

УДК 633.39

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ НА СОДЕРЖАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕЛеной МАССЕ КУКУРУЗЫ

© *Н.В. Сырчина^{1*}, Л.В. Пилип², Т.Я. Ашихмина^{1,3}*

¹ *Вятский государственный университет, ул. Московская, 36, Киров, 610000, Россия, nvms1956@mail.ru*

² *Вятский государственный агротехнологический университет, Октябрьский пр., 133, Киров, 610017, Россия*

³ *Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167982, Россия*

Оптимальное содержание микроэлементов в зеленых кормах имеет принципиальное значение для обеспечения высокой продуктивности крупного рогатого скота. Для производства зеленых кормов используется кукуруза, выращиваемая на полях, расположенных вблизи животноводческих комплексов и удобряемых побочными продуктами животноводства (ППЖ). В условиях высокой нагрузки ППЖ (навозом, навозными стоками) аккумуляция микроэлементов в зеленой массе кукурузы (ЗМК) происходит более интенсивно, чем при использовании удобрений и микроудобрений в минеральной форме. Выращивание кукурузы способствует активному выносу из почвы Fe, Zn, Mn и слабому выносу Cu. Накопление микроэлементов в растениях, выращиваемых на кислых, удобряемых ППЖ почвах, выше, чем при выращивании на нейтральных. По абсолютному содержанию в ЗМК микроэлементы располагаются в следующей последовательности: Mn>Fe>Zn>Cu. Соответствующий ряд совпадает с последовательностью уменьшения концентраций подвижных форм элементов в агроземах, но отличается от последовательности изменения индексов аккумуляции (ИА) микроэлементов. Рассчитанные на основе экспериментальных данных значения ИА располагаются следующим образом: Fe>Zn>Mn>Cu. ИА всех микроэлементов, кроме Cu, в ЗМК были выше единицы, поэтому кукурузу можно отнести к категории растений-аккумуляторов. ИА Cu в разных агроземах были ниже 1 и практически не зависели от уровня обменной кислотности. Слабая аккумуляция вероятно обусловлена низким содержанием Cu в дерново-подзолистых почвах, высокой устойчивостью комплексов Cu с органическими лигандами и значительным содержанием доступного для растений азота в удобряемых ППЖ почвах.

Ключевые слова: железо, медь, марганец, цинк, зеленая масса кукурузы, индекс аккумуляции микроэлементов, побочные продукты животноводства, растения-аккумуляторы, агроземы.

Для цитирования: Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Влияние органических удобрений на содержание микроэлементов в зеленой массе кукурузы // Химия растительного сырья. 2024. №1. С. 372–380. DOI: 10.14258/jcprm.20240112298.

Введение

Кукуруза входит в число важнейших сельскохозяйственных культур, широко используемых для производства зеленых кормов и силоса, составляющих основу рациона крупного рогатого скота (КРС). Согласно официальным статистическим данным, посевные площади под кукурузу на корм в хозяйствах всех категорий РФ в 2022 г. достигли 1373.3 тыс./га, что на 10.3% больше, чем в 2021 г. Стремительное наращивание объемов производства обусловлено высокой урожайностью, технологичностью возделывания, значительной питательной ценностью и хорошей силосуемостью этой культуры. Кукуруза восковой спелости занимает 1-е место среди кормовых культур Нечерноземья по выходу с единицы посевной площади сухого вещества, жира, энергии и 2-е место по выходу перевариваемого протеина и минеральных элементов [1]. Зеленая масса кукурузы (в пересчете на сухое вещество) в фазе цветения и молочной спелости содержит 9.4–9.7% сырого протеина и 24.0–25.4% сырой клетчатки [2]. Включение кукурузного силоса в рацион КРС способствует наращиванию мышечной массы бычков и повышению молочной продуктивности коров [3, 4].

* Автор, с которым следует вести переписку.

В отличие от большинства других однолетних сельскохозяйственных культур, кукурузу на силос и зеленый корм допускается выращивать на одном месте в течение трех-четырёх лет [5], что очень удобно для животноводческих предприятий, располагающих ограниченными посевными площадями, находящимися в непосредственной близости от ферм. Выращивание кормовой культуры вблизи от мест потребления позволяет снизить транспортные расходы на доставку кормов, а также минимизировать затраты хозяйств на утилизацию побочных продуктов (навоза, навозных стоков) в качестве органических удобрений [6, 7].

Для снижения затрат на транспортировку основная масса образующихся на животноводческом предприятии органических удобрений вносится на поля, расположенные на расстоянии до 10–15 км от мест содержания животных. Вместе с побочными продуктами животноводства (ППЖ) в пашню поступают микроэлементы, содержащиеся в кормах и витаминно-минеральных комплексах. Регулярное внесение высоких норм ППЖ приводит к существенной трансформации химического состава агроземов, включая накопление тяжелых металлов (ТМ) и биогенных органических веществ низкой степени разложения [8–11]. Биодоступность ТМ, к числу которых относятся многие микроэлементы, в удобряемых навозом почвах существенно повышается [12]. Накопление подвижных и доступных форм микроэлементов приводит к аккумуляции их в кормовых культурах, что необходимо учитывать при составлении сбалансированных по элементному составу рационов для животных. Следует отметить, что проблема прогнозирования биодоступности микроэлементов, особенно в загрязненных почвах, до настоящего времени далека от решения [13]. Вместе с тем выявление взаимосвязей между подвижностью микроэлементов в почвах и уровнем поглощения их растениями имеет принципиальное значение для обеспечения качества и безопасности растениеводческой продукции, выращиваемой на почвах в условиях высокой нагрузки ППЖ.

Цель работы – изучение влияния систематического внесения высоких норм органических удобрений (навоза, навозных стоков, жидкой фракции навоза) на содержание микроэлементов в зеленой массе кукурузы.

Экспериментальная часть

В качестве объектов для проведения исследований были выбраны два пахотных поля, расположенных вблизи крупных животноводческих комплексов Кировской области. Первое поле (опыт 1) на протяжении последних 7 лет удобряли обезвреженной в лагунах жидкой фракцией навоза КРС, второе (опыт 2) – жидкой фракцией свиного навоза. Удобрения вносили с помощью буксируемой шланговой системы (рис. 1) на глубину до 50 см. Норму внесения рассчитывала агрохимическая служба предприятий, согласно РД-АПК 1.10.15.02-17. Среднегодовая (за 7 лет) масса вносимых жидких органических удобрений составила 220 ± 30 т.

Оба поля (опыт 1 и опыт 2) использовали в кормовом севообороте. Последние 2 года на полях выращивали кукурузу на силос (рис. 2).

Отбор проб почвы (агрозема) и зеленой массы кукурузы проводили в конце вегетационного периода (середина сентября 2022 г.). Пробы отбирали тростевым буром в соответствии с ГОСТ Р 58595-2019. Обследованная площадь пашни составила 40 га (по 20 га на каждом поле). Контрольные пробы почвы (контроль 1 и контроль 2) отбирали аналогично пробам агрозема на расстоянии не менее 300 м от границ пахотных полей на заросших кустарником и травой участках. Почвы всех территорий дерново-подзолистые, среднесуглинистые. Отбор и подготовку проб зеленой массы кукурузы (ЗМК) выполняли согласно ГОСТ Р 58588-2019. Лабораторные исследования проводили через 5 дней после отбора проб. Содержание подвижных и валовых форм микроэлементов в почве определяли атомно-абсорбционным методом по ФР 1.31.2018.31189 с помощью спектрометра ААС «Спектр-5-4», содержание микроэлементов в зеленой массе кукурузы – по ГОСТ 32343-2013. Подвижные формы металлов из проб почвы извлекали ацетатно-аммонийным буферным раствором с $\text{pH}=4.8$. В перечень анализируемых микроэлементов были включены Fe, Mn, Zn, Cu, относящиеся к элементам-биофилам [14], широко используемым в составе витаминно-минеральных комплексов для животных, а также токсичные элементы Cd, Pb, Hg и As.

Индекс аккумуляции (ИА) микроэлементов рассчитывали по формуле: $\text{ИА} = \text{Ск}/\text{Сп}$, где Ск – содержание микроэлемента в воздушно-сухой ЗМК, мг/кг; Сп – содержание подвижных форм микроэлемента в воздушно-сухих образцах агрозема, мг/кг. Статистическую обработку полученных результатов выполняли общепринятыми методами в программе Microsoft Excel. Статистическую значимость различий средних величин оценивали по t-критерию Стьюдента.



Рис.1. Технология внесения жидкой фракции навозных стоков трактором с буксируемой шланговой системой (фотография авторов)



а



б

Рис. 2. Общий вид второго опытного поля, засаженного кукурузой (а); *Zea mays* (б) в конце вегетационного периода (фотографии авторов)

Обсуждение результатов

В результате выполненных исследований установлено, что химический состав агроземов, удобряемых навозом сельскохозяйственных животных, существенно отличается от химического состава почвы контрольных участков. Для агроземов характерен очень высокий уровень подвижного фосфора и обменного калия, более высокое содержание органического вещества, а также более низкая обменная кислотность (табл. 1).

В удобряемой навозом почве содержание валовых форм Mn, Zn и Cu не превышало нормативы, установленные в СанПиН 1.2.3685-21: предельно допустимая концентрация (ПДК) Mn – 1500 мг/кг; ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) Cu в суглинистых и глинистых почвах при pH>5.5 – 132.0 мг/кг; Zn – 220 мг/кг. Валовое содержание Cu в агроземах было выше, чем в почве контрольных участков (различие статистически значимое). Аккумуляция Cu в удобряемых ППЖ агроземах может быть обусловлена низкой подвижностью и быстрым закреплением этого металла в почвах.

Содержание подвижных Zn и Cu в агроземах также не превышало нормативы (ПДК Zn – 23.0 мг/кг; ПДК Cu – 3.0 мг/кг), однако находилось на более высоком уровне, чем в почве контрольных участков. Превышение ПДК выявлено для подвижного Mn. Согласно СанПиН 1.2.3685-21, в дерново-подзолистых почвах концентрация подвижных форм этого металла не должна превышать 80.0 мг/кг (при pH 5.1–6.0) и 100 мг/кг (при pH>6.0).

Более высокая подвижность Cu, Mn и Zn в агроземах по сравнению с контролем может быть обусловлена образованием растворимых комплексов этих элементов с органическими веществами (фенолами, кислотами, аминами и т.п.), источниками которых являются ППЖ [15], а также с фульвокислотами, образующимися в результате трансформации органических компонентов почвы. Соответствующие комплексы являются устойчивыми в области значений pH, характерных для изучаемых образцов агрозема [16].

Для Fe также характерно комплексообразование с органическими веществами, однако при $pH > 3.2$ этот элемент переходит в труднорастворимые формы (гидроксиды, оксиды) [17, 18], что объясняет низкое содержание его подвижных форм в почвах, удобряемых ППЖ. Осаждение Mn из почвенных растворов происходит только в области pH_{KCl} 8.0–9.0 [19], т.е. в агроземах растворимые комплексы этого элемента с органическими лигандами являются вполне устойчивыми.

Статистически значимые отличия между содержанием подвижных форм микроэлементов в почве различных опытных участков не выявлены. Согласно принятым в агрохимической службе градациям, для дерново-подзолистых и серых лесных почв, обеспеченность обследованных агроземов подвижными Mn и Zn – высокая, Cu – низкая.

В таблице 2 приведены результаты исследований, характеризующие содержание микроэлементов в ЗМК, выращенной на полях, удобряемых ППЖ. Для сравнения в таблицу включена информация о содержании микроэлементов в ЗМК, выращенной на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве без удобрений или с внесением разных доз минеральных и микроудобрений [20].

Приведенные в таблице 2 данные дают основания предположить, что в условиях высокой нагрузки ППЖ аккумуляция микроэлементов в ЗМК происходит более интенсивно, чем при использовании удобрений и микроудобрений в минеральной форме или при выращивании культуры без удобрений. Несмотря на активную аккумуляцию, содержание Fe, Zn и Cu в ЗМК (кроме содержания Fe в варианте «опыт 2») не превышало установленный в МДУ уровень. Концентрация Mn в ЗМК находилась в пределах нормальных значений для травянистых растений (25.0–250 мг/кг сухого вещества) [22].

Статистически значимых различий в содержании подвижных форм микроэлементов в почве между вариантами «опыт 1» и «опыт 2» выявлено не было, однако содержание всех изученных микроэлементов оказалось выше в ЗМК, выращенной в условиях более кислой почвы, удобряемой свиным навозом (опыт 2), то есть на биодоступность микроэлементов большое влияние оказывает не только подвижность (способность переходить в почвенную вытяжку), но и форма, в которой элемент находится в почвенном растворе. Образование устойчивых растворимых комплексов катионов металлов с органическими лигандами с одной стороны способствует повышению их мобильности, с другой – затрудняет возможность поглощения соответствующих катионов корневой системой растений. На устойчивость органических комплексов ТМ непосредственное влияние оказывает pH среды [23]. В кислых почвах за счет протонирования органических лигандов устойчивость комплексов снижается и биодоступность микроэлементов увеличивается. В результате накопление ТМ в растениях, выращиваемых на кислых почвах, оказывается более высоким, чем на нейтральных.

По абсолютному содержанию в ЗМК микроэлементы можно расположить в следующей последовательности: $Mn > Fe > Zn > Cu$. Соответствующий ряд совпадает с последовательностью уменьшения концентраций подвижных форм элементов в агроземах.

Таблица 1. Химический состав агрозема и почвы контрольных участков

Показатель	Метод анализа	Значение показателя			
		агрозем		почва контрольных участков	
		опыт 1	опыт 2	контроль 1	контроль 2
pH_{KCl} , ед. pH	ГОСТ 26483-85	7.2±0.2	5.2±0.3	4.0±0.2	4.0±0.2
Органическое вещество, %	ГОСТ 23740-2016	5.5±1.3	2.7±0.5	2.2±0.5	2.1±0.3
N общий, мг/кг	ГОСТ Р 58596-2019	1340±430	560±120	480±90	490±80
P ₂ O ₅ подвижный	ГОСТ Р 54650-2011	1050±180	930±140	179±42	106±26
K ₂ O обменный		830±110	680±120	128±18	118±13
Ca обменный, мг/кг	ГОСТ 26487-8	13.5±2.3	7.6±1.4	9.2±1.8	8.9±1.9
Fe, мг/кг (валовое / подвижное)	ФР 1.31.2018.31189	5900±1500 / 25±6	9260±2380 / 18±5	5580±1640 / 120±30	9209±2300 / 130±30
Mn, мг/кг (валовый / подвижный)		750±215 / 116±27	680±190 / 126±33	821±230 / 22±4	790±150 / 29±4
Zn, мг/кг (валовое / подвижное)		16.8±5.5 / 5.9±1.4	37.8±13.4 / 8.3±2.3	17.5±2.4 / 3.4±0.8	39.5±13.3 / 2.8±0.9
Cu, мг/кг (валовое / подвижное)		21±4 / 1.2±0.3	29±6 / 1.8±0.5	10.4±2.6 / 0.08±0.04	13.9±3.3 / 0.47±0.10

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые отличия определяемых показателей в агроземе от соответствующих показателей контрольных участков ($p < 0.05$).

Таблица 2. Содержание микроэлементов в зеленой массе кукурузы, мг/кг

Микроэлемент	Содержание (на сухое вещество)			МДУ
	опыт 1	опыт 2	выращенная без удобрений или на минеральных удобрениях [20]	
Fe	85±11	122±16	17.1–45.1	100
Mn	136±25	226±36	5.0–18.4	не установлен
Zn	9.6±2.4	19.5±4.7	1.4–4.5	50
Cu	0.89±0.20	1.20±0.27	0.04–0.58	30

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые различия между вариантами «опыт 1» и «опыт 2» ($p < 0.05$). МДУ – Временный максимально допустимый уровень содержания некоторых химических элементов и гос-сипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках [21].

Из всех изученных микроэлементов менее всего в ЗМК накапливалась Cu, что может быть обусловлено низким содержанием подвижных форм этого элемента в почве [24] и высоким уровнем доступного для растений азота, источником которого являются ППЖ. Согласно результатам опубликованных исследований, обильное азотное питание приводит к дефициту Cu в растениях [25]. Оптимальный уровень содержания Cu в кормах для животных должен составлять 6.5–8.7 мг/кг сухого вещества [26], т.е. в 7–9 раз выше, чем в ЗМК, выращенной на полях, удобряемых ППЖ.

В таблице 3 приведены значения ИА микроэлементов в ЗМК. Соответствующий показатель используют для характеристики интенсивности накопления микроэлементов в растениях в конкретных почвенно-геохимических условиях [27].

Согласно полученным результатам, последовательность расположения элементов по величине ИА не совпадает с последовательностью их расположения по концентрации в зеленой массе кукурузы. Индекс аккумуляции Fe в ЗМК, несмотря на низкое содержание подвижных форм этого элемента в почве, был значительно выше, чем ИА других микроэлементов, включая Mn. Активная аккумуляция свидетельствует о наличии у растений кукурузы физиологических механизмов, позволяющих поглощать Fe из богатых органическим веществом нейтральных почв, наиболее благоприятных для выращивания соответствующей кормовой культуры.

Индексы аккумуляции всех микроэлементов, кроме Cu, в ЗМК были выше единицы, т.е. по этому показателю кукурузу можно отнести к категории растений-аккумуляторов [28]. Наиболее высокие значения ИА были установлены для агрозема «опыт 2» (кислая почва, относительно низкое содержание органического вещества).

Индексы аккумуляции Cu в разных агроземах были ниже 1 и практически не зависели от уровня обменной кислотности. Слабая аккумуляция Cu из удобряемых ППЖ почв может быть обусловлена высокой устойчивостью комплексов этого металла с органическими лигандами в области pH_{KCl} , характерной для агроземов. Согласно опубликованным экспериментальным данным, устойчивость фульватных комплексов Cu превышает устойчивость аналогичных комплексов Zn в 3 раза [29].

Расчитанные на основе полученных экспериментальных данных значения ИА можно расположить в следующей последовательности: $Fe > Zn > Mn > Cu$.

Содержание токсичных элементов, таких как Cd, Pb, Hg и As в кормовых культурах имеет первостепенное значение для здоровья продуктивных животных. В таблицах 4 и 5 приведены результаты химического анализа, характеризующие валовое содержание токсичных элементов в почве и зеленой массе кукурузы.

Анализ массива данных по содержанию токсичных элементов в почве пахотных полей (средние су-глинки) не выявил превышения установленных нормативов, однако в удобряемом навозом агроземе (опыт 1 и опыт 2) установлено более высокое содержание Pb, чем в почве контрольных участков (табл. 4). При этом более высокие значения выявлены на полях, удобряемых навозными стоками КРС. Тем не менее содержание представленных токсичных элементов в зеленой массе кукурузы (табл. 5) соответствовало требованиям, предъявляемым к грубым и сочным кормам.

Таблица 3. Индексы аккумуляции микроэлементов в зеленой массе кукурузы

Микроэлемент	Индекс аккумуляции	
	опыт 1	опыт 2
Fe	3.4	6.8
Mn	1.2	1.8
Zn	1.6	2.3
Cu	0.7	0.7

Таблица 4. Валовое содержание токсичных элементов в агроземе и почве контрольных участков, мг/кг

Элемент	Метод анализа	Значение показателя				ПДК/ОДК с учетом фона 1
		агрозем		почва контрольных участков		
		опыт 1	опыт 2	контроль 1	контроль 2	
Cd	ФР 1.31.2018.31189	0.16 ±0.04	0.18±0.05	0.15±0.03	0.14±0.04	/ 0.5; 1.0; 2.0
Pb		7.8±2.0	6.4±1.5	3.9±0.5	2.14±0.48	/ 32; 65.0; 130
As	РД 52.18.721-2009	1.4±0.5	1.9±0.6	1.7±0.4	1.9±0.6	/ 2.0; 5.0; 10.0
Hg	РД 52.18.827-2016	0.026±0.008	0.020±0.006	0.034±0.010	0.028±0.010	2.1/

Примечание. Значения ПДК/ОДК приведены для разных почв согласно СанПиН 1.2.3685-21: песчаные и супесчаные; кислые суглинистые и глинистые ($pH_{КС1} < 5.5$); близкие к нейтральным, нейтральные суглинистые и глинистые ($pH_{КС1} > 5.5$).

Таблица 5. Содержание токсичных элементов в зеленой массе кукурузы (на сухое вещество), мг/кг

Элемент	Содержание (на сухое вещество)		
	опыт 1	опыт 2	МДУ [21]
Cd	0.14±0.05	0.18±0.06	0.3
Pb	3.43±1.4	1.07±0.72	5.0
Hg	0.024±0.006	0.028±0.008	0.05
As	0.32±0.10	0.34±0.08	0.5

Выводы

Внесение высоких норм органических удобрений на основе побочных продуктов животноводства способствует повышению концентрации подвижных форм микроэлементов в пахотном горизонте почвы и накоплению их в зеленой массе кукурузы. Несмотря на более активное поглощение ТМ из удобряемых ППЖ почв, концентрация Zn и Cu в ЗМК не превышала установленный в МДУ уровень.

Выращивание кукурузы способствует активному выносу из почвы Fe, Zn и Mn. Содержание соответствующих микроэлементов в ЗМК варьирует в широких пределах и существенно зависит от уровня кислотности. В ЗМК, выращенной на более кислой, удобряемой свиными навозными стоками почве, накапливается больше микроэлементов, чем в ЗМК, выращенной на нейтральных почвах, удобряемых навозом КРС.

Самый высокий индекс аккумуляции микроэлементов в ЗМК выявлен для Fe, играющего ключевую роль в процессах фотосинтеза и дыхания. Самая низкая аккумуляция – для Cu. Слабое поглощение Cu кукурузой может быть обусловлено низким содержанием этого элемента в дерново-подзолистых почвах, значительным уровнем доступного для растений азота и высокой устойчивостью комплексных соединений Cu с органическими лигандами.

Содержание токсичных элементов (Pb, Cd, As, Hg) в удобряемой навозом почве и зеленой массе кукурузы не превышало установленных нормативов, однако в пашне содержание Pb было выше, чем в почве контрольных участков. Вероятным источником соответствующего элемента является навоз животных.

Значительная вариабельность химического состава ЗМК по такому показателю, как содержание микроэлементов, свидетельствует о необходимости регулярного мониторинга качества и безопасности кормов, выращиваемых на почвах в условиях высокой нагрузки ППЖ.

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Вятского государственного университета, Вятского государственного агротехнологического университета, Института биологии Коми научного центра УрО РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Чичаева В.Н., Воробьева Н.В., Середнев Ю.С. Рейтинговая оценка некоторых кормовых культур Центральной зоны Нижегородской области // Вестник Ульяновской ГСХА. 2014. №4 (28). С. 147–162.
2. Федорова З.Л., Романенко Л.В. Требования к качеству основных кормов для коров с высокой продуктивностью (обзор) // Генетика и разведение животных. 2016. №3. С. 3–14.

3. Cabrita A.R.J., Dewhurst R.J., Melo D.S.P., Moorby J.M., Fonseca A.J.M. Effects of dietary protein concentration and balance of absorbable amino acids on productive responses of dairy cows fed corn silage-based diets // *Journal of Dairy Science*. 2011. Vol. 94, no. 9. Pp. 4647–4656. DOI: 10.3168/jds.2010-4097.
4. Andrade F.L.D., Rodrigues J.P.P., Detmann E., Valadares Filho S.D.C., Castro M.M.D., Trece A.S., Silva T.E., Fischer V., Weiss K., Marcondes M.I. Nutritional and productive performance of dairy cows fed corn silage or sugar-cane silage with or without additives // *Tropical animal health and production*. 2016. Vol. 48, no. 4. Pp. 747–753. DOI: 10.1007/s11250-016-1020-y.
5. Терещенко С.А., Мудрова Л.Д. Зависимость качества силоса от элементов технологии возделывания кукурузы (*Zea mays* L.) // *Известия КГТУ*. 2019. №52. С. 133–142.
6. Сазанов А.В., Терентьев Ю.Н., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Козвонин В.А. Производство биоорганических удобрений как направление реализации безотходных технологий в свиноводстве // *Теоретическая и прикладная экология*. 2017. №3. С. 85–90. DOI: 10.25750/1995-4301-2017-3-085-090.
7. Пилип Л.В., Сырчина Н.В. Экологическая проблема отрасли свиноводства // *Аграрная наука – сельскому хозяйству*. Барнаул, 2019. С. 193–196.
8. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я. Промышленные свинокомплексы как источники загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами // *Известия Коми научного центра УрО РАН. Серия «Экспериментальная биология и экология»*. 2021. №5 (51). С. 88–91. DOI: 10.19110/1994-5655-2021-5-88-91.
9. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. №3. С. 219–225. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-3-219-225.
10. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Казакова М.Э. Влияние отходов животноводства на подвижность калия и фосфора в почве // *Бутлеровские сообщения*. 2022. Т. 72, №10. С. 89–94. DOI: jbc-01/22-72-10-89.
11. Michaud A.M., Cambier P., Sappin-Didier V., Deltrel V., Mercier V., Rampon J.N., Houot S. Mass balance and long-term soil accumulation of trace elements in arable crop systems amended with urban composts or cattle manure during 17 years // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27, no. 5. Pp. 5367–5386. DOI: 10.1007/s11356-019-07166-8.
12. Jakubus M., Graczyk M. Microelement variability in plants as an effect of sewage sludge compost application assessed by different statistical methods // *Agronomy*. 2020. Vol. 10, no. 5. Article 642. DOI: 10.3390/agronomy10050642.
13. Кабата-Пендиас А. Проблемы современной биогеохимии микроэлементов // *Российский химический журнал*. 2005. Т. XLIX, №3. С. 15–19.
14. Дыленова Е.П., Жигжитжапова С.В. Рандалова Т.Э., Раднаева Л.Д., Ширеторова В.Г., Павлов И.А. Микроэлементы – биофилы и тяжелые металлы в *Artemisia Frigida* Willd. и *Artemisia Jacutica* Drob. // *Химия растительного сырья*. 2019. №4. С. 199–205. DOI: 10.14258/jcprn.2019045126.
15. Clemente R., Escolar Á., Bernal M.P. Heavy metals fractionation and organic matter mineralisation in contaminated calcareous soil amended with organic materials // *Bioresource Technology*. 2006. Vol. 97, no. 15. Pp. 1894–1901. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.08.018.
16. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: пер. с англ. М., 1989. 439 с.
17. Wajid K., Ahmad K., Khan Z.I., Nadeem M., Bashir H., Chen F., Ugulu I. Effect of organic manure and mineral fertilizers on bioaccumulation and translocation of trace metals in maize // *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 2020. Vol. 104, no. 5. Pp. 649–657. DOI: 10.1007/s00128-020-02841-w.
18. Киселёва Н.Д., Двуреченский В.Г. Формы железа в почвах естественных ландшафтов Верхнего Приангарья // *Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология*. 2021. Т. 37. С. 89–100. DOI: 10.26516/2073-3372.2021.37.89.
19. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О., Хомяков Ю.В. Динамика содержания подвижного марганца в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита // *Агробиология*. 2018. №8. С. 52–63. DOI: 10.1134/S0002188118080100.
20. Бахитова А.Р., Лапушкин В.М. Накопление микроэлементов в зелёной массе кукурузы при её выращивании на дерново-подзолистой почве // *Плодородие*. 2018. №4 (103). С. 18–21.
21. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. URL: <https://standartgost.ru/g/pkey-14293725464>.
22. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение. Новосибирск, 1991. 151 с.
23. Qin F., Shan X., Wei B. Effects of low-molecular-weight organic acids and residence time on desorption of Cu, Cd, and Pb from soils // *Chemosphere*. 2004. Vol. 57, no. 4. Pp. 253–263. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2004.06.010.
24. Kumar V., Pandita S., Sidhu G.P.S., Sharma A., Khanna K., Kaur P., Bali A.S., Setia R. Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: a comprehensive review // *Chemosphere*. 2021. Vol. 262. Article 127810. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127810
25. Кузнецова Е.А., Гаврилина В.А., Зомитев В.Ю. Накопление тяжелых металлов растениями кукурузы в процессе онтогенеза // *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*. 2016. Т. 2(37), №4. С. 30–34.
26. Косолапов В.М., Чуйков В.А., Худякова Х.К., Косолапова В.Г. Минеральные элементы в кормах и методы их анализа: монография. М., 2019. 272 с.
27. Сибгатуллина М.Ш., Валиев В.С. Микроэлементы в дикорастущих растениях национального парка «Нижняя Кама» // *Социально-экологические технологии*. 2019. Т. 9, №3. С. 325–342. DOI: 10.31862/2500-2961-2019-9-3-325-342.
28. Khawla K., Besma K., Enrique M., Mohamed H. Accumulation of trace elements by corn (*Zea mays*) under irrigation with treated wastewater using different irrigation methods // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019. Vol. 170. Pp. 530–537. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.12.025.

29. Галактионов А.Ю., Карпухин А.И. Содержание, профильное распределение и связь тяжелых металлов с группами и фракциями органического вещества в почвах лесной опытной дачи РГАУ – МСХА // Известия ТСХА. 2007. №3. С. 47–56.

Поступила в редакцию 16 декабря 2022 г.

После переработки 15 марта 2023 г.

Принята к публикации 3 октября 2023 г.

Syrcina N.V.^{1*}, Pilip L.V.², Ashikhmina T.Ya.^{1,3} THE EFFECT OF ORGANIC FERTILIZERS ON THE CONTENT OF TRACE ELEMENTS IN THE GREEN MASS OF CORN

¹ Vyatka State University, Moskovskaya st., 36, Kirov, 610000, Russia, e-mail: nvms1956@mail.ru

² Vyatka State Agrotechnological University, Oktyabrsky ave., 133, Kirov, 610017, Russia

³ Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Kommunisticheskaya st., 28, Syktyvkar, 167982, Russia

The optimal content of trace elements in green feeds is of fundamental importance for ensuring high productivity of cattle. For the production of green fodder, corn grown in fields located near livestock complexes and fertilized by by-products of animal husbandry (BPA) is used. In conditions of a high load of BPA (manure, manure runoff), the accumulation of trace elements in the green mass of corn (GMC) occurs more intensively than when using fertilizers in mineral form. Corn cultivation promotes active removal of Fe, Zn, Mn from the soil and weak removal of Cu. The accumulation of trace elements in plants grown on acidic soils fertilized by BPA is higher than when grown on neutral soils. According to the absolute content in GMC, trace elements are arranged in the following sequence: Mn>Fe>Zn>Cu. The corresponding series coincides with the sequence of decreasing concentrations of mobile forms of elements in agro-ecosystems, but differs from the sequence of changes in the indices of accumulation (IA) of trace elements. The IA values calculated on the basis of experimental data are arranged as follows: Fe>Zn>Mn>Cu. The IA of all trace elements, except Cu, in the GMC was higher than one, so corn can be classified as battery plants. IA Cu in different agro-ecosystems was below 1 and practically did not depend on the level of metabolic acidity. The weak accumulation is probably due to the low Cu content in sod-podzolic soils, the high stability of Cu complexes with organic ligands and the significant content of nitrogen available to plants in soils fertilized by BPA.

Keywords: iron, copper, manganese, zinc, green mass of corn, index of accumulation of trace elements, by-products of animal husbandry, accumulator plants, agrozeims.

For citing: Syrcina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 1, pp. 372–380. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240112298.

References

- Chichayeva V.N., Vorob'yeva N.V., Serednev Yu.S. *Vestnik Ul'yanovskoy GSKhA*, 2014, no. 4 (28), pp. 147–162. (in Russ.).
- Fedorova Z.L., Romanenko L.V. *Genetika i razvedeniye zhivotnykh*, 2016, no. 3, pp. 3–14. (in Russ.).
- Cabrita A.R.J., Dewhurst R.J., Melo D.S.P., Moorby J.M., Fonseca A.J.M. *Journal of Dairy Science*, 2011, vol. 94, no. 9, pp. 4647–4656. DOI: 10.3168/jds.2010-4097.
- Andrade F.L.D., Rodrigues J.P.P., Detmann E., Valadares Filho S.D.C., Castro M.M.D., Trece A.S., Silva T.E., Fischer V., Weiss K., Marcondes M.I. *Tropical animal health and production*, 2016, vol. 48, no. 4, pp. 747–753. DOI: 10.1007/s11250-016-1020-y.
- Tereshchenko S.A., Mudrova L.D. *Izvestiya KGTU*, 2019, no. 52, pp. 133–142. (in Russ.).
- Sazanov A.V., Terent'yev Yu.N., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Kozvonin V.A. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2017, no. 3, pp. 85–90. DOI: 10.25750/1995-4301-2017-3-085-090. (in Russ.).
- Пилип Л.В., Сырчина Н.В. *Agrarnaya nauka – sel'skomu khozyaystvu*. [Agricultural science – agriculture]. Barnaul, 2019, pp. 193–196. (in Russ.).
- Pilip L.V., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN. Seriya «Eksperimental'naya biologiya i ekologiya»*, 2021, no. 5 (51), pp. 88–91. DOI: 10.19110/1994-5655-2021-5-88-91. (in Russ.).
- Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2022, no. 3, pp. 219–225. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-3-219-225. (in Russ.).

* Corresponding author.

10. Pilip L.V., Syrcina N.V., Ashikhmina T.Ya., Kazakova M.E. *Butlerovskiye soobshcheniya*, 2022, vol. 72, no. 10, pp. 89–94. DOI: jbc-01/22-72-10-89. (in Russ.).
11. Michaud A.M., Cambier P., Sappin-Didier V., Deltreil V., Mercier V., Rampon J.N., Houot S. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, no. 5, pp. 5367–5386. DOI: 10.1007/s11356-019-07166-8.
12. Jakubus M., Graczyk M. *Agronomy*, 2020, vol. 10, no. 5, article 642. DOI: 10.3390/agronomy10050642.
13. Kabata-Pendias A. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2005, vol. XLIX, no. 3, pp. 15–19. (in Russ.).
14. Dylenova Ye.P., Zhigzhitzhapova S.V., Randalova T.E., Radnayeve L.D., Shiretorova V.G., Pavlov I.A. *Khimiya Ras-titel'nogo Syr'ya*, 2019, no. 4, pp. 199–205. DOI: 10.14258/jcprm.2019045126. (in Russ.).
15. Clemente R., Escolar Á., Bernal M.P. *Bioresource Technology*, 2006, vol. 97, no. 15, pp. 1894–1901. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.08.018.
16. Kabata-Pendias A., Pendias Kh. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh*. [Microelements in soils and plants]. Mos-cow, 1989, 439 p. (in Russ.).
17. Wajid K., Ahmad K., Khan Z.I., Nadeem M., Bashir H., Chen F., Ugulu I. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2020, vol. 104, no. 5, pp. 649–657. DOI: 10.1007/s00128-020-02841-w.
18. Kiselova N.D., Dvurechenskiy V.G. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Biologiya. Ekologiya*, 2021, vol. 37, pp. 89–100. DOI: 10.26516/2073-3372.2021.37.89. (in Russ.).
19. Litvinovich A.V., Lavrishchev A.V., Bure V.M., Pavlova O.Yu., Kovleva A.O., Khomyakov Yu.V. *Agrokhiimiya*, 2018, no. 8, pp. 52–63. DOI: 10.1134/S0002188118080100. (in Russ.).
20. Bakhitova A.R., Lapushkin V.M. *Plodorodiye*, 2018, no. 4 (103), pp. 18–21. (in Russ.).
21. *Vremennyy maksimal'no dopustimyy uroven' (MDU) sodержaniya nekotorykh khimicheskikh elementov i gossipola v kormakh dlya sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh i kormovykh dobavkakh* [Temporary maximum permissible level (MLL) for the content of certain chemical elements and gossypol in feed for farm animals and feed additives]. URL: <https://standartgost.ru/g/pkey-14293725464>. (in Russ.).
22. Il'in V.B. *Tyazhelye metally v sisteme pochva-rasteniye*. [Heavy metals in the soil-plant system]. Novosibirsk, 1991, 151 p. (in Russ.).
23. Qin F., Shan X., Wei B. *Chemosphere*, 2004, vol. 57, no. 4, pp. 253–263. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2004.06.010.
24. Kumar V., Pandita S., Sidhu G.P.S., Sharma A., Khanna K., Kaur P., Bali A.S., Setia R. *Chemosphere*, 2021, vol. 262, article 127810. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127810
25. Kuznetsova Ye.A., Gavrilina V.A., Zomitev V.Yu. *Tekhnologiya i tovarovedeniye innovatsionnykh pishchevykh produktov*, 2016, vol. 2(37), no. 4, pp. 30–34. (in Russ.).
26. Kosolapov V.M., Chuykov V.A., Khudyakova Kh.K., Kosolapova V.G. *Mineral'nyye elementy v kormakh i metody ikh analiza: monografiya*. [Mineral elements in feed and methods of their analysis: monograph]. Moscow, 2019, 272 p. (in Russ.).
27. Sibgatullina M.Sh., Valiyev V.S. *Sotsial'no-ekologicheskiye tekhnologii*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 325–342. DOI: 10.31862/2500-2961-2019-9-3-325-342. (in Russ.).
28. Khawla K., Bisma K., Enrique M., Mohamed H. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, vol. 170, pp. 530–537. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.12.025.
29. Galaktionov A.Yu., Karpukhin A.I. *Izvestiya TSKhA*, 2007, no. 3, pp. 47–56. (in Russ.).

Received December 16, 2022

Revised March 15, 2023

Accepted October 3, 2023

Сведения об авторах

Сырчина Надежда Викторовна – кандидат химических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории биомониторинга, nvms1956@mail.ru

Пилип Лариса Валентиновна – кандидат ветеринарных наук, доцент кафедры зоогигиены, физиологии и биохимии, pilip_larisa@mail.ru

Ашихмина Тамара Яковлевна – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории биомониторинга, ecolab2@gmail.com

Information about authors

Syrcina Nadezhda Viktorovna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Biomonitoring Research Laboratory, nvms1956@mail.ru

Pilip Larisa Valentinovna – Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor of the Department of Animal Hygiene, Physiology and Biochemistry, pilip_larisa@mail.ru

Ashikhmina Tamara Yakovlevna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Biomonitoring Research Laboratory, ecolab2@gmail.com