\text{--}1162\text{ Бк/м}^3$. Для проведения сравнительного анализа изменений уровня накопления макро- и микроэлементов в органах растений были выбраны ключевые участки с различным уровнем объемной активности радона. На этих участках выделены микропопуляции (популяционные локусы) *L. caerulea*

subsp. *altaica* (см. рис. 1). Микропопуляция 1 (M1) расположена на правом берегу р. Кызыл-Ярык, поляна в разнотравно-зеленомошно-брусничном елово-кедрово-лиственничном лесу у подножия северо-западного склона с выходами эрозионных останцов (известняки мраморизованные рифея-кембрия (по геологической карте [15])), объемная активность подпочвенного радона до 707 Бк/м^3 . Микропопуляция 2 (M2) расположена на правом берегу р. Кызыл-Ярык, поляна в зеленомошно-разнотравно-злаковом лиственнично-кедровом лесу, объемная активность подпочвенного радона до 262 Бк/м^3 . Микропопуляция 3 (M3) расположена на левом берегу р. Кызыл-Ярык, широкая поляна в злаково-разнотравном лиственнично-кедровом лесу, объемная активность подпочвенного радона до 1168 Бк/м^3 . По геологической карте [15], M3 находится в зоне сгущения разломной сети, что подтверждает и повышенная эманация радона, а также морфологически выраженные в виде логов на склонах локальные разломы, сходящиеся на этой поляне. Микропопуляция 4 (M4) расположена на левом берегу р. Кызыл-Ярык, основание заросшего лесом аккумулятивного тела старого обвала (хлоритовые сланцы), упавшего на пойму (северо-восточный склон), берег реки, зеленомошно-злаково-разнотравный лиственнично-кедровый лес, объемная активность подпочвенного радона до 391 Бк/м^3 . Микропопуляция 5 (M5) расположена на левом берегу р. Кызыл-Ярык, нижняя часть аккумулятивного тела старого обвала, упавшего на пойму (северо-восточный склон), берег реки, зеленомошно-брусничный-разнотравно-злаковый лиственнично-кедровый лес, объемная активность подпочвенного радона до 646 Бк/м^3 .

Для анализа содержания макро- и микроэлементов в системе “почва – растения” производили сопряженный отбор почвенных и растительных образцов в трех точках каждой микропопуляции. Объекты исследования – листья, плоды и стебли *L. caerulea* subsp. *altaica*, а также почва в зоне корневого питания растений (0–30 см). Листья, плоды и стебли *L. caerulea* subsp. *altaica* собирали в фазе созревания плодов. Всего было отобрано 15 почвенных и 45 растительных образцов (листья, плоды и стебли с 15 растений). Элементный химический состав (Al, B, Ba, Be, Ca, Co, Cr, Cu, Ce, Ga, Fe, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Si, Sr, Sc, Ti, V, Zn, Zr) почв и растений определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Установка для

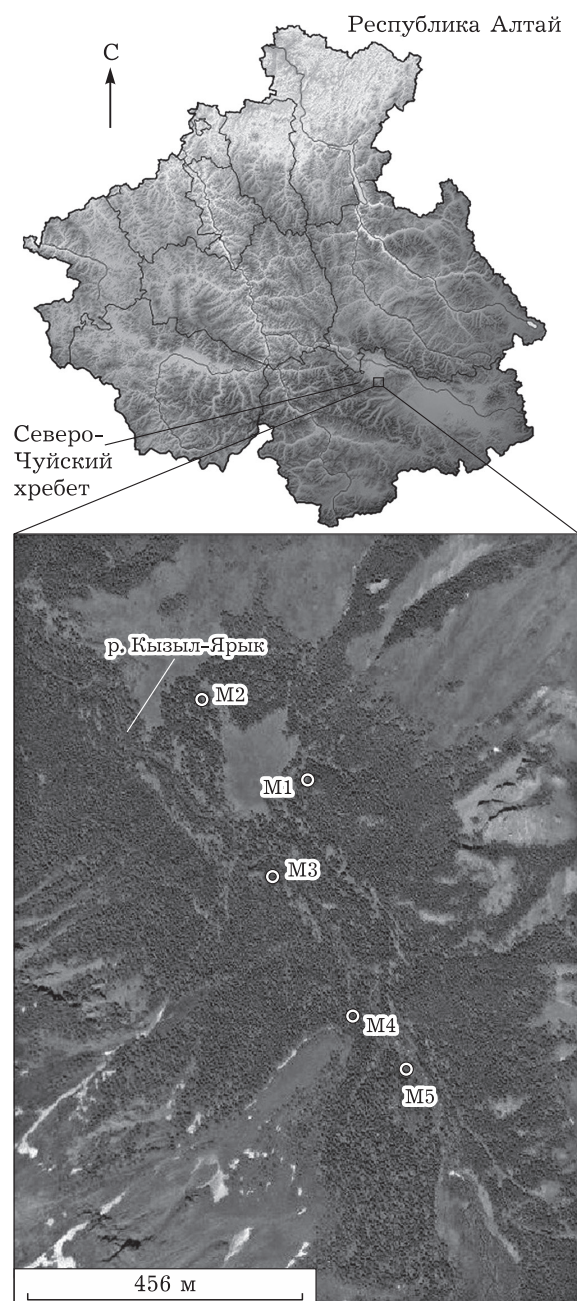


Рис. 1. Участок проведения исследований в долине р. Кызыл-Ярык: M1–M5 – микропопуляции *L. caerulea* subsp. *altaica*, $50^{\circ}05'$ с. ш., $87^{\circ}57'$ в. д., 1976–2030 м над уровнем моря (картографический сервис Google).

проведения исследований включала дуговой аргоновый двухструйный плазматрон, устройство для распыления и подачи в плазменную струю исследуемого тонкодисперсного порошка, многоканальный анализатор эмиссионных спектров МАЭС (Россия) и спектрограф PGS-2 (Германия). Для определения содержания элементов в листьях, стеблях и плодах их озоляли в муфельной печи при температуре 450°C , золу

разлагали концентрированными HNO_3 и HCl с 30 % раствором H_2O_2 , а затем золу растворяли дистиллированной водой. Содержание подвижных форм Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr, Zn (экстрагент – ацетатно-аммонийный буферный раствор с pH 4.8) в почвах анализировали атомно-абсорбционным методом с использованием спектрометра AAnalyst 400 (США). Данные приведены в пересчете на воздушно-сухое вещество. В качестве стандартов были использованы образцы дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы САДПП-09/3 (ОСО № 18809), черноземной выщелоченной среднесуглинистой почвы САЧВП-05/2 (ОСО № 28813), дерново-подзолистой супесчаной почвы СДПС-1 (ГСО 2498-83), чернозема типичного СЧТ-3 (ГСО 2509-83), травяной муки злаковой (гранулированной) ТМЗг-01 (ОСО № 10-176-2011) и листа березы ЛБ-1 (ГСО 8923-2007). Полученные результаты определения химических элементов в стандартных образцах укладывались в их аттестованные значения.

Интенсивность биологического поглощения элементов органами растений *L. caerulea* subsp. *altaica* 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 последней ацетатно-аммонийным буфером. Это отношение также называют коэффициентом биогеохимической подвижности. Он характеризует доступность элементов растениям и степень использования ими подвижных форм элементов, содержащихся в почве [17].

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили при помощи пакета программ STATISTICA 6.1. Распределение исследуемых химических элементов внутри отдельных микропопуляций соответствовало нормальному закону, дисперсии были однородны, что позволило рассчитать средние арифметические значения содержания элементов ($\bar{x}$) и стандартные отклонения (S_x) [18]. Статистическую значимость различий элементного химического состава микропопуляций оценивали методом однофакторного параметрического дисперсионного анализа ANOVA. Корреляционный анализ выполнен по методу Пирсона, критические уровни значимости приведены в тексте статьи. Коэффициенты вариации (C_v) были рассчитаны для всего исследуемого участка (пяти микропопуляций в целом).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почва является для растений основным источником поступления элементов минерального питания, поэтому был проведен сравнительный анализ общего (валового) содержания макро- и микроэлементов, а также содержания подвижных форм K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Li, Sr в зоне минерального питания растений, составлены ряды накопления валовых концентраций элементов (рис. 2, 3, табл. 1). Результаты сравнения абсолютных значений общего содержания макро- и микроэлементов образцов почв, отобранных в микропопуляциях долины р. Кызыл-Ярык, показали их статистически значимые различия по минеральному составу (см. рис. 2). Почвы М5 характеризовались значительно более высоким общим содержанием Ca, Al, K, Na, Sr, P, Mn, Ba, B, Zn и Cu по сравнению с почвами других микропопуляций. По всей видимости, они сформированы на породах баратальской свиты (карбонатные породы). Сходным минералогическим составом и самым низким общим содержанием практически всех проанализированных элементов отличались почвы М3 и М4, вероятно, сформированные на породах близкого геологического происхождения (горноалтайская свита). Высокими концентрациями Cr и Ni характеризуются почвы М1, возможное влияние на химизм почв оказывают породы манжерокской свиты. Различия по содержанию микро- и макроэлементов хорошо иллюстрируют и их ряды накопления (см. табл. 1). Эти различия связаны с минералогическим составом подстилающих пород, в значительной степени определяющих элементный состав почв [19]. Согласно данным [15], исследуемая популяция *L. caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Кызыл-Ярык находится на относительно небольшом участке, в зоне сгущения тектонических разломов, разделяющих контрастные по минералогическому составу породы манжерокской свиты (зеленокаменноизмененные основные и средние эффузивы и их туфы, известняки, силицилиты, актинолитовые сланцы), нерасчлененной горноалтайской свиты (кварц-биотитовые, кварц-амфиболовые кристаллические сланцы и гнейсы), верхней подсвиты горноалтайской свиты (алевролиты, филлитизированные сланцы и полимиктовые песчаники) и баратальской свиты (мраморизированные известняки, горизонты силицилитов и основных эффузивов). По долине реки отмечены и ледниковые отложения [15], которые также могли оказывать влияние на

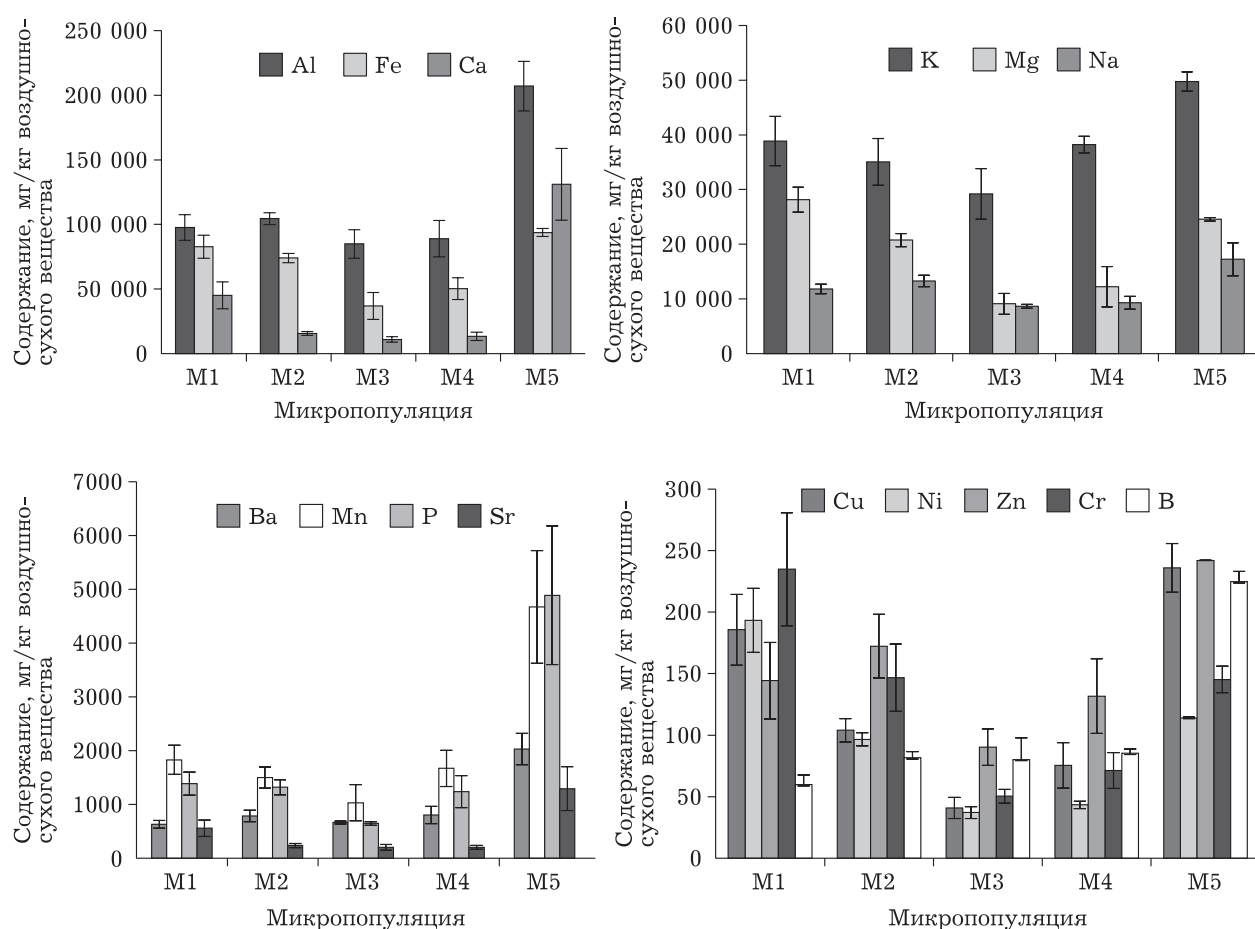


Рис. 2. Распределение общего содержания макро- и микроэлементов в почвах в микропопуляциях *L. caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Кызыл-Ярык, мг/кг воздушно-сухого вещества, ($\bar{x} \pm S_x$).

разнообразие минерального состава почв на этом участке.

Почвы исследуемых микропопуляций *L. caerulea* subsp. *altaica* различались по величине pH, которая для M1 составляла 6.7, M2 – 4.5, M3 – 5.8, M4 – 6.4, M5 – 6.7. Кислотность, наряду с другими факторами, оказывает влияние на подвижность химических элементов в почве. На рис. 3 показано изменение содержания подвижной формы макро- и микроэлементов в почве в зависимости от места произрастания растений *L. caerulea* subsp. *altaica*. В почвах M1 и M5, отличающихся наименьшей кислотностью, установлены наибольшие концентрации подвижной формы Ca, Sr и наименьшие – Fe. В почве M5 отмечено также значимо самое низкое содержание Cr, Ni, Co, Cu и самое высокое содержание Na. Почвы M1 отличались от остальных микропопуляций значимо большими концентрациями Mn. В почвах с наибольшей кислотностью (M2) установлено самое высокое содержание Fe. Значимо положительными ли-

нейными корреляции с величиной pH связаны содержания Ca и Sr (уровень значимости $p < 0.01$); отрицательными – Fe ($p < 0.001$), Cr, Co, Ni, Pb ($p < 0.01$). Содержание подвижной формы Ca, Sr ($p < 0.001$) и Na ($p < 0.01$) значимо коррелирует с общим содержанием этих элементов в почве.

Сравнительный анализ содержания 27 изученных макро- и микроэлементов в листьях, плодах и стеблях *L. caerulea* subsp. *altaica*, как уже отмечалось в [12], показал их различный характер распределения и накопления в органах растений (табл. 2).

Содержание зольных элементов в листьях жимолости синей изменялось в зависимости от места произрастания растений в пределах 8.1–9.5 % и было наибольшим по сравнению с другими органами. Повышенная зольность обусловлена более высоким уровнем накопления макроэлементов: Ca – до 21 г/кг, Si – до 1.8 г/кг, Mg и P – до 4.0 и 4.1 г/кг соответственно. Из микроэлементов в листьях отмечались и более высокие концентрации Sr, Ni, Mo, B, Ga, La и Zr.

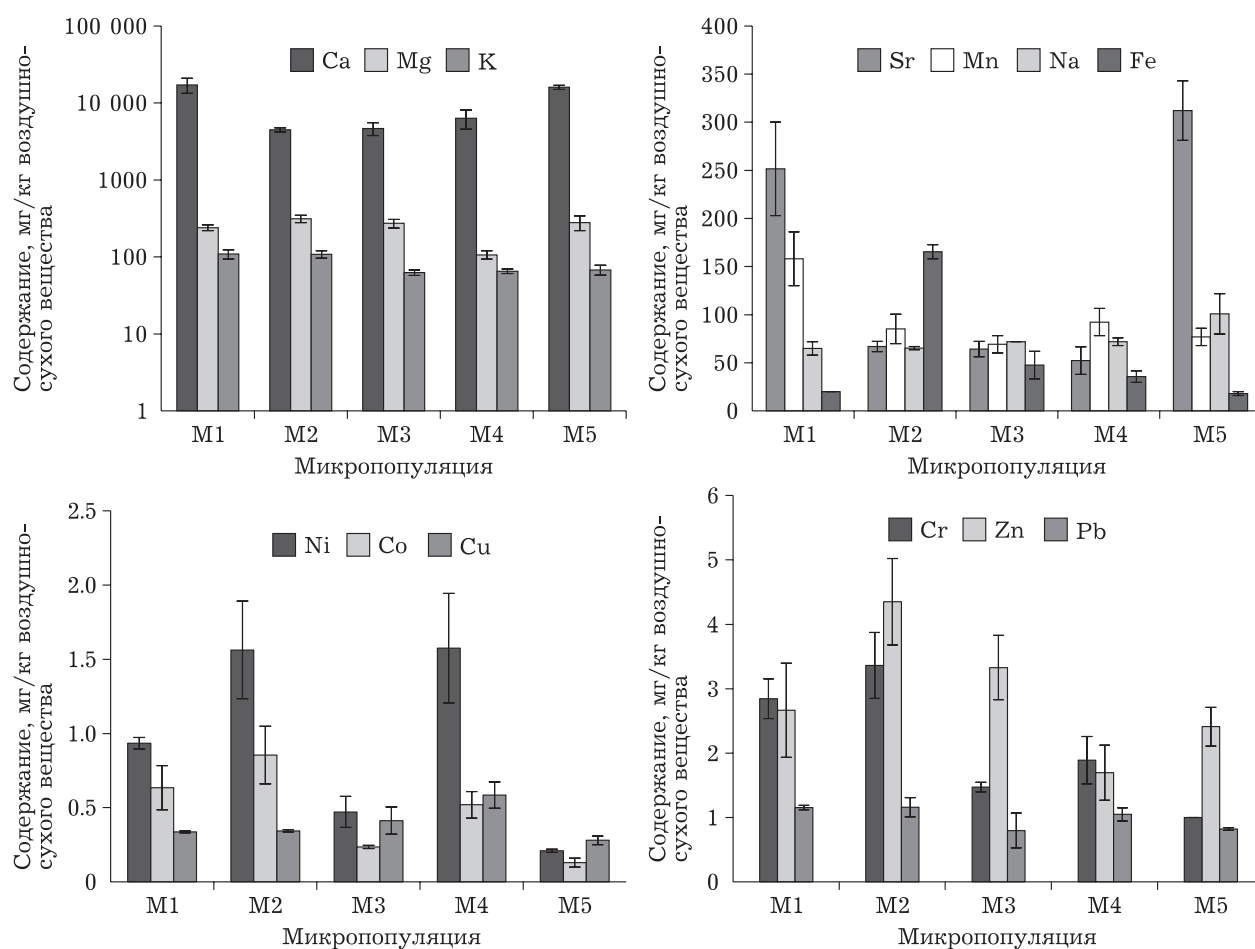


Рис. 3. Распределение содержания подвижных форм макро- и микроэлементов в почве в микропопуляциях *L. caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Кызыл-Ярык, мг/кг воздушно-сухого вещества (для K, Mg и Ca в логарифмической шкале), ($\bar{x} \pm S_{\bar{x}}$).

ТАБЛИЦА 1

Ряды накопления микро- и макроэлементов в листьях *L. caerulea* subsp. *altaica* и в почвах в зависимости от места произрастания растений

Микропопуляция	Ряд накопления
В листьях растений	
M1	Ca > K > P > Mg > Si > Sr > Ba > Fe > Na > Al > Mn > B > Zn > Cu > Mo > Ti > Zr > Ce > Ni > Cr > Pb > V > La > Ga > Co > Sc > Be
M2	Ca > K > P > Mg > Si > Sr > Ba > Na > Fe > Al > Mn > B > Zn > Cu > Ti > Zr > Mo > Ni > Ce > Pb > Cr > V > La > Ga > Co > Sc > Be
M3	Ca > K > Mg > P > Si > Ba > Sr > Na > Al > Fe > B > Mn > Zn > Cu > Ti > Zr > Ce > Ni > Mo > V > Pb > Cr > La > Ga > Co > Be > Sc
M4	Ca > K > Mg > P > Si > Ba > Sr > Mn > Fe > Na > Al > B > Zn > Cu > Ti > Zr > Ce > Ni > Pb > V > Cr > La > Ga > Co > Mo > Be > Sc
M5	Ca > K > Mg > P > Si > Mn > Ba > Sr > Al > Na > Fe > B > Zn > Cu > Ti > Ce > Zr > Ni > V > La > Cr > Pb > Co > Ga > Mo > Be > Sc
В почвах	
M1	Al > Fe > Ca > K > Mg > Na > Ti > Mn > P > Ba > Sr > V > Cr > Zr > Ni > Cu > Zn > Co > B > Sc > La > Pb > Ga > Mo > Be
M2	Al > Fe > K > Mg > Ca > Na > Ti > Mn > P > Ba > Zr > V > Sr > Zn > Cr > Cu > Ni > B > Co > La > Sc > Pb > Ga > Mo > Be
M3	Al > Fe > K > Ca > Mg > Na > Ti > Mn > Ba > P > Zr > Sr > V > Zn > B > Cr > Cu > Ni > La > Pb > Co > Sc > Ga > Mo > Be
M4	Al > Fe > K > Ca > Mg > Na > Ti > Mn > P > Ba > Zr > Sr > V > Zn > Cu > B > Cr > Ni > La > Pb > Sc > Co > Ga > Mo > Be
M5	Al > Ca > Fe > K > Mg > Na > Ti > P > Mn > Ba > Sr > Zr > V > Zn > Cu > B > Cr > Ni > La > Pb > Sc > Co > Ga > Mo > Be

ТАБЛИЦА 2

Содержание золы, макро- и микроэлементов в органах растений
в микропопуляциях *L. caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Кызыл-Ярык
($\bar{x} \pm S_{\bar{x}}$, мг/кг воздушно-сухого вещества; К, Са, Mg, Р – г/кг) [12]

Элемент	Орган растения	Микропопуляция				
		М1	М2	М3	М4	М5
Зола, %	Лист	9.4±0.1	9.2±0.2	9.5±0.1	8.8±0.4	8.1±0.1
	Плод	4.4±0.2	4.8±0.2	4.8±0.2	4.8±0.9	5.2±0.4
	Стебель	3.6±0.1	3.8±0.1	3.4±0.1	3.5±0.2	3.0±0.1
Al	Лист	58±2	60±4	54±2	70±5	59±3
	Плод	20±1	20±1	17±1	17±3	20±2
	Стебель	82±5	75±10	83±13	71±8	92±4
В	Лист	38±3	40±1	35±1	37±2	33±1
	Плод	12±1	12±1	11±1	12±2	11±1
	Стебель	12±1	15±1	13±1	12±1	11±1
Ва	Лист	74±3	118±11	124±7	118±17	97±3
	Плод	11±1	16±1	16±1	15±3	15±1
	Стебель	55±4	105±12	85±5	69±4	74±6
Be	Лист	0.056±0.004	0.059±0.003	0.059±0.004	0.056±0.002	0.045±0.001
	Плод	0.029±0.002	0.030±0.001	0.024±0.001	0.032±0.001	0.029±0.002
	Стебель	0.025±0.002	0.027±0.001	0.023±0.001	0.020±0.002	0.020±0.001
Са	Лист	20.8±0.7	17.8±0.4	17.8±0.8	18.2±1.0	15.6±0.6
	Плод	2.7±0.3	2.8±0.1	3.0±0.2	3.0±0.1	2.7±0.2
	Стебель	6.4±0.2	6.8±0.3	5.4±0.2	5.5±0.3	4.6±0.1
Се	Лист	1.5±0.1	1.4±0.1	1.4±0.1	1.4±0.1	2.4±0.2
	Плод	0.8±0.1	0.8±0.1	0.8±0.1	0.9±0.1	1.5±0.1
	Стебель	0.6±0.1	0.8±0.1	0.7±0.1	0.5±0.1	0.9±0.1
Со	Лист	0.11±0.02	0.13±0.02	0.17±0.01	0.13±0.01	0.19±0.03
	Плод	0.04±0.01	0.07±0.01	0.08±0.01	0.10±0.01	0.14±0.03
	Стебель	0.03±0.01	0.10±0.02	0.08±0.01	0.05±0.01	0.08±0.01
Сг	Лист	0.70±0.06	0.55±0.03	0.44±0.01	0.45±0.02	0.34±0.02
	Плод	0.23±0.01	0.24±0.01	0.18±0.02	0.22±0.02	0.20±0.02
	Стебель	0.30±0.02	0.35±0.02	0.27±0.02	0.22±0.02	0.22±0.02
Cu	Лист	12±1	13±1	11±1	9±1	6±1
	Плод	13±1	13±1	14±1	13±1	7±1
	Стебель	10±1	15±1	13±1	11±2	5±1
Fe	Лист	67±6	67±1	46±3	77±5	51±4
	Плод	20±2	19±1	19±2	27±1	18±2
	Стебель	65±5	53±5	58±10	58±5	63±4
Ga	Лист	0.29±0.03	0.28±0.02	0.25±0.01	0.25±0.01	0.15±0.01
	Плод	0.15±0.01	0.13±0.01	0.12±0.01	0.14±0.01	0.11±0.01
	Стебель	0.12±0.01	0.12±0.01	0.10±0.01	0.08±0.01	0.07±0.01
К	Лист	17±1	16±1	14±1	16±2	12±1
	Плод	15±1	18±1	19±1	23±1	19±1
	Стебель	8±1	9±1	7±1	8±1	6±1
La	Лист	0.34±0.02	0.43±0.02	0.43±0.02	0.38±0.04	0.37±0.04
	Плод	0.16±0.01	0.21±0.02	0.19±0.01	0.24±0.02	0.27±0.05
	Стебель	0.12±0.02	0.24±0.05	0.18±0.02	0.11±0.01	0.11±0.01
Mg	Лист	3.5±0.1	3.9±0.1	3.6±0.2	4.0±0.2	3.3±0.1
	Плод	1.1±0.1	1.2±0.1	1.2±0.1	1.3±0.1	1.1±0.1
	Стебель	0.9±0.1	1.1±0.1	1.0±0.1	0.9±0.1	0.8±0.1
Mn	Лист	54±4	53±6	35±1	90±9	108±18
	Плод	16±1	16±1	12±1	22±1	21±2
	Стебель	91±4	114±17	86±9	94±15	179±12

Таблица 2 (Окончание)

Элемент	Орган растения	Микропопуляция				
		М1	М2	М3	М4	М5
Mo	Лист	3.91±0.78	1.73±0.14	0.87±0.07	0.08±0.01	0.10±0.01
	Плод	0.46±0.07	0.26±0.03	0.13±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01
	Стебель	0.24±0.03	0.18±0.02	0.09±0.02	0.05±0.02	0.03±0.01
Na	Лист	67±3	79±4	76±1	76±1	55±2
	Плод	33±1	34±3	32±2	48±2	33±2
	Стебель	35±2	36±1	41±4	42±2	35±1
Ni	Лист	1.36±0.10	1.69±0.10	1.19±0.03	1.19±0.07	1.02±0.24
	Плод	1.40±0.20	2.10±0.10	1.67±0.10	1.79±0.20	2.10±0.40
	Стебель	0.54±0.04	0.92±0.07	0.73±0.06	0.94±0.26	0.63±0.05
P	Лист	4.1±0.3	4.0±0.3	2.1±0.2	2.6±0.2	1.7±0.2
	Плод	2.1±0.1	2.3±0.1	1.7±0.1	2.4±0.1	1.7±0.1
	Стебель	0.8±0.1	1.1±0.1	0.8±0.1	0.7±0.1	0.6±0.1
Pb	Лист	0.61±0.07	0.56±0.03	0.49±0.02	0.54±0.03	0.33±0.02
	Плод	0.25±0.02	0.28±0.01	0.18±0.01	0.27±0.01	0.21±0.02
	Стебель	0.37±0.03	0.39±0.03	0.39±0.07	0.26±0.04	0.23±0.02
Sc	Лист	0.06±0.01	0.06±0.01	0.05±0.00	0.05±0.01	0.03±0.01
	Плод	0.03±0.00	0.04±0.00	0.02±0.01	0.03±0.00	0.02±0.01
	Стебель	0.03±0.00	0.04±0.01	0.04±0.01	0.02±0.00	0.03±0.00
Si	Лист	1631±214	1796±210	758±23	853±63	681±74
	Плод	69±6	73±9	64±3	110±16	61±9
	Стебель	242±17	209±24	250±38	177±21	200±13
Sr	Лист	151±6	145±4	97±9	91±8	76±3
	Плод	23±2	24±1	13±1	13±1	11±1
	Стебель	64±4	80±3	43±2	38±3	36±1
Ti	Лист	3.1±0.2	2.9±0.3	2.7±0.1	4.3±0.3	3.1±0.1
	Плод	0.8±0.1	0.9±0.1	0.9±0.1	1.2±0.1	1.1±0.1
	Стебель	5.8±0.5	4.5±0.8	5.5±1.0	4.9±0.7	5.1±0.4
V	Лист	0.54±0.01	0.53±0.02	0.54±0.01	0.51±0.03	0.45±0.01
	Плод	0.24±0.01	0.25±0.01	0.24±0.01	0.29±0.01	0.27±0.02
	Стебель	0.30±0.01	0.27±0.02	0.27±0.02	0.26±0.03	0.26±0.01
Zn	Лист	23±1	24±1	32±2	27±2	23±1
	Плод	12±1	13±1	14±1	16±1	11±1
	Стебель	39±1	48±6	52±3	44±6	37±2
Zr	Лист	1.7±0.1	1.9±0.1	1.9±0.1	1.5±0.1	1.2±0.1
	Плод	0.8±0.1	1.1±0.1	0.8±0.1	0.9±0.1	0.8±0.1
	Стебель	0.7±0.1	0.9±0.1	0.8±0.1	0.6±0.1	0.57±0.1

Примечание. $\bar{x}$ – среднее арифметическое; $S_{\bar{x}}$ – стандартное отклонение.

В плодах содержание К было более высокое по сравнению с другими органами и изменялось от 15 до 23 г/кг. Подвид *L. caerulea* subsp. *altaica* характеризуется преимущественным аккумулярованием Mn и Zn в стеблях растений. Для Cu характерно достаточно равномерное распределение по органам. Коэффициент биологического накопления хорошо иллюстрирует различную интенсивность накопления органами определенных макро- и микроэлементов (рис. 4). При значениях КБН > 1 растения рассматриваются как концентраторы химических элемен-

тов [6]. Для *L. caerulea* subsp. *altaica* самые высокие значения КБН характерны для микроэлементов Cu и Zn, интенсивное накопление которых является специфичной особенностью этого вида (см. рис. 4), также этот подвид является концентратором Ni.

Наблюдались значительные различия в содержании отдельных макро- и микроэлементов в органах растений и их последовательности в рядах накопления в зависимости от места произрастания растений (см. табл. 1 и 2). В частности, для микропопуляции М5 установлены самые

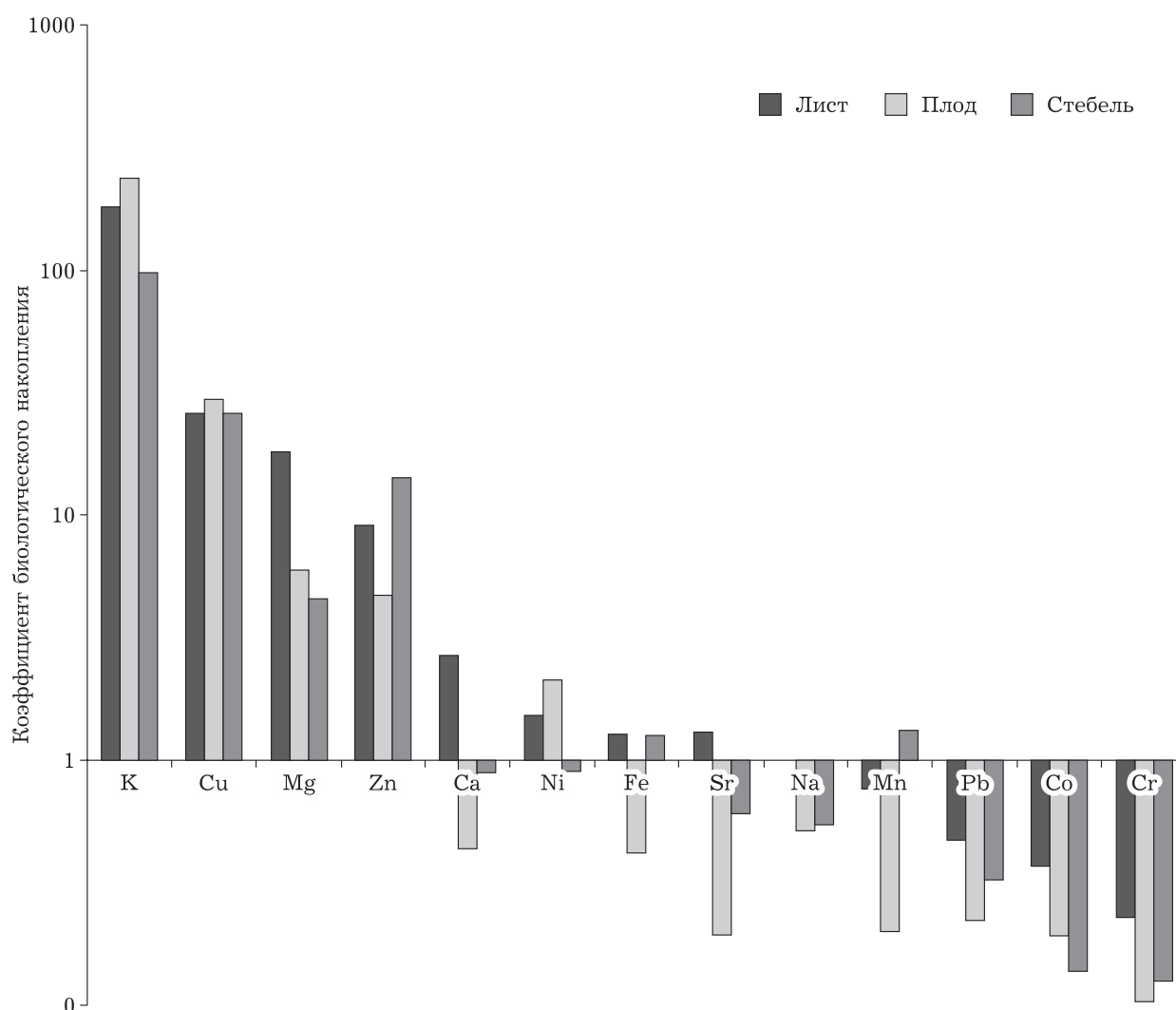


Рис. 4. Коэффициент биологического накопления макро- и микроэлементов листьями, плодами и стеблями растений *L. caerulea* subsp. *altaica* (логарифмическая шкала).

низкие концентрации Cu, K, P и Na в отдельных органах растений. Для растений из микропопуляции M1 характерно наибольшее содержание Mo во всех органах растений. В листьях растений из микропопуляций M1 и M2 значительно выше концентрация Cu, Cr, P, Sr и Si.

В общей выборке, включающей пробы почв всех исследованных микропопуляций, был выявлен очень высокий уровень варьирования содержания химических элементов – коэффициент вариации C_v изменялся в пределах 20–119 % (рис. 5). Однако при этом их концентрация в органах растений на исследуемом участке варьировала незначительно, за исключением молибдена, C_v содержания которого в листьях равен 119 % при достаточно низком варьировании его концентрации в почве ($C_v = 28$ %). Наиболее стабильным ($C_v < 20$ %) было содержание в органах растений Mg, B, V, Be, Al, La, Ca, Na, Zr,

K, Zn, Ti, Ba, Ni, Fe (см. рис. 5). Уровень варьирования содержания меди в листьях был достаточно высоким ($C_v = 28$ %), однако ее место в рядах накопления не изменялось, также как и для цинка. Значительная вариабельность содержания в листьях Mo ($C_v = 119$ %) и Mn ($C_v = 44$ %) отражается и на изменении места этих элементов в рядах накопления (см. табл. 1).

Изменение интенсивности накопления макро- и микроэлементов органами растений из почвы на разных участках оказывало влияние и на величину физиологически важных соотношений элементов минерального питания. Данные по отдельным соотношениям элементов, которые являются критериями оценки жизненного состояния растительного организма, представлены в табл. 3 [12].

Соотношение K/Ca характеризуется достаточно постоянной величиной и определяет тип

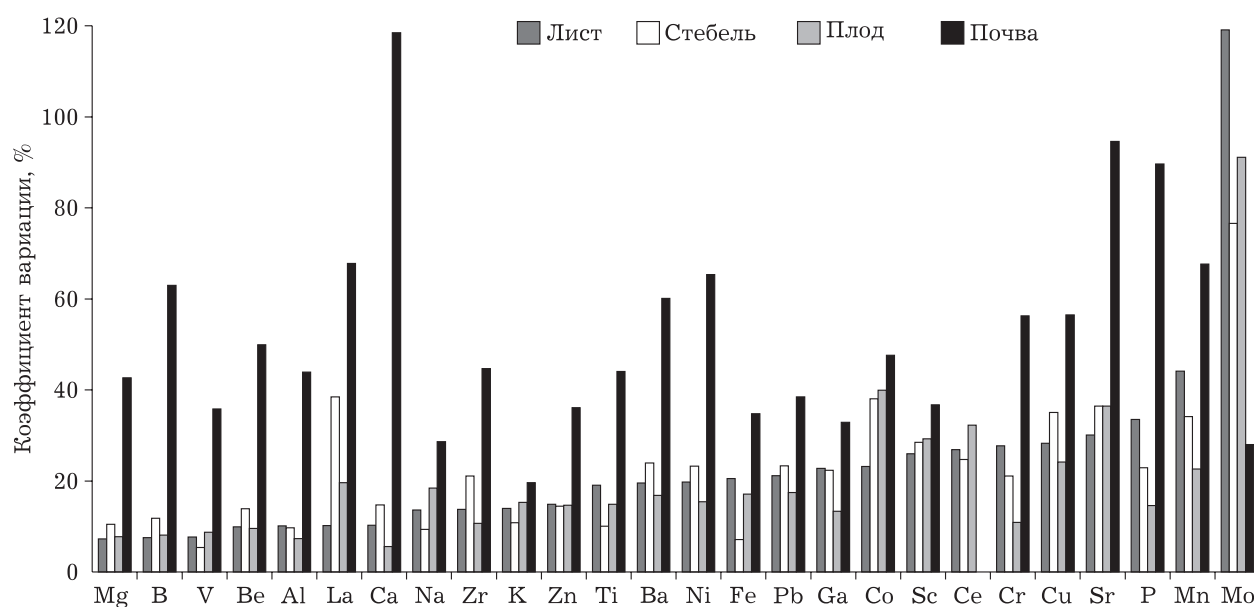


Рис. 5. Уровни варьирования содержания макро- и микроэлементов в органах *L. caerulea* subsp. *altaica* и почвах ($n = 15$).

минерального питания растений. Ранее установлено, что для *L. caerulea* subsp. *altaica* соотношение K/Ca в листьях растений всегда <1 [20, 21], что говорит о принадлежности этого вида к растениям с кальциотрофным типом минерального обмена [22]. В микропопуляции М4 в листьях растений Ca содержалось меньше, чем K, что нехарактерно для этого вида. В остальных микропопуляциях соотношение K/Ca изменялось в пределах 0.7–0.9.

Необходимым условием для эффективного протекания фотосинтеза в листьях растений является изменение соотношения Fe/Mn в пределах 1.2–2.5 [23]. По нашим данным, наиболее низкие значения Fe/Mn – 0.4 и 0.9 – наблюдались в микропопуляциях М5 и М4 соответ-

ственно, что указывает на нарушение поступления Fe в листья растений на этих участках.

Согласно ранее проведенным исследованиям, соотношение Cu/Zn в листьях жимолости синей в различных популяциях Горного Алтая изменялось в пределах 0.2–0.3 [20]. Оба элемента связаны с процессами ферментосинтеза [5] и их соотношение более жестко контролируется биологическими и физико-химическими механизмами поглощения и концентрации элементов. В микропопуляциях М1 и М2 наблюдалось увеличение величины Cu/Zn до 0.5 за счет более интенсивного накопления Cu, что указывает на возможное нарушение физиологических процессов и требует дальнейших исследований.

Ранее в результате изучения популяционной изменчивости вида *L. caerulea*, произрастающего в зонах активных тектонических разломов, было установлено, что геофизические и геохимические аномалии могут влиять на изменение содержания химических элементов в растениях [20] и увеличение уровня изменчивости их морфологических признаков [24]. Как отмечалось выше, в результате изучения изменчивости репродуктивных характеристик растений в популяции *L. caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Кызыл-Ярык, установлена гетерогенность популяции по комплексу признаков генеративной сферы [11]. Варьирование макро- и микроэлементного состава почв на этом участке, связанное с тектоническими дизъюнктивными нарушениями горных пород, может являться одной из причин гетерогенности данной популяции по

ТАБЛИЦА 3

Соотношения макро- и микроэлементов в органах *L. caerulea* subsp. *altaica* в зависимости от места произрастания [12]

Соотношение элементов	Орган растения	Микропопуляция				
		М1	М2	М3	М4	М5
Cu/Zn	Лист	0.5	0.5	0.3	0.4	0.2
	Плод	1.1	1.0	1.0	0.7	0.5
	Стебель	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1
Fe/Mn	Лист	1.5	1.3	1.0	0.9	0.4
	Плод	1.3	1.2	1.5	1.1	0.6
	Стебель	0.7	0.5	0.7	0.7	0.3
K/Ca	Лист	0.8	0.9	0.8	1.2	0.7
	Плод	5.6	6.3	6.2	5.6	7.4
	Стебель	1.2	1.3	1.4	1.5	1.3

ТАБЛИЦА 4

Коэффициенты корреляции между содержанием макро- и микроэлементов, их соотношениями в органах растений и репродуктивными характеристиками

Репродуктивные характеристики	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Zn	Fe/Mn	Fe/Zn	Fe/Cu	Fe/Ni	Cu/Zn	K/Ca	Ca/Mg
Лист																				
Длина плодов	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	-0.2	0.4	-0.2	0.2	-0.1	0.4	0.0	-0.2	0.1	0.1	-0.2	0.1	-0.2
Ширина плодов	-0.1	0.3	-0.4	-0.4	0.0	-0.1	0.1	0.3	0.2	-0.3	-0.3	-0.5	0.3	-0.5	-0.2	-0.4	0.3	-0.6	0.0	-0.3
Масса плодов	-0.1	0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.0	0.3	-0.3	-0.1	-0.3	0.6	-0.3	-0.4	-0.1	0.1	-0.5	0.1	-0.3
Число семян	-0.5	0.1	-0.4	-0.5	0.1	0.1	-0.4	0.6	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.1	-0.8	0.0	-0.5	0.5	-0.5	0.3	-0.3
Всхожесть семян	0.2	0.1	0.2	-0.4	0.3	-0.1	-0.1	0.5	-0.1	-0.4	-0.2	0.0	-0.1	-0.6	0.3	-0.4	0.6	-0.3	-0.2	0.3
Энергия прорастания семян	0.5	-0.3	0.8	0.6	0.4	0.2	0.4	-0.2	0.4	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.2	0.6	-0.1	0.5	-0.1	0.4
Плод																				
Длина плодов	0.2	-0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2	0.6	-0.4	0.2	0.1	0.4	0.1	0.0	0.2	0.4	-0.1	-0.2	0.1
Ширина плодов	0.0	0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.4	0.2	-0.1	-0.3	0.3	0.1	0.0	-0.1	0.0	-0.3	0.1	0.1
Масса плодов	0.2	0.2	-0.1	0.1	0.3	0.1	0.2	0.2	0.6	-0.2	0.0	0.0	0.5	0.0	-0.1	0.1	0.3	-0.2	-0.1	0.1
Число семян	0.4	0.5	0.0	-0.6	0.5	0.3	0.3	0.6	0.6	-0.1	0.2	0.0	0.3	-0.2	0.5	-0.6	0.5	-0.7	-0.1	0.3
Всхожесть семян	-0.3	0.3	0.0	-0.2	-0.2	0.0	-0.3	-0.1	0.1	0.0	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	0.1	-0.2	-0.1	0.0	0.4	-0.3
Энергия прорастания семян	-0.3	-0.3	0.2	0.4	-0.3	-0.6	-0.3	-0.3	-0.2	0.0	0.0	0.2	-0.3	0.0	-0.2	0.4	-0.3	0.6	0.1	-0.5
Стебель																				
Длина плодов	0.0	0.0	-0.2	0.1	0.0	0.2	0.1	-0.3	0.2	0.2	-0.1	-0.2	0.2	0.3	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.2	-0.1
Ширина плодов	-0.5	0.2	-0.5	-0.4	0.1	-0.4	-0.4	0.2	0.4	0.0	-0.2	-0.5	0.2	-0.2	0.0	-0.4	0.1	-0.6	0.2	-0.4
Масса плодов	-0.2	0.1	-0.4	-0.1	0.0	-0.2	-0.1	-0.2	0.4	0.3	-0.2	-0.4	0.3	0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.3	0.1	-0.3
Число семян	-0.4	0.0	-0.6	-0.5	0.0	-0.3	-0.5	0.3	0.0	0.3	-0.6	-0.5	0.0	0.0	0.1	-0.5	-0.1	-0.6	0.1	0.0
Всхожесть семян	-0.1	0.0	-0.2	-0.5	0.4	-0.2	-0.4	0.5	0.0	-0.4	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	0.5	-0.5	0.4	-0.5	-0.1	0.4
Энергия прорастания семян	0.6	0.2	0.7	0.5	0.0	0.4	0.6	-0.2	-0.2	0.0	0.4	0.7	0.1	0.0	-0.1	0.5	-0.2	0.6	-0.3	0.3
Почва																				
Длина плодов	0.0	-0.2	-0.1	0.5	-0.2	-0.4	-0.6	0.1	0.0	0.2	0.0	-0.1	-0.4	-0.2	-0.1	0.5	-0.1	0.5	-0.3	0.4
Ширина плодов	-0.1	-0.1	-0.2	0.0	-0.1	-0.8	-0.5	-0.1	0.2	0.0	0.0	-0.2	0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0	-0.3	0.1
Масса плодов	-0.1	-0.3	-0.2	0.2	-0.3	-0.7	-0.5	0.0	0.1	0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	0.2	-0.2	0.2	-0.4	0.2
Число семян	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.2	-0.5	-0.6	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	-0.3	0.0	0.1	-0.2	0.2	-0.4	0.3
Всхожесть семян	0.6	0.0	0.0	0.1	-0.4	-0.1	-0.4	0.4	0.2	-0.2	0.1	0.4	0.1	-0.5	-0.4	0.1	-0.4	0.2	-0.6	0.7
Энергия прорастания семян	0.3	0.1	0.4	-0.2	0.0	0.5	0.4	0.4	-0.4	0.2	0.1	0.3	-0.2	0.0	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	0.1

Примечание. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, достоверные на уровне значимости (p) 1–5 %.

репродуктивным характеристикам. Популяция *L. caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Кызыл-Ярык находится в сходных микроклиматических условиях на относительно небольшом участке, сложенном очень контрастными по минеральному составу породами. Поэтому она служит хорошим объектом для изучения корреляций между содержанием макро- и микроэлементов в органах растений и их репродуктивной способностью.

В табл. 4 представлены коэффициенты корреляции между репродуктивными характеристиками растений из микропопуляций *L. caerulea* subsp. *altaica* (данные опубликованы ранее в [11]) и содержанием макро- и микроэлементов в органах растений и почвах. Установлено, что на рост размеров и массы плодов значимое влияние при $p < 0.05$ оказывало увеличение содержания Zn в плодах и листьях и Na в плодах растений. Соотношение Cu/Zn в органах растений имеет значимо отрицательные линейные корреляции с размерами плодов ($p < 0.05$), числом семян в плодах ($p < 0.01$) и их всхожестью ($p < 0.05$). Значимо положительные корреляции (при $p < 0.05$) установлены между соотношением Cu/Zn и энергией прорастания семян. Мы уже отмечали выше, что увеличение величины Cu/Zn может свидетельствовать о нарушении физиологических процессов. Уменьшение размеров плодов, числа полноценных семян в плодах, а также снижение всхожести семян при увеличении соотношения Cu/Zn подтверждает это предположение. Большинство функций Cu и Zn связано с участием в ферментативных реакциях [5, 25]. Важная роль Cu и Zn в формировании генеративных органов доказана многочисленными исследованиями [26–29], что объясняет значимые зависимости характеристик репродуктивной сферы с соотношением Cu/Zn. Элементы Cu и Zn являются антагонистами, и сдвиг их соотношений в органах растений в ту или другую сторону может играть ключевую роль в формировании и нормальном развитии семян. Установлены также корреляционные зависимости между соотношением Cu/Zn и антиоксидантной активностью [30]. Значимо положительно на энергию прорастания семян оказывает влияние: при $p < 0.01$ – содержание в листьях и стеблях Cr и Sr; при $p < 0.05$ – содержание в листьях Ca, Cu, Pb и соотношение Fe/Cu, содержание в стеблях Ca, Cu и Mg и соотношение Fe/Cu. Значимо отрицательно (при $p < 0.01$) с энергией прорастания семян взаимосвязано содержание K в плодах. Репродуктивные характеристики значимо коррелируют с содержанием подвиж-

ной формы K (при $p < 0.05$) и Mg (при $p < 0.01$) в почве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сравнительного исследования изменчивости макро- и микроэлементного состава почв и органов растений в популяции *L. caerulea* subsp. *altaica* долины р. Кызыл-Ярык (Республика Алтай) установлено значительное варьирование общего содержания Ca, Al, K, Na, Sr, P, Mn, Ba, B, Zn, Cu, Cr и Ni в почвах изученных микропопуляций. Кислотность почв изменялась от 4.5 до 6.7 и значимо положительно коррелировала с содержанием подвижных форм Ca и Sr, в то время как отрицательная взаимосвязь наблюдалась с содержанием подвижных форм Fe, Cr, Co, Ni и Pb. Общее содержание Ca, Sr и Na имеет значимо линейные корреляции с содержанием подвижных форм этих элементов в почвах. В листьях растений более интенсивно накапливались макроэлементы Ca, Mg, P и Si, а также микроэлементы Sr, Ni, Mo, B, Ga, La и Zr, в плодах – K, в стеблях – Mn и Zn. Медь между органами растений распределена достаточно равномерно. Микропопуляции значительно различались по уровню накопления в органах растений Cu, K, P, Na, Mo, Cr, P, Sr и Si. Изменение содержания Zn в плодах и листьях и Na в плодах растений значимо положительно влияли на размеры и массу плодов. Соотношение Cu/Zn в органах растений связано значимо отрицательными линейными корреляциями с размерами плодов, числом семян в плодах, их всхожестью, а значимо положительными – с энергией прорастания семян. На энергию прорастания семян также значимо положительно влияли уровни накопления в листьях и стеблях Ca, Mg, Cr, Cu, Sr, Pb и соотношение Fe/Cu. Содержание K в плодах отрицательно коррелировало с энергией прорастания семян. Большинство анализируемых репродуктивных характеристик значимо взаимосвязано с содержанием K и Mg в почвах.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ЦСБС СО РАН (проект № АААА-А21-121011290027-6) и ИПА СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Sharma A., Lee H.-J. *Lonicera caerulea*: An updated account of its phytoconstituents and health-promoting activities // Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 107. P. 130–149.

- 2 Gołba M., Sokół-Lętowska A., Kucharska A. Z. Health properties and composition of honeysuckle berry *Lonicera caerulea* L. An update on recent studies // *Molecules*. 2020. Vol. 25, No. 3. Art. 749.
- 3 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, No. 1. P. 61–79.
- 4 Минаева В. Г. Лекарственные растения Сибири / под ред. А. В. Куминовой. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 431 с.
- 5 Битюцкий Н. П. Микроэлементы высших растений. СПб.: СПбГУ, 2020. 368 с.
- 6 Ловкова М. Я., Соколова С. М., Бузук Г. Н., Быховский В. Я., Пономарева С. М. Особенности элементного состава лекарственных растений, синтезирующих фенольные соединения // *Прикл. биохимия и микробиология*. 1999. № 5. С. 576–589.
- 7 Trifonov V. G., Karakhanian A. S. Active faulting and human environment // *Tectonophysics*. 2004. Vol. 380, No. 3–4. P. 287–294.
- 8 Агаджанян Н. А., Александров С. И., Аптикаева О. В., Гаврилова Т. И., Гамбурцев А. Г., Главатских С. П., Грачев В. А., Дмитриева Т. Б., Жалковский Е. В., Киселев Г. П., Летников Ф. А., Расторгуев В. Н., Сидоров П. И., Черешнев В. А., Юдахин Ф. Н. Экология человека в изменяющемся мире / под ред. В. А. Черешнева. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 570 с.
- 9 Syvrotkin V. L. Hydrogen degassing of the Earth: Natural disasters and the biosphere / *Man and the Geosphere*. Florinsky I. V. (ed.). New York: Nova Science Publishers, 2010. 307–347 p.
- 10 Heads M. Biogeographical affinities of the New Caledonian biota: A puzzle with 24 pieces // *Journal of Biogeography*. 2010. No. 37. P. 1179–1201.
- 11 Боярских И. Г., Волкова Л. Р. Изменчивость репродуктивной способности *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) в сейсмоактивной зоне Горного Алтая (Северо-Чуйский хр., р. Кызыл-Ярык) // *Вестн. Томского гос. ун-та. Биология*. 2020. № 4. С. 48–70.
- 12 Боярских И. Г., Волкова Л. Р., Сиромля Т. И. Популяционная изменчивость содержания микро- и макроэлементов в органах *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* (Горный Алтай, Северо-Чуйский хр., р. Кызыл-Ярык) // *Сб. научных статей по материалам XVIII Междунар. научно-практ. конф. “Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии”*, Барнаул, 20–23 мая 2019. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2019. С. 477–481.
- 13 Рогожин Е. А., Овсяченко А. Н., Мараханов А. В. Сильнейшие землетрясения на юге Горного Алтая в голоцене // *Физика Земли*. 2008. № 6. С. 31–51.
- 14 Agatova A., Nepop R. Dating strong prehistoric earthquakes and estimating their recurrence interval applying radiocarbon analysis and dendroseismological approach – Case study from SE Altai (Russia) // *International Journal of Geohazards and Environment*. 2016. No. 3. P. 131–149.
- 15 Федак С. И., Туркин Ю. А., Гусев А. И., Шокальский С. П., Русанов Г. Г., Борисов Б. А., Беляев Г. М., Леонтьева Е. М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-45. Горно-Алтайск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. 567 с.
- 16 Spivak A. A. Manifestation of fault zones in geophysical fields // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. Vol. 5, No. 2. P. 507–525.
- 17 Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 610 с.
- 18 Glantz S. A. Primer of Biostatistics. 7th ed. New York: McGraw-Hill Publ., 2012. 320 p.
- 19 Сысо А. И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 277 с.
- 20 Боярских И. Г., Сысо А. И., Сиромля Т. И. Особенности минерального состава *Lonicera caerulea* в контрастных геохимических условиях // *Химия растительного сырья*. 2018. № 3. С. 129–138.
- 21 Boyarskih I. G., Syso A. I., Siromlya T. I. Variability of chemical elements and biologically active polyphenols in *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* (Caprifoliaceae) plant organs along an altitudinal gradient // *Contemporary Problems of Ecology*. 2019. Vol. 12, No. 6. P. 594–606.
- 22 Horak O., Kinzel H. Typen des Mineralstoffwechsel bei den hoheren Pflanzen // *Osterr. Bot. Z*. 1971. Vol. 119, No. 4–5. P. 475–495.
- 23 Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2011. 505 p.
- 24 Boyarskikh I. G., Agatova A. P., Syso A. I., Klyuchevskaya A. I. Plant morphofunctional response to environmental changes within active fault zones of the Kurai Ridge (Gorny Altai) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. Vol. 56, No. 8. P. 773–798.
- 25 Marschner H. Mineral nutrition of higher plants. 3rd ed. Netherlands: Elsevier/Academic Press. 2011. 684 p.
- 26 Школьник М. Я. Микроэлементы в жизни растений. Л.: Наука. Ленинград. отд-ние, 1974. 324 с.
- 27 Cakmak I. Role of zinc in protecting plant cells from reactive oxygen species // *New Phytol*. 2000. Vol. 146. P. 185–205.
- 28 Kapoor S., Kobayashi A., Takatsuji H. Silencing of the tapetum-specific zinc finger gene TAZ1 causes premature degeneration of tapetum and pollen abortion in petunia // *Plant Cell Online*. 2002. Vol. 14, No. 10. P. 2353–2367.
- 29 Hafeez B., Khanif Y. M., Saleem M. Role of zinc in plant nutrition – A Review // *American Journal of Experimental Agriculture*. 2013. Vol. 3, No. 2. P. 374–391.
- 30 Hodzic Z., Crnkić A., Kesić A., Saletovic M. Zinc/copper ratio in the medicinal plants // 17th Int. research/expert conf. “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, TMT 2013, Istanbul, Turkey, 10–11 September 2013. P. 141–144.