

4.1.5. МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА
(СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 631.41 (470.32)

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_2_81

EDN: HXIJXK

Влияние мелиорации фосфогипсом на экологическое состояние черноземов Каменной степи**Елена Владимировна Куликова¹, Надежда Сергеевна Горбунова^{2✉}, Юрий Алексеевич Куликов³**¹Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия²Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия³ООО «ИнфоБиС», Саратов, Россия²vilian@list.ru✉

Аннотация. Представлены результаты исследования, проведенного с целью изучения влияния применения фосфогипса совместно с минеральными удобрениями на общие химические и физико-химические показатели черноземов обыкновенных Каменной степи. Анализируемые почвы фонового участка имеют нейтральную реакцию почвенного раствора, довольно высокое содержание органического вещества, их ППК насыщен катионами кальция и магния. При регулярной распашке черноземов обыкновенных, а также систематическом применении удобрений и фосфогипса происходит некоторая трансформация почвенных свойств. Почвенный раствор приобретает более кислую реакцию за счет сопутствующего действия вносимых минеральных удобрений. Фосфогипс также содержит в своем составе кислые компоненты, которые влияют на реакцию среды. Распашка способствует усилению процессов минерализации органического вещества, а ежегодный вынос питательных элементов с урожаем не в полной мере возмещается вносимыми минеральными удобрениями. Все это приводит к некоторым потерям органического вещества, уменьшению содержания гумуса. Применение фосфогипса совместно с минеральными удобрениями способно сдерживать деградационные процессы. Однако при использовании средств химизации без должного научного обоснования, особенно совместно с фосфогипсом, отмечается определенное увеличение содержания такого тяжелого металла, как кадмий, а также повышение степени его подвижности и доступности растениям, что не только негативно сказывается на урожайности, но и приводит к загрязнению почвенного покрова, его частичной или даже полной деградации. Поскольку практически все средства химизации содержат определенную долю примесей, в составе которых присутствуют радиоактивные изотопы, а также тяжелые металлы, необходимо проводить регулярные исследования по определению содержания вредных ингредиентов в почвах и растениях. Мониторинговые исследования направлены как на повышение качества производимой сельхозпродукции, так и на стабилизацию почвенного плодородия.

Ключевые слова: мелиорация, фосфогипс, кадмий, полевой опыт, удобрения, Каменная степь, черноземы, экологическое состояние

Для цитирования: Куликова Е.В., Горбунова Н.С., Куликов Ю.А. Влияние мелиорации фосфогипсом на экологическое состояние черноземов Каменной степи // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 2(77). С. 81–89. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_2_81–89.

4.1.5. LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT
AND AGRICULTURAL PHYSICS (AGRICULTURAL SCIENCES)

Original article

Effect of reclamation with phosphogypsum on the ecological status of chernozem soils of the Kamennaya Steppe**Elena V. Kulikova¹, Nadezhda S. Gorbunova^{2✉}, Yuriy A. Kulikov³**¹Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia²Voronezh State University, Voronezh, Russia³InfoBiS LLC, Saratov, Russia²vilian@list.ru✉

Abstract. The authors present the results of research conducted in order to study application of phosphogypsum in combination with mineral fertilizers on the general chemical and physico-chemical parameters of ordinary chernozems of the Kamennaya Steppe. The studied soils in the background plot have a neutral reaction of soil solution with a fairly high content of organic matter, and their soil adsorption complex is saturated with calcium and magnesium cations. Regular plowing of ordinary chernozems, as well as systematic use of fertilizers and phosphogypsum cause some transformations of soil properties. The soil solution acquires a more acidic reaction

due to the concomitant action of the applied mineral fertilizers. Phosphogypsum also contains acidic components in its composition, which affect the reaction of the medium. Plowing contributes to the strengthening of processes of mineralization of organic matter, and the annual removal of nutrients with harvest is not fully compensated by the applied mineral fertilizers. All this leads to the loss of organic matter and a decrease in the humus content. Application of phosphogypsum in combination with mineral fertilizers can restrain this degradation and stabilize the content of organic matter. However, the use of chemicalization agents without sufficient scientific rationale, especially together with phosphogypsum, can cause an increase in the content of such heavy metal as cadmium, as well as its increased mobility and availability for crops, which has a negative impact on the yield and causes soil contamination with its partial or even complete degradation. Since almost all chemicals contain a certain proportion of impurities, it is necessary to conduct regular studies to determine the content of harmful ingredients in soils and plants. Monitoring studies are aimed both at improving the quality of produced agricultural products and at stabilizing the soil fertility.

Keywords: land reclamation, phosphogypsum, heavy metals, field experiment, fertilizers, Kamennaya Steppe, chernozem soil, ecological status

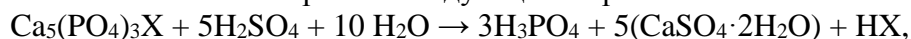
For citation: Kulikova E.V., Gorbunova N.S., Kulikov Yu.A. Effect of reclamation with phosphogypsum on the ecological status of chernozem soils of the Kamennaya Steppe. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(2):81-89. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_2_81-89.

Введение

Сельскохозяйственные производители в настоящее время активно применяют различные средства химизации, в том числе и в мелиоративных целях, для улучшения почвенных условий выращивания различных культур, а также для увеличения объемов производимой продукции. Любые мелиоративные работы направлены на оптимизацию состава обменных катионов почв, в результате чего происходит не только улучшение условий для роста и развития растений, но и стабилизация почвенно-поглощающего комплекса, повышение его устойчивости ко многим неблагоприятным факторам.

Присутствие катиона натрия в ППК, наоборот, приводит не только к ухудшению физического и физико-химического состояния почв [8, 10], но и отрицательно влияет на рост и развитие растений [2]. Данное положение было научно обосновано еще К.К. Гедройцем [11, 12], а в дальнейшем было использовано в качестве доказательства эффективности применения различных мелиоративных мероприятий, в том числе внесения фосфогипса [3, 10] совместно с минеральными удобрениями [13].

Фосфогипс представляет собой побочный продукт, образующийся в процессе производства фосфорной кислоты при обработке апатита серной кислотой [14]. Данный процесс схематически можно выразить следующим образом:



где X представлен различными примесями, в состав которых могут входить F, Cl, Br, OH, радиоактивные изотопы, а также тяжелые металлы, в том числе и Cd.

Доля кадмия в фосфогипсе невысока (по данным О.В. Дубровиной, она не превышает 0,45 мг/кг [1]), но постоянное применение этого мелиоранта совместно с минеральными удобрениями способно нарушить экологическое равновесие черноземов обыкновенных [4, 6, 7, 9].

Кадмий очень часто является сопутствующим элементом органических и минеральных удобрений, входит в их состав в качестве примеси. При этом его вынос растениями [16] и миграция по профилю гораздо выше, чем внесение. Создается так называемый отрицательный баланс кадмия [4], поэтому загрязнения почвенного покрова данным элементом не происходит.

Цель исследования состояла в изучении влияния применения фосфогипса совместно с различными дозами минеральных удобрений на общие химические и физико-химические показатели черноземов обыкновенных, а также на валовое содержание и обменные соединения кадмия в них и в растениеводческой продукции, выращиваемой в исследуемом многофакторном полевом опыте. Для получения достоверных данных перечисленные показатели изучались и на фоновом участке, на котором отсутствует какая-либо антропогенная нагрузка.

Место и методика исследований

Изучение влияния применения фосфогипса в качестве мелиоранта совместно с минеральными удобрениями на экологическое состояние черноземов проводили в 2017–2019 гг. в полевом опыте на территории Таловского района Воронежской области (Каменная степь).

Почвы представлены черноземом обыкновенным среднесильным среднегумусным тяжелосуглинистым на покровной карбонатной глине, реакция почвенного раствора – близкая к нейтральной.

Опыт заложен методом расщепленных делянок (расположение систематическое), повторность – четырехкратная.

Программу исследований выполняли в десятипольном севообороте, представленном следующими культурами: горох – озимая пшеница – сахарная свекла – ячмень – кукуруза – горох – тритикале – просо – ячмень – кукуруза.

Первым фактором опыта рассматривали эффективность внесения элементов минерального питания (суперфосфат двойной гранулированный, аммиачная селитра и 40% калийная соль) по вариантам: естественный уровень (удобрения не вносились), повышенный (в запас $N_{200}P_{300}K_{300}$) и высокий (в запас $N_{300}P_{600}K_{600}$).

Вторым фактором опыта рассматривали эффективность использования фосфогипса при разных уровнях удобрения севооборота. Схема сочетала два варианта – с внесением мелиоранта и без внесения. Внесение 3 т/га фосфогипса осуществляли 1 раз в ротацию севооборота [1].

Почвенные образцы отбирали буром методом «конверта» с глубины 0–20, 40–50 и 70–80 см и потенциометрическим методом определяли рН водной суспензии.

Также определяли:

а) в безкарбонатных образцах:

- гидролитическую кислотность – методом Каппена;

- содержание органического вещества с пересчетом его на гумус – методом И.В.

Тюрина в модификации В.Н. Симакова;

б) в некарбонатных и незасоленных почвах, а также в карбонатных почвах:

- содержание обменных катионов кальция, магния – методом Тюрина;

- обменный натрий – методом Антипова-Каратаева и Мамаевой.

Для определения валового содержания кадмия предварительно подготовленную почву озоляли в муфельной печи при температуре 505 °С. Далее прокаленную почву обрабатывали азотной кислотой (HNO_3) в соотношении 1:1, содержимое колб кипятили в течение 10 минут. После охлаждения до комнатной температуры к содержимому колб приливали концентрированную (30%) перекись водорода (H_2O_2) и вновь кипятили в течение 10 минут. Остывшее до комнатной температуры содержимое колб фильтровали через плотный фильтр (синяя лента). Полученный фильтрат помещали в мерную колбу вместимостью 50 мл и доливали до метки дистиллированную воду. Полученная вытяжка использовалась для определения валового содержания кадмия.

По мнению И.О. Плехановой, О.А. Золотаревой, И.Д. Тарасенко, А.С. Яковлева, валовое содержание тяжелых металлов не позволяет судить об экологическом статусе почвенного покрова, а также об их миграции в растительные организмы [5]. Для этого необходимы данные о подвижных соединениях, доступных для растений, поэтому обменные соединения кадмия определяли в вытяжке ацетатно-аммонийного буфера (ААБ, рН = 4,8) при соотношении почва : раствор, равном 1:10 [15].

Содержание Cd определяли в зерне тритикале (*Triticale*) – сорт Тальва 100, предварительно озолив растительный материал с помощью нагревания в муфельной печи до температуры 500 °С и обработав образец 2 мл этилового спирта (C_2H_5OH). Для полного озоления использовали также концентрированную перекись водорода (H_2O_2), которую постепенно по каплям добавляли в качестве дополнительного окислителя.

Количественное определение Cd в полученных вытяжках проводили на атомно-абсорбционном спектрометре Квант-З.ЭТА, чувствительность определения – 0,01 мкг/л, точность – 4%.

Вариационно-статистическую обработку данных проводили с использованием пакета программ STATISTICA 10 и Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

Черноземы обыкновенные фонового участка, которые не используются в сельскохозяйственном производстве, имеют близкую к нейтральной реакцию среды, pH составляет $7,01 \pm 0,12$. Вниз по профилю данный показатель увеличивается в сторону подщелачивания и достигает значения 8,15. Данное явление объясняется присутствием в почвенном растворе карбонатов почвообразующей породы. В верхнем горизонте отмечаются невысокие показатели гидролитической кислотности, которые не превышают $0,25 \pm 0,09$ мг-экв/100 г почвы. Вниз по профилю водород гидролитической кислотности исчезает полностью, но появляются катионы натрия, максимальное содержание которых достигается в почвообразующей породе и составляет 0,1 мг-экв/100 г почвы. Источником поглощенного катиона натрия в образцах почвы исследуемой территории являются почвообразующие породы. В засушливые годы натрий поднимается довольно высоко и способен насыщать верхние горизонты черноземов.

Почвенно-поглощающий комплекс исследуемых черноземов насыщен катионами кальция до $39,5 \pm 3,14$ мг-экв/100 г почвы, содержание обменного магния в исследуемых почвах достигает $7,1 \pm 1,01$ мг-экв/100 г почвы, содержание гумуса в верхнем горизонте – $6,89 \pm 1,14\%$. Почвы диагностируются как среднегумусные, органическое вещество накапливается в верхнем гумусовом горизонте за счет огромной биомассы лугово-степной растительности, которая ежегодно поступает в биологический круговорот и накапливается в виде органического вещества черноземов. При распашке черноземов данный процесс нарушается, поскольку выращиваемая сельскохозяйственная продукция выносит питательные элементы с урожаем, при этом полноценного восстановления органического вещества не происходит. Усиленная минерализация органического вещества приводит к потере гумуса до уровня 5,4%, черноземы трансформируются в малогумусные. Вниз по почвенному профилю как на фоновом участке, так и на черноземах полевого опыта происходит постепенное снижение содержания гумуса до 0,1%. В почвообразующей породе органическое вещество исчезает практически полностью.

Черноземы обыкновенные полевого опыта по сравнению с фоновым участком имеют более кислые показатели pH водной суспензии ($6,0 \pm 0,9$). Процессы подкисления черноземов обыкновенных в результате применения удобрений описывают в своих работах О.В. Дубровина, Ю.И. Чевердин, И.Ф. Поротиков [1, 13].

На вариантах опыта, где вносился фосфогипс, отмечается нейтральная реакция почвенного раствора (табл. 1). Фосфогипс в своем составе содержит кислые компоненты, обусловленные присутствием серы, вследствие чего происходит подкисление почвенного раствора. В данном опыте такое явление не отмечается, поскольку сера является необходимым элементом для роста и развития растений, а в условиях интенсивного применения минеральных удобрений отмечается еще большее потребление и других почвенных компонентов, в том числе и серы. Вниз по профилю всех вариантов опыта происходит подщелачивание $pH_{\text{водн}}$, вследствие влияния карбонатов почвенного раствора (табл. 1). Гидролитическая кислотность является pH-зависимой величиной и присутствует только в слое черноземов 0–20 см на вариантах без внесения фосфогипса. Максимальное значение гидролитической кислотности составляет $0,35 \pm 0,09$ мг-экв/100 г почвы.

Таблица 1. Значение pH водной суспензии в черноземах обыкновенных Каменной степи в условиях полевого опыта (среднее за 3 года)

Уровень обеспеченности почв элементами питания	Варианты опыта	Слой почвы					
		0–20 см		40–50 см		70–80 см	
		$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$					
		I	II	I	II	I	II
Естественный	Контроль	6,0 ± 0,19	7,2 ± 0,17	7,3 ± 0,11	7,4 ± 0,07	7,6 ± 0,18	7,7 ± 0,13
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	7,1 ± 0,11	7,3 ± 0,15	7,4 ± 0,09	7,5 ± 0,09	7,7 ± 0,11	7,7 ± 0,14
Повышенный	Контроль	7,1 ± 0,13	7,3 ± 0,11	7,4 ± 0,12	7,5 ± 0,11	7,6 ± 0,12	7,8 ± 0,15
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	7,2 ± 0,17	7,3 ± 0,20	7,5 ± 0,14	7,5 ± 0,15	7,8 ± 0,09	7,9 ± 0,14
Высокий	Контроль	7,2 ± 0,21	7,4 ± 0,13	7,6 ± 0,17	7,7 ± 0,13	7,9 ± 0,11	8,1 ± 0,11
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	7,2 ± 0,17	7,5 ± 0,14	7,6 ± 0,16	7,7 ± 0,14	7,7 ± 0,17	8,0 ± 0,12
НСР ₀₅		0,16		0,13		0,09	

Примечание: здесь и далее в таблицах варианты I и II – соответственно без применения и с применением фосфогипса; \bar{x} – среднее арифметическое, мг/кг; $s_{\bar{x}}$ – ошибка среднего арифметического.

Интенсивное использование черноземов при выращивании различных сельскохозяйственных культур приводит к усиленной минерализации органического вещества и потере содержания гумуса. Так, в условиях полевого опыта без внесения минеральных удобрений и мелиоранта содержание гумуса падает до $5,4 \pm 0,11\%$ (табл. 2). Вместе с тем применение различных доз минеральных удобрений сдерживает описанный процесс и способствует стабилизации органического вещества. Содержание гумуса сохраняется в среднем на уровне $6,7\%$. Внесение фосфогипса не оказывает влияния как на процессы накопления, так и на процессы минерализации органического вещества. Вниз по профилю черноземов происходит постепенное снижение количества гумуса, в почвообразующей породе отмечается его минимальное содержание на уровне $0,05\%$.

Таблица 2. Содержание гумуса в почве Каменной степи в условиях полевого опыта (среднее за 3 года), %

Уровень обеспеченности почв элементами питания	Варианты опыта	Слой почвы					
		0–20 см		40–50 см		70–80 см	
		$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$					
		I	II	I	II	I	II
Естественный	Контроль	5,4 ± 0,11	5,5 ± 0,14	4,2 ± 0,12	4,2 ± 0,11	1,4 ± 0,09	1,4 ± 0,12
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	5,8 ± 0,09	5,8 ± 0,15	4,2 ± 0,18	4,3 ± 0,13	1,5 ± 0,10	1,6 ± 0,11
Повышенный	Контроль	6,1 ± 0,07	6,2 ± 0,21	4,7 ± 0,16	4,7 ± 0,14	1,6 ± 0,11	1,7 ± 0,09
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	6,6 ± 0,09	6,6 ± 0,18	4,7 ± 0,17	4,8 ± 0,09	1,7 ± 0,09	1,7 ± 0,08
Высокий	Контроль	6,0 ± 0,10	6,0 ± 0,19	5,0 ± 0,09	5,0 ± 0,08	1,8 ± 0,10	1,8 ± 0,09
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	6,7 ± 0,11	6,7 ± 0,17	5,1 ± 0,10	5,1 ± 0,10	1,9 ± 0,12	1,9 ± 0,11
НСР ₀₅		0,21		0,19		0,20	

Обменные катионы Ca²⁺ и Mg²⁺ входят в состав почвенно-поглощающего комплекса, образованного преимущественно коллоидами органо-минерального типа, особенно катион Ca²⁺. Вследствие этого их максимальное содержание отмечается на вариантах опыта с наиболее высоким содержанием гумуса (табл. 3).

Таблица 3. Содержание обменных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в почве Каменной степи в условиях полевого опыта (среднее за 3 года), мг-экв/100 г почвы

Уровень обеспеченности почв элементами питания	Варианты опыта	Слой почвы					
		0–20 см		40–50 см		70–80 см	
		$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$					
		I	II	I	II	I	II
Естественный	Контроль	37,9/6,9	38,2/6,9	30,4/6,0	30,5/6,4	24,2/5,9	24,6/5,9
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	38,0/7,2	39,0/7,3	31,2/6,1	31,0/6,5	24,4/6,4	24,9/6,5
Повышенный	Контроль	38,5/7,2	39,5/7,3	32,4/6,0	31,8/6,2	26,4/6,3	28,0/6,4
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	38,5/7,3	39,4/7,0	32,4/6,1	31,9/6,3	27,0/6,5	28,4/6,7
Высокий	Контроль	39,7/7,7	39,6/7,5	33,5/6,2	33,3/6,4	28,8/6,9	29,0/6,8
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	39,8/7,6	39,8/7,6	34,7/6,2	33,6/6,4	28,8/6,9	28,9/6,9
НСР ₀₅		0,30		0,24		0,21	

Примечание: числитель – Ca^{2+} , знаменатель – Mg^{2+} .

Вслед за уменьшением содержания органического вещества вниз по почвенному профилю происходит снижение и данных катионов. Что касается обменного Na^+ , то этот катион ведет себя иначе и не подчиняется указанной зависимости. Он довольно равномерно распределен по почвенному профилю на уровне 0,05–0,07 мг-экв/100 г почвы, но обнаруживаться начинает ниже глубины 70 см, на вариантах опыта без применения мелиоранта. Таким образом, внесение фосфогипса действительно способствует вытеснению обменного Na^+ из почвенно-поглощающего комплекса.

Внесение мелиоранта улучшает состояние ППК, а научно обоснованное внесение минеральных удобрений препятствует процессам минерализации органического вещества. Все это способствует поддержанию естественного экологического баланса в почвенных процессах и сохранению плодородия исследуемых почв. Валовое содержание Cd в верхнем 0–20 см слое не превышает $0,45 \pm 0,03$ мг/кг (табл. 4).

Таблица 4. Валовое содержание и обменные соединения Cd в почве Каменной степи по вариантам опыта (среднее за 3 года), глубина 0–20 см, мг/кг

Уровни обеспеченности почвы элементами питания	Варианты опыта	Валовое содержание		Обменные соединения	
		$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$			
		I	II	I	II
Естественный	Контроль	$0,30 \pm 0,07$	$0,41 \pm 0,14$	$0,06 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,04$
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	$0,25 \pm 0,07$	$0,45 \pm 0,03$	$0,07 \pm 0,03$	$0,08 \pm 0,03$
Повышенный	Контроль	$0,30 \pm 0,06$	$0,34 \pm 0,09$	$0,09 \pm 0,02$	$0,16 \pm 0,01$
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	$0,28 \pm 0,08$	$0,29 \pm 0,07$	$0,13 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,01$
Высокий	Контроль	$0,30 \pm 0,09$	$0,36 \pm 0,09$	$0,11 \pm 0,05$	$0,13 \pm 0,05$
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	$0,28 \pm 0,10$	$0,28 \pm 0,05$	$0,13 \pm 0,06$	$0,14 \pm 0,06$
НСР ₀₅		0,16		0,03	

Следует отметить, что внесение фосфогипса достоверно увеличивает содержание кадмия в почвенном покрове, причем явление наблюдается при естественном уровне обеспеченности элементами минерального питания. Что касается повышенного и высокого фонов, то валовое содержание металла не превышает $0,36 \pm 0,09$ мг/кг. Это объясняется тем, что при данном уровне удобрённости растения наиболее интенсивно потребляют элементы минерального питания, в том числе и незначительные дозы Cd. Предположение подтверждается результатами, полученными при исследовании зерна тритикале, выращиваемой на данном варианте опыта. Согласно данным таблицы 5, наибольшее количество Cd содержится в зерне при высоком уровне удобрённости.

Количество обменных соединений кадмия мало и незначительно изменяется в пределах опыта, но тенденция его накопления на вариантах опыта при совместном вне-

сении удобрений и мелиоранта сохраняется (табл. 4). Следует также отметить, что внесение удобрений и фосфогипса способствуют увеличению степени подвижности Cd, что делает его более доступным растениям и способным мигрировать в сопредельные среды.

Согласно полученным данным, валовое содержание кадмия в почвах опытного участка не превышает ПДК = 1 мг/кг. Количество обменных соединений элемента в черноземе обыкновенном не превышает верхнего значения ПДК = 0,5 мг/кг, но в условиях повышенного и высокого уровня обеспеченности почв элементами питания оно достигает $0,18 \pm 0,01$ мг/кг, что выше нижнего уровня ПДК = 0,1 мг/кг [5].

Концентрация кадмия в зерне исследуемых образцов колеблется от $0,1 \pm 0,04$ до $0,42 \pm 0,03$ мг/кг сухого вещества. На содержание Cd в зерне растениеводческой продукции оказывают влияние условия выращивания. Так, при внесении фосфогипса происходит накопление Cd в зерне, это вызвано интенсивным поступлением металла в растительные организмы вследствие возрастания подвижности Cd с 17,1% на варианте естественного уровня обеспеченности до 51,1% на вариантах совместного использования удобрений и мелиоранта.

Таблица 5. Содержание Cd в зерне тритикале в условиях полевого опыта в Каменной степи, мг/кг сухого вещества

Уровни обеспеченности почвы элементами питания	Варианты опыта	Содержание Cd	
		I	II
Естественный	Контроль	$0,10 \pm 0,04$	$0,24 \pm 0,02$
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	$0,19 \pm 0,05$	$0,14 \pm 0,02$
Повышенный	Контроль	$0,27 \pm 0,03$	$0,34 \pm 0,03$
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	$0,31 \pm 0,02$	$0,27 \pm 0,02$
Высокий	Контроль	$0,34 \pm 0,06$	$0,42 \pm 0,03$
	N ₆₀ P ₆₀ K ₄₀	$0,39 \pm 0,06$	$0,35 \pm 0,03$

ПДК содержания Cd в растениеводческой продукции составляют 0,2–0,8 мг/кг. В зерне тритикале в условиях повышенного и высокого уровня обеспеченности почв элементами минерального питания содержится от 0,27 до 0,42 мг/кг Cd, что превышает нижний предел ПДК. Кроме того, следует отметить, что доступность Cd растительным организмам значительно выше, чем его переход в вытяжку ацетатно-аммонийного буфера [17].

Выводы

Исследуемые черноземы обыкновенные фонового участка имеют нейтральную реакцию почвенного раствора, довольно высокое содержание органического вещества, их почвенно-поглощающий комплекс насыщен катионами кальция и магния. В нижней части почвенного профиля обнаруживаются катионы натрия в незначительном количестве. При регулярной распашке данных почв, а также систематическом применении удобрений и фосфогипса происходит некоторая трансформация почвенных свойств.

Черноземы опытного участка имеют более кислую реакцию почвенного раствора в верхних горизонтах за счет сопутствующего действия вносимых минеральных удобрений. Кроме того, фосфогипс в своем составе также содержит кислые компоненты, которые влияют на реакцию среды.

Распашка способствует усилению процессов минерализации органического вещества, а ежегодный вынос питательных элементов с урожаем сельскохозяйственных культур не в полной мере возмещается вносимыми минеральными удобрениями. Все это приводит к некоторым потерям органического вещества и уменьшению процентного содержания гумуса. Как следствие, черноземы трансформируются в малогумусные.

Применение фосфогипса совместно с минеральными удобрениями способно сдерживать деградационные процессы и стабилизировать содержание органического вещества. В составе обменных катионов преобладает катион кальция.

При использовании средств химизации без должного научного обоснования, особенно совместно с фосфогипсом, отмечается определенное увеличение содержания такого тяжелого металла, как кадмий, а также повышение степени его подвижности и

доступности растениям, что не только негативно сказывается на урожайности, но и приводит к загрязнению почвенного покрова, его частичной или даже полной деградации. Поскольку практически все средства химизации содержат определенную долю примесей, в составе которых присутствуют радиоактивные изотопы, а также тяжелые металлы, то необходимо проводить регулярные исследования по определению содержания вредных ингредиентов в почвах и растениях.

Мониторинговые исследования направлены как на повышение качества производимой сельхозпродукции, так и на стабилизацию почвенного плодородия.

Список источников

1. Дубровина О.В. Влияние удобрений и фосфогипса на урожайность, качество зерна кукурузы и плодородие чернозема обыкновенного в условиях юго-востока ЦЧЗ: автореферат дис. ... канд. с.-х. наук. Каменная степь, 2004. 16 с.
2. Еремченко О.З., Четина О.А. Влияние NaCl-засоления на содержание катионов Na⁺, K⁺, Ca²⁺ в листьях злаков при разной реакции почвенной среды [Электронный ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. 2022. № 1(49). Порядковый номер: 7. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/1/st_107.pdf.
3. Конарбаева Г.А., Якименко В.Н. Влияние внесения фосфогипса и фосфорных удобрений на фонд фтора в агроценозах лесостепи западной Сибири // Плодородие. 2021. № 5(122). С. 109–112. DOI: 10.25680/S19948603.2021.122.27.
4. Лукин С.В., Селюкова С.В. Экологическая оценка содержания кадмия в почвах и сельскохозяйственных растениях юго-западной части Центрально-Черноземных областей России // Почвоведение. 2018. №10-Приложение. С. S3–S9. DOI: 10.1134/S0032180X18120079.
5. Плеханова И.О., Золотарева О.А. Экологическое нормирование состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами // Агрохимия. 2020. № 10. С. 79–88. DOI: 10.31857/S0002188120100099.
6. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Влияние длительного применения средств химизации на содержание фракций Cd, Pb, Cu и Zn в слоях чернозема выщелоченного тяжелосуглинистого // Агрохимия. 2022. № 5. С. 47–55. DOI: 10.31857/S0002188122050076.
7. Романенко А.А., Баршадская С.И., Гукалов В.В. и др. Агроэкологическая оценка плодородия обыкновенных черноземов [Электронный ресурс] // АгроЭкоИнфо. Электронный научно-производственный журнал. 2022. № 2(50). Порядковый номер: 14. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st_220.pdf.
8. Савич В.И., Седых В.А., Сорокин А.Е. и др. Агроэкологическая оценка засоления почв [Электронный ресурс] // АгроЭкоИнфо. Электронный научно-производственный журнал. 2022. № 2(50). Порядковый номер: 2. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st_206.pdf.
9. Сычев В.Г. Влияние длительного применения минеральных и органических удобрений на основные показатели различных типов почв // Плодородие. 2021. № 4(121). С. 3–5. DOI: 10.25680/S19948603.2021.121.01.
10. Сычев В.Г., Гречишкина Ю.И., Егоров В.П., Матвиенко А.В. Проблемы гипсования солонцовых почв в Ставропольском крае // Плодородие. 2021. № 5(122). С. 37–43. DOI: 10.25680/S19948603.2021.122.10.
11. Сычев В.Г., Шафран С.А. К.К. Гедройц – выдающийся ученый почвовед и агрохимик // Плодородие. 2022. № 2(125). С. 74–75. DOI: 10.25680/S19948603.2022.125.18.
12. Торшин С.П., Лапушкин В.М. Создатель учения о поглотительной способности почв (к 150-летию со дня рождения К.К. Гедройца) // Агрохимический вестник. 2022. № 2. С. 78–80. DOI: 10.24412/1029-2551-2022-2-015.
13. Чевердин Ю.И., Поротиков И.Ф. Изменение реакции среды чернозема обыкновенного под влиянием возрастающих доз минеральных удобрений // Агрохимия. 2021. № 8. С. 17–26. DOI: 10.31857/S0002188121080068.
14. Чевычелов А.П., Захарова О.Г. Фосфатное сырье Якутии и возможности его использования в качестве удобрений и мелиорантов // Агрохимический вестник. 2021. № 5. С. 80–83. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-014.
15. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Burachevskaya M.V. et al. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil // MethodsX. 2018. Vol. 5. Pp. 217–226. DOI: 10.1016/j.mex.2018.02.007.
16. Neaman A., Robinson B., Minkina T.M. et al. Feasibility of metal(loid) phytoextraction from polluted soils: the need for greater scrutiny // Environmental Toxicology and Chemistry. 2020. Vol. 8(39). Pp. 1469–1471. DOI: 10.1002/etc.4787.
17. Vodyanitskii Y., Minkina T., Bauer T. Method for calculation the selectivity of reagents extracting heavy metals mobile compounds from soil // Applied Geochemistry. 2020. Vol. 116. Pp. 104570. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104570.

References

1. Dubrovina O.V. Vliyanie udobrenij i fosfogipsa na urozhajnost', kachestvo zerna kukuruzy i plodorodie chernozema obyknovennogo v usloviyakh yugo-vostoka CChZ [Effect of fertilizers and phosphogypsum on the yield, quality of corn grain and the fertility of ordinary chernozem in the conditions of the southeast of the Central Chernozem Zone]: avtoreferat dissertatsii ... kandidata sel'skokhozyajstvennykh nauk = Abstract of Candidate Dissertation in Agricultural Sciences. Kamennaya step; 2004. 16 p. (In Russ.).

2. Eremchenko O.Z., Chetina O.A. Vliyanie NaCl-zasoleniya na sodержanie kationov Na⁺, K⁺, Ca²⁺ v list'yakh zlakov pri raznoy reaktivnosti pochvennoy sredy [Effect of NaCl salinization on Na⁺, K⁺, Ca²⁺ cations in cereal leaves in different soil reactions]. *AgroEcolInfo. Elektronnyy nauchno-proizvodstvennyy zhurnal = AgroEcolInfo. Electronic Research and Production Journal*. 2022;1(49):7. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/1/st_107.pdf. (In Russ.).
3. Konarbaeva G.A., Yakimenko V.N. Vliyanie vneseniya fosfogipsa i fosfornykh udobreniy na fond ftora v agrotsenozakh lesostepi zapadnoy Sibiri [Influence of application of phosphogypse and phosphoric fertilizers on the foundation of fluorine fund in agrocenoses of the forest-steppe of Western Siberia]. *Plodorodie = Plodorodie*. 2021;5(122):109-112. DOI: 10.25680/S19948603.2021.122.27. (In Russ.).
4. Lukin S.V., Selyukova S.V. Ekologicheskaya otsenka sodержaniya kadmiya v pochvakh i sel'skokhozyajstvennykh rasteniyakh yugo-zapadnoy chasti Central'no-Chernozemnykh oblastey Rossii [Ecological assessment of the content of cadmium in soils and crops in southwestern regions of the Central Chernozem Zone of Russia]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2018;10:S3-S9. DOI: 10.1134/S0032180X18120079. (In Russ.).
5. Plekhanova I.O., Zolotareva O.A. Ekologicheskoe normirovanie sostoyaniya pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami [Ecological regulation of the state of soils contaminated with heavy metals]. *Agrokimiya = Agricultural Chemistry*. 2020;10:79-88. DOI: 10.31857/S0002188120100099. (In Russ.).
6. Pugaev S.V., Prokina L.N. Vliyanie dlitel'nogo primeneniya sredstv khimizatsii na sodержanie fraktsiy Cd, Pb, Cu i Zn v sloyakh chernozema vyshhelochennogo tyazhelosuglinistogo [Effect of prolonged use of chemicalization agents on the content of Cd, Pb, Cu and Zn fractions in layers of leached heavy loamy chernozem]. *Agrokimiya = Agricultural Chemistry*. 2022;5:47-55. DOI: 10.31857/S0002188122050076. (In Russ.).
7. Romanenko A.A., Barshadskaya S.I., Gukalov V.V. et al. Agroekologicheskaya otsenka plodorodiya obyknovennykh chernozemov [Agroecological assessment of fertility of ordinary chernozems]. *AgroEcolInfo. Elektronnyy nauchno-proizvodstvennyy zhurnal = AgroEcolInfo. Electronic Research and Production Journal*. 2022;2(50):14. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st_220.pdf. (In Russ.).
8. Savich V.I., Sedykh V.A., Sorokin A.E. et al. Agroekologicheskaya otsenka zasoleniya pochv [Agroecological assessment of soil salinity]. *AgroEcolInfo. Elektronnyy nauchno-proizvodstvennyy zhurnal = AgroEcolInfo. Electronic Research and Production Journal*. 2022;2(50):2. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st_206.pdf. (In Russ.).
9. Sychev V.G. Vliyanie dlitel'nogo primeneniya mineral'nykh i organicheskikh udobreniy na osnovnye pokazateli razlichnykh tipov pochv [Effects of long-term use of mineral and organic fertilizers on key indicators of different types of soils]. *Plodorodie = Plodorodie*. 2021;4(121):3-5. DOI: 10.25680/S19948603.2021.121.01. (In Russ.).
10. Sychev V.G., Grechishkina Yu.I., Egorov V.P., Matvienko A.V. Problemy gipsovaniya solontsovykh pochv v Stavropol'skom krae [Problems of gypsum formation of saline soils in Stavropol Territory]. *Plodorodie = Plodorodie*. 2021;5(122):37-43. DOI: 10.25680/S19948603.2021.122.10. (In Russ.).
11. Sychev V.G., Shafran S.A. K.K. Gedrojt – vydayushchiysya uchenyj pochvoved i agrokhimik [K.K. Gedrojt is an outstanding researcher in soil science and agrochemistry]. *Plodorodie = Plodorodie*. 2022;2(125):74-75. DOI: 10.25680/S19948603.2022.125.18.
12. Torshin S.P., Lapushkin V.M. Sozdatel' ucheniya o poglotitel'noy sposobnosti pochv (k 150-letiyu so dnya rozhdeniya K.K. Gedrojtsa) [Creator of the doctrine of the absorptive capacity of soils (on the 150th anniversary of birth of K.K. Gedrojt)]. *Agrokhimicheskij vestnik = Agrochemical Bulletin*. 2022;2:78-80. DOI: 10.24412/1029-2551-2022-2-015. (In Russ.).
13. Cheverdin Yu.I., Porotikov I.F. Izmenenie reaktivnosti sredy chernozema obyknovennogo pod vliyaniem vozrastayushchikh doz mineral'nykh udobreniy [Changes in the reaction of the medium ordinary chernozem under the influence of increasing doses of mineral fertilizers]. *Agrokimiya = Agricultural Chemistry*. 2021;8:17-26. DOI: 10.31857/S0002188121080068. (In Russ.).
14. Chevychelov A.P., Zakharova O.G. Fosfatnoe syr'e Yakutii i vozmozhnosti ego ispol'zovaniya v kachestve udobreniy i meliorantov [Phosphate raw materials of Yakutia and possibility of its use as fertilizers and ameliorants]. *Agrokhimicheskij vestnik = Agrochemical Bulletin*. 2021;5:80-83. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-014. (In Russ.).
15. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Burachevskaya M.V. et al. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil. *MethodsX*. 2018;5:217-226. DOI: 10.1016/j.mex.2018.02.007.
16. Neaman A., Robinson B., Minkina T.M. et al. Feasibility of metal(loid) phytoextraction from polluted soils: the need for greater scrutiny. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2020;8(39):1469-1471. DOI: 10.1002/etc.4787.
17. Vodyanitskii Y., Minkina T., Bauer T. Method for calculation the selectivity of reagents extracting heavy metals mobile compounds from soil. *Applied Geochemistry*. 2020;116:104570. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104570.

Информация об авторах

Е.В. Куликова – кандидат биологических наук, доцент кафедры мелиорации, водоснабжения и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», melior-agronomy@inbox.ru.

Н.С. Горбунова – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и земельных ресурсов ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», vilian@list.ru.

Ю.А. Куликов – консультант, ООО «ИнфоБиС», juriy.kulikov@yandex.ru.

Information about the authors

E.V. Kulikova, Candidate of Biological Sciences, Docent, the Dept. of Land Reclamation, Water Supply and Geodesy, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, melior-agronomy@inbox.ru.

N.S. Gorbunova, Candidate of Biological Sciences, Docent, the Dept. of Ecology and Land Resources, Voronezh State University, vilian@list.ru.

Yu.A. Kulikov, Consultant, InfoBiS LLC, juriy.kulikov@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 16.06.2023; принята к публикации 20.06.2023.

The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 16.06.2023; accepted for publication 20.06.2023.

© Куликова Е.В., Горбунова Н.С., Куликов Ю.А., 2023