УДК 633.34:631.5 DOI: 10.25680/S19948603.2026.152.07

НАКОПЛЕНИЕ МЕДИ, КОБАЛЬТА И МАРГАНЦА В ПОЧВЕ И ВЕГЕТАТИВНЫХ ОРГАНАХ СОИ ПРИ ТРАДИЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ И ПРЯМОМ ПОСЕВЕ

Р.В. Окунев[1], к.б.н., С.В. Белякова[1], Л.Р. Мухаметвалеев2 П.А. Курынцева[1], к.б.н., И.А. Тойгильдина[2], к.с-х.н., А.Л. Тойгильдин[2], д.с-х.н., С.Ю. Селивановская[1], д.б.н.
[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет
420008, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, 18,
e-mail: tutinkaz@yandex.ru
[2]Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина
432000, Ульяновская область, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, зд. 1

Работа выполнена в рамках государственного задания № FZSM-2024-0004

Исследованы сезонная динамика и влияние внесения минеральных удобрений на аккумуляцию Cu, Co *и* Mn *в системе почва-растение при традиционной обработке почвы и прямом посеве сои. Полевой опыт заложен на черноземе выщелоченном. На фоне каждой технологии изучали три уровня минерального питания: без удобрений, припосевное внесение комплексного удобрения* NPK(S) *8:19:29 (3) + 0,2*Zn *в дозах 80 и 160 кг/га. В условиях опыта можно отметить, что технология возделывания оказывала ограниченное влияние: некоторые различия прослеживались лишь для* Co *в почве,* Cu *в корнях и* Mn *в надземной биомассе. Внесение удобрений в большинстве случаев, по-видимому, сглаживало эти различия и преимущественно сказывалось на содержании элементов в почве и корнях, не затрагивая надземную биомассу. Величина КБП для* Co *в июне обнаружила тенденцию к росту с увеличением дозы удобрения. Наибольшая изменчивость содержания микроэлементов во всех объектах связана с фактором времени отбора. Результаты кластерного анализа позволяют предположить наличие взаимосвязей* Cu *– с сорбционными характеристиками,* Co *– с микробной активностью, а* Mn *– с температурным режимом почвы.*

Ключевые слова: соя, прямой посев, медь, кобальт, марганец, почва-растение.

Для цитирования: *Окунев Р.В., Белякова С.В., Мухаметвалеев Л.Р., Курынцева П.А., Тойгильдина И.А., Тойгильдин А.Л., Селивановская С.Ю.* Накопление меди, кобальта и марганца в почве и вегетативных органах сои при традиционной обработке и прямом посеве// Плодородие. – 2026. – №5. – С. 37-42. DOI: 10.25680/S19948603.2026.152.07.

До 1960-1970-х годов доминировала классическая технология возделывания пахотных почв, включающая интенсивную механическую обработку, направленную на подавление сорной растительности и формирование рыхлого агрокультурного слоя. Кроме того, отсутствие строгого соблюдения севооборота в сочетании с длительным периодом незащищенной (открытой) почвы приводило к системной деградации почвенных ресурсов, сокращению биоразнообразия и ускоренному разрушению почвенного покрова [13].

Альтернативой, направленной на решение этих проблем, выступает система ресурсосберегающего (природоохранного) земледелия, которая базируется на основных тезисах: минимализация механического воздействия на почвы, реализация постоянного покрытия почвы, ведение севооборотов, способствующих улучшению культурного слоя [7]. Такая модель ведения земледелия обычно имеет множество экологических преимуществ, включая накопление почвенного углерода, снижение интенсивности эрозионных процессов, выбросов парниковых газов и т.д. [2, 8, 13, 14].

Несмотря на перспективность возделывания многих культур методами ресурсосберегающего земледелия, влияние данных технологий на ряд ключевых факторов, определяющих продуктивность, остается недостаточно изученным. Такими показателями являются подвижность микроэлементов в почве и их миграционная способность в системе почва-растение. Изменение физико-химических и биологических свойств почвы при нулевой обработке, вероятно, способствует изменению подвижности и биологической доступности микроэлементов. Это может быть важным на начальных этапах роста, когда растение уязвимо к абиотическим стрессам, а формирующаяся корневая система определяет ее последующую способность к поглощению элементов.

Цель исследования – дать сравнительную оценку содержанию меди, кобальта и марганца в вегетативных органах сои (корни и надземная биомасса) и их подвижных форм в почве в два периода вегетации – фазу активного роста (июнь) и фазу созревания (сентябрь) – при возделывании по традиционной технологии и при прямом посеве.

Соя – одна из ключевых экономически значимых и высокобелковых культур на территории России [4, 10, 11], которая реализуется не только в варианте классического земледелия, но и в ресурсосберегающих технологиях, в том числе с применением прямого посева [3, 9]. При выращивании с использованием прямого посева она имеет свои особенности. У сои медленный темп начального роста надземной массы [1], что делает растения уязвимыми в неблагоприятных погодных условиях. В системах с прямым посевом без обработки, где почва весной прогревается медленнее из-за мульчи, это может привести к еще большему снижению роста и ослаблению всходов. Это, вероятно, отражается и на поступлении микроэлементов в растения, которые в свою очередь являются активаторами ферментов и реакций, участвующих в росте и развитии.

Методика. Полевой опыт был заложен на территории кафедры земледелия, растениеводства и селекции

Ульяновского ГАУ. Сою (*Glycine max* L.) сорта УСХИ 6 с нормой высева 0,7 млн всхожих семян на 1 га высевали в 2025 г. в зерновом севообороте: 1 – рапс яровой; 2 – озимая пшеница; 3 – соя; 4 – яровая пшеница; 5 – гречиха; 6 – ячмень. Почва – чернозем выщелоченный со следующей характеристикой (табл. 1). Температуру почвы измеряли на глубине 10 см. Влажность почвы определяли гигроскопическим методом по ГОСТу 5180-2015. Углерод микробной биомассы почвы оценивали согласно ISO 16072:2002 с использованием газового хроматографа. Содержание общего углерода после сухого сжигания и содержание органического углерода определяли на анализаторе углерода LECO RC 612 по ГОСТу ISO 10694–2024. Кислотность водной вытяжки почв устанавливали по ГОСТу 26423-85 с помощью иономера И-160 МИ (НПО «Измерительная техника», Россия), емкость катионного обмена методом Бобко-Аскинази-Алешина в модификации ЦИНАО по ГОСТу 17.4.4.01-84.

1. Свойства исследуемых почвенных образцов

Свойства почвы	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум	Коэффициент вариации, %
Температура на глубине 10 см, °С	25,1	4,6	19,0	30,5	18,4
Влажность, %	5,9	1,3	3,8	7,6	22,4
Содержание общего углерода (ОУ) после сухого сжигания, %	10,1	0,4	9,7	11,0	3,6
Содержание органического углерода ($С_{орг.}$), мг/г	34,4	1,8	31,1	36,9	5,3
Микробная биомасса (МБ), мкг С/г	93,2	11,0	74,9	113,6	11,8
Кислотность водной вытяжки (pH), ед.	6,2	0,5	5,7	7,7	8,0
Емкость катионного обмена (ЕКО), мг-экв/100 г	28,1	9,2	12,3	40,0	32,9

В опыте сою возделывали по двум технологиям: традиционная обработка почвы (T) и прямой посев (NT). Каждая технология включала три варианта минерального питания: без применения удобрений – $N_0P_0K_0$ (D0), предпосевное внесение комплексного азотно-фосфорно-калийного удобрения марки NPK(S) 8:19:29 (3) + 0,2 Zn с дозой 80 кг/га – $N_6P_{15}K_{23}S_2$ (D1) и 160 кг/га – $N_{13}P_{30}K_{46}S_5$ (D2).

Площадь опытного участка каждого варианта 108 м^2. Посев проводили с помощью сеялки «Десна-Полесье» СПС – 4000 в агрегате с трактором МТЗ-1221. Удобрения вносили при посеве.

Почву и растительные образцы (корни и надземная биомасса) отбирали в начале июня (стадия 2-4 тройчатого листа) и в сентябре (стадия созревания). Корни растений после извлечения из почвы отделяли от надземной части. Для удаления почвенных частиц корни тщательно отряхивали вручную, после чего промывали проточной водопроводной водой, а затем дистиллированной. Корни и надземную биомассу растений высушивали и измельчали. Содержание микроэлементов в растительных пробах определяли после кислотного разложения (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98), а в почвах – после извлечения ацетатно-аммонийным буфером с pH 4,8 (ПНД Ф 16.2.2:2.3:71-2011). Определение меди, кобальта и марганца осуществляли методом электротермического атомно-абсорбционного анализа на спектрометре ICE 3000. Расчеты проводили на абсолютно сухое вещество.

Статистическую обработку результатов анализа проводили в программах Microsoft Office Excel 2016, Past 4.13 и JASP при n=3, p<0,05. Данные на рисунках представлены как среднее ± стандартное отклонение. Для изучения влияния факторов (тип обработки почвы, доза удобрения, время отбора проб) на содержание элементов проводили многофакторный дисперсионный анализ. Однородность дисперсий проверяли с помощью теста Левена в программе JASP. Для попарного сравнения вариантов опыта использовали post-hoc тест Тьюки. Коэффициенты биологического поглощения (КБП) рассчитывали как отношение содержания элемента в корнях растений (мг/кг сухой массы) к его содержанию в почве (подвижные формы, мг/кг). Для выявления структуры взаимосвязей между КБП микроэлементов и свойствами почвы был применен иерархический кластерный анализ методом Варда. Для приведения всех значений к единому масштабу употребляют Z-преобразование. В качестве меры сходства между объектами использовали евклидово расстояние. Визуализация результатов кластеризации представлена в виде дендрограммы.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения подвижных форм металлов в почвенных образцах показали, что содержание исследуемых элементов значительно ниже допустимых концентраций, установленных СанПиН 1.2.3685-21 (Cu – 3,0 мг/кг; Co – 5,0; Mn – 60-100 мг/кг). С помощью многофакторного дисперсионного анализа устанавливали статистически значимое влияние дозы удобрения, срока отбора и технологии обработки на содержание элементов в почвах, корнях и надземной биомассе по отдельности. Проверка однородности дисперсий, осуществленная с помощью теста Левена, показала, что p-значения теста в зависимости от элемента находятся в диапазоне от 0,056 до 0,370, что свидетельствует о соблюдении предпосылки о равенстве дисперсий в группах.

Для концентраций меди в почве выявлено статистически значимое влияние дозы удобрения (p=0,008) и срока отбора проб (p<0,001) на содержание элемента, тогда как технология обработки почвы не оказала значимого влияния (p=0,366) (табл. 2).

2. Уровни значимости (p-значения) влияния факторов на содержание микроэлементов в почве и растениях сои

Фактор	Почва	Корни	Надземная биомасса
	Медь		
Обработка	0,366	0,017*	0,734
Доза удобрения	0,008*	0,009*	0,909
Время отбора проб	<0,001*	<0,001*	<0,001*
	Кобальт		
Обработка	<0,001*	0,722	0,536
Доза удобрения	0,004*	0,009*	0,982
Время отбора проб	<0,001*	<0,001*	<0,001*
	Марганец		
Обработка	0,518	0,248	<0,001*
Доза удобрения	<0,001*	0,002*	0,084
Время отбора проб	<0,001*	<0,001*	<0,001*

*Значимое влияние фактора.

В почве содержание меди варьировало в диапазоне от 0,06 до 0,31 мг/кг (рис. 1*А*). В июне отмечена максимальная концентрация элемента в варианте D2 как при традиционной обработке, так и при прямом посеве. Минимальные концентрации зафиксированы в сентябре: при традиционной обработке – в варианте D1, при прямом посеве – в вариантах D0 и D2.

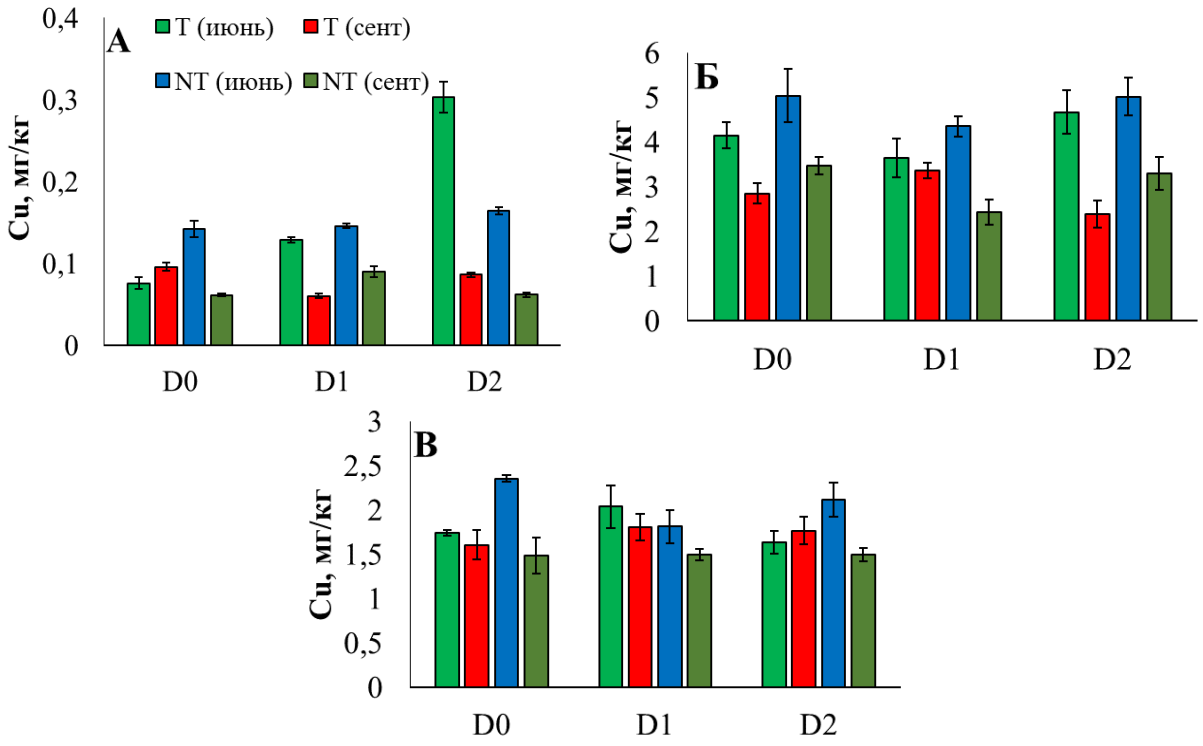


Рис. 1. Содержание подвижных форм меди в почве под посевами сои (А), валовой меди в корнях (Б) и надземной биомассе (В) растений в зависимости от технологии обработки (Т- традиционная, NT – прямой посев), дозы удобрения (D0 – без удобрений, D1 – однократная, D2 – двукратная); срока отбора проб (июнь – июнь, сентябрь – сентябрь)

В корнях растений содержание меди варьировало от 2,06 до 5,73 мг/кг (рис. 1Б). На его концентрацию оказали влияние все три фактора. К сентябрю наблюдалось снижение концентрации во всех вариантах опыта, что, вероятно, обусловлено увеличением биомассы корневой системы к концу вегетации и разбавлением концентрации элемента. Как и в почвах, высокие концентрации элемента обнаружены в июне при D2 в обеих технологиях. При этом, несмотря на высокое содержание элемента в почве, отмечены низкие по отношению к сентябрю значения КБП – 15,4 и 30,4 при традиционной обработке и прямом посеве соответственно (табл. 3).

3. Коэффициенты биологического поглощения в зависимости от технологии обработки, дозы удобрения и срока отбора проб

Система земледелия (сроки отбора проб)	Дозы удобрений		
	D0	D1	D2
Медь			
Т (июнь)	54,4	28,2	15,4
Т (сентябрь)	29,6	55,8	27,6
NT (июнь)	35,5	29,8	30,4
NT (сентябрь)	56,2	26,9	53,2
Кобальт			
Т (июнь)	133,5	370,4	693,9
Т (сентябрь)	14,0	29,8	25,6
NT (июнь)	193,9	235,7	371,1
NT (сентябрь)	14,9	6,9	15,2
Марганец			
Т (июнь)	8,2	6,1	8,5
Т (сентябрь)	4,9	4,4	4,7
NT (июнь)	6,7	6,4	8,5
NT (сентябрь)	5,9	5,0	5,1

Примечание. Способы обработки: (Т- традиционная, NT – прямой посев), дозы удобрения – (D0 – без удобрений, D1 – однократная, D2 – двукратная), сроки отбора проб – (июнь, сентябрь).

Кроме того, высокое содержание элемента также обнаружено при прямом посеве при D0. В сентябре наибольшее содержание элемента при традиционной обработке обнаружено в варианте D1, а при прямом посеве – в D0 и D2.

В надземной биомассе содержание меди варьировало от 1,34 до 2,32 мг/кг (рис. 1*В*). Для элемента обнаружено влияние только времени отбора проб ($p<0,001$). Наиболее высокие содержания элемента в июне выявлены при прямом посеве в вариантах D0 и D2, а также при традиционной обработке в D1. В сентябре в вариантах D1 и D2 при прямом посеве содержание элемента в 1,2 раза ниже, чем при традиционной обработке.

Содержание подвижного кобальта в почвах меньше, чем меди, однако варьировало в более широком диапазоне – от 2,4 до 38,0 мкг/кг (рис. 2А). Установлено влияние всех трех факторов на содержание элемента (<0,001-0,004). К сентябрю его концентрация возрастала в среднем в 4,3-4,9 раза по сравнению с июнем. В корнях растений, напротив, содержание металла в июне составляло от 940,4 до 2360,2 мкг/кг (рис. 2Б), что значительно превышало его концентрацию в почве (КБП достигали 133,5-693,9). Высокий уровень аккумуляции кобальта в корнях обусловлен, вероятно, тем, что кобальт является основным компонентом витамина В12, необходимого для функционирования ферментов для азотофиксации клубеньковых бактерий [15]. Однако миграция кобальта в корни растений может также быть связана с его более высокой, чем у других элементов, подвижностью при слабокислом pH (среднее значение его составляет 6,2), при котором элемент более доступен для корней [16]. Однако к сентябрю содержание элемента в корнях снижалось (до 227,1-838,8 мкг/кг), тогда как в почве, напротив, возрастало. При этом значения КБП в сентябре

были значительно ниже июньских и составили от 6,9 до 29,8. Снижение концентрации кобальта в корнях к сентябрю обусловлено, вероятно, несколькими процессами. Это может быть связано с высвобождением элемента из стареющих и лизирующихся клубеньков [18], вероятно, за счет чего и происходит увеличение концентрации элемента в почвах. Дополнительный вклад может вносить его физиологический отток (реутилизация) в формирующиеся семена. Однако, предположительно для кобальта отток в семена проходит менее эффективно, чем для меди и других элементов [17]. При традиционной обработке в варианте D0 в почвах в июне концентрация элемента достигала максимума. Во всех остальных вариантах (в июне и сентябре) содержание кобальта при прямом посеве было выше, чем при традиционной обработке.

Многофакторный дисперсионный анализ выявил значимое влияние дозы удобрения и времени отбора проб ($p=0,009$ и $p<0,001$ соответственно) на содержание элемента в корнях растений, тогда как влияния способа обработки почвы не обнаружено ($p=0,722$). В июне в вариантах D1 и D2 содержание кобальта при прямом посеве было выше, чем при традиционной обработке, а в сентябре – ниже. В надземных частях растений установлено влияние только времени отбора проб ($p<0,001$). В июне наибольшее содержание элемента обнаружено при прямом посеве в вариантах D0 и D2 и при традиционной обработке в варианте D1. В сентябре концентрация кобальта, как и в корнях растений, в вариантах D1 и D2 при прямом посеве была меньше, чем при традиционной обработке.

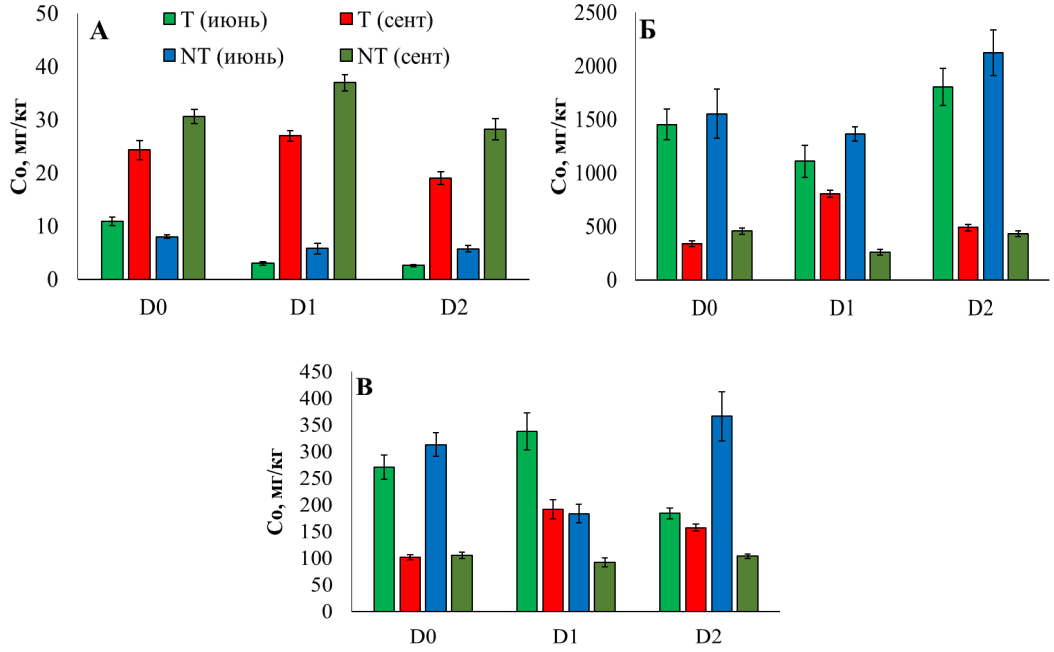


Рис. 2. Содержание подвижных форм кобальта в почве под посевами сои (А), валового кобальта в корнях (Б) и надземной биомассе (В) растений в зависимости от технологии обработки (Т- традиционная, NT – прямой посев), дозы удобрения (D0 – без удобрений, D1 – однократная, D2 – двукратная); срока отбора проб (июнь – июнь, сент. – сентябрь)

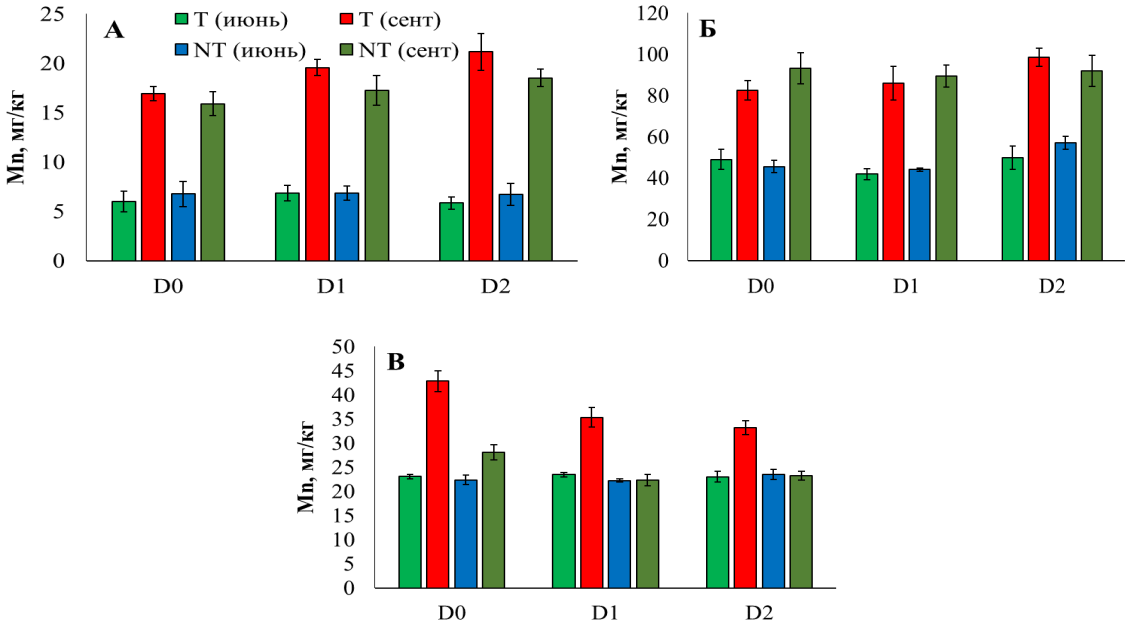


Рис. 3. Содержание подвижных форм марганца в почве под посевами сои (А), валового марганца в корнях (Б) и надземной биомассе (В) растений в зависимости от технологии обработки (Т- традиционная, NT – прямой посев), дозы удобрения (D0 – без удобрений, D1 – однократная, D2 – двукратная), срока отбора проб (июнь – июнь, сент. – сентябрь)

Содержание подвижного марганца в почве варьировало от 3,58 до 23,01 мг/кг, а в корнях растений – от 38,9 до 102,8 мг/кг (рис. 3А и 3Б). Установлено статистически значимое влияние дозы удобрения и срока отбора проб на содержание элемента в почве и корнях ($p<0,001$-$0,002$). В июне концентрация элемента в почве была ниже в 2,3-3,0 раза, а в корнях в 1,6-2,0 раза, чем в сентябре.

В надземной биомассе сои на содержание марганца влияли обработка почвы и время отбора проб. В июне его концентрация составляла 21,4-24,4 мг/кг (рис. 3В). В сентябре максимальные концентрации отмечены при традиционной обработке (33,1-44,4 мг/кг), при этом в вариантах с внесением удобрений (D1 и D2) содержание элемента было ниже, чем в D0.

Сравнение полученных данных с исследованиями других ученых показало, что на черноземах выщелоченных содержание меди в соломе сои ниже, чем в литературных источниках (3,00-4,12 мг/кг сухого вещества [5]), а для кобальта и марганца (80-250 мкг/кг для Co и 16,9-27,9 мг/кг для Mn [5, 6]) значения совпадают с литературными данными или превышают их до 1,5-1,6 раза. В целом в условиях однолетнего полевого опыта полученные данные позволяют предварительно отметить следующие тенденции. Технология возделывания сои оказывала ограниченное влияние на содержание микроэлементов в системе почва-растение: эффект проявился лишь для кобальта в почве, меди в корнях и марганца в надземной биомассе. Доза удобрения влияла преимущественно на содержание элементов в почве и корнях, тогда как в надземной биомассе значимого эффекта не обнаружено. Отсутствие влияния в последнем случае связано, вероятно, с возможной миграцией элементов в генеративные органы, которые не анализировались в данном исследовании.

Также установлено, что во всех изучаемых объектах прослеживается влияние времени отбора проб на концентрацию элемента – в июне и сентябре концентрации существенно различаются. Тем не менее не обнаружено единой, однонаправленной зависимости содержания элементов от доз удобрения и технологии обработки почвы, которая сохранялась бы для всех изученных объектов (почва, корни, надземная биомасса) в оба срока отбора.

При рассмотрении величин КБП обращает на себя внимание следующая особенность: для кобальта в июне наметилась тенденция к росту показателя с увеличением дозы удобрения, и эта тенденция прослеживалась как при традиционной обработке, так и при прямом посеве. Можно предположить, что это связано со стимуляцией развития клубеньковых бактерий удобрениями и усилением симбиотической азотфиксации на начальных этапах роста растений [18]. Что касается марганца, то его КБП в варианте D1 был ниже, чем в D0 и D2, причем это наблюдалось вне зависимости от времени отбора проб или технологии обработки почвы.

Кластерный анализ позволяет предположить существование взаимосвязей между КБП изученных элементов и свойствами почвы (рис. 4). КБП меди объединился в один кластер с показателями ЕКО и pH почвы, что может свидетельствовать о его связи с физико-химическими характеристиками почвы, определяющими сорбционную способность элемента. КБП кобальта сформировал обособленный кластер с показателем микробной биомассы, что, вероятно, подтверждает его преимущественную связь с биологическими процессами, в том числе с азотофиксацией. Однако, учитывая, что в нашем исследовании прямые измерения азотфиксации или оценка популяции клубеньковых бактерий не проводились, связь между концентрацией элемента и азотофиксацией требует дополнительной проверки в будущих экспериментах. КБП марганца объединился в один кластер с температурой почвы. Из-за близости на дендрограмме температуры почвы к КБП марганца, а затем (после кобальта) и к показателям микробной биомассы, можно предположить, что термический фактор играет двойственную роль. С одной стороны, температура может выступать как интегральный показатель, напрямую участвующий в регуляции доступности марганца с помощью влияния на его растворимость, окислительно-восстановительные реакции и сорбционные процессы. С другой стороны, температура, вероятно, могла повлиять на активность микробиоты, которая способна изменять подвижность марганца в результате микробиологического окисления и восстановления [12].

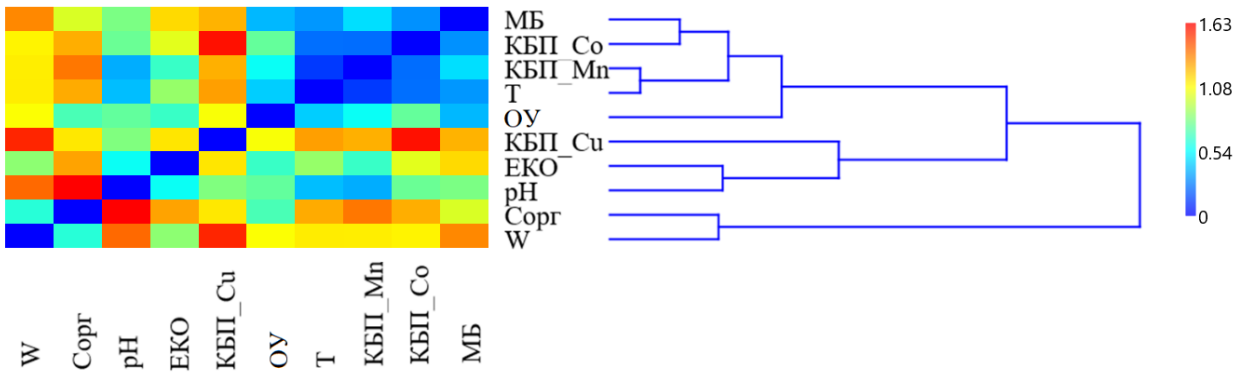


Рис. 4. Результаты кластерного анализа (Метод Варда): W – влажность почвы, $C_{орг.}$ – содержание органического углерода, pH – кислотность водной вытяжки, ЕКО – емкость катионного обмена, ОУ – общий углерод, Т – температура почвы на глубине 10 см, МБ – микробная биомасса, КБП_Cu, КБП_Co или КБП_Mn – коэффициенты биологического поглощения для меди, кобальта или марганца соответственно

Выводы. Проведенный опыт позволяет предположить, что характер аккумуляции и распределения изученных микроэлементов в системе почва–корни–надземная биомасса сои складывается под влиянием комплекса факторов (технология обработки почвы и посева, доза удобрения) и зависит от времени отбора проб. При сравнении технологий возделывания прослеживаются некоторые различия в содержании

микроэлементов: для кобальта – в почве, для меди – в корнях, для марганца – в надземной биомассе. В большинстве случаев, эти различия, по-видимому, нивелируются при внесении удобрений. Однако доза удобрения, вероятно, оказывает большее влияния на содержание меди и кобальта в почве, а не на их накопление в надземной биомассе. Дополнительно фактор времени отбора существенно влияет на изменчивость полученных показателей. Тем не менее выявленные закономерности могут служить основой для формулировки гипотез и планирования экспериментов. Для выработки практических рекомендаций необходимы многолетние исследования с включением анализа семян и прямыми измерениями азотфиксации. Кроме того, вероятное ежегодное накопление органического вещества может дополнительно повлиять на доступность микроэлементов при прямом посеве, что требует дальнейшего изучения.

Литература

1. *Амелин А.В.* Особенности начального роста у разных сортотипов сои / А.В. Амелин, И.И. Кузнецов, В.Н. Зайцев // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2010. – № 6(27). – С. 131-133.
2. *Грошева О.А.* Разработка научных основ устойчивого степного землепользования в работах отечественных и зарубежных исследователей / О.А. Грошева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – № 12. – С. 56-59. – DOI: 10.17513/mjpfi.13330
3. *Дридигер В.К.* Рост, развитие и продуктивность сои при возделывании по технологии No-till в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края / В.К. Дридигер, Р.Г. Гаджиумаров // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. – 2018. – № 3(175). – С. 52-57. – DOI: 10.25230/2412-608X-2018-3-175-52-57
4. *Зубарева К.Ю.* Соя в России / К.Ю. Зубарева // Вестник техносферной безопасности и сельского развития. – 2020. – № 4 (28). – С. 23-25.
5. *Лукин С.В.* Оценка макро- и микроэлементного состава растений гороха, белого люпина и сои / С.В. Лукин // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2018. – № 6. – С. 76-79. – DOI: 10.30850/vrsn/2018/6/76-79
6. *Лукин С.В.* Мониторинг содержания марганца, цинка и меди в почвах и растениях Центрально-Черноземного района России / С.В. Лукин, Д.В. Жуйков // Почвоведение. – 2021. – № 1. – С. 60–69. – DOI: 10.31857/S0032180X21010093
7. *Мальцева И.С.* Ресурсосберегающее сельское хозяйство как направление прогрессивного аграрного развития / И.С. Мальцева // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2022. – № 17-2. – С. 265-267.
8. *Минникова Т.В.* Влияние технологии No-till на нитрифицирующую активность черноземов Ростовской области / Т.В. Минникова, Г.В. Мокриков, К.Ш. Казеев, А.В. Горбов, В.В. Гаркущенко, В.В. Малахова // Агрохимия. – 2017. – № 9. – С. 33-38. – DOI: 10.7868/S0002188117090034
9. *Низкодубова А.А.* Влияние агрохимикатов на урожайность и качество сои при выращивании по технологии No-till / А.А. Низкодубова, Р.А. Каменев, А.П. Солодовников, А.В. Летучий // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 12. – С. 50-54. – DOI: 10.28983/asj.y2021i12pp50-54
10. *Нафиков М.М.* Особенности применения способов обработки почвы при возделывании сои в лесостепной зоне / М.М. Нафиков, С.Г. Смирнов, А.В. Краснов, Л.Г. Шашкаров // Аграрная наука. – 2024. – Т. 381, № 4. – С. 70–74. – DOI: 10.32634/0869-8155-2024-381-4-70-74
11. *Шарипова Г.Ф.* Эффективность применения удобрений с микроэлементами на различных сортах сои / Г.Ф. Шарипова, В.А. Колесар, Р.И. Сафин // Плодородие. – 2020. – № 3. – С. 9-12. – DOI: 10.25680/S19948603.2020.114.02
12. *Alejandro S.* Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation / S. Alejandro, S. Höller, B. Meier, E. Peiter // Frontiers in Plant Science. – 2020. – Vol. 11. – Art. 300. – DOI: 10.3389/fpls.2020.00300
13. *Dang Y.P.* No-till Farming Systems for Sustainable Agriculture: An Overview / Y.P. Dang, K.L. Page, R.C. Dalal, N.W. Menzies // No-till Farming Systems for Sustainable Agriculture / ed. by Y. Dang, R. Dalal, N. Menzies. – Cham: Springer, 2020. – P. 3-20. – DOI: 10.1007/978-3-030-46409-7_1
14. *Francaviglia R.* Soil organic carbon sequestration and tillage systems in the Mediterranean Basin: a data mining approach / R. Francaviglia, C. Di Bene, R. Farina, L. Salvati // Nutrient Cycling in Agroecosystems. – 2017. – Vol. 107, No. 1. – P. 125–137. DOI: 10.1007/s10705-016-9820-z
15. *Hu X.* Cobalt: An Essential Micronutrient for Plant Growth? / X. Hu, X. Wei, J. Ling, J. Chen // Frontiers in Plant Science. – 2021. – Vol. 12. – Article 768523. – DOI: 10.3389/fpls.2021.768523
16. *Srivastava P.* Cobalt in soils: sources, fate, bioavailability, plant uptake, remediation, and management / P. Srivastava, N. Bolan, V. Casagrande, J. Benjamin, S.A. Adejumo, M. Sabir, Z. Farooqi, Saifullah // Appraisal of Metal(loids) in the Ecosystem / ed. by V. Kumar, A. Sharma, R. Setia. – 2022. – P. 81-104. – DOI: 10.1016/B978-0-323-85621-8.00007-8
17. *Riesen O.* Redistribution of Nickel, Cobalt, Manganese, Zinc, and Cadmium via the Phloem in Young and Maturing Wheat / O. Riesen, U. Feller // Journal of Plant Nutrition. – 2005. – Vol. 28. – P. 421-430. – DOI: 10.1081/PLN-200049153
18. *Yu H.* GmNAC039 and GmNAC018 activate the expression of cysteine protease genes to promote soybean nodule senescence / H. Yu, A. Xiao, J. Wu, H. Li, Y. Duan, Q. Chen, H. Zhu, Y. Cao // The Plant Cell. – 2023. – Vol. 35, No. 8. – P. 2929-2951. – DOI: 10.1093/plcell/koad129

ACCUMULATION OF COPPER, COBALT, AND MANGANESE IN THE SOIL–PLANT SYSTEM DURING SOYBEAN CULTIVATION WITH TRADITIONAL TILLAGE AND NO-TILL

R.V. Okunev[1], Candidate of Biological Sciences, S.V. Belyakova[1], L.R. Mukhametvaleev[2], P.A. Kuryntseva[1], Candidate of Biological Sciences, I.A. Toigildina[2], Candidate of Agricultural Sciences, A.L. Toigildin[2], Doctor of Agricultural Sciences, S.Yu. Selivanovskaya[1], Doctor of Biological Sciences
[1]Kazan (Volga Region) Federal University, 18 Kremlyovskaya str, Kazan, 420008, Russian Federation, e-mail: tutinkaz@yandex.ru.
[2]Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
432000, Ulyanovsk Region, Ulyanovsk, Novy Venets Boulevard, Bldg. 1

In this study, the seasonal dynamics and the effect of mineral fertilizer on the accumulation of Cu, Co, and Mn in the soil–plant system were investigated for soybean (Glycine max L.) grown under conventional tillage and no-till. The field experiment was conducted on leached chernozems. Three levels of mineral nutrition were studied for each technology: no fertilizers, pre-sowing application of a complex fertilizer NPK(S) 8:19:29 (3) + 0.2Zn at doses of 80 and 160 kg/ha. Under the experimental conditions, the cultivation technology had a limited effect: some differences were observed only for Co in the soil, Cu in the roots and Mn in the aboveground biomass. Fertilizer application in most cases apparently smoothed out these differences and primarily affected the element content in the soil and roots, without affecting the aboveground biomass. In June, the bioaccumulation factor for Co showed a tendency to increase with increasing fertilizer dose. The greatest variability in microelement content across all samples was associated with sampling time. Cluster analysis results suggest correlations between Cu and sorption characteristics, Co and microbial activity, and Mn and soil temperature.

Keywords: soybean, direct seeding, copper, cobalt, manganese, soil-plant interaction