

УДК 631.416.9:546.73:631.445.25(470.1)

КОБАЛЬТ В СИСТЕМЕ ПОЧВА–РАСТЕНИЕ НА ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ¹

© 2021 г. Г. Я. Елькина

*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН
167982 Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия*

E-mail: elkina@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 19.01.2021 г.

После доработки 01.03.2021 г.

Принята к публикации 10.04.2021 г.

Выявлено, что поведение кобальта в системе почва–растения в условиях искусственного загрязнения определяется количеством элемента, спецификой культур и продолжительностью последствия. В низких концентрациях кобальт оказал стимулирующее действие на рост и развитие кормовых трав, при превышении оптимума происходило ингибирование и гибель растений. Транслокацию кобальта в растения больше максимально-допустимого уровня наблюдали при внесении элемента в почву в количестве 32 мг Со/кг. В связи со значительным возрастанием подвижности элемента в загрязненных почвах показана необходимость оценки экологического состояния почв по наличию подвижных форм.

Ключевые слова: кобальт, система почва–растение, подзолистые почвы, европейский Северо-Восток России.

DOI: 10.31857/S000218812107005X

ВВЕДЕНИЕ

Кобальт относится к числу физиологически необходимых элементов для живых организмов. Входя в состав ферментов, кобальт активно влияет на поступление и обмен азотистых веществ, синтез хлорофилла и нуклеиновых кислот в растениях. Значим он для жизни клубеньковых бактерий и фиксации ими молекулярного азота [1, 2]. Особо велика роль кобальта для жизнедеятельности животных. Дефицит его в рационе вызывает ряд заболеваний (акобальтозы, анемии, авитаминозы). Являясь составной частью витамина В₁₂, кобальт влияет на углеводный и жировой обмен, участвует в кроветворении и образовании гемоглобина. Животные, как и человек, этот витамин не синтезируют. В связи с этим важна обеспеченность им кормовых культур и продуктов питания [3–5].

При этом тяжелые металлы (ТМ), к которым относится кобальт, в избыточном количестве также вызывают заболевания животных и человека [4, 6]. В условиях техногенеза роль антропогенного фактора в формировании микроэлементного состава живых организмов значительно возрастает.

В связи этим актуально изучение взаимосвязей между содержанием кобальта в почве, продуктивностью растений и качеством продукции. Важен при этом региональный подход [7], обусловленный разнообразием почв, условиями возделывания и спецификой культур. На почвах с низким содержанием кобальта значимым остается улучшение минерального и биохимического состава растительной продукции.

Цель работы – изучение действия и последствия кобальта на продуктивность однолетних и многолетних трав и его транслокацию в растения на подзолистых почвах европейского Северо-Востока.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в пригороде г. Сыктывкара на легкосуглинистой пахотной подзолистой почве со следующей агрохимической характеристикой: рН 5.7, содержание гумуса – 1.9%, сумма обменных оснований – 6.1, гидролитическая кислотность – 2.6 ммоль/100 г, азот гидролизующий – 4.9 мг/100 г, содержание подвижных фосфора – 285 и калия – 122 мг/кг (по Кирсанову).

Изучение действия кобальта на растения начали в мелкоделяночном эксперименте (опыт 1),

¹ Работа выполнена в рамках госзадания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

где были смоделированы 3 контрастных по содержанию элемента уровня. Для создания первого из них внесли $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ в количестве 100 мг Co/m^2 , что соответствовало установленной оптимальной дозе кобальта на подзолистых почвах Республики Коми – 1 кг/га. Второй уровень превышал первый в 10 раз, третий – в 100 раз. В пахотный горизонт с учетом его мощности (0–25 см) и объемной массы поступило от 0.3 до 33 мг $\text{Co}/\text{кг}$ почвы. Площадь делянок – 1 m^2 , повторность четырехкратная. В первый год возделывали однолетние травы – горох (*Pisum sativa* (rehcbdjv)) сорта Альбумен и овес (*Avena sativa*) сорта Льговский-82 в смешанном посеве), на 2–3-й годы – клевер (*Trifolium pratense*) сорта Печорский улучшенный (последствие I, II), на 4-й год – овес (последствие III). В качестве фона под однолетние травы вносили N60P60K60, под клевер – N30P30K30.

Позднее были проведены микрополевые исследования в сосудах с возрастающим содержанием элемента (опыт 2). Почвенная масса с разным содержанием кобальта была получена путем смешивания почвы опыта 1 с почвой контрольных делянок. Доля загрязненной почвы от первого варианта к десятому последовательно повышалась от 1 до 10 кг/10 кг почвы. В загрязненной почве (время взаимодействия кобальта с почвой продолжалось 5 лет) в естественных условиях произошли трансформация внесенной соли и уравнивание форм элемента. Для подобных процессов требуются не менее 3-х лет [8]. Почву массой 10 кг помещали в полиэтиленовые сосуды без дна (диаметр – 20, высота – 30 см), которые зарывали в траншеи. Эксперимент выполняли в четырехкратной повторности в течение 2-х лет. В сосуды высевали по 15 семян гороха и овса, оставляя впоследствии по 10 растений каждого вида. Биомассу растений, как и содержание в них кобальта, определяли отдельно для гороха и овса.

Валовое содержание кобальта в почвах после разложения смесью азотной, фтористоводородной и хлорной кислот определяли методом атомной абсорбции на приборе фирмы “Hitachi” (модель 180–80 Z). В почвах, наряду с валовым содержанием, анализировали подвижные формы, переходящие в 1M HCl, ацетатно-аммонийный буфер (ААБ) pH 4.8. Определение ТМ в растениях осуществляли после разложения смесью азотной кислоты и перекиси водорода на СВЧ-минерализаторе “Минотавр-1” методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ПНДФ 16.1:2.3: 3.11-98).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Реакция растений на микроэлементы во многом определяется содержанием их в почве. В незагрязненных почвах количество ТМ обусловлено рядом факторов, основными из которых являются содержание в материнской породе, направленность и интенсивность почвообразовательного процесса [7].

В разрезе, примыкающем к опытному участку, кобальт в большей мере сосредоточен в пахотном горизонте (6.91–7.99 мг/кг) (табл. 1). Сельскохозяйственное использование привело к обогащению обрабатываемой толщи кобальтом, чему способствовали смена древесной растительности на травянистую, а также применение удобрений и мелиорантов. Минимум кобальта пришлось на элювиальный горизонт А2В1 (3.63 мг/кг). Аккумуляция элемента (6.45 мг/кг) в иллювиальном горизонте А2В1(В1) была связана с тем, что он является геохимическим барьером в связи с утяжелением гранулометрического состава. Количество микроэлемента в материнской породе составило 4.17 мг/кг. В нижней части профиля преобладали кислоторастворимые формы кобальта (37–56% от общего его количества), что связано с более тяжелым гранулометрическим составом и низкой гумусированностью иллювиальной толщи. Содержание подвижной формы кобальта, экстрагируемое 1M HCl, в пахотном горизонте составило 1.02–1.40, ААБ – 0.18–0.25 мг/кг. Ацетатно-аммонийная вытяжка вытеснила незначительное количество элемента (от 2.6 до 9.4%), основная часть кобальта была закреплена почвенно-поглощающим комплексом (ППК).

Количество подвижного кобальта в подзолистых почвах региона составило 0.5–3.9 мг/кг, меняясь по шкале обеспеченности от бедных до среднеобеспеченных [9].

Валовое содержание кобальта в опыте 2 (табл. 1) с ростом доли загрязненной почвы увеличилось линейно с 6.2 в контроле до 65.5 мг/кг. Солянокислая вытяжка из почвы контроля извлекла 25.8% от общего количества. В первом варианте с кобальтом подвижность элемента увеличилась до 43.7%, в остальных вариантах вытяжка экстрагировала более половины поступившего в почву элемента.

Подвижность кобальта в контроле при использовании ААБ-вытяжки составила 2.9%, из загрязненной почвы буфер извлекал от 6.6 до 32.9% от общего содержания. Во 2-м варианте количество кобальта, экстрагируемое ААБ (5.3 мг/кг), превысило ПДК. Содержание подвижных форм при загрязнении возросло более интенсивно

Таблица 1. Содержание кобальта в почве опыта 2, мг/кг воздушно-сухой почвы

Вариант	Валовое	1 М НСІ-вытяжка		ААБ-вытяжка	
		мг/кг	% от валового	мг/кг	% от валового
Контроль (0)*	6.2	1.6	25.8	0.18	2.9
1 (1)	15.1	6.6	43.7	2.5	16.6
2 (2)	20.1	10.5	52.2	5.3	26.4
3 (3)	30.9	17.4	56.3	9.1	29.4
4 (4)	32.1	18.3	57.0	10.2	31.8
5 (5)	37.5	22.5	60.0	11.6	30.9
6 (6)	46.0	25.7	55.9	15.1	32.8
7 (7)	48.7	26.7	54.8	16.1	32.9
8 (8)	55.3	30.1	54.4	16.9	30.6
9 (9)	57.7	32.3	55.5	19.1	33.1
10 (10)	65.5	32.6	49.8	19.1	29.2
ПДК				5.0	

Примечание. Нумерация вариантов та же в табл. 3, 4.

*В скобках – количество загрязненной почвы в почве сосуда на 10 кг, кг.

(в 20.4 раза – в 1М НСІ-вытяжке и в 106 раз – в ААБ), чем увеличилось общее содержание (в 10.6 раза) элемента в почве. Солянокислая вытяжка характеризовала в основном потенциальный запас элемента, а ацетатно-аммонийный буфер извлекал наиболее мобильные и опасные с экологической точки зрения соединения.

Повышенное поступление кобальта, особенно в условиях слабой буферности подзолистых почв, обусловленной низким содержанием органического вещества и кислой реакцией среды, существенно повлияло на естественное состояние элемента в почве. Равновесие между количеством кобальта в твердой фазе почвы и почвенном растворе установилось на новом, существенно отличающемся от исходного, уровне. Поступившие в почву металлы вступают в реакции ионного обмена, сорбции-десорбции, соосаждения–растворения, комплексообразования [10]. Но при этом значительная их часть не закрепляется в ППК, оставаясь в почвенном растворе в свободном состоянии. Эти формы ТМ представляют бóльшую опасность для растений, чем валовое их количество. В связи с этим оценка как обеспеченности микроэлементом, так и загрязнения им почв должна осуществляться по наличию подвижных форм. Дополнительным аргументом к этому послужило отсутствие пропорциональных связей между валовым содержанием кобальта и количеством экстрагируемых соединений.

Влияние кобальта на растения в эксперименте с контрастным загрязнением (опыт 1) началось с изменения всхожести семян. Если количество

взошедших растений на делянках с дозами кобальта 100 и 1000 мг/м² статистически не отличалось от фона, то на делянках с повышенной дозой всходы гороха и клевера отсутствовали. Доза 10000 мг/м² (100 кг/га) оказалась летальной для бобовых растений. Всхожесть овса при 3-м уровне загрязнения составила 57%. Бобовые растения в начальные стадии онтогенеза оказались более чувствительными к повышенным концентрациям кобальта, чем злаковые. Отдельные симптомы избытка кобальта начали проявляться еще при 2-м уровне в виде хлоротичных пятен на листьях гороха и светлых полос на листьях овса.

Влияние кобальта на физиологические и биохимические процессы в растениях сказалось на величине биомассы растений (табл. 2). Под действием оптимальной дозы (100 мг/м²) продуктивность кормовых трав и особенно гороха значительно увеличилась. Общая биомасса трав выросла на 52, гороха – на 148%. При 2-м уровне загрязнения (1000 мг/м²) продуктивность однолетних трав была близка к фону, но меньше, чем при оптимальном количестве элемента. Вследствие гибели гороха, снижения всхожести и ингибирования роста злакового растения при избытке кобальта при 3-м уровне (10000 мг/м²) произошло значительное уменьшение биомассы (–75% от фона).

Высокая продуктивность гороха была связана с положительным влиянием кобальта на азотный обмен в растениях [11], который значительно улучшился вследствие деятельности клубеньковых бактерий при обеспечении микроэлементом. Как показал визуальный осмотр корней гороха,

Таблица 2. Влияние кобальта на продуктивность растений и его транслокацию (опыт 1)

Доза, мг/м ²	Горохо-овсяная смесь, действие				Клевер 1-го года пользования, последствие I		Клевер 2-го года пользования, последствие II		Овес, последствие III	
	горох	овес	общая биомасса	% к фону	биомасса	% к фону	биомасса	% к фону	биомасса	% к фону
Контроль	25/0.82**	238/0.40	263		620/2.1		1050		62	
100 (0.3*)	62/3.1	340/1.08	402	52	705/2.8	14	1210	15	63	1
1000 (3.3)	24/11.8	250/7.1	274	4	456/10.5	-26	870	-17	64	3
10000 (33)	0	66/13.7	66	-75	0	-100	0	-100	20	-68
<i>HCP</i> ₀₅			28		55		110		7	

*Среднее поступление в почву, мг/кг.

**Над чертой – продуктивность, г воздушно-сухой массы/м², под чертой – содержание в растениях, мг Со/кг воздушно-сухой массы.

при оптимальной дозе (100 мг/м²) отмечен рост числа клубеньков, их размера и интенсивности окраски по сравнению с контролем. Разное влияние кобальта на горох и овес обусловлено в основном биологическими видовыми особенностями растений. На метаболические процессы в растениях отразились как недостаток микроэлемента в почве контроля, так и избыток при повышенном содержании его в почве.

Последствие первой дозы кобальта (100 мг/м²) на клевере проявилось в меньшей мере, чем действие элемента на однолетние травы при непосредственном внесении. Биомасса многолетнего бобового растения при оптимальной дозе микроэлемента в оба года последствия была больше на 14–15%. Кроме затухающего действия причиной снижения эффективности элемента могло послужить то, что хорошо развитая покровная культура сдерживала рост клевера 1-го года жизни, что сказалось впоследствии. Вторая доза кобальта была токсичной для клевера, его биомасса была меньше чем в контроле. При максимальном загрязнении произошла гибель растений на стадии всходов.

С тем, чтобы проследить за токсичностью кобальта в последствии, в следующий сезон на делянках с максимальным загрязнением, на которых клевер погиб в год посева, был проведен посев гороха. В отличие от предыдущего года полной гибели растений не наблюдали, снижение биомассы составило 77%. Полученные результаты свидетельствовали о снижении ингибирующего действия поллютанта со временем. Вместе с тем овес, высеянный на 4-й год (табл. 2), при избытке кобальта (10000 мг/м²) продолжал испытывать токсическое действие (-68%).

Эффективность некорневых подкормок люпина узколистного, озимой пшеницы, ярового ячменя и люцерны кобальтом (удобрение Микро-Стим-Кобальт) также определялась уровнем обеспеченности почвы элементом и дозами микроудобрения. При низкой и средней обеспеченности почвы кобальтом отмечали стимулирующее действие, при избыточной – происходило снижение продуктивности [12]. Применение некорневых подкормок азотнокислым кобальтом многолетних трав на подзолистых почвах обеспечило высокую (20%) прибавку биомассы, на микроэлемент в большей мере отреагировал клевер, в нем усилился синтез белка [9].

С ростом поступления кобальта в почву увеличилась транслокация элемента в растения. Среди однолетних трав более высоким содержанием кобальта отличались бобовые растения (табл. 2). При применении оптимальной дозы содержание кобальта в кормовых травах соответствовало рекомендуемому показателю для жвачных животных. При более высоких дозах его количество в наземной биомассе трав превысило максимально допустимый уровень – МДУ [13], который для кормов естественной влажности составляет 1 мг/кг (6 мг/кг в пересчете на воздушно-сухое вещество).

В большинстве исследований ТМ применяют сверхвысокие дозы элементов с заведомо негативным действием на растения. Включение низких доз позволило определить резкие изменения в жизнедеятельности растений в зависимости от количества микроэлемента, внесенного в почву: оптимальные дозы улучшали рост и развитие растений, избыточные привели к снижению биомассы, гибели бобовых культур и излишнему накоплению элемента в растительной продукции. Дей-

Таблица 3. Продуктивность однолетних трав при возрастающих концентрациях кобальта (опыт 2)

Вариант	Содержание, мг/кг (1 М НСl)	Масса одного растения (воздушно-сухая, г)			
		первый год		второй год	
		горох	овес	горох	овес
Контроль	1.6	0.36 ± 0.05	0.40 ± 0.04	0.15 ± 0.07	0.19 ± 0.04
1	6.6	0.41 ± 0.04	0.47 ± 0.05	0.16 ± 0.03	0.26 ± 0.03
2	10.5	0.42 ± 0.04	0.50 ± 0.06	0.15 ± 0.03	0.30 ± 0.04
3	17.4	0.41 ± 0.04	0.53 ± 0.04	0.16 ± 0.02	0.30 ± 0.03
4	18.3	0.40 ± 0.04	0.52 ± 0.07	0.19 ± 0.04	0.33 ± 0.04
5	22.5	0.38 ± 0.03	0.55 ± 0.07	0.19 ± 0.02	0.32 ± 0.04
6	25.7	0.35 ± 0.03	0.57 ± 0.07	0.17 ± 0.03	0.35 ± 0.05
7	26.7	0.35 ± 0.02	0.59 ± 0.07	0.15 ± 0.02	0.39 ± 0.04
8	30.1	0.33 ± 0.03	0.54 ± 0.06	0.16 ± 0.03	0.39 ± 0.04
9	32.3	0.31 ± 0.02	0.52 ± 0.05	0.17 ± 0.02	0.35 ± 0.04
10	32.6	0.30 ± 0.02	0.50 ± 0.06	0.15 ± 0.02	0.35 ± 0.04

ствии кобальта менялось от стимулирующего при его недостатке к токсическому – при избытке.

В эксперименте с возрастающими концентрациями кобальта в почве (опыт 2) такого существенного роста продуктивности под действием микроэлемента, как при непосредственном внесении (опыт 1) не наблюдали (табл. 3). В первый год прирост биомассы гороха на 15% отмечен в вариантах 2–4. В следующий год горох активнее развивался в вариантах 4 и 5, где валовое количество кобальта было больше и составляло 32.1–37.5 мг/кг. В вариантах с меньшим содержанием микроэлемента происходило постепенное снижение его эффективности. Биомасса овса в вариантах с микроэлементом в первый год превышала контроль на 17–47%. Тенденция к снижению продуктивности злакового растения по сравнению с максимальной происходила в 2-х последних вариантах при содержании валового кобальта 57.7–65.5 мг/кг. Это количество микроэлемента в почве было больше, чем внесено на 3-м уровне опыта 1 (33 мг Со/кг), при котором происходила гибель бобового и ингибирование роста и развития злакового растения. На 2-й год биомасса овса, как и в первый, была больше в вариантах с кобальтом.

Различия в росте и развитии растений, прежде всего гороха, в двух последовательных экспериментах связываем с тем, что смоделированные концентрации данного физиологически значимого элемента в опыте 2 были больше оптимальных: с варианта 2 содержание кобальта, извлекаемое ААБ, превысило ПДК (5 мг/кг). Разница также могла быть обусловлена тем, что поступление элемента в растения в замкнутом пространстве

сосуда отличалось от его поглощения в полевых условиях.

При анализе результатов опыта 1 отмечали некоторое снижение как стимулирующего, так и токсического эффекта во временном промежутке, процесс этот продлился в опыте 2. Чем продолжительнее металлы находятся в почве, тем в меньшей мере проявляется их токсичность в отношении растений [14, 15]. Снижение негативного действия ТМ со временем происходило и в экспериментах с медью, цинком и кадмием [16–18]. Спад токсичности обусловлен в основном закреплением элементов в ППК, определенный вклад вносит вымывание элементов за пределы пахотного горизонта и отчуждение растениями. Учитывая снижение биодоступности металлов в почвах со временем, следует использовать разные нормативы для свежего и старого загрязнения.

Действие кобальта в микрополевым опыте, так же как и в опыте 1, определялось поступлением элемента в растения. Вследствие слабой обеспеченности почв данным микроэлементом содержание его в растениях, особенно злаковых, в контроле было меньше рекомендуемого для кормов. С повышением концентрации кобальта в почве количество элемента в биомассе гороха увеличилось с 0.42 в контроле до 22.7 мг/кг (табл. 4), превышая МДУ, начиная с варианта 4 при содержании кобальта в почве 18.3 мг/кг (1 М НСl). Количество кобальта в наземной массе овса в целом было меньше (от 0.22 до 5.1 мг/кг), чем в биомассе гороха. При содержании в почве >30.1 мг Со/кг (1 М НСl) оно превысило нормируемый показатель. Содержание кобальта в горохе увеличива-

Таблица 4. Содержание ТМ в однолетних травах (первый год)

Вариант	Содержание элементов, мг/кг воздушно-сухой массы											
	горох						овес					
	Cu	Zn	Co	Pb	Cd	Ni	Cu	Zn	Co	Pb	Cd	Ni
Контроль	3.2	34	0.42	0.79	0.8	4.9	3.7	22	0.22	1.3	1	1.8
1	3.0	33	1.5	0.84	1.8	5.6	2.7	10.1	0.53	0.62	0.9	1.8
2	3.1	31	3.8	1.2	1.1	5.9	2.4	8.2	1.5	0.71	0.9	1.9
3	2.7	25	6.0	1.7	1.2	4.6	2.3	6.8	1.8	1.07	0.5	1.5
4	2.4	21	8.3	1.7	1.5	4.1	2.1	6.4	2.5	0.83	0.4	1.6
5	2.5	20	10.8	1.4	1.0	3.8	2.0	6.7	3.5	0.62	0.4	1.8
6	2.2	19	16.6	1.7	1.6	4.3	1.9	7.1	4.5	1.20	1.1	1.9
7	2.9	18	16.8	1.5	1.3	4.6	1.7	7.3	5.2	0.8	0.4	2.1
8	2.4	17	17.2	0.87	0.9	3.8	1.7	7.4	7.0	0.74	0.6	1.7
9	3.0	20	20.8	0.93	0.9	4.7	1.8	7.9	5.9	0.78	0.8	2.1
10	3.3	24	22.7	1.01	1.0	4.6	1.6	7.6	5.1	0.53	0.5	1.5

Примечание. Относительная погрешность анализа ($\pm\delta\%$): Zn – 20, Cu – 20, Ni – 35, Pb – 25, Cd – 50, Co – 40%.

лось линейно, коррелируя с общим количеством элемента в почве ($y = 0.411x - 4.1535$, $R^2 = 0.97$, $P < 0.001$). Близкая зависимость была характерна и для злакового растения ($y = 0.1134x - 0.8462$, $R^2 = 0.88$, $P < 0.001$).

При наличии также линейной зависимости между поступлением кобальта в растения и количеством его в почве накопление микроэлемента в биомассе люцерны по мере увеличения обеспеченности супесчаной почвы этим элементом происходило более интенсивно, чем в злаковых культурах. При избыточном содержании элемента в почве количество его в растениях превысило уровень оптимальных концентраций [12].

Но в то же время изменения в содержании кобальта в тканях растений происходили более интенсивно, чем осуществлялся рост его количества в почве. Поглощение кобальта горохом в сравнении с контролем увеличилось в 50, овсом – в 20, тогда как общее содержание элемента в почве – в 10 раз. Изменения в количестве соединений, извлекаемых солянокислой вытяжкой, составили 20, а ААБ – более 100 раз. Различия в содержании элемента в наземной массе бобовой культуры более всего согласовались с количеством соединений, экстрагируемых буферной вытяжкой. Это подтвердило также наличие более тесной корреляции между содержанием элемента в биомассе гороха и количеством его в ААБ ($y = 0.6237x - 1.33$, $R^2 = 0.99$, $P < 0.001$). В растениях овса связи между этими показателями были менее тесные ($y = 0.3283x - 0.3018$, $R^2 = 0.89$, $P < 0.001$).

Одним из показателей, описывающих транслокацию элементов, является коэффициент накопления (KH) – соотношение между содержанием тестируемого элемента в наземной биомассе и общим количеством его в почве. В бобовом растении KH с ростом количества кобальта в почве увеличился с 0.07 в контроле до 0.36 в варианте 6, в овсе – с 0.04 до 0.13 в варианте 8, разница с контролем для гороха составила 5.3, злака – 3.6 раза. В дальнейшем показатель несколько стабилизировался, что связано со сдерживающим влиянием корневой системы. Более высокий KH был характерен для гороха: различия с овсом составили от 1.9 в контроле до 4.4 при максимальном содержании элемента в почве. Более интенсивное поступление микроэлемента в бобовую культуру определялось большей физиологической значимостью элемента для данного вида растений при содержании его в почве в пределах необходимости и более значительным сбоем в поглощении кобальта при превышении оптимума.

Нарушения в метаболизме растений вследствие повышенной транслокации кобальта в растения привели к изменениям в поглощении других элементов. Наиболее значительно изменилось поступление цинка: с ростом содержания кобальта в горохе количество цинка в нем, начиная с варианта 4, снизилось на 26–50%. Взаимоотношения в поглощении цинка и кобальта имели антагонистический характер, между их количеством установлена отрицательная корреляция ($r = -0.79$, $P < 0.001$). Содержание цинка в наземной массе овса в вариантах с кобальтом также было значительно меньше, однако связи между по-

ступлением элементов были менее тесные, чем в бобовом растении ($r = -0.52$, $P < 0.001$). Антагонизм обнаружен также между поступлением кобальта и меди в овес ($r = -0.85$, $P < 0.001$). Различия в транслокации элементов в растениях определяются их биологическими особенностями, доступностью элементов в почве, величиной продуктивной массы [9]. Сложный характер взаимодействия между поглощением цинка и кобальта растениями приведен также в работе [19].

При изучении поведения ТМ в системе почва–растение важным является определение концентраций, которые не вызывают снижение продуктивности (фактор толерантности) и не приводят к накоплению элементов в растениях в токсичных количествах (фактор транслокации). Множество одновременно действующих факторов как в почве, так и в растениях, затрудняют процесс регламентирования. Для решения практических вопросов необходимы критерии или количественные параметры загрязнения почв и растительной продукции ТМ. На основе связей между содержанием кобальта в почве, продуктивностью и поступлением элемента в растения попытались определить допустимые границы загрязнения подзолистых почв кобальтом при возделывании кормовых культур, учитывая особенности растений. В основу нормирования положили содержание ТМ (в том числе и подвижных форм) в почве, гарантирующее ненакопление токсичных элементов в товарной части продукции сверх МДУ и не вызывающее снижение продуктивности растений. Негативное уменьшение биомассы трав по сравнению с контролем в опыте 2 не установлено, в опыте 1 оно происходило при внесении кобальта в дозе 33 мг/кг. Превышение МДУ в биомассе гороха началось при валовом количестве элемента в почве, равном 32.2, содержании элемента в вытяжке 1 МНСI – 18.3, в ААБ – 10.2 мг/кг, для овса показатели транслокации составили соответственно 55.3, 30.1, 16.9 мг/кг. Сверхнормативное накопление кобальта в однолетних травах происходило при более низких количествах элемента, чем угнетение роста и развития растений.

При содержании кобальта, равном величине ПДК подвижной формы (5 мг/кг, ААБ-вытяжка), накопление элемента в травах сверх МДУ не наблюдали. Ухудшение качества растительной продукции началось при наличии в почве 10.2 мг Со/кг. Снижение продуктивности и превышение МДУ в биомассе происходило при более высоком содержании подвижного кобальта, чем нормируемый показатель. Использование ПДК подвижной формы для подзолистых почв вполне приемлемо: в его пределах не происходил спад продук-

тивности и сохранялось качество продукции. Необходимо также учесть то, что при непосредственном поступлении ТМ в почву регламентируемые показатели для почв должны быть меньше, чем для устоявшейся системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на поведении кобальта в системе почва–растение отразились специфика культур, его содержание и время взаимодействия с почвой. Повышение количества микроэлемента до оптимальных пределов вело к росту биомассы однолетних и многолетних трав, улучшению их микроэлементного состава, превышение оптимума вызвало ингибирование роста, развития и гибель растений. Повышенные концентрации кобальта в почве привели к интенсивному поступлению элемента в травы, ухудшая качество продукции. Сверхнормативная транслокация в кормовые травы происходила при более низких концентрациях элемента, чем вызывающая снижение продуктивности.

С ростом поступления кобальта в почву увеличилась его подвижность, поэтому наряду с валовым содержанием необходимо учитывать наличие подвижных соединений. Растения реагировали как на недостаток, так и на избыток элемента. Вследствие чего подход к изучению физиологически значимых элементов должен вестись с 2-х позиций как необходимых микроэлементов, так и потенциальных загрязнителей агроландшафтов с регламентацией их количества. При нормировании ТМ, важно учитывать показатели толерантности, транслокации и давности загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягодин Б.А. Кобальт в жизни растений. М.: Наука, 1970. 343 с.
2. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
3. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека: экология, классификация, органопатология. М.: Медицина, 1991. 496 с.
4. Anke M., Gleis M., Muller R., Roth N., Dorn W., Schaffer U., Seifert M., Arnold W. Macro, trace and ultratrace element intake depending on the geological origin of the habitat, time, sex and form diet // Biogeochemistry and geochemical ecology. Moscow: Publ. GUN NPC TMG MZ RF, 1999. P. 235–263.
5. Сосорова С.Б. Кобальт в почвах и растениях дельты р. Селенга // Почвоведение. 2009. № 7. С. 806–813.
6. Белякова Т.М., Дианова Т.М., Крамкова Т.В. Медико-биохимические проблемы экологической безопасности населения России // Техногенез и био-

- химическая эволюция таксонов биосферы. М.: Наука, 2003. С. 275–288.
7. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
 8. Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 5. Этокотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. 148 с.
 9. Елькина Г.Я. Оптимизация минерального питания растений на подзолистых почвах. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 280 с.
 10. Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Эдиториал УРСС, 1999. 168 с.
 11. Школьник М.Я. Микроэлементы в жизни растений. Л.: Наука, 1974. 323 с.
 12. Рак М.В., Пукалова Е.Н. Кобальт в почвах и растениеводческой продукции Беларуси и эффективность применения кобальтовых удобрений // Почвоведение и агрохимия. 2016. № 2 (57). С. 90–99.
 13. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. М.: Госагропром СССР, ГУ ветеринарии, 1987. 5 с.
 14. Зырин Н.Г., Обухов А.И. Принципы и методы нормирования (стандартизации) содержания тяжелых металлов в почве и в системе почва–растение // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1983. Вып. 35. С. 7–11.
 15. Lock Koen, Janssen Colin R. Influence of aging on copper bioavailability in soil // Environ. Toxicol. Chem 2003. V. 22. № 5. P. 1162–1266.
 16. Елькина Г.Я. Поведение меди в системе почва–растение в условиях европейского Северо-Востока // Агрохимия. 2008. № 6. С. 72–79.
 17. Елькина Г.Я. Поведение цинка в системе почва–растение в условиях Европейского северо-Востока // Агрохимия. 2009. № 11. С. 57–64.
 18. Елькина Г.Я. Поведение кадмия в системе почва–растение в условиях европейского Северо-Востока // Агрохимия. 2011. № 8. С. 89–94.
 19. Несговорова Н.П., Савельев В.Г., Иванцова Г.В. Возможности использования гвоздичных растений в индикации содержания тяжелых металлов в почве // Фундамент. исслед-я. 2014. № 5. С. 765–771.

Cobalt in the Soil–Plant System on Podzolic Soils of the European North-East of Russia

G. Ya. Elkina

*Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Division, RAS
ul. Kommunisticheskay 28, Syktyvkar 167982, Russia
E-mail: elkina@ib.komisc.ru*

It was found that cobalt behavior in an artificially polluted soil–plant system depended on specific features of a particular crop, cobalt amount and after-effect duration. In low concentrations, cobalt had a stimulating effect on the growth and development of forage grasses; when the optimum was exceeded, inhibition and death of plants occurred. Translocation of cobalt in plants above maximal permissible level was observed with the direct introduction of element 32 mg Co/kg soil. Because of the significant increase in the mobility of element in contaminated soils is a need necessary to assess the level of contamination on the presence of mobile forms.

Key words: cobalt, soil–plant system, Northeaster Europe of Russia.