

Влияние почвенных условий на проявление хлороза и партенокарпии у растений *Lonicera caerulea* L.

А. И. СЫСО¹, И. Г. БОЯРСКИХ^{1, 2}, ХУО ЮНВЕИ³, Т. И. СИРОМЛЯ¹

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630099, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 8/2

²Центральный сибирский ботанический сад СО РАН
630090, Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101
E-mail: irina_2302@mail.ru

³Северо-восточный агроуниверситет
Китай, 150030, г. Харбин, ул. Чанг Цзян, 600

Статья поступила 16.03.2021

После доработки 24.03.2021

Принята к печати 26.03.2021

АННОТАЦИЯ

С целью выявления нарушений минерального питания, вызывающих хлороз листьев и проявление партенокарпии у сибирского сорта *Lonicera caerulea* (жимолости синей) при интродукции в провинции Хэйлунцзян (Китай), проведено сравнительное изучение макро- и микроэлементного состава и свойств почв в двух китайских уездах и в двух районах юга Западно-Сибирской равнины (Россия). Установлено, что на появление массового хлороза листьев, их гибель и гормональные изменения, вызывающие формирование партенокарпических плодов, на отдельных учетных площадках в провинции Хэйлунцзян может влиять сильная кислотность почв (pH_{KCl} 4,0–4,5), способствующая увеличению концентраций Al, Fe, Mn до фитотоксичного уровня. В растениях на этих площадках отмечалось не характерное для данного вида распределение Al, Fe, Mn, Cu и Zn по органам и накопление токсичных концентраций Al, Fe, Mn в листьях, которое вызывало нарушение важных для жизни растений соотношений P/Al, Ca/Al, Mg/Al, P/Fe, P/Mn, Cu/Fe и Cu/Mn.

Ключевые слова: жимолость синяя, интродукция, кислые почвы, алюминий, марганец, железо, хлороз, партенокарпия.

Успешность интродукции ценных пищевых, лекарственных и декоративных видов растений определяется комплексом абиотических факторов. Наиболее важными из них считаются климатические факторы, и их изучению посвящены многочисленные исследования [Урусов и др., 2010; Семенютина и др., 2016]. Опыт интродукции часто свидетель-

ствует о важности учета также и почвенных условий произрастания многолетних культур. Климатические факторы определяют потенциальную возможность обеспечения конкретного вида растения теплом и влагой, а почвенные – пригодность почв по составу и свойствам для произрастания растения на площадке интродукции, интенсивность ее

освоения [Антюфеев и др., 2014]. Историческим примером безуспешной интродукции, основанной только на теории климатических аналогов, может служить первая попытка интродукции чая в Россию (Никитский ботанический сад). Причиной неудачи введения чая в культуру на юге Крыма явились особенности почв, а именно – наличие карбонатов кальция и щелочная реакция почвенного раствора. Чай же, как известно, в природном ареале произрастает на кислых почвах [Бахтадзе, 1961]. Детальная характеристика почвенного покрова района, где планируется распространить изучаемый вид растения, а также анализ изменений макро- и микроэлементного состава в системе “почва – растение” в новых для вида условиях произрастания и оценка физиолого-биохимических реакций растений в условиях эдафического стресса являются одним из необходимых направлений исследований и основой вывода о возможности успешной интродукции (при благоприятных климатических условиях) [Антюфеев и др., 2014; Zaimenko et al., 2020].

Многочисленные исследования как в России, так и за рубежом посвящены поиску и использованию новых нетрадиционных растений в качестве источников биологически активных веществ для фармации или как функциональных продуктов питания. Одним из таких видов является жимолость синяя (*Lonicera caerulea* L. s. l. семейства Caprifoliaceae Juss. subsect. *Caeruleae* Rehd.) – высокоценная ягодная культура. Обладая высокой биологической активностью [Sharma, Lee, 2020], ее плоды и листья могут быть использованы как функциональный компонент продуктов питания и представляют собой полезное дополнение для профилактики ряда хронических заболеваний, например, рака, сахарного диабета, сердечно-сосудистых и нейродегенеративных заболеваний [Golba et al., 2020]. В связи с этим в последние десятилетия во многих странах с умеренным климатом значительно активизировалось введение *L. caerulea* в культуру. Для выращивания или включения в селекцию часто используют сорта, созданные в России [Junwei et al., 2005; Bors et al., 2012; Gawronski et al., 2014]. Обследование плантаций провинции Хэйлунцзян (Китай), проведенное нами в 2014 г., показало, что в промышленных масштабах размножается сорт

русской селекции “Берель”, выделенный по комплексу хозяйственно-ценных признаков. Этот сорт был получен в результате опыления отборной формы *L. caerulea* subsp. *altatica* (Ball.) из Рудного Алтая смесью пыльцы сортов *L. caerulea* subsp. *kamtschatica* (Pojark) (камчатского происхождения) [Жолобова, Прищепина, 2002]. Известно, что *L. caerulea* относится к самобесплодным видам растений, при опылении пыльцой одного сорта плоды не завязываются совсем или завязываются в малом количестве мелкие бессемянные плоды [Плеханова, 1982; Vožek, 2012; Боярских, 2017]. Односортные насаждения вели к практически полной бесплодности растений. Между тем в отчетах одного из хозяйств уезда Мулин провинции Хэйлунцзянь в поселке Гунхе показывалось наличие урожая плодов на односортной (сорт “Берель”) плантации *L. caerulea*. Это вызвало противоречие с полученными ранее данными по самоплодности *L. caerulea* и говорило о возможном проявлении партеногенеза, которое раньше не отмечалось в подсемии голубых жимолостей.

Обследование 1 га насаждений сорта “Берель” в поселке Гунхе показало, что 4-летние растения этой плантации имеют достаточно высокую продуктивность. Плоды, собранные с растений на этой плантации, не имели семян и были более чем в 3 раза меньше по массе по сравнению с плодами этого сорта на других участках в этой провинции при различных условиях опыления и в 1,5 раза меньше, чем в континентальных условиях Западной Сибири [Junwei, Boyarskikh, 2020]. Известно, что завязывание и развитие плодов – это сложные процессы, которые синхронизируются и координируются различными фитогормонами. Наиболее заметную роль в запуске роста и регуляции развития плодов играют ауксин и, в зависимости от вида, гибберлин или цитокинин [McAtee et al., 2013], концентрации этих гормонов резко увеличиваются после оплодотворения яйцеклетки. В случае отсутствия опыления и оплодотворения рост плодов можно стимулировать экзогенной обработкой ауксином [Бойценюк и др., 2019]. Усиление синтеза фитогормонов может быть также вызвано нарушением минерального питания растений, которое наблюдается, в частности, на засоленных почвах [Веселов и др., 2007].

Пытаясь найти причину партенокарпии в поселке Гунхе, мы обратили внимание на массовый межжилковый хлороз молодых листьев разных видов растений в этом районе, указывающий на вероятность нарушений минерального питания и изменения в гормональной регуляции жимолости синей. Согласно визуальной диагностике минерального питания листья растений имели признаки недостатка магния или железа [Церлинг, 1990]. Нужно отметить, что хлорозу были подвержены в основном интродуцированные виды растений, в частности, у растущего здесь же аборигенного вида голубых жимолостей *L. boczarnikovii* Plekhanova признаков хлороза не отмечалось, это говорило о характерных для данного района особенностях почв и об адаптации к ним местных видов растений. Массовое проявление хлороза также отмечалось и на плантации жимолости синей в окрестности г. Ичунь. Здесь в пределах небольшого участка отмечались и сортовые различия по степени хлороза. В значительно меньшей степени хлорозом поражались сорта *L. caerulea* subsp. *venulosa* (Maxim) приморского происхождения (“Томичка”, “Памяти Гидзюка” и др.), также без признаков хлороза был местный вид *L. boczarnikovaе*.

С целью выявления причин, вызывающих хлороз у растений, были проведены сравнительные исследования свойств и элементного состава почв, а также содержания макро- и микроэлементов в листьях, плодах и стеблях сорта “Берель” жимолости синей в насаждениях с разной степенью проявления хлороза в провинции Хэйлунцзян (Китай) и в двух районах юга Западно-Сибирской равнины (Российская Федерация), где визуально нарушения минерального питания у растений не отмечалось.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в 2014 г. в Китае в провинции Хэйлунцзян на двух плантациях: в поселке Гунхе уезда Мулин (предгорье Маньчжуро-Корейских гор), в г. Ичунь в лесной зоне (предгорье Малого Хингана), и в России: в лесостепной зоне Западно-Сибирской равнины в г. Новосибирске на интродукционном участке Центрального сибирского ботанического сада СО РАН (ЦСБС) (правый берег

р. Обь), в г. Барнауле в питомнике Научно-исследовательского института садоводства Сибири им. М. А. Лисавенко (Приобское плато).

Объектами исследований служили пробы листьев, плодов и стеблей жимолости синей сорта “Берель” и почв, отобранные на учетных (пробных) площадках согласно рекомендациям по растительной диагностике [Церлинг, 1990] в фазе начала созревания плодов. В Китае пробы в системе “почва – растение” отбирались на учетных площадках насаждений с разной степенью проявления хлороза у растений, а в России – на растениях без признаков хлороза. Гунхе-1 – площадка с сильной степенью хлороза (более 50 % площади листа) и массовым проявлением партенокарпии, Гунхе-2 – со слабой степенью хлороза (менее 25 % площади листа), Ичунь-1 – со средней степенью хлороза (25–50 % площади листа), Ичунь-2 – анализировали только стебли (листья полностью погибли и опали). Для растительной диагностики минерального питания отбиралось 200–400 г (сырая масса) листьев, зрелых плодов и стеблей в средней и верхней частях кустов модельных растений, под которыми брались почвенные пробы из корнеобитаемого слоя 0–30 см.

Подготовка проб к анализам включала их высушивание до состояния воздушно-сухого вещества (СВ). Растительные пробы сушили при температуре 60 °С в сушильном шкафу с принудительной вентиляцией, а почвенные пробы – при комнатной температуре. Затем растительные пробы измельчали в мельнице и помещали в полиэтиленовый пакет. Почвенные пробы для общих анализов размельчались в фарфоровой ступке и просеивались через сито с ячейками 2 мм, а для определения элементного состава почв дополнительно растирались до состояния пудры в агатовой ступке.

В почвах определяли содержание частиц менее 0,01 мм (<10 мкм) в водной суспензии пипеточным методом, органического вещества (ОВ) его окислением смесью 0,4 н $K_2Cr_2O_7$ в разбавленной (1:1) H_2SO_4 при нагревании до 125 °С в сушильном шкафу. Потенциометрическое определение потенциальной кислотности (pH_{KCl}) почв и фотоколориметрическое определение подвижного (обменного) алюминия проводились в солевой суспензии 1 М KCl при отношении почвы к раствору 1 : 2,5.

Концентрация подвижной формы К, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cd, Co, Cu, Cr, Ni, Pb, экстрагируемой из почв 1 М ацетатно-аммонийным буферным раствором (ААБ) с pH 4,8 (1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$) при отношении почвы к раствору 1 : 10, и их общее содержание в растворах зол растительных проб измерялись методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии. Общее содержание макро- и микроэлементов определяли методом оптической атомно-эмиссионной спектрометрии с использованием дугового аргонного двухструйного плазмотрона, спектрометра (PGS-2) и многоканального анализатора эмиссионных спектров (МАЭС) в почвах и золе растений, полученной после их озоления в муфельной печи при температуре 450 °С. Калибровку приборов и контроль точности измерений в пробах растений и почв химических элементов выполняли по аттестованным значениям их массовой доли в стандартных образцах почв и растений. Относительная погрешность измерений была в пределах 10 %.

В работе значения состава почв и растений приведены в расчете на сухое вещество, химических элементов – на элемент.

Интенсивность биологического поглощения элементов органами *L. caerulea* оценивали по значениям коэффициентов биологического накопления (КБН), рассчитываемых как отношение содержания элемента в сухом веществе растений к концентрации подвижной формы элемента в почве.

Для сравнительной оценки свойств почв и содержания в них макро- и микроэлементов использовались принятые в России критерии [Методические указания..., 2003]. Оценку концентрации макро- и микроэлементов в растениях проводили по критериям, использу-

емым для диагностики их минерального питания [Церлинг, 1990]. Проведенное сравнение может быть достаточно условным, учитывая возможности аборигенных видов растений адаптироваться к определенным эдафическим условиям.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно проведенным исследованиям состав и свойства почв учетных площадок *L. caerulea* (сорт “Берель”) в провинции Хэйлунцзян и на Западно-Сибирской равнине существенно различаются (табл. 1). Почвы площадок в п. Гунхе и г. Ичунь в основном сильнокислые (pH_{KCl} 4,1–4,5), встречаются очень сильнокислые ($\text{pH}_{\text{KCl}} < 4,0$) и слабокислые (pH_{KCl} 5,1–5,5), а на юге Западно-Сибирской равнины почвы менее кислые – в основном с нейтральной (pH_{KCl} 6,1–7,0) или близкой к нейтральной (pH_{KCl} 5,6–6,0) реакцией почвенной среды.

Почвы в провинции Хэйлунцзян относятся к среднесуглинистым (30,1–40,0 %), тяжелосуглинистым (40,1–50,0 %) и глинистым (>50,0 %) разновидностям, а на Западно-Сибирской равнине – к легкосуглинистым (20,1–30,0 %). Большинство почв имеет среднее (5–7 %) и высокое (более 7 %) содержание органического вещества, за исключением почв в г. Новосибирске, где оно очень низкое (<2,0 %).

Атомно-эмиссионное определение общего содержания макро- и микроэлементов показало (рис. 1), что в почвах провинции Хэйлунцзян концентрации Al, Fe, Mn, Ba и V существенно выше, чем в почвах юга Западно-Сибирской равнины. Почвы учетной площадки Ичунь-2 отличались от остальных учетных площадок провинции Хэйлунцзян

Т а б л и ц а 1
Свойства и состав почв

Место отбора проб	pH_{KCl}	Частицы <10 мкм, %	ОВ*, %
Гунхе-1	4,3 ± 0,4	49,9 ± 0,6	7,6 ± 1,0
Гунхе-2	4,7 ± 0,1	46,8 ± 3,5	6,3 ± 0,5
Ичунь-1	4,2 ± 0,1	42,0 ± 0,6	6,1 ± 0,4
Ичунь-2	3,9 ± 0,2	49,2 ± 1,4	8,2 ± 0,3
Барнаул	6,1 ± 0,1	16,8 ± 2,1	5,3 ± 1,0
Новосибирск	6,3 ± 0,1	21,8 ± 0,5	1,9 ± 0,1

* ОВ – органическое вещество.

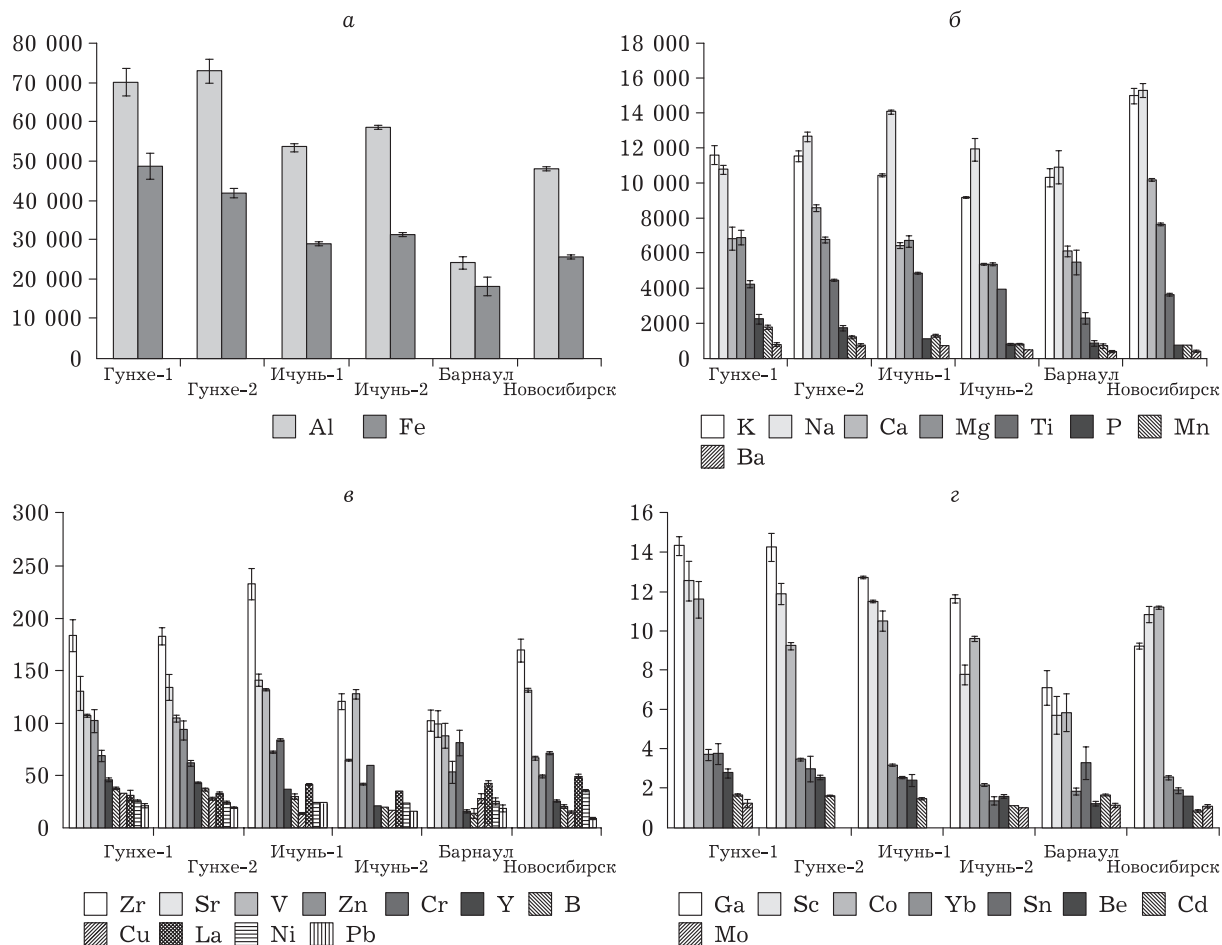


Рис. 1. Общее содержание макро- и микроэлементов в почвах. По оси ординат – содержание элементов, мг/кг воздушно-сухого вещества, по оси абсцисс – анализируемые элементы в точках отбора проб

наименьшей концентрацией практически всех проанализированных макро- и микроэлементов.

Относительно высокое (>0,15 %) общее содержание фосфора обнаружено в почвах одной из учетных площадок Гунхе (табл. 2), в других почвах оно находилось в диапазоне его среднего уровня (0,02–0,15 %).

В почвах насаждений *L. caerulea* общее содержание K, Ca, Mg, Co, Cu, Cr, Mo, Ni, Pb находится в пределах их нормального количества в почвах умеренного климатического пояса. Только в почвах некоторых учетных площадок в г. Гунхе содержание Fe, Mn, Zn оказалось высоким. Токсичного для рас-

Т а б л и ц а 2
Критические значения общего содержания химических элементов в суглинистых почвах
[Ильин, Сысо, 2001; Kabata-Pendias, 2011]

Градация по содержанию	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	B	Zn	Cu	Cr	Ni
	%						мг/кг				
Низкое (дефицит)	<0,02	<0,5	<0,4	<0,3	<0,5	<0,03	<7	<15	<7	–	–
Нормальное	0,02–0,15	0,5–2,5	0,4–4,0	0,3–1,0	0,5–5,0	0,03–0,14	7–33	15–75	7–33	<20–120	5–50
Высокое	>0,15	>2,5	>4,0	>1,0	5,1–7,0	0,15–0,30	34–100	76–250	50–100	121–500	51–100
Избыточное	–	–	–	–	–	–	>100	>250	>100	>500	>100

тений уровня общего содержания В, Zn, Co, Cu, Cr, Mo, Ni, Pb в почвах не обнаружено.

По концентрации подвижных макро- и микроэлементов, экстрагируемых ААБ с рН 4,8, почвы плантаций различались между собой сильнее, чем по их общему содержанию (рис. 2). В сильноокислых почвах провинции Хэйлунцзян выявлены относительно высокие ($>30,0$ мг/кг) концентрации подвижного алюминия – катиона Al^{3+} . В слабокислых почвах провинции и нейтральных почвах Западной Сибири концентрации подвижного алюминия были ниже пределов обнаружения ($<0,5$ мг/кг почвы).

В почвах провинции Хэйлунцзян по сравнению с почвами Западной Сибири было существенно выше содержание Mg, Al, Fe, Mn, Zn, Na, Ni, Cr, Co и Cd. Значительной была разница и между пробными площадками в провинции Хэйлунцзян по концентрации в почвах подвижной формы отдельных элементов. В почвах площадок, в пределах которых ли-

стья растений характеризовались сильной степенью хлороза (Гунхе-1) или полностью погибли (Ичунь-2), содержание Al, Fe, Mn, Ni, Cu и Co было существенно выше, чем в почвах, где степень хлороза была невысокой (Гунхе-2 и Ичунь-1). Почвы Ичунь-2 отличались также наименьшим содержанием Ca по сравнению с почвами других анализируемых площадок. Возможно, это связано с внесением удобрений, подкисляющих почвы на этой плантации, или с особенностями микрорельефа, способствующего вымыванию из почв отдельных элементов, о низком общем содержании микроэлементов на этом участке сообщалось выше.

По приведенным критериям (табл. 3) уровень концентрации подвижного калия в почвах в основном соответствовал нормальному и высокому уровню обеспеченности им растений. Низкая концентрация подвижного калия выявлена в серых лесных почвах в г. Новосибирске, а избыточная – в почвах площа-

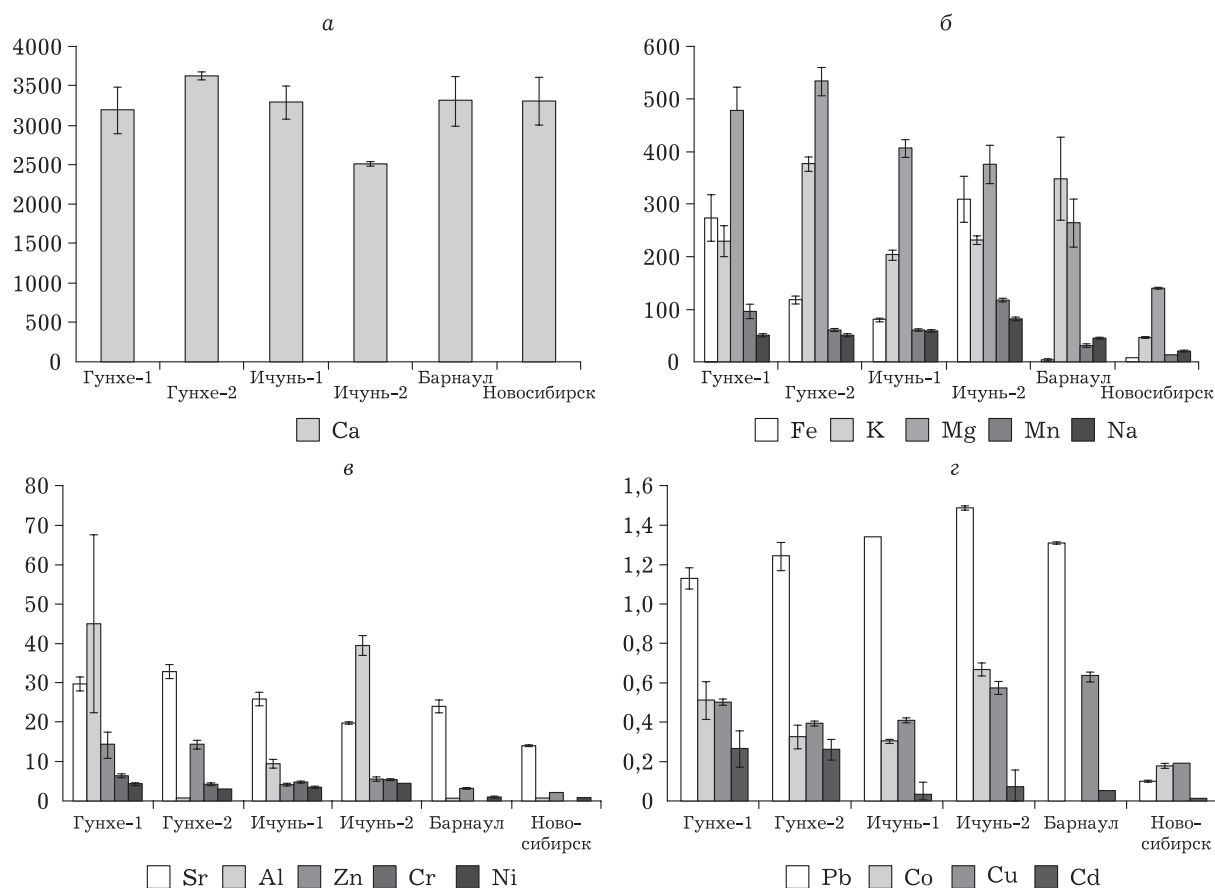


Рис. 2. Среднее содержание подвижной в ААБ формы макро- и микроэлементов в почвах. По оси ординат – содержание элементов, мг/кг воздушно-сухого вещества, по оси абсцисс – анализируемые элементы в точках отбора проб

Т а б л и ц а 3

Критические значения содержания подвижных в ААБ элементов в почвах, мг/кг

Градация по содержанию	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Cr	Ni	Pb
Низкое (дефицит)	<100	<1000	<120	<20	<10	<2,0	<0,2	–	–	–
Нормальное	101–300	1000–3000	121–360	21–40	11–20	2,1–5,0	0,21–0,5	–	–	–
Высокое	301–500	3000–4000	361–480	40–80	20–45	5,0–10,0	0,5–1,0	–	–	–
Избыточное	>2000	>4000	>480	>200	>100	>23,0	>3,0	>6,0	>4,0	>6,0

Т а б л и ц а 4

Доля подвижной формы макро- и микроэлементов в их общем содержании в почвах, %

K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Co	Cr	Ni	Pb	Cd
Провинция Хэйлунцзян, г. Гунхе											
3,0	45,9	8,5	0,5	5,1	12,6	1,4	4,6	7,6	13,8	5,2	16,4
Провинция Хэйлунцзян, г. Ичунь											
2,2	46,3	6,0	0,6	9,1	8,8	3,5	4,7	7,0	16,5	7,9	4,3
Западно-Сибирская равнина, г. Новосибирск											
0,3	21,2	2,1	<0,1	1,8	3,9	1,2	1,8	0,7	2,3	7,4	1,9
Западно-Сибирская равнина, г. Барнаул											
3,4	54,6	4,8	<0,1	4,6	6,1	2,4	1,8	0,6	3,4	7,4	3,1

Т а б л и ц а 5

Коэффициенты корреляции между валовым содержанием макро- и микроэлементов и содержанием их подвижной формы в почве

Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Zn	Al
0,6	0,5	0,2	–0,1	0,4	0,8	–0,6	0,0	0,7	–0,5	–0,6	–0,1	0,3	0,8	0,3

док в г. Гунхе, что обусловлено различной его подвижностью – долей подвижной формы в валовом содержании (табл. 4). Между валовым содержанием Ca, Fe, Mn и Zn и содержанием подвижной формы этих элементов в почве установлены значимые положительные корреляции ($p < 0,05$ и $p < 0,01$), для K и Ni линейные зависимости были отрицательными при $p < 0,05$ (табл. 5).

В большинстве почв плантаций уровень концентрации подвижного кальция был повышенным и высоким. Избыточные концентрации подвижного Mg обнаружены в почвах большинства пробных площадок плантации в г. Гунхе, что в основном связывается с повышенной подвижностью элемента в этих почвах.

Полагаем, что относительно высокие концентрации подвижной формы Cu, Co, Cr,

Ni, Cd в почвах провинции Хэйлунцзян (см. табл. 3) также обусловлены их повышенной подвижностью (см. табл. 4), а следствием малой подвижности меди и кобальта в почвах плантаций на Западно-Сибирской равнине является дефицит их подвижной формы.

Результаты определения золы и общего содержания макро- и микроэлементов в сухом веществе листьев, плодов и стеблей *L. caerulea* представлены в табл. 6. Сравнение уровней концентрации отдельных элементов в органах растений в зависимости от места их произрастания показало различия как по их содержанию, так и по распределению между органами.

Зольность листьев была всегда более чем 2 раза выше стеблей и плодов. Между анализируемыми площадками существенной разни-

цы не отмечалось. Незначительно (в среднем до 13 %) увеличивалась зольность листьев из Ичунь-1.

В условиях Западной Сибири, которые мы принимаем оптимальными для сорта жимолости синей “Берель”, Al и Fe накапливались практически равномерно в стеблях и листьях. В стрессовых эдафических условия при высоких концентрациях подвижной формы Al и Fe в почве (Гунхе-1, Ичунь-1) концентрация этих элементов в листьях становится значительно выше, чем в стеблях, и превышает токсические пределы (табл. 7). В растениях с погибшими листьями (Ичунь-2) Al и Fe в огромном количестве накапливались в стеблях – до 1800 и 843 мг/кг соответственно. В плодах содержание Al и Fe было 3–6 раз ниже, чем в листьях, однако на участке Гунхе-1 концентрация этих элементов в плодах увеличивалась значительно. Такая же закономерность прослеживается и по содержанию Ti. Медь на учетной площадке в Новосибирске распределялась по органам относительно равномерно, в Хэйлунцзян существенно увеличивалась ее

концентрация в листьях. Содержание Mn и Zn на учетных площадках Западной Сибири было больше в стеблях, чем в других органах. В условиях Гунхе концентрации этих элементов в стеблях и листьях были близкими, а в Ичунь Mn и Zn накапливалось значительно больше в листьях, чем в стеблях, причем уровень накопления Mn был токсичным для растений (см. табл. 7) [Kabata-Pendias, 2011]. В листьях на всех исследуемых площадках всегда больше по сравнению со стеблями и плодами концентрировалось макроэлементов: Ca, P, Mg, Si и микроэлементов – Ba, Be, B, Cr, Ga, La, Mo, Na, Sr, V, Y, Yb и Zr. В плодах всегда интенсивней накапливался K.

Сравнительный анализ зольности и общего содержания макро- и микроэлементов в сухом веществе листьев *L. caerulea* и рассчитанные на их основе отношения между макро- и микроэлементами (табл. 8) показали, что у сорта “Берель” в провинции Хэйлунцзян концентрации Al, Fe, Mn, Zn, Ni, Cu, Mg, Na, Cd и Ti существенно выше, чем в Западной Сибири.

Т а б л и ц а 6

Среднее содержание золы, макро- и микроэлементов в органах *L. caerulea*, мг/кг воздушно-сухого вещества

Элемент	Орган	Гунхе-1	Гунхе-2	Ичунь-1	Ичунь-2	Барнаул	Новосибирск
1	2	3	4	5	6	7	8
Зола, %	Стебель	4,23 ± 0,10	3,88 ± 0,38	3,38 ± 0,03	3,83 ± 0,03	3,88 ± 0,42	4,75 ± 0,46
	Плоды	4,18 ± 0,49	3,70 ± 0,34	–	–	–	3,39 ± 0,10
	Лист	9,93 ± 0,15	8,39 ± 0,69	13,12 ± 0,22	–	10,1 ± 0,82	8,93 ± 0,12
Al	Стебель	290 ± 60	50 ± 5	570 ± 13	1800 ± 6	105 ± 46	150 ± 12
	Плоды	80 ± 20	30 ± 3	–	–	–	17 ± 2
	Лист	340 ± 75	130 ± 15	1040 ± 60	–	127 ± 3	110 ± 7
Ba	Стебель	92 ± 3	69 ± 4	42 ± 3	32 ± 2	62 ± 11	52 ± 7
	Плоды	23 ± 3	14 ± 3	–	–	–	11 ± 1
	Лист	160 ± 12	115 ± 24	133 ± 10	–	131 ± 9	60 ± 2
Be	Стебель	0,041 ± 0,003	0,025 ± 0,003	0,030 ± 0,002	0,060 ± 0,004	0,030 ± 0,007	0,020 ± 0,004
	Плоды	0,034 ± 0,007	0,030 ± 0,003	–	–	–	0,015 ± 0,001
	Лист	0,083 ± 0,005	0,058 ± 0,011	0,130 ± 0,002	–	0,070 ± 0,003	0,049 ± 0,012
B	Стебель	14 ± 1	12 ± 1	7 ± 1	6 ± 1	16 ± 4	23 ± 3
	Плоды	14 ± 1	11 ± 1	–	–	–	18 ± 1
	Лист	40 ± 3	38 ± 7	45 ± 3	–	106 ± 7	45 ± 3
Ca	Стебель	7330 ± 370	6400 ± 400	5490 ± 70	4540 ± 30	9150 ± 1410	10000 ± 270
	Плоды	2890 ± 295	1920 ± 160	–	–	–	2840 ± 160
	Лист	25300 ± 990	19990 ± 2950	25500 ± 90	–	25990 ± 1880	19000 ± 730
Cd	Стебель	1,81 ± 0,65	0,83 ± 0,22	0,33 ± 0,02	0,15 ± 0,01	0,29 ± 0,08	0,19 ± 0,04
	Плоды	0,65 ± 0,11	0,58 ± 0,07	–	–	–	0,20 ± 0,02
	Лист	1,76 ± 0,29	1,31 ± 0,12	0,61 ± 0,02	–	0,36 ± 0,02	0,20 ± 0,02
Co	Стебель	0,10 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,7 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,10 ± 0,03
	Плоды	0,04 ± 0,01	0,05 ± 0,01	–	–	–	0,07 ± 0,01
	Лист	0,10 ± 0,01	0,11 ± 0,02	0,36 ± 0,01	–	0,09 ± 0,01	0,18 ± 0,05
Cr	Стебель	0,56 ± 0,09	0,27 ± 0,03	0,69 ± 0,02	1,55 ± 0,05	0,39 ± 0,15	0,46 ± 0,09
	Плоды	0,39 ± 0,09	0,26 ± 0,02	–	–	–	0,16 ± 0,01
	Лист	0,87 ± 0,05	0,64 ± 0,09	1,91 ± 0,02	–	0,83 ± 0,01	0,70 ± 0,11

1	2	3	4	5	6	7	8
Cu	Стебель	4,5 ± 0,9	3,7 ± 0,4	6,5 ± 0,1	6,8 ± 0,1	3,7 ± 0,2	5,1 ± 0,3
	Плоды	4,1 ± 0,6	4,3 ± 1,2	—	—	—	3,1 ± 0,2
	Лист	7,0 ± 0,4	6,1 ± 0,8	8,4 ± 0,4	—	4,5 ± 1,0	4,3 ± 0,4
Fe	Стебель	176 ± 43	33 ± 3	329 ± 5	843 ± 28	81 ± 30	67 ± 2
	Плоды	72 ± 20	22 ± 4	—	—	—	17 ± 1
	Лист	222 ± 43	111 ± 9	657 ± 6	—	79 ± 14	74 ± 7
Ga	Стебель	0,12 ± 0,02	0,07 ± 0,02	0,16 ± 0,01	0,35 ± 0,01	0,10 ± 0,02	0,06 ± 0,01
	Плоды	0,13 ± 0,03	0,12 ± 0,02	—	—	—	0,04 ± 0,01
	Лист	0,21 ± 0,02	0,17 ± 0,03	0,52 ± 0,03	—	0,26 ± 0,03	0,12 ± 0,04
K	Стебель	16980 ± 1750	20800 ± 5200	8610 ± 50	3800 ± 80	14000 ± 400	7440 ± 840
	Плоды	27960 ± 6020	24000 ± 4300	—	—	—	9190 ± 430
	Лист	15900 ± 2800	21600 ± 6860	23896 ± 1551	—	13880 ± 920	8200 ± 1350
La	Стебель	0,25 ± 0,02	0,19 ± 0,05	0,24 ± 0,01	0,81 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,21 ± 0,04
	Плоды	0,22 ± 0,05	0,18 ± 0,03	—	—	—	0,14 ± 0,01
	Лист	0,51 ± 0,03	0,39 ± 0,05	0,72 ± 0,01	—	0,42 ± 0,08	0,41 ± 0,03
Mg	Стебель	1120 ± 140	950 ± 85	1070 ± 50	570 ± 40	1040 ± 120	1170 ± 40
	Плоды	1030 ± 44	790 ± 70	—	—	—	860 ± 40
	Лист	6020 ± 325	4850 ± 1060	6680 ± 45	—	3400 ± 420	3120 ± 100
Mn	Стебель	152 ± 15	73 ± 21	140 ± 5	96 ± 3	61 ± 7	54 ± 3
	Плоды	25 ± 2	15 ± 3	—	—	—	8 ± 1
	Лист	156 ± 12	76 ± 9	308 ± 2	—	42 ± 3	34 ± 4
Mo	Стебель	0,22 ± 0,01	0,12 ± 0,03	0,12 ± 0,02	0,26 ± 0,04	0,19 ± 0,02	0,21 ± 0,05
	Плоды	0,25 ± 0,07	0,26 ± 0,07	—	—	—	0,31 ± 0,01
	Лист	0,42 ± 0,09	0,41 ± 0,06	0	—	0,60 ± 0,16	0,93 ± 0,10
Na	Стебель	114 ± 29	28 ± 2	229 ± 10	625 ± 45	45 ± 13	95 ± 15
	Плоды	55 ± 14	25 ± 5	—	—	—	20 ± 1
	Лист	172 ± 19	79 ± 6	615 ± 25	—	72 ± 5	115 ± 22
Ni	Стебель	1,83 ± 0,90	4,19 ± 1,30	1,15 ± 0,30	1,70 ± 0,13	0,53 ± 0,11	0,92 ± 0,05
	Плоды	3,37 ± 0,71	4,27 ± 1,93	—	—	—	1,56 ± 0,07
	Лист	3,35 ± 0,78	5,03 ± 1,90	6,39 ± 0,29	—	1,26 ± 0,13	1,35 ± 0,10
P	Стебель	10850 ± 20	1110 ± 177	450 ± 20	539 ± 30	1044 ± 106	1272 ± 140
	Плоды	1740 ± 185	1550 ± 197	—	—	—	1880 ± 100
	Лист	2290 ± 153	2200 ± 218	2513 ± 70	—	1644 ± 170	2123 ± 18
Pb	Стебель	0,92 ± 0,33	0,27 ± 0,02	0,40 ± 0,02	0,81 ± 0,02	0,48 ± 0,24	0,63 ± 0,02
	Плоды	0,41 ± 0,14	0,27 ± 0,03	—	—	—	0,16 ± 0,01
	Лист	1,11 ± 0,17	0,79 ± 0,12	1,14 ± 0,06	—	0,97 ± 0,11	0,64 ± 0,18
Si	Стебель	910 ± 200	235 ± 60	2070 ± 55	5860 ± 150	525 ± 20	500 ± 15
	Плоды	403 ± 167	176 ± 21	—	—	—	156 ± 6
	Лист	4550 ± 717	3600 ± 745	7940 ± 45	—	5610 ± 456	2450 ± 117
Sr	Стебель	100 ± 3	82 ± 1	45 ± 4	29 ± 1	69 ± 13	95 ± 8
	Плоды	34 ± 5	19 ± 4	—	—	—	18 ± 1
	Лист	276 ± 16	209 ± 41	210 ± 7	—	193 ± 12	142 ± 8
Ti	Стебель	14,2 ± 2,9	3,1 ± 0,2	29,0 ± 2,1	80,3 ± 1,3	7,1 ± 2,6	7,6 ± 0,5
	Плоды	4,8 ± 2,3	2,0 ± 0,1	—	—	—	1,2 ± 0,3
	Лист	16,1 ± 3,4	6,7 ± 0,6	60,5 ± 1,5	—	9,5 ± 0,3	7,5 ± 0,4
V	Стебель	0,38 ± 0,04	0,16 ± 0,05	0,81 ± 0,01	1,54 ± 0,12	0,31 ± 0,05	0,34 ± 0,04
	Плоды	0,30 ± 0,04	0,15 ± 0,03	—	—	—	0,18 ± 0,01
	Лист	0,67 ± 0,04	0,43 ± 0,07	1,78 ± 0,04	—	0,64 ± 0,02	0,49 ± 0,06
Y	Стебель	0,13 ± 0,02	0,04 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,56 ± 0,07	0,04 ± 0,01	0,15 ± 0,02
	Плоды	0,07 ± 0,02	0,03 ± 0,01	—	—	—	0,06 ± 0,01
	Лист	0,17 ± 0,02	0,09 ± 0,01	0,30 ± 0,01	—	0,07 ± 0,03	0,19 ± 0,01
Yb	Стебель	0,019 ± 0,002	0,009 ± 0,001	0,020 ± 0,001	0,060 ± 0,010	0,010 ± 0,001	0,010 ± 0,001
	Плоды	0,014 ± 0,004	0,009 ± 0,001	—	—	—	0,006 ± 0,001
	Лист	0,032 ± 0,003	0,023 ± 0,002	0,060 ± 0,005	—	0	0,020 ± 0,003
Zn	Стебель	38,4 ± 1,6	20,3 ± 2,5	19,1 ± 0,2	12,8 ± 0,4	14,1 ± 2,9	19,6 ± 3,0
	Плоды	9,4 ± 0,4	7,5 ± 1,1	—	—	—	6,1 ± 0,1
	Лист	31,3 ± 4,8	22,5 ± 5,4	32,9 ± 0,2	—	10,8 ± 0,3	7,8 ± 0,1
Zr	Стебель	1,46 ± 0,16	0,82 ± 0,06	1,59 ± 0,01	4,23 ± 0,33	0,87 ± 0,18	1,02 ± 0,22
	Плоды	1,03 ± 0,25	0,78 ± 0,09	—	—	—	0,60 ± 0,04
	Лист	2,45 ± 0,20	1,70 ± 0,23	4,39 ± 0,27	—	2,08 ± 0,04	1,62 ± 0,04

Т а б л и ц а 7

Критические концентрации химических элементов в листьях

Зола	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Al	Ni	Cr	Pb
%					мг/кг								
1	–	<0,10	<0,50	<0,05	<0,1	<20–50	<15–25	<10–20	<2	<5	–	–	–
2	5,0–15	0,1–0,4	0,5–4,0	0,05–1	0,15–0,35	51–250	26–150	20–70	03–30	05–30	<40	0,1–5,0	<1,0
3	15,1–20	0,5–0,9	4,1–5,0	1,1–10	0,36–1,5	251–500	151–300	71–100	11–30	31–100	40–200	5,1–10	1,0–4,0
4	>20,1	>1,0	>5,00	>10,0	>1,50	>500	>300	>100	>30	>100	>200	>20,0	>5,0

Примечание. 1 – низкие (дефицит); 2 – нормальные; 3 – избыточные; 4 – токсичные.

Величина жизненно важных соотношений P/Al, K/Al, Ca/Al, Mg/Al, P/Fe, P/Mn в листьях на участках с сильной (Гунхе-1) и средней (Ичунь-1) степенью хлороза значительно ниже по сравнению с учетными площадками Гунхе-2 (с низкой степенью хлороза) и с плантациями в Западной Сибири.

В токсичных для растений концентрациях Al накапливался на всех учетных площадках провинции Хэйлунцзян, Fe и Mn – на площадке Ичунь-1. С большой степенью вероятности гибель листьев на площадке Ичунь-2 была вызвана токсичными концентрациями этих элементов, на что указывает высокое содержание Al, Fe и Mn в стеблях растений с этой площадки.

Концентрация в органах Mn и Zn положительно значимо коррелирует с валовым содержанием в почве (табл. 9). Значимыми положительными корреляциями ($p < 0,01$ и $p < 0,05$) содержание в органах растений Mn, Ni, Zn, Cd и K связано с содержанием подвижной формы этих элементов в почвах (табл. 10). Потенциальная кислотность (pH_{KCl}) почв положительно значимо ($p < 0,05$) влияла на интенсивность биологического накопления листьями только Fe (табл. 11). Корреляция между интенсивностью накопления в плодах растений и pH_{KCl} почв была положительно значимой для Mn, Fe, Co при $p < 0,01$ и для Mg, Zn при $p < 0,05$. Кислотность (pH_{KCl}) почв оказывала значимое положительное влияние на интенсив-

Т а б л и ц а 8

Отношения макро- и микроэлементов в листьях *L. caerulea*

Место отбора проб	P/Al	K/Al	Ca/Al	Mg/Al	P/Fe	P/Mn	Fe/Mn	Fe/Zn	Cu/Fe	Mn/Zn	Cu/Mn	Cu/Zn
Гунхе-1	7,2	48	83	20	11	15	1,4	7,2	0,03	5,2	0,05	0,24
Гунхе-2	16,7	173	149	36	20	29	1,5	5,5	0,05	3,7	0,08	0,30
Ичунь-1	2,4	22	25	6	4	8	2,1	19,9	0,01	9,3	0,03	0,26
Барнаул	13,0	110	205	27	22	39	1,9	7,4	0,06	3,9	0,11	0,42
Новосибирск	19,5	75	174	29	29	65	2,2	9,5	0,06	4,4	0,13	0,55

Близкие к нормальному отношения элементов в разных видах растений*

Норма	>15,0	>100	>80	>20	>10	>10	1,0–2,5	1,0–4,5	0,08–0,10	1,7–3,2	0,15–0,30	0,35–0,70
-------	-------	------	-----	-----	-----	-----	---------	---------	-----------	---------	-----------	-----------

*Близкие к норме значения отношений между элементами приняты с учетом указанных для разных видов растений исследователями [Foy et al., 1978; Церлинг, 1990; Ильин, Сысо, 2001; Kabata-Pendias, 2011; Soil conditions..., 2013].

Т а б л и ц а 9

Коэффициенты корреляции между валовым содержанием макро- и микроэлементов в почве и органах растений

Орган	Al	Ba	Be	B	Ca	Cd	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sn	Zn
Стебель	0,1	0,5	0,0	0,3	0,3	0,4	–0,6	–0,1	–0,4	–0,2	0,7	0,0	–0,3	0,0	–0,5	–0,5	0,5
Плоды	0,5	0,6	0,7	0,7	0,4	0,8	0,0	0,3	–0,9	–0,1	0,9	–0,4	–0,4	–0,4	0,4	–0,7	0,7
Лист	0,2	0,6	0,4	0,3	–0,6	0,5	–0,2	0,1	–0,5	0,0	0,9	0,2	–0,3	0,4	0,5	–0,6	0,8

П р и м е ч а н и е. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые на 5, 1 и 0,1%-м уровне.

Коэффициенты корреляции между содержанием макро- и микроэлементов в органах растений и содержанием подвижной формы макро- и микроэлементов в почвах

Орган	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Zn	Al
Стебель	0,3	0,6	0,4	0,2	-0,1	0,3	0,7	0,3	0,6	0,3	0,6	-0,1	0,2	0,7	0,2
Плоды	0,2	0,9	-0,7	0,0	0,3	0,4	0,9	0,1	0,9	0,3	0,7	0,5	0,5	0,6	0,0
Лист	-0,5	0,8	-0,4	0,2	0,2	0,1	0,4	0,4	0,8	0,0	0,8	0,3	0,6	0,7	0,0

П р и м е ч а н и е. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые на 5, 1 и 0,1%-м уровне.

Коэффициенты корреляции между интенсивностью накопления макро- и микроэлементов в органах растений и потенциальной кислотностью (pH_{KCl}) почв

Орган	Al	Mn	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Na	Ni	Sr	Zn	Cd	Co	Cr
Стебель	0,8	0,7	0,6	0,3	0,7	0,5	0,7	-0,1	0,3	0,6	0,6	0,4	0,1	-0,5
Плоды	0,3	0,9	0,2	0,5	0,9	0,6	0,8	0,2	0,6	0,4	0,8	0,7	0,9	0,7
Лист	0,6	-0,1	-0,3	-0,1	0,7	0,3	0,4	0,0	0,3	0,0	0,0	0,3	0,5	-0,1

П р и м е ч а н и е. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые на 5, 1 и 0,1%-м уровне.

ность накопления в стеблях наибольшего числа элементов: Al – при $p < 0,001$; Mg – при $p < 0,01$; Ca, Sr, Mn, Fe и Zn – при $p < 0,05$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Избыток или недостаток химических элементов в почве при недостаточной адаптации к ним может приводить к различным морфофункциональным нарушениям (изменение роста и морфологии вегетативных органов, окраски лепестков и листьев) и, в крайнем случае, к отмиранию растений [Kabata-Pendias, 2011; Битюцкий, 2020].

Выявленные значительные отличия состава и свойств почв интродукционных насаждений *L. caerulea* на северо-востоке провинции Хэйлунцзян от почв на юго-востоке Западно-Сибирской равнины, показанные в табл. 1, обусловлены тем, что на этих территориях формирование почв шло на разных по минеральному и гранулометрическому составу почвообразующих породах в различных условиях климата и растительного покрова, а при антропогенном использовании почвы подвергались различному по интенсивности сельскохозяйственному воздействию. В провинции Хэйлунцзян почвы в п. Гунхе представлены лугово-черноземовидной почвой, в г. Ичунь – буроземом. Они сформировались в условиях

влажного континентального климата и находились под длительным сельскохозяйственным использованием с интенсивным применением органических и минеральных удобрений [Бурдуковский и др., 2016; Голов и др., 2020]. В умеренно-влажном – умеренно-засушливом экстр-континентальном климате юга Западно-Сибирской равнины сформировались серые лесные почвы на участке в г. Новосибирске, чернозем обыкновенный – в г. Барнауле. Они используются при умеренном применении удобрений [Сысо, 2007]. Выявленные сильная кислотность, тяжелый гранулометрический состав в провинции Хэйлунцзян в целом характерны для аналогичных почв сопредельной с ней территории Амурской области и юга Дальнего Востока России [Рясинская, Иванов, 1987; Бурдуковский, 2016; Голов и др., 2020].

Относительно высокое валовое содержание Al, Fe, Mn, Zn, Cu, P в почвах в провинции Хэйлунцзян по сравнению с легкосуглинистыми почвами юга Западно-Сибирской равнины связано как с их среднесуглинистым гранулометрическим составом, так с наличием здесь месторождений черных и цветных металлов, фосфатов, от которых почвообразующие породы и почвы могли унаследовать эти химические элементы [Изотов, 2015]. Причиной повышенного общего содержания P, Zn, Cu в почвах плантации в г. Гунхе могло быть

также многолетнее внесение этих элементов в почвы с удобрениями под ранее возделываемые здесь культуры, преимущественно сою. В целом по агрохимическим и экологическим критериям [Ильин, Сысо, 2001] общее содержание большинства макро- и микроэлементов в почвах изученных плантаций *L. caerulea* оценивается как нормальное для жизни растений и предполагает достаточную обеспеченность ими при условии высокой подвижности элементов в почвах и доступности растениям, отсутствии сильного антагонизма между элементами в почвах.

Более высокое содержание подвижной формы отдельных макро- и микроэлементов в почвах провинции Хэйлунцзян может быть вызвано различными причинами. Высокие концентрации подвижных Fe, Mn и Zn – до 310, 118 и 14 мг/кг соответственно – в почвах площадок Гунхе и Ичунь связаны с более высоким их валовым содержанием, что подтверждается корреляционным анализом (см. табл. 5), а также более высокой подвижностью этих элементов в более кислых местных почвах по сравнению с почвами Западной Сибири.

Содержание Al на площадках Гунхе-1 и Ичунь-2 достигает 40–45 мг/кг. Согласно многочисленным исследованиям [Авдонин, 1957; Kabata-Pendias, 2011; Soil conditions..., 2013], доказано, что при $pH_{KCl} < 4,5$ в почвах, увеличивающей растворимость соединений алюминия и концентрацию Al^{3+} более 30–40 мг/кг, растения начинают угнетаться, а при более 70–80 мг/кг – погибать, что говорит о токсичном уровне содержания Al на этих площадках, вызванном высокой кислотностью.

Известно, что в сильнокислых почвах из-за повышения подвижности Mn, Fe и Al концентрации этих металлов могут достигать фитотоксичного уровня. При этом токсичность Al является основным фактором, ограничивающим рост растений на кислых почвах [Пухальская, 2005; Bose et al., 2015; Rahman, Upadhyaya, 2020]. Исследования Л. М. Рясинской и Г. И. Иванова [1987] показали, что в бурых почвах Приморья концентрация подвижного алюминия Al^{3+} может возрастать с 0,5 до 180–200 мг/кг при изменении реакции среды с нейтральной (pH_{KCl} 6,3) до очень сильно кислой (pH_{KCl} 3,6).

Следствием сильной кислотности почв плантаций провинции Хэйлунцзян является

не только повышенная и избыточная подвижность в них Al, Fe, Mn, но и P, K, Ca, Mg, Zn, которая может оказывать влияние на накопление этих элементов в органах *L. caerulea*. Все это сказывается на поведении макро- и микроэлементов в системе “почва – растение”, их отношениях, антагонизме и синергизме, а далее на биохимических процессах, проявлении морфологических отклонений, хлороза листьев.

Для *L. caerulea* не определены референтные значения количества золы, содержания и отношения макро- и микроэлементов в листьях ни для одной фазы развития растения. Поэтому в качестве критериев оценки зольности и элементного состава листьев *L. caerulea* в начале фазы созревания плодов (см. табл. 6) мы использовали приведенные разными исследователями величины низкого, среднего (нормального), высокого или избыточного (токсичного) содержания элементов (см. табл. 7), нормального и аномального отношения между ними для других видов растений (см. табл. 8) [Foy et al., 1978; Церлинг, 1990; Ильин, Сысо, 2001; Kabata-Pendias, 2011; Soil conditions..., 2013]. Также для оценки уровня накопления и распределения макро- и микроэлементов в органах *L. caerulea* использовали данные по изменчивости содержания в листьях, стеблях и плодах в 60 природных популяциях Горного Алтая в контрастных условиях произрастания [Боярских и др., 2013, 2015, 2018].

Оценка элементного химического состава листьев *L. caerulea* по принятым нами критериям (см. табл. 7) показала, что на всех учетных площадках в листьях содержание золы, P, K, Mo, Ni, Cr, Pb, Cd близко к норме или немного выше ее. В отношении золы это говорит об отсутствии загрязнения листьев почвенными или техногенными минеральными частицами, что позволяет считать приведенные ее значения конституционными или референтными – соответствующими естественной зольности листьев *L. caerulea*.

Установленный уровень содержания P, K, Cu, Mo, Ni, Cr, Pb, Cd в листьях свидетельствует о хорошей обеспеченности растений жимолости синей эссенциальными элементами – P, K, Cu, Mo, и об отсутствии ее загрязнения тяжелыми металлами. Обнаруженное избыточное содержание в листьях

растений Ca, Mg и B, возможно, для нее “нормальное” и обусловлено повышенной потребностью растений этого вида в этих элементах, что подтверждается исследованиями в естественных условиях произрастания *L. caerulea*, уровни накопления этих элементов укладываются в пределы варьирования [Боярских и др., 2013, 2015, 2018].

Как и предполагали, свойства почв и высокие концентрации в них подвижной формы Al, Fe, Mn на площадках Гунхе и Ичунь способствуют накоплению токсичных для растений концентраций этих элементов в листьях. Не соответствует характерному для природных местообитаний и для площадок Западной Сибири распределение по органам Al, а также эссенциальных микроэлементов Fe, Mn, Cu и Zn. Результаты ранее проведенных исследований [Боярских и др., 2013, 2015, 2018] показали, что в оптимальных для этого вида условиях произрастания содержание Mn и Zn в стеблях всегда значительно выше, чем в листьях. Уровень накопления Fe, Cu и Al в листьях и стеблях в естественных условиях в среднем одинаковый, в отдельных популяциях он может быть немного выше в стеблях. На учетных площадках провинции Хэйлунцзян содержание Fe, Mn, Cu, Zn и Al в листьях значительно выше, чем в стеблях. Также отмечается и значительное увеличение концентрации Na в листьях и стеблях и увеличение разницы по уровню его накопления в органах. Наибольшая разница по распределению перечисленных микроэлементов была у растений из Ичунь-1.

Антагонизм Al, Fe, Mn с другими макро- и микроэлементами – P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, негативно сказывается на их отношениях (см. табл. 8). В отличие от листьев сорта жимолости синей “Берель” с учетных площадок на Западно-Сибирской равнине, на площадках Ичунь-1 и Гунхе-1 отношения P/Al, Ca/Al, Mg/Al, P/Fe, P/Mn, Cu/Fe, Cu/Mn были ниже.

Проявление хлороза, наблюдаемое на площадках Гунхе и Ичунь, сходно по характеру с признаками хлороза при недостатке Fe или Mg [Церлинг, 1990] или является вторичными симптомами токсичности Mn [Millaleo et al., 2010]. В листьях растений на этих площадках Fe и Mg содержатся в избыточном количестве, а Mn в токсичной концентрации от-

мечается только в Ичунь-1. Однако известно о проявлении вызванного Al хлороза, возникающего вследствие нарушения метаболизма Fe и Mg [Foy et al., 1978], о чем свидетельствуют аномально низкие значения соотношений Mg/Al и P/Fe.

По разным причинам аномальными в листьях *L. caerulea* оказались низкие значения отношения K/Al: в провинции Хэйлунцзян – из-за высокого содержания алюминия, а на Западно-Сибирской равнине – из-за низкого содержания калия. Отношения Fe/Zn, Mn/Zn были везде высокими по сравнению с нормальными соотношениями элементов (см. табл. 8) из-за избыточного содержания Fe и Mn в листьях растений в провинции Хэйлунцзян и дефицита Zn в листьях на Западно-Сибирской равнине. Только отношение Cu/Zn в листьях биофильных элементов, связанных с ферментосинтезом, было близко к норме на всех изученных плантациях. Нужно отметить, что отношение Cu/Zn, согласно ранее проведенным исследованиям в контрастных условиях произрастания, является довольно постоянной величиной, варьирует в незначительных пределах (0,2–0,4) и всегда значимо связано линейными зависимостями с основными биологически активными полифенолами *L. caerulea* [Боярских и др., 2015, 2019].

Усиление кислотности почв положительно значимо связано с интенсивностью накопления в стеблях Al ($p < 0,001$), Mg ($p < 0,01$), Ca, Sr, Mn, Fe и Zn ($p < 0,05$) (см. табл. 11). Вероятно, поступление элементов в стебли носит более пассивный характер, чем в ассимиляционные и репродуктивные органы растений, и больше зависит от экзогенного влияния среды. Уровни накопления в листьях и плодах в большей мере контролируются эндогенными регуляторными факторами, в том числе гормонами и вторичными метаболитами.

В процессе адаптации различных видов растений к кислым почвам, содержащим высокие концентрации токсичного Al, происходит изменение роста корней, модулируемое вариациями в накоплении и распределении фитогормонов. Алюминий приводит к “взрыву” этилена в эпикальных клетках корня, что регулирует резкое увеличение ауксина. Набухание корня возникает вследствие периклинальных делений в ответ на избыточное накопление ауксина [Sun et al., 2016]. Посредством

регуляции гормональной передачи сигналов растения реагируют при токсичных концентрациях Fe [Zhang et al., 2018] и при избытке Mn [Horst, 1988]. Причем локальный стресс, оказываемый на корни растений, вызывал изменения уровней фитогормонов в различных органах растений [Веселов и др., 2007; O'Brien, Benkova, 2013]. Проявление партенокарпии у сорта жимолости синей “Берель”, наблюдаемое в п. Гунхе, может быть вызвано увеличением уровня ауксина как опосредованной реакции на стрессовое воздействие токсичных концентраций, в первую очередь Al.

Для улучшения почвенных условий произрастания сортов *L. caerulea*, полученных при участии образцов алтайского и камчатского происхождения, необходимо уменьшить концентрацию подвижного алюминия в сильнокислых почвах провинции Хэйлунцзян, проведя их известкование [Голов и др., 2020]. Вероятно, более адаптированы для выращивания на этих почвах будут сорта аборигенного вида *L. boczkarnikowii* и сорта, полученные на основе *L. caerulea* subsp. *venulosa* из Приморского края, произрастающих в природе в сходных эдафических условиях. На это указывают результаты исследований уровня толерантности к Al у разных рас *Betula pendula* Roth, произрастающих на почвах с различной потенциальной кислотностью почв [Kidd, Proctor, 2000].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного сравнительного изучения макро- и микроэлементного состава, свойств почв в насаждениях жимолости синей сорта “Берель” в провинции Хэйлунцзян (Китай) и Западной Сибири (Россия) установлены значительные различия эдафических условий произрастания растений. В провинции Хэйлунцзян на учетных площадках, где у растений наблюдались гибель листьев или их сильное поражение хлорозом, а также формирование партенокарпических плодов, почвы характеризовались сильной кислотностью (рН_{KCl} 4,0–4,5) и фитотоксичными концентрациями в них Al, Fe, Mn. Для площадок Западно-Сибирской равнины характерна нейтральная или близкая к ней реакция почвенной среды; макро- и микроэлементов в фитотоксичных концентрациях здесь не выявлено.

Свойства почв и высокие концентрации в них подвижной формы Al, Fe, Mn на площадках Гунхе и Ичунь способствовали накоплению фитотоксичных концентраций этих элементов в листьях, а также вели к нехарактерному для этого вида распределению Al, Fe, Mn, Cu и Zn по органам. Избыточное и токсичное накопление в листьях Al, Fe, Mn вызывало нарушение важных для жизни растений соотношений P/Al, Ca/Al, Mg/Al, P/Fe, P/Mn, Cu/Fe и Cu/Mn, а также нарушало процессы метаболизма и вызывало хлороз листьев растений.

Полученные результаты и анализ литературы позволяют предположить, что причиной проявления партенокарпии у сибирского сорта жимолости синей, наблюдаемой в п. Гунхе, может быть стрессовое воздействие токсичных концентраций Al, вызывающее изменения уровней фитогормонов (в первую очередь ауксина) в органах растений.

Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А21-121011290027-6 ЦСБС СО РАН и 121031700309-1 ИПА СО РАН.

При подготовке публикации использовались материалы биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН “Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте”, УНУ № USU 44053

ЛИТЕРАТУРА

- Авдонин Н. С. Вопросы земледелия на кислых почвах. М.: Сельхозгиз, 1957. 289 с.
- Антюфеев В. В., Казимирова Р. Н., Евтушенко А. П. Агроклиматические, микроклиматические и почвенные условия в приморской полосе Южного берега Крыма. Теоретические основы и практические рекомендации для рационального размещения растений при реконструкции насаждений. Ялта, 2014. 88 с.
- Бахтадзе К. Е. Развитие культуры чая в СССР / АН ГССР. Тбилиси: Изд-во АН ГССР, 1961. 171 с.
- Битюцкий Н. П. Микроэлементы высших растений. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2020. 368 с.
- Бойценюк Л. И., Желонкина Е. Э., Пафнutowa Е. Г., Сулов С. В. Влияние синтетических аналогов фитогормонов на формирование урожая плодово-ягодных культур // Междунар. с.-х. журн. 2019. № 4 (370). С. 80–82. <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2019-14072>
- Боярских И. Г. Особенности репродуктивной биологии жимолости синей *Lonicera caerulea* L. // С.-х. биология. 2017. Т. 52, № 1. С. 200–210. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.200rus>
- 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 гра-

- диенте // Сиб. экол. журн. 2019. № 6. С. 727–741. doi: 10.15372/SEJ20190608 [Boyarskikh 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, N 6. P. 594–606. doi: 10.1134/S1995425519060039]
- Боярских И. Г., Сысо А. И., Сиромля Т. И. Особенности минерального состава *Lonicera caerulea* в контрастных геохимических условиях // Химия раст. сырья. 2018. № 3. С. 129–138. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.2018033740>
- Боярских И. Г., Сысо А. И., Худяев С. А. Изменчивость элементного состава *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) в популяциях Горного Алтая // Раст. ресурсы. 2013. Вып. 4. С. 571–585.
- Боярских И. Г., Чанкина О. В., Сысо А. И., Васильев В. Г. Тренды содержания химических элементов в листьях *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) в связи с их вторичным метаболизмом в природных популяциях Горного Алтая // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79, № 1. С. 106–110. <https://doi.org/10.7868/S0367676515010081>
- Бурдуковский М. Л., Голов В. И., Ковшик И. Г. Изменение агрохимических свойств основных пахотных почв юга Дальнего Востока при длительном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1244–1250.
- Веселов Д. С., Веселов С. Ю., Высоцкая Л. Б., Кудоярова Г. Р., Фархутдинов Р. Г. Гормоны растений: регуляция концентрации, связь с ростом и водным обменом. М.: Наука, 2007. 158 с.
- Голов В. И., Бурдуковский М. Л., Иваненко Н. В., Попова Ю. А. Экологическое состояние пахотных почв Дальнего Востока и ближайшие перспективы их использования // Вестн. ДВО РАН. 2020. № 1. С. 66–74.
- Жолобова З. П., Прищепина Г. А. Жимолость: История, состояние и перспективы культуры в Сибири. Барнаул: Изд. АГАУ, 2003. 108 с.
- Изотов Д. А. Экономика провинции Хэйлунцзян: перспективы развития в контексте реализации целевых программ // Регионалистика. 2015. Т. 2, № 4. С. 31–50.
- Ильин В. Б., Сысо А. И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
- Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ Росинформагротех, 2003. 240 с.
- Плеханова М. Н. Изучение само- и перекрестного опыления жимолости с помощью люминесцентной микроскопии // Бюл. ВИР. 1982. Т. 126. С. 53–58.
- Пухальская Н. В. Проблемные вопросы алюминиевой токсичности // Агрохимия. 2005. № 8. С. 70–82.
- Рясинская Л. М., Иванов Г. И. Кислотность и содержание алюминия в некоторых почвах Приморья // Генезис, химия и биология почв Приморья и Приамурья. Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. С. 98–110.
- Семенютина А. В., Костюков С. М., Кащенко Е. В. Методы выявления механизмов адаптации древесных видов в связи с их интродукцией в засушливые регионы // Успехи соврем. естествознания. 2016. № 2. С. 103–109.
- Сысо А. И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Запальной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 277 с.
- Урусов В. М., Майоров И. С., Чипизубова М. Н. Оценка сходства климата как основа успеха интродукции // Вестн. ТГЭУ. 2010. № 1. С. 108–111.
- Церлинг В. В. Диагностика питания сельскохозяйственных культур: справочник. М.: Агропромиздат, 1990. 235 с.
- Bors B., Thomson J., Sawchuk E., Reimer P., Sawatzky R., Sander T. Haskap breeding and production final report. ADF 2008-0042, Saskatchewan Agriculture. Regina, 2012.
- Bose J., Babourina O., Ma Y., Zhou M., Shabala S., Rengel Z. Specificity of ion uptake and homeostasis maintenance during acid and aluminium stresses // Aluminium Stress Adaptation in Plants. Vol. 24 / Eds. S. K. Panda, F. Baluska. Cham: Springer International Publishing, 2015. P. 229–251.
- Božek M. The effect of pollinating insects of two cultivars of *Lonicera caerulea* L. // J. Apicult. Sci. 2012. Vol. 56, N 2. С. 5–11.
- Foy C. D., Chaney R. L., White M. C. The physiology of metal toxicity in plants // Ann. Rev. Plant Physiol. 1978. Vol. 29. P. 511–566.
- Gawronski J., Hortynski J., Kaczmarek E., Dyduch-Sieminska M., Marecki W., Witorożec A. Evaluation of phenotypic and genotypic diversity of some Polish and Russian blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.) cultivars and clones // Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus. 2014. Vol. 13 (4). P. 157–169.
- Golba 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, N 3. 749. <https://doi.org/10.3390/molecules25030749>
- Horst W. J. The physiology of manganese toxicity // Manganese in Soil and Plants / Eds: R. D. Graham, R. J. Hannam, N. J. Uren. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. P. 175–188.
- Junwei Huo, Boyarskikh I. G. Parthenocarpy in *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) // International Conferences “Plant Diversity: Status, Trends, Conservation Concept” 2020, BIO Web of Conferences. 2020. Vol. 24. 0003. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202400031>
- Junwei Huo, Yang Guo-hui, Sui Wei, Yu Ze-yuan. Review of study on gemplasm resources of Blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.) // Acta Horticulturae Sinica. 2005. Vol. 32, N 1. P. 159–164.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Fourth Editions. CRC Taylor and Francis Group. 2011. 505 p.
- Kidd P. S., Proctor J. Effects of aluminium on the growth and mineral composition of *Betula pendula* Roth // J. Exp. Bot. 2000. Vol. 51. P. 1057–1066. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.347.1057>
- McAtee P., Karim S., Schaffer R., David K. A dynamic interplay between phytohormones is required for fruit development, maturation, and ripening // Front. Plant Sci. 2013. Vol. 4, N 79. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00079>
- Millaleo R., Reyes-Diaz M., Ivanov A., Mora M. L., Alberdi M. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms // J. Soil Sci. and Plant Nutrition. 2010. Vol. 10, N 4. P. 470–481.

- O'Brien J. A., Benkova E. Cytokinin cross-talking during biotic and abiotic stress responses // *Front. Plant Sci.* 2013. Vol. 4. P. 451. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00451>
- Rahman R., Upadhyaya H. Aluminium Toxicity and Its Tolerance in Plant: A Review // *J. Plant Biol.* 2020. <https://doi.org/10.1007/s12374-020-09280-4>
- Sharma A., Lee H.-J. *Lonicera caerulea*: An updated account of its phytoconstituents and health-promoting activities // *Trends in Food Sci. & Technol.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.013>
- Soil conditions and plant growth / Eds. P. J. Gregory, S. Nortcliff. New York: Wiley-Blackwell, 2013. 496 p.
- Sun L., Tian J., Zhang H., Liao H. Phytohormone regulation of root growth triggered by P deficiency or Al toxicity // *J. Exp. Bot.* 2016. Vol. 67, N 12. P. 3655–3664. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw188>
- Zaimenko N. V., Pavliuchenko N. A., Ellanska N. E., Ivanyska B. O., Kharytonova I. P., Yunosheva O. P., Skrypchenko N. V., Zhang P., Liu D., Shen J., Tian L. Comparative analysis of agrochemical, allelopathic and microbiological characteristics of the soil environment for *Actinidia arguta* (Siebold et Zucc.) Planch. ex Miq. cultivated in Ukraine and two provinces of China // *Plant Introduction*. 2020. Vol. 85/86. P. 3–14.
- Zhang L., Li G., Wang M., Di D., Sun L., Kronzucker H. J., Shi W. Excess iron stress reduces root tip zone growth through nitric oxide-mediated repression of potassium homeostasis in *Arabidopsis* // *New Phytologist*. 2018. Vol. 219. P. 259–274.

Influence of soil conditions on the manifestation of chlorosis and parthenocarp in *Lonicera caerulea* L.

A. I. SYSO¹, I. G. BOYARSKIKH^{1, 2}, HUO JUNWEI³, T. I. SYROMLYA¹

¹*Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS
630090, Novosibirsk, Academician Lavrentiev av., 8/2*

²*Central Siberian Botanical Garden
630090, Novosibirsk, Zolotodolinskaya str., 101
E-mail: irina_2302@mail.ru*

³*College of Horticulture, Northeast Agricultural University
China, 150030, Harbin, Chang Zyan, 600*

To reveal changes in plant mineral nutrition causing leaves' chlorosis and parthenocarpy in the blue honeysuckle plants of Siberian origin, grown on plantations in Heilongjiang Province, China, we compared macro- and trace elements' composition in two counties in China and two districts in the south of the West Siberian plain. It was found that massive leaves' chlorosis and dying-off, as well as hormonal changes resulting in parthenocarpal fruits, may be associated with soil acidity (pH_{KCl} 4.0–4.5) on some of the study sites in the Heilongjiang Province, as such high acidity increased plant available Al, Fe and Mn concentrations to phytotoxic levels. The blue honeysuckle plants grown on such study sites had specific patterns of Al, Fe, Mn, Cu and Zn distribution throughout their organs, as well as accumulation of toxic concentrations of Al, Fe, Mn in leaves, resulting in aberrant P/Al, Ca/Al, Mg/Al, P/Fe, P/Mn, Cu/Fe and Cu/Mn ratios, which are vitally important for plants.

Key words: blue honeysuckle, plant species introduction, acidic soils, aluminum, manganese, iron, chlorosis, parthenocarpy.