

ОСОБЕННОСТИ КРУГОВОРОТА МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЧВЕННЫХ КОНКРЕЦИЙ

Я. О. ТИМОФЕЕВА, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник сектора биогеохимии, **Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН** (690022, г. Владивосток, проспект 100-летия Владивостока, д. 159; e-mail: timofeeva@biosoil.ru)

***Ключевые слова:** почвы, микроэлементы, почвенные конкреции, малый биологический круговорот.*

Приведены результаты исследований микроэлементного состава почв, конкреций и растений агроэкосистем Приморского края. Выявлена общая несбалансированность микроэлементного состава пахотных горизонтов и устойчивый дефицит Mo, Ni и Zn в агроземогумусовых подбелах, интенсивно использующихся в сельскохозяйственном производстве региона. Содержание Cu и Co в исследованных почвах повышено по сравнению с региональной кларковой концентрацией. Исследованные почвы характеризуются активным формированием почвенных конкреций. На основании изучения процесса накопления микроэлементов конкрециями установлено, что конкреции являются своеобразными депонентами почвенной системы и оказывают существенное влияние на перераспределение микроэлементов в пахотном горизонте почв. Внесение удобрений сопровождается дополнительным поступлением валовых и водорастворимых форм микроэлементов в почвы и в конкреции. Специфика содержания большинства исследованных микроэлементов в растениях пшеницы обусловлена участием элементов в ключевых метаболических процессах. Результатом внесения удобрений является увеличение содержания в растительных тканях Pb и Cd. Однако основной объем Pb и Cd, содержащихся в растениях, возвращается в почву в виде пожнивных остатков. Также в почвах удобряемых участков отмечено увеличение количества конкреций. Анализ взаимосвязи между содержанием различных форм микроэлементов в почвах, конкрециях и растениях позволили установить, что функционирование конкреций является одним из факторов, ограничивающих поступление некоторых микроэлементов в растения и, возможно, тем самым влияет на их урожайность. Учитывая тот факт, что добиться увеличения урожайности невозможно без применения удобрений и соответственно сопутствующих им примесей, в почвах, используемых для производства сельскохозяйственной продукции, конкреции играют роль балансирующего компонента агроэкосистем, который регулирует питание растений экологически безопасным путем.

FEATURES OF TRACE ELEMENTS CYCLING OF IN AGROECOSYSTEMS UNDER FORMATION OF SOIL NODULES

Ya. O. TIMOFEEVA, candidate of biological sciences, leading researcher of the Sector of biogeochemistry, **Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS**, (159 Stoletiya Vladivostoka str., 690022, Vladivostok; e-mail: timofeeva@biosoil.ru)

***Keywords:** soils, trace elements, soil nodules, biological cycle.*

The results of studies of trace elements compositions of soils, nodules and plants from agroecosystems of the Primorye Region were presented. The common imbalance of trace element composition of arable horizons and stable deficits of Mo, Ni and Zn in soils which intensely used in regional agricultural production was indentified. In the studied soils Cu and Co contents were increased in comparison with the regional clark concentration. The studied soils are characterized by active formation of soil nodules. Based on the study of trace elements accumulation in nodules, it was found that nodules are kind depositors of the soil system and have a significant impact on trace elements redistribution in arable soil horizon. Adding of fertilizers is accompanied by additional input of total and water-soluble forms of trace elements in the soil and in the nodule. The specificity of most of the studied microelements content in wheat plants is due to the participation of elements in key metabolic processes. The result of fertilizer application is increase Pb and Cd contents in plant tissues. However, the main part of Pb and Cd which contained in plants returned to the soil as crop residues. The increase of nodules number was observed in soils of plots with adding fertilizers. Analysis of the relationship between the contents of trace elements different forms in soil, nodules and plant has been allowed to establish that functioning nodules is one of the factors limiting the intake of some trace elements in plants and most likely affect on productivity of plants. Taking into account the fact that it is impossible to increase the yield without fertilizers application and respectively without related impurities, in soils which used for agricultural production, nodules play the role of balancing component of agroecosystems, which regulates plant nutrition by environmentally safe way.

Положительная рецензия представлена Е. А. Макаренко, доктором биологических наук, профессором кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Дальрыбвтуз».

Введение

Система «почва – растение» является главным, первоначальным звеном в пищевой цепи животных и человека. Элементный состав системы определяется потребностями и особенностями растительных организмов и содержанием доступных для растений форм элементов в почвах. Необходимые для живых организмов элементы разделены на группы макро- и микроэлементов. Микроэлементы являются активаторами многих жизненно важных биохимических процессов [8]. Каждое растение нуждается в микроэлементах, которые должны находиться в почвах в необходимых для растений количествах и в доступных для поглощения формах. При этом растения чувствительны и требовательны к содержанию микроэлементов в почвенной среде. Повышенные концентрации микроэлементов могут оказывать токсичное воздействие на растения. Исследование миграционных потоков микроэлементов в системе малого биологического круговорота особенно важно в агрофитоценозах, где специфика круговорота микроэлементов в значительной мере зависит от привнесения элементов с удобрениями и от выноса биомассой возделываемых культур. Несбалансированное содержание микроэлементов в почвах сельхозугодий является причиной низких и некачественных урожаев сельскохозяйственной продукции [5].

В почвах микроэлементы входят в состав множества разнообразных комплексных соединений. Вертикальное распределение микроэлементов в почвенном профиле и уровень концентрации доступных для растений форм микроэлементов в значительной степени определяются сорбционными процессами, одновременно протекающими в различных фазах почв. Одним из механизмов сорбции, определяющих объем, прочность и долговечность фиксации микроэлементов в почвах является процесс почвенного конкрециеобразования [6, 7]. Конкреции представляют собой плотные тела, состоящие из Fe-Mn-соединений, минеральных зерен и обогащенных углеродом зон, они встречаются в почвах различных биоклиматических зон и обладают ярко выраженной способностью к накоплению микроэлементов [4, 10]. Результаты многочисленных исследований указывают на формирование специфической взаимосвязи между микроэлементами и основными компонентами конкреций. Основываясь на этом, микроэлементы в конкрециях разделили на элементы марганцевой (Co, Ni, Zn, Cd) и железистой (Cr, Cu, As) групп [7]. Накопление микроэлементов в конкрециях, с одной стороны, порождает элементный дефицит, с другой – снижение высоких концентраций, что в равной мере воздействует на важнейшие показатели сельскохозяйственной биопродукции. Имеющихся результатов изучения содержания микроэлементов в конкрециях

почв сельскохозяйственных угодий недостаточно, чтобы определенно высказаться о влиянии конкреций на миграционные потоки микроэлементов в системе малого биологического круговорота. Основной целью проводимых исследований являлась оценка уровня воздействия конкреций на массопоток микроэлементов в агроэкосистеме.

Цель и методика исследования

Изучение влияния конкреций на миграционные циклы микроэлементов в агроэкосистемах проводилось на почвах опытных полей, отнесенных к агроотемно-гумусовым подбелам. Исследованные почвы составляют основной пахотный фонд Приморского края.

Постановка эксперимента в полевых условиях проводилась на делянках, засеянных пшеницей (площадь 25 м²). В полевом севообороте были выбраны контрольные варианты опыта (без удобрений) и варианты опыта с одинарной нормой внесения удобрений (гранулированная мочевины, суперфосфат двойной, хлористый калий, навоз). Дозы вносимых удобрений – навоз 40 т/га + N₉₀P₁₂₀K₁₂₀ д. н./га. Отбор почв и конкреций проводился в пахотном слое мощностью до 22 см с учетом массы отобранных образцов для последующего пересчета содержания конкреций к весу вмещающей почвенной массы. Конкреции отделяли от почвенного мелкозема мокрым просеиванием на мелкоячеистых капроновых ситах. Последующее отделение конкреций от минеральных зерен проводилось в лабораторных условиях.

Валовый микроэлементный состав опытных образцов определялся методом энергодисперсионной рентгенфлуоресцентной спектроскопии (EDX). Определение содержания элементов проводили на анализаторе EDX 800HS-P (Shimadzu, Япония), оснащенном родиевым катодом в формате количественного анализа, в вакуумной среде с использованием государственных стандартных образцов сравнения (ГСО 901-76, ГСО 902-76, ГСО 903-76, ГСО 2498-83, ГСО 2499-83, ГСО 2507-83) [11]. Методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии определяли уровни концентрации подвижных (доступных для растений) форм микроэлементов в водных вытяжках почв и конкреций, а также микроэлементный состав растений [3].

При отборе опытного почвенно-растительного материала и проведении аналитических работ была использована трехкратная повторность. На основе валового содержания элементов в почвах и конкрециях рассчитывали коэффициент накопления элементов в конкрециях [7]. Для количественной оценки массопотока микроэлементов из почвы в растения рассчитан коэффициент биологического накопления (КБП) [8].

Результаты исследования

Уровни концентрации различных форм микроэлементов в исследуемых почвах приведены в таблице 1.

Таблица 1
Содержание различных форм микроэлементов в почвах и конкрециях (мг/кг)
Table 1
Different forms trace element contents in soils and nodules (mg/kg)

Элемент <i>Element</i>	Вариант опыта <i>Variant experience</i>	Почва <i>Soil</i>		Конкреции <i>Nodules</i>		Региональный кларк в почвах <i>Regional clarke in soils [4]</i>
		Валовые формы <i>Total forms</i>	Водорастворимые формы <i>Water-soluble forms</i>	Валовые формы <i>Total forms</i>	Водорастворимые формы <i>Water-soluble forms</i>	
Zn	Контроль <i>Control</i>	10,35 ± 0,08	Не обнаружено <i>Not detected</i>	4,26 ± 0,05 (0,4)*	Не обнаружено <i>Not detected</i>	70
	Удобрение <i>Fertilization</i>	11,94 ± 0,14	Не обнаружено <i>Not detected</i>	4,27 ± 0,02 (0,4)	Не обнаружено <i>Not detected</i>	
Ni	Контроль <i>Control</i>	9,46 ± 0,09	0,07±0,01	59,48 ± 0,33 (6,3)	0,12 ± 0,01	46
	Удобрение <i>Fertilization</i>	13,26 ± 0,06	0,11 ± 0,01	85,29 ± 0,11 (6,4)	0,05 ± 0,01	
Mo	Контроль <i>Control</i>	0,81 ± 0,01	0,05 ± 0,01	1,83 ± 0,02 (2,3)	0,01 ± 0,002	1,6
	Удобрение <i>Fertilization</i>	0,87 ± 0,01	0,08 ± 0,01	3,02 ± 0,01 (3,5)	0,06 ± 0,01	
Co	Контроль <i>Control</i>	25,25 ± 0,25	0,08 ± 0,01	152,64 ± 0,62 (6,0)	0,31 ± 0,02	22
	Удобрение <i>Fertilization</i>	35,77 ± 0,16	0,07 ± 0,01	208,87 ± 0,40 (5,8)	0,63 ± 0,04	
Pb	Контроль <i>Control</i>	28,27 ± 0,11	0,05 ± 0,01	154,27 ± 0,43 (5,5)	0,02 ± 0,001	32
	Удобрение <i>Fertilization</i>	36,62 ± 0,09	0,74 ± 0,04	241,62 ± 0,71 (6,6)	0,05 ± 0,01	
Cu	Контроль <i>Control</i>	22,09 ± 0,18	0,02 ± 0,005	106,80 ± 0,45 (4,8)	0,01 ± 0,001	20
	Удобрение <i>Fertilization</i>	25,59 ± 0,08	0,05 ± 0,01	142,55 ± 0,23 (5,6)	0,03 ± 0,002	
Cd	Контроль <i>Control</i>	0,26 ± 0,01	Не обнаружено <i>Not detected</i>	0,20 ± 0,01 (0,8)	Не обнаружено <i>Not detected</i>	0,6
	Удобрение <i>Fertilization</i>	0,45 ± 0,01	0,01 ± 0,002	0,30 ± 0,01 (0,7)	Не обнаружено <i>Not detected</i>	

* в скобках – коэффициент накопления элементов в конкрециях

* in brackets – enrichment factor of elements in nodules

При сопоставлении величины содержания микроэлементов в исследованных почвах с региональными кларками установлено пониженное содержание Ni, Mo и Cd [4]. Также к элементам, находящимся в недостаточном количестве, относится Zn, его содержание колеблется от 9 до 11 мг/кг, что в 6 раз меньше регионального кларка.

В целом в почвах агроэкосистем исследованного региона отмечается дефицит этого элемента, что можно объяснить истощением почвы в результате постоянного изъятия Zn с урожаем и практически полным отсутствием его восполнения. Содержание Pb варьируется: в почвах контрольных вариантов опыта оно меньше кларковой величины, в почвах удобряемых участков незначительно превышает уровень кларка. Содержание Co и Cu во всех вариантах опыта превышает величину регионального кларка от 1,1 до 1,6 раз. На содержание микроэлементов в почвах большое влияние оказывает внесение различных видов удобрений. Резонно предположить, что в почвах, где длительное время вносились различные

удобрения, содержание микроэлементов должно увеличиться. Привнесение микроэлементов на удобряемых участках агротемногумусовых подбелов составило 42 % для Cd, 29 % Co и Ni, 23 % Pb, 13 % Cu и Zn, 7 % для Mo. Несмотря на некоторое привнесение микроэлементов, при сравнении с региональным кларковым содержанием поведение большей части из них не обнаруживает новых тенденций.

Большое значение при изучении микроэлементов в почвах сельхозугодий приобретают сведения о величине содержания водорастворимых форм, которые являются наиболее доступными для растений. Концентрация водорастворимых форм оказывает наибольшее влияние на возделываемые культуры и является достоверным показателем оценки запаса доступных растениям соединений микроэлементов. Полученные результаты указывают на значительные колебания в содержании подвижных форм микроэлементов относительно их валового объема (табл. 1). Исследованные почвы характеризуются высокой обеспеченностью Co и низкой обеспеченностью Cu и Zn.

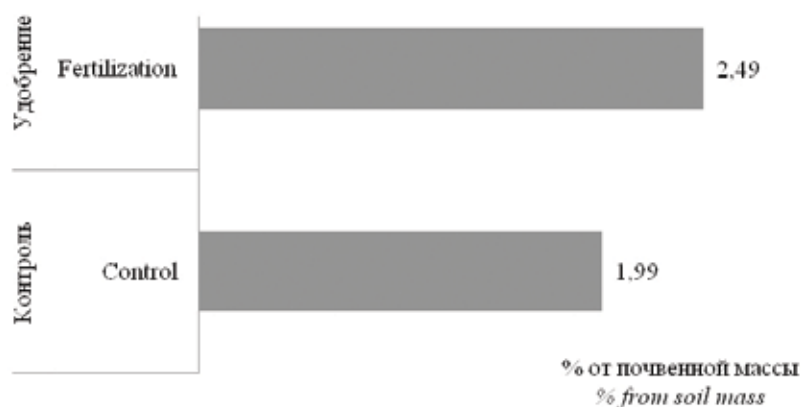


Рис. 1. Содержание конкреций во вмещающей почвенной массе
 Fig. 1. Nodules contents in the host mass of soil

Полученные результаты указывают на увеличение концентрации водорастворимых форм элементов в почвах удобряемых вариантов опыта. Максимальное увеличение уровня концентрации подвижных форм отмечено для Ni, Mo, Pb и Cu, что можно быть вызвано дополнительным привнесением элементов в качестве примесей и влиянием удобрений на изменение свойств почв, провоцирующих переход элементов из труднодоступных в легкоподвижные соединения.

В исследованных почвах наблюдается несбалансированность микроэлементного состава. Для пахотных почв это явление весьма распространенное и прежде всего связано с неравным поступлением и выносом микроэлементов в агрофитоценозах. Наряду с этим немаловажное значение имеют особенности внутрипочвенных процессов преобразования микроэлементов, в которых активное участие принимают почвенные конкреции. Результаты, полученные ранее, показали, что в отношении некоторых микроэлементов конкреции являются активными накопителями [4, 6, 7, 10]. Среди них обнаружены элементы, относящиеся к разряду жизненно необходимых (Mn, Cu, Co, Mo и др.). Поэтому учет количества формирующихся конкреций имеет большое значение для изучения баланса микроэлементов, особенно в системе «почва – сельскохозяйственная культура» (рис. 1). На удобряемых делянках отмечается существенное (на 20 %) увеличение содержания конкреций по сравнению с контрольными вариантами опыта. Параллельно происходит увеличение размера конкреций: на контрольных делянках преобладали конкреции диаметром 1–2 мм, на удобряемых – 2–3 мм.

Стимулирующее действие удобрений на рост и развитие конкреций связано с изменением некоторых физико-химических параметров почв, влияющих на образование конкреций. Наиболее значимой является контрастность смены окислительно-восстановительных условий, которая усиливается при почвенной химизации. Также использование различ-

ных видов удобрений, особенно органических, инициирует развитие почвенной микрофлоры, в том числе и специфической конкреционной. Дополнительно увеличение размера конкреций можно объяснить увеличением содержания основных конкрециеобразующих элементов и всех тех, которые способны накапливаться в них. Причем удобрения оказывают как прямое влияние на их поступление, привнося с элементами питания балластные или примесные компоненты, так и косвенное – путем изменения показателей реакции среды, величины окислительно-восстановительного потенциала, содержания органического вещества и др. [1]. Все это приводит к изменению сорбционной емкости самих конкреций вследствие наличия на их поверхности переменных зарядов оксидных соединений Fe и Mn, а также высвобождению химических элементов из труднодоступных соединений и дальнейшему их поглощению конкрециями [2].

Содержание валовых форм микроэлементов в конкрециях свидетельствует о превышении уровня содержания элементов в почвах и превышении величины кларка, за исключением Zn и Cd (табл. 1). Значения коэффициентов накопления элементов в конкрециях указывают на активное накопление в конкрециях Ni, Co, Pb и Cu и на отсутствие накопления Cd и Zn (табл. 1). При использовании удобрений в конкрециях увеличивается не только уровень содержания большинства исследованных микроэлементов, но и интенсивность их накопления. Увеличение коэффициентов накопления микроэлементов в конкрециях почв удобряемых делянок выражается следующими цифрами: Mo – 34 %, Pb – 17 %, Cu – 14 %, Ni – 1,5 %. Полученные результаты указывают на то, что конкреции могут выступать в роли основных накопителей микроэлементов, вносимых с удобрениями, и являться одной из причин дефицита микроэлементов.

Относительное содержание водорастворимых форм микроэлементов в конкрециях ниже, чем в по-

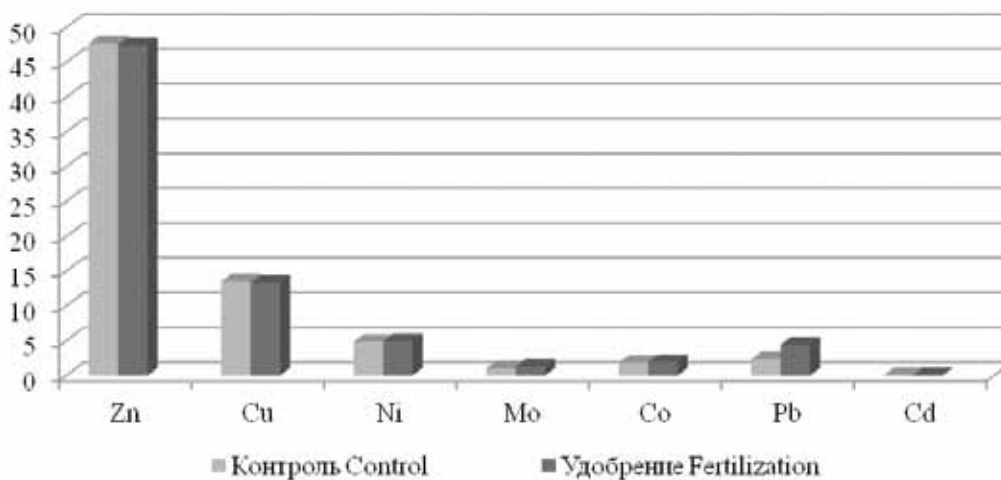


Рис. 2. Содержание микроэлементов в растительных тканях пшеницы контрольных вариантов опыта (мг/кг сухой массы)
 Fig. 2. The content of trace elements in plant tissues of wheat of control experiment variants (mg/kg dry mass)

Таблица 2
 Коэффициенты биологического поглощения микроэлементов растениями пшеницы
 Table 2
 Coefficients of biological absorption of trace elements by wheat

Элемент <i>Element</i>	Контроль <i>Control</i>	Удобрение <i>Fertilization</i>
Zn	4,87 ± 0,26	4,42 ± 0,18
Ni	0,54 ± 0,03	0,37 ± 0,02
Mo	1,26 ± 0,07	1,04 ± 0,07
Co	0,08 ± 0,01	0,05 ± 0,01
Pb	0,08 ± 0,01	0,12 ± 0,01
Cu	0,64 ± 0,05	0,52 ± 0,03
Cd	0,21 ± 0,01	0,15 ± 0,01

чвах. Определение водорастворимых форм Zn и Cd не представляется возможным ввиду низкого содержания. Внесение удобрений и, как следствие, изменение условий поглощения микроэлементов из почвы сопровождается увеличением концентрации водорастворимых форм Mo, Co, Pb и Cu в конкрециях.

В растительных тканях пшеницы концентрация Zn и Cu выше содержания остальных исследованных элементов (рис. 2). Масштаб поглощения элементов прямо связан с ролью в жизни растений. Zn и Cu относят к «элементам жизни», их физиологическая роль связана, прежде всего, с участием в ключевых метаболических процессах [8]. В биомассе растений, выращенных на делянках, где применялись удобрения, отчетливо увеличивается концентрация Pb и Cd. Увеличение уровня концентрации данных элементов в растительных тканях может быть вызвано увеличением содержания подвижных форм элементов в почве и возникновением благоприятных условий, способствующих активному поглощению элементов растениями из почв при использовании удобрений.

Фракционный учет урожая пшеницы показал преобладание продуктивной части. Урожай фракций пшеницы, отчуждаемых с поля (зерно и стебли) на

контрольных и удобряемых делянках, составил соответственно 72 % и 69 %. Данные о содержании каждого исследуемого микроэлемента в отдельной фракции растений позволили нам подсчитать их общее количество, вовлеченное в биологический круговорот, а также величину выноса с урожаем и возврата в почву. Результаты исследований показали, что на контрольных вариантах опыта растениями пшеницы выносятся значительная доля Zn, Mo, Co, Ni и Cu (60–80 %) (рис. 3).

Pb и Cd в большем объеме возвращаются в почву в виде пожнивных остатков. Для растений, выращенных на удобряемых делянках, установленная тенденция выноса микроэлементов не меняется, за исключением небольшого увеличения содержания Pb, Cd и Mo во фракциях растений, составляющих хозяйственный вынос. Для характеристики избирательного поглощения исследованных элементов растениями пшеницы был рассчитан КБП, по величине которого можно судить о степени «биофильности» элемента. Уровни КБП варьировали на контрольных и удобряемых делянках опыта (табл. 2).

При исследовании интенсивности вовлечения в биологический круговорот микроэлементов растениями

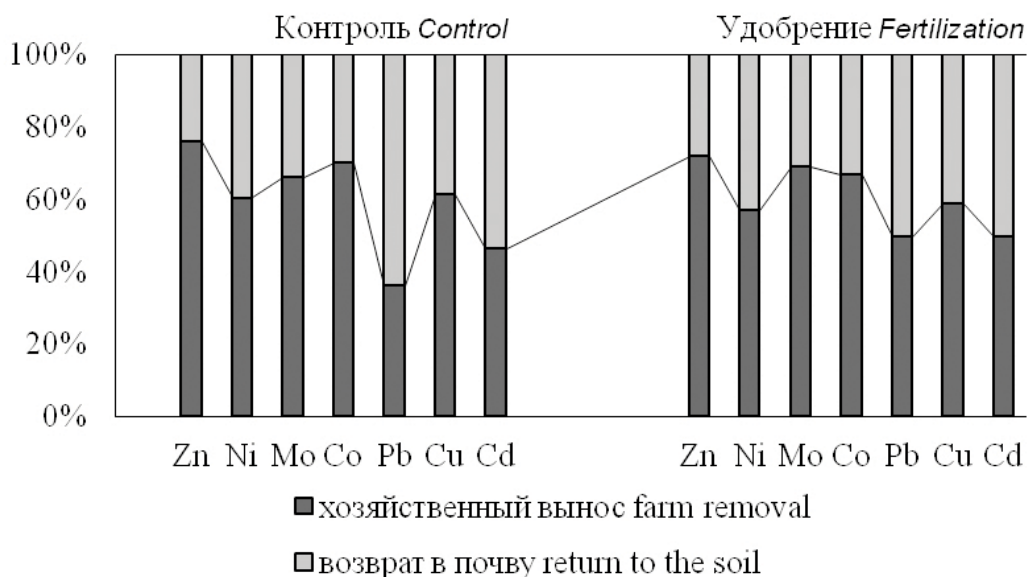


Рис. 3. Соотношение содержания микроэлементов в продуктивной и непродуктивной частях урожая
 Fig. 3. The ratio of trace elements content in productive and non-productive parts of crop

Таблица 3
 Коэффициенты корреляции между содержанием различных форм микроэлементов в почвах, конкрециях и растениях
 Table 3
 Correlation coefficients between the trace elements different forms contents in soils, in nodules and in plants

Элемент Element	Объекты Objects	Формы элементов Element forms	
		Валовые формы Total forms	Водорастворимые формы Water-soluble forms
Zn	П-р s-p*	0,76	–
	К-р n-p**	0,74	–
Ni	П-р s-p	0,37	0,75
	К-р n-p	0,50	0,76
Mo	П-р s-p	0,79	0,78
	К-р n-p	0,19	0,79
Co	П-р s-p	0,51	0,75
	К-р n-p	0,54	0,85
Pb	П-р s-p	0,54	0,83
	К-р n-p	0,46	0,90
Cu	П-р s-p	0,53	0,80
	К-р n-p	0,54	0,74
Cd	П-р s-p	0,34	–
	К-р n-p	0,40	–

*n-p – коэффициенты корреляции элементов в системе «почва – растение»

*s-p – correlation coefficients of elements in the soil-plant system

**к-р – коэффициенты корреляции элементов в системе «конкреции – растение»

**n-p – correlation coefficients of elements in the nodules-plant system

пшеницы обнаружено, что на контрольных делянках эта культура активнее всего извлекает из почвы Zn и Mo, уровень КПБ которых относится к группе интенсивного поглощения. В меньшей степени это относится к Cu, Ni, Cd, величина их КПБ находится в диапазоне среднего поглощения, и очень слабо поглощаются Pb и Co. Характер накопления микроэлементов в растениях удобряемых делянок свидетельствует о снижении интенсивности их поглощения растениями, за исключением Pb.

Содержание микроэлементов в биомассе пшеницы находится в прямой зависимости от величины урожая. Следовало бы ожидать, что на удобряемых делянках возрастающий урожай и объем микроэлементов, поступающих в растения, должны сопровождаться увеличением их выноса и усилением расходования из почвы. Однако это не всегда подтверждается экспериментально. Содержание микроэлементов в растениях, выращенных на делянках, где применяли различные виды удобрений, действительно указывает на увеличение их притока, но размер КПБ свидетельствует о снижении степени их извлечения из почвы. В почве, как уже было отмечено, с использованием удобрений наблюдалось нарастание уровня концентрации следуемых элементов и особенно тех, которые являются частыми спутниками хозяйственной деятельности человека (Pb, Cu, Cd). Одной из причин возникновения данного явления может быть активное формирование почвенных конкреций. Применение удобрений сопровождается усилением процесса конкрециеобразования и стимулированием сорбционных свойств конкреций, под воздействием которых значительное количество микроэлементов закрепляется в составе конкреций и очень малая часть находится в доступном для растений состоянии.

В качестве диагностических критериев оценки степени влияния микроэлементов, находящихся в почвах и конкрециях, на растительные организмы мы использовали средние коэффициенты корреляции между количеством различных фракций элементов в почвах, конкрециях и растениях (табл. 3). По усредненным данным, максимальная корреляционная связь между содержанием микроэлементов в растениях и почвах отмечена для валовых форм Mo и Zn. Взаимосвязь между содержанием водорастворимых форм элементов в почвах и растениях превышает уровень взаимосвязи валовых форм и варьируется от 0,75 до 0,83. Между содержанием элементов в растениях и конкрециях наибольшая связь обнаружена для водорастворимых форм Co и Pb. В целом для большинства элементов величина коэффициента корреляции между валовыми формами элементов в системе «почва – растение» выше значения связи между растениями и конкрециями. При сравнении уровней

взаимосвязи с водорастворимыми фракциями микроэлементов установлено, что конкреции наряду с вмещающей почвенной массой оказывают существенное влияние на химический состав растений. Коэффициент корреляции водорастворимых форм Co и Pb между растениями и конкрециями превышает уровень данного показателя между растениями и почвой. Такая тенденция взаимосвязи элементов в почвах, конкрециях и растениях может быть связана с единым источником поступления микроэлементов. Следовательно, не исключена возможность сорбции микроэлементов из почвы на поверхности твердой фазы конкреций преимущественно в виде водорастворимых, легкоподвижных соединений, которые по мере вхождения в состав конкреций подвергаются трансформации со стороны основных конкрециеобразующих элементов.

Оксиды и гидроксиды Fe и Mn обуславливают более устойчивую форму закрепления микроэлементов [9] и, вероятно, переводят водорастворимые формы микроэлементов в конкрециях в инертные соединения. Последние отличаются от почвенных меньшим участием в питании растений в результате их закрепления в составе более стабильных, специфических соединений. Результаты исследований показали, что дополнительное обогащение почвы микроэлементами снижает прочность их фиксации в конкрециях, возможно, потому, что постоянное микроэлементное пополнение приводит к практически полной реализации сорбционных способностей собственно конкреционного вещества.

Выводы. Рекомендации

Изученные агротемногумусовые подбелы характеризуются несбалансированным содержанием микроэлементов. В почвах наряду с устойчивым дефицитом микроэлементов (Mo, Ni и Zn), необходимых для получения качественной растениеводческой продукции, обнаружено повышенное содержание Cu и Co. Внесение удобрений сопровождается дополнительным поступлением микроэлементов, но не оказывает существенного влияния на микроэлементный состав почв. Миграционные циклы микроэлементов в значительной мере регулируются деятельностью конкреций. Основная функциональная особенность конкреций выражается в накоплении и снижении подвижности микроэлементов, что в конечном итоге приводит к ограничению поступления элементов в растения и подтверждается уровнем КПБ. При этом небольшой объем микроэлементов, представленный подвижными соединениями, обнаруживает высокую степень взаимосвязи с содержанием микроэлементов в растениях. Полученные результаты позволяют предположить, что до тех пор, пока микроэлементы, поглощенные конкрециями, не претерпели глубоких преобразований, они наравне с элементами, содер-

жающимися во вмещающем почвенном горизонте, участвуют в питании растений. При дальнейшем связывании элементов сорбционно-активными фазами конкреций в комплексные соединения конкреции ограничивают миграцию, а впоследствии и вовсе выводят часть микроэлементов из биологического круговорота.

Литература

1. 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.
2. Водяницкий Ю. Н. Роль соединений железа в закреплении тяжелых металлов и металлоидов в почвах (обзор литературы) // Почвоведение. 2010. № 5. С. 918–926.
3. Пансю М., Готеру Ж. Анализ почвы. Справочник. Минералогические, органические и неорганические методы анализа. СПб.: Профессия, 2014. 800 с.
4. Тимофеева Я. О., Голов В. И. Железо-марганцевые конкреции как накопители тяжелых металлов в некоторых почвах Приморья // Почвоведение. 2007. № 12. С. 1463–1471.
5. Тимофеева Я. О., Голов В. И., Кошелева Ю. А. Микроэлементы в растениях сои Дальневосточного региона России // Вестник ДВО РАН. 2017. № 2. С. 31–35.
6. Ettler V., Chren M., Mihaljevic M., Drahota P., Kribek B., Veselovsky F., Sracek O., Vanek A., Penizek V., Komarek M., Mapani B., Kamona F. Characterization of Fe-Mn concentric nodules from Luvisol irrigated by mine water in a semi-arid agricultural area // Geoderma. 2017. Vol. 299. P. 32–42.
7. Gasparatos D. Sequestration of heavy metals from soil with Fe-Mn concretions and nodules // Environmental Chemical Letter. 2013. Vol. 11. P. 1–9.
8. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants, 4rd edn. CRC Press, NY. 2011. 505 p.
9. Ruqia N., Khan M., Masab M., Ur Rehman H., Ur Rauf N., Shahab S., Ameer N., Sajed M., Ullah M., Rafeeq M., Shaheen Z. Accumulation of Heavy Metals (Ni, Cu, Cd, Cr, Pb, Zn, Fe) in the soil, water and plants and analysis of physico-chemical parameters of soil and water Collected from Tanda Dam kohat // J. Pharm. Sci. & Res. 2015. Vol. 7 (3). P. 89–97.
10. Timofeeva Ya. O., Karabtsov A. A., Semal V. A., Burdukovskii M. L., Bondarchuk N. V. Iron-manganese nodules in Udepts: the dependence of the accumulation of trace elements on nodule size // Soil Sci Soc Am J. 2014. Vol. 78 (3). P. 767–778.
11. Timofeeva Ya. O., Kosheleva Yu. A., Semal V. A., Burdukovskii M. L. Origin, baseline contents, and vertical distribution of selected trace lithophile elements in soils from nature reserves, Russian Far East // J Soils Sediments. 2018. Vol. 18. P. 968–982.

References

1. Burdukovskiy M. L., Golov V. I., Kovshik I. G. Changes in the basic agrochemical properties of arable soils in the South of the Far East with long-term agricultural use // Eurasian Soil Sci. 2016. Vol. 49(10). P. 1174–1179.
2. Vodyanitskii Yu. N. The role of iron in the fixation of heavy metals and metalloids in soils: a review of publications // Eurasian Soil Sci. 2010. Vol. 43(5). P. 519–532.
3. Pansu M., Gautheyrou J. Analysis of soil. Handbook of soil analysis mineralogical, organic and inorganic methods. SPb.: Proffesiya, 2014. 800 p.
4. Timofeeva, Ya. O., Golov V. I. Sorption of heavy metals by iron–manganic nodules in soils of Primorskii region // Soil Science. 2007. Vol. 40. P. 1308–1315.
5. Timofeeva, Ya. O., Golov V. I., Kosheleva Yu. A. Trace elements in soybean plants of the Russian Far Eastern region // Vestnik FEB RAS. 2017. Vol. 2. P. 31–35.
6. Ettler V., Chren M., Mihaljevic M., Drahota P., Kribek B., Veselovsky F., Sracek O., Vanek A., Penizek V., Komarek M., Mapani B., Kamona F. Characterization of Fe-Mn concentric nodules from Luvisol irrigated by mine water in a semi-arid agricultural area // Geoderma. 2017. Vol. 299. P. 32–42.
7. Gasparatos D. Sequestration of heavy metals from soil with Fe-Mn concretions and nodules // Environmental Chemical Letter. 2013. Vol. 11. P. 1–9.
8. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants, 4rd edn. CRC Press, NY. 2011. 505 p.
9. Ruqia N., Khan M., Masab M., Ur Rehman H., Ur Rauf N., Shahab S., Ameer N., Sajed M., Ullah M., Rafeeq M., Shaheen Z. Accumulation of Heavy Metals (Ni, Cu, Cd, Cr, Pb, Zn, Fe) in the soil, water and plants and analysis of physico-chemical parameters of soil and water Collected from Tanda Dam kohat // J. Pharm. Sci. & Res. 2015. Vol. 7 (3). P. 89–97.
10. Timofeeva Ya. O., Karabtsov A.A., Semal V. A., Burdukovskii M. L., Bondarchuk N. V. Iron-manganese nodules in Udepts: the dependence of the accumulation of trace elements on nodule size // Soil Sci Soc Am J. 2014. Vol. 78 (3). P. 767–778.
11. Timofeeva Ya. O., Kosheleva Yu. A., Semal V. A., Burdukovskii M. L. Origin, baseline contents, and vertical distribution of selected trace lithophile elements in soils from nature reserves, Russian Far East // J Soils Sediments. 2018. Vol. 18. P. 968–982.