

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

Научная статья

УДК 631:631.9:631.95

doi: 10.55170/19973225_2023_8_2_10

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОСФОГИПСА В ПОВЫШЕНИИ ПРОДУКТИВНОСТИ КАРТОФЕЛЯ ПРИ ОРОШЕНИИ

Наталья Ивановна Аканова¹, Наталья Михайловна Троц^{2✉}, Михаил Николаевич Можаренко³, Наталья Владимировна Боровкова⁴

¹ФГБНУ «ВНИИ агрохимии имени Д. Н. Прянишникова», Москва, Россия

^{2, 4}Самарский государственный аграрный университет, Усть-Кинельский, Самарская область, Россия

³АО «АПАТИТ», Москва, Россия

¹info@vniia-pr.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3153-6740>

²troz_shi@mail.ru[✉], <http://orcid.org/0000-0003-3774-1235>

³mozarenko@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9607-3228>

⁴isslab@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1215-7067>

Цель исследований – разработка приемов повышения продуктивности картофеля и минимализации содержания тяжелых металлов в продукции за счет внесения фосфогипса на черноземе солонцеватом южной агроклиматической зоны Самарской области. Одна из задач агропромышленного комплекса – обеспечение продовольственной безопасности, на решение которой могут влиять такие факторы, как рациональное, агроэкономически эффективное и экологически безопасное использование природных ресурсов, в том числе фосфатного сырья. Исследование возможности применения побочного продукта производства фосфорной кислоты – фосфогипса – в сельскохозяйственном производстве, способствующего повышению плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур, представляется актуальным. Внесение фосфогипса в сочетании с минеральными удобрениями способствует повышению продуктивности картофеля. Использование фосфогипса в системе удобрения картофеля позволило получить прибавку урожая клубней в пределах 25-26,8% – 12,1-13,3 т/га при сборах на уровне 48,4-49,6 т/га. Максимальный урожай товарного картофеля получен в варианте с внесением 6,0 т/га фосфогипса. Применение фосфогипса способствует улучшению кислотно-основных свойств, кальциевого и серного режима почв. Применение фосфогипса способствует снижению валового содержания в почве свинца на 28-63%, цинка на 5,5-22% и железа на 7,5-36% по сравнению с контролем. Концентрация других анализируемых токсикантов, в том числе ртути, мышьяка и кадмия, практически не изменяется и находится значительно ниже ПДК и ОДК, что позволяет сделать вывод об экологической чистоте используемых препаратов, а также о возможности использовать фосфогипс в качестве микроудобрения.

Ключевые слова: фосфогипс, плодородие почв, урожайность, черноземы, картофель, орошение.

Для цитирования: Аканова Н. И., Троц Н. М., Можаренко М. Н., Боровкова Н. В. Агроэкологическая эффективность фосфогипса в повышении продуктивности картофеля при орошении // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. №2. С. 10–17. doi: 10.55170/19973225_2023_8_2_10.

AGROECOLOGICAL EFFICIENCY OF PHOSPHOGYPSUM IN INCREASING POTATO PRODUCTIVITY DURING IRRIGATION

Natalya I. Akanova¹, Natalya M. Trots^{2✉}, Mikhail N. Mozharenskiy³, Natalya V. Borovkova⁴

¹All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D. N. Pryanishnikov, Moscow, Russia

^{2, 4}Samara State Agrarian University, Ust-Kinelsky, Samara Region, Russia

³Joint Stock Company «APATIT», Moscow, Russia

¹info@vniia-pr.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3153-6740>

²troz_shi@mail.ru[✉], <http://orcid.org/0000-0003-3774-1235>

³mozarenko@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9607-3228>

⁴isslab@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1215-7067>

The purpose of the research is to develop methods for increasing potato productivity and minimizing the content of heavy metals in products by introducing phosphogypsum on saline chernozem of the southern agro-climatic zone of the Samara region. One of the tasks of the agro-industrial complex is to ensure food security, the solution of which can be influenced by such factors as rational, agroeconomically efficient and environmentally safe use of natural resources, including phosphate raw materials. The study of the possibility of using a by-product of the production of phosphoric acid – phosphogypsum – in agricultural production, contributing to increased soil fertility and crop yields, seems relevant. The introduction of phosphogypsum in combination with mineral fertilizers helps to increase the productivity of potatoes. The use of phosphogypsum in the potato fertilizer system made it possible to obtain an increase in the yield of tubers in the range of 25-26.8% – 12.1-13.3 t/ha with collections at the level of 48.4-49.6 t/ha. The maximum yield of commercial potatoes was obtained in the variant with the introduction of 6.0 t/ha of phosphogypsum. The use of phosphogypsum contributes to the improvement of acid-base properties, calcium and sulfur regime of soils. The use of phosphogypsum helps to reduce the gross content of lead in the soil by 28-63%, zinc by 5.5-22% and iron by 7.5-36% compared to the control. The concentration of other analyzed toxicants, including mercury, arsenic and cadmium, practically does not change and is significantly lower than the MPC and UEC, which allows us to conclude about the ecological purity of the drugs used, as well as the possibility of using phosphogypsum as a microfertilizer.

Keywords: phosphogypsum, soil fertility, productivity, chernozems, potatoes, irrigation.

For citation: Akanova, N. I., Trots, N. M., Mozharenskiy, M. N. & Borovkova, N. V. (2023). Agroecological efficiency of phosphogypsum in increasing potato productivity during irrigation. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara State Agricultural Academy)*, 2, 10–17 (in Russ.). doi: 10.55170/19973225_2023_8_2_10.

В настоящее время в сложившихся сложных экономических условиях одной из глобальных проблем в агропромышленном комплексе является проблема обеспечения продовольственной безопасности, на решение которой могут влиять такие факторы, как рациональное, агроэкономически эффективное и экологически безопасное использование природных ресурсов, в том числе фосфатного сырья. В этой связи исследование возможности применения побочного продукта производства фосфорной кислоты – фосфогипса (ФГ) – в сельскохозяйственном производстве, способствующего повышению плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур, представляется актуальным [1, 2]. Современный этап развития отечественной аграрной сферы требует агроэкологической оценки эффективности фосфогипса в конкретных почвенно-климатических зонах. Так, в Самарской области для рассоления почв может быть использован фосфогипс Балаковского филиала АО «Апатит». Его запасы в отвалах предприятия огромны – превышают 40 млн тонн.

Цель исследований – разработка приемов повышения продуктивности картофеля и минимализации содержания тяжелых металлов в продукции за счет внесения фосфогипса на черноземе солонцеватом южной агроклиматической зоны Самарской области.

Задачи исследований – изучить влияние возрастающих доз фосфогипса (2,0, 4,0, 6,0, 8,0 и 10,0 т/га) на формирование продуктивности картофеля, агрохимические показатели плодородия почвы, особенности динамики валового содержания цинка (Zn), свинца (Pb), никеля (Ni), меди (Cu) и кадмия (Cd) в пахотном горизонте.

Материал и методы исследований. Фосфогипс содержит 80-90% гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 2-3% P_2O_5 , до 15% SiO_2 , до 21% S, 20-22% Ca. Также в его составе содержатся: 1,4% Mg, 0,17-0,20% F, 0,1% B, 1% Mn, 0,01% Cu, 0,05% Zn, 0,03% Co, 0,05% Mo [3, 4].

Полевые опыты по исследованию действия ФГ в посадках картофеля были заложены в 2021-2022 гг. на полях крестьянско-фермерского хозяйства (КФХ), расположенного в Приволжском районе Самарской области. Исследования проводились на специализированном севообороте, когда картофель возвращается на одно и то же поле не ранее, чем через 4 года.

Чередование культур в севообороте: 1. Чистый (черный) пар. 2. Картофель. 3. Овощи. 4. Соя.

Учетные площадки имеют форму квадрата со стороной 30 м (или 40 рядов), площадь 900 м² (30 м x 30 м). Площадь полевого севооборота 840 га, в его границах четыре опытных участка площадью 210 га. Ввиду того, что севооборот действует на орошаемом участке поливной системы «Фрегат», то каждый опытный участок привязан к максимальной площади полива при работе на одной позиции дождевальная машины и имеет площадь 82,6 га.

В данном севообороте получили распространение сборные поля. В составе севооборота организовано 2 сборных поля. Количество полей севооборота совпадает с количеством лет ротации (4 года). В конце мая производилась первая обработка почвы гербицидами до всходов. Первая листовая обработка гербицидами в комплексе с фунгицидами производилась в фазе 4-6 листьев. Всего за период вегетации было предусмотрено четыре листовых обработки с интервалом в 7, 12, 14, 12 дней после первой обработки. Минеральные удобрения под картофель вносились разбросным способом до посадки. Полная доза калийных удобрений (KCl 60%) вносилась осенью под нарезку гребней в один приём разбрызгивателем навесным Rauch MDS 935 на тракторе Д/Д 6920, Д/Д 6130. Весной одновременно с посадкой производилось внесение аммофоса, затем через 10-15 дней перед окучиванием производили подкормку азотным удобрением (сульфат аммония $\text{N}_{21}\text{S}_{24}$).

Для производимых операций использовали универсальный пропашной колесный трактор МТЗ-82 и полевой опрыскиватель AMAZONEUG-3000, предназначенный исключительно для сельскохозяйственного применения методом поверхностного опрыскивания с использованием воздушно-го потока, для работы со всеми разрешенными в сельском хозяйстве растворами, эмульсиями и суспензиями. При закладке учетных площадок расстояние между гребнями составило 75 см, высота гребня 18-20 см, расстояние в ряду посадочных мест – 24 см.

Анализ метеорологических данных метеостанции (МС «Безенчукская») показал, что вегетационный период культуры проходил на фоне повышенных температур и дефицита осадков: среднесуточная температура воздуха мая была на 6⁰С выше нормы, количество осадков составило только 20,8 мм, при норме 33 мм. В июне наблюдались обильные осадки – 72 мм, что составляет 185% от нормы. Развитие растений в июле проходило при теплой погоде и остром недостатке осадков, сумма которых составила 47 мм (37% от нормы). Жаркая и засушливая погода продолжалась и в августе. Сумма положительных температур за вегетационный период (май-июль) составила 2009⁰С при норме 1602⁰С, ГТК равнялся 0,55.

Закладка и проведение полевых опытов – согласно методике опытного дела Б. А. Доспехова [5], методическим указаниям по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями [6], методическим требованиям к полевому опыту [7], основам научных исследований в агрономии [8].

Густоту стояния и сохранность растений подсчитывали на постоянно закрепленных на делянке 4-х площадках по 0,5 м² в 2-х повторениях. Подсчет проводили в фазе полных всходов и в конце вегетации [8, 9, 10, 11]. Динамику линейного роста определяли путем измерения высоты случайно выбранных растений в 10 точках делянки с интервалом в 10 дней от начала интенсивного роста и перед уборкой. Учет урожая проводился поделочно с последующим взвешиванием на электронных товарных площадочных весах M-ER 333.

Результаты исследований. Согласно фенологическим наблюдениям дружные всходы картофеля появились 11.05, через 20 дней после посадки. Фаза начала бутонизации наступила через 30 дней после всходов, разницы в вариантах по срокам наступления не было. Равномерным наступлением характеризовалась и стадия образования клубней. Вегетационный период по всем вариантам составил 90 дней. Анализ структуры урожая картофеля показал, что количество стеблей одного растения в контроле составило 5 шт. В фоновом варианте и при внесении 2,0 т/га ФГ

показатель практически не изменился. С увеличением доз ФГ количество стеблей на одном растении возросло в среднем до 5,5 шт., но четкой закономерности не выявлено. Высота растений картофеля во многом зависит от сорта и густоты посадки. Прирост растений при внесении 4,0 и 8,0 т/га ФГ составил 4 и 3,1%, соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Структура урожая картофеля при внесении различных доз фосфогипса
в черноземную почву, 2021-2022 гг.

№	Вариант опыта	Количество стеблей на одном растении, шт.	Высота растений, см	Количество клубней на 1 растении, шт.
1	Контроль	5,0	75,0	15,0
2	Фон	5,3	75,8	15,9
3	Фон + ФГ 2 т/га	5,3	76,4	15,9
4	Фон + ФГ 4 т/га	5,5	78,0	16,5
5	Фон + ФГ 6 т/га	5,5	76,8	16,5
6	Фон + ФГ 8 т/га	5,5	77,3	16,5

Количество клубней с одного растения в варианте с внесением 4,0 и 6,0 т/га ФГ было одинаковым и составило в среднем 16,5 шт., что на 1,5 шт. больше контрольных показателей. Внесение минеральных удобрений и вариант с внесением 2,0 т/га ФГ увеличили количество клубней на 0,9 шт.

Применение удобрений в сочетании с возрастающими дозами ФГ обеспечивает получение урожая клубней картофеля от 46 до 49 т/га, прибавка составила 12-13 т/га (табл. 2). Также выявлено улучшение фракционного состава и выхода товарного картофеля фракции 55-80 мм. Наибольшая прибавка урожая отмечена в варианте с внесением 6,0 т/га ФГ – 26,8%.

Таблица 2

Влияние фосфогипса на фракционный состав и урожайность картофеля, 2021-2022 гг.

№	Вариант опыта	Единицы измерения	Фракция, мм				Урожай, т/га	Прибавка к контролю	
			35-45	45-55	55-80	отход		т/га	%
1	Контроль	шт.	120	136	150	108	36,30	0	0
		кг	3,2	12	29,5	1,7			
		%	5,0	18,6	48,4	2,6			
2	Фон	шт.	56	116	188	7,6	46,70	10,4	22,3
		кг	2,5	29,1	34,4	3			
		%	3,6	42,2	49,8	4,3			
3	Фон + ФГ 2 т/га	шт.	100	116	188	76	48,40	12,1	25,0
		кг	2,5	24,8	37	1,36			
		%	3,8	37,7	56,4	2,1			
4	Фон + ФГ 4 т/га	шт.	56	160	112	52	48,90	12,6	25,8
		кг	4,3	22,4	30,2	1,1			
		%	7,4	38,7	52,1	1,8			
5	Фон + ФГ 6 т/га	шт.	60	100	232	56	49,60	13,3	26,8
		кг	4,08	12,1	54,7	0,72			
		%	5,7	16,9	76,4	1,01			
6	Фон + ФГ 8 т/га	шт.	36	148	136	108	48,30	12,0	24,8
		кг	2,0	19,3	31,4	1,5			
		%	3,6	35,6	58,0	2,8			
НСР ₀₅							0,87		

Химический состав клубней колебался в широких пределах: содержание воды в клубнях от 64 до 86%, содержание крахмала 11,0-14,7 %, сухого вещества 23,7-24,8%. Применение удобрений и 4,0 и 6,0 т/га ФГ обусловило повышение содержание крахмала в клубнях на 3,7 и 3,5%, соответственно (табл. 3).

Внесение 2,0 т/га ФГ и 4-8 т/га ФГ в сравнении с контролем способствовало повышению содержания витамина С в клубнях картофеля на 2,7 мг и 5,6-5,8 мг, соответственно. Содержание нитратов в клубнях картофеля на опытном участке не превысило допустимых норм (122-134 мг/кг). Внесение удобрений и ФГ (независимо от его дозы), способствовало накоплению нитратов в клубнях ниже допустимых уровней (табл. 3).

Таблица 3

Влияние фосфогипса на биохимические показатели клубней картофеля, 2021-2022 гг.

№	Вариант опыта	Содержание			
		Сухое вещество, %	Крахмал, %	Витамин С, мг	Нитраты, мг/кг
1	Контроль	24,2	11,0	10,0	122
2	Фон	23,7	13,0	12,7	134
3	Фон + ФГ 2 т/га	24,3	14,2	13,8	127
4	Фон + ФГ 4 т/га	24,7	14,7	15,6	131
5	Фон + ФГ 6 т/га	24,7	14,3	15,8	128
6	Фон + ФГ 8 т/га	24,8	14,5	15,6	131

Исследованиями выявлено, что pH почвенного раствора при внесении удобрений и ФГ изменяется следующим образом: в фоновом варианте показатель снизился на 0,8 ед., при внесении 2,0 и 4,0 т/га – на 0,9 ед. по сравнению с контролем. Однако, при внесении 6,0 и 8,0 т/га ФГ pH остался практически без изменений (табл. 4).

Таблица 4

Влияние фосфогипса на агрохимические показатели ченоземных почв, 2021-2022 гг.

№	Вариант опыта	pH KCl	ЕКО, ммоль/100 г	Гумус, %	Нитраты, мг/100 г	S подв., мг/кг	Mg обм.	Ca обм.	Na	P ₂ O ₅	N лг	K ₂ O	Плотность почвы, г/см ³
							мг-экв./100 г			мг/кг			
1	Контроль	7,4	29,3	4,7	13	19,7	1,5	16,5	0,1	112	73	50	2,5
2	Фон	6,6	30,7	4,8	33	32,4	1,7	15,0	0,9	142	156	76	2,5
3	Фон + ФГ 2 т/га	6,5	21,2	5,0	38	48,7	1,8	18,0	0,8	153	161	217	2,4
4	Фон + ФГ 4 т/га	6,5	31,4	4,8	35	64,2	1,9	21,9	0,8	182	158	175	2,4
5	Фон + ФГ 6 т/га	7,3	31,9	4,8	41	87,3	1,9	19,6	0,9	102	156	95	2,4
6	Фон + ФГ 8 т/га	7,5	32,4	5,0	34	110,7	1,9	16,6	0,1	138	150	51	2,4

Увеличение емкости катионного обмена (ЕКО) происходит с ростом доз ФГ. Наибольший показатель ЕКО отмечается при внесении 8,0 т/га ФГ. Анализ данных по содержанию гумуса не выявил какого-либо существенного изменения. Показатели оставались примерно равными контрольному значению. Содержание нитратов значительно увеличилось с повышением доз ФГ: при внесении 2-6 т/га показатель увеличился на 25 и 28 мг/100 г и составил 38 и 41 мг/100 г, соответственно (табл. 4). В состав ФГ входит до 21% серы, которая необходима растениям для роста и развития. Содержание подвижной серы в почве с увеличением доз ФГ закономерно увеличивается. Наибольшее содержание серы отмечалось при внесении 8,0 т/га ФГ и составляло 110,7 мг/кг. Для сравнения показатель в контрольном варианте составил 19,7 мг/кг. Внесение удобрений и возрастающих доз ФГ приводит к увеличению в почве обменного магния. В вариантах с внесением 4-8 т/га ФГ содержание Mg составляло 1,9 мг-экв./100 г, в контрольном варианте – 1,5 мг-экв./100 г. В отношении кальциевого режима черноземной почвы, при внесении 8,0 т/га ФГ содержание обменного кальция составило 16,6 мг-экв./100 г, что на 0,1 мг-экв./100 г выше, чем в контроле. Наибольшее содержание кальция отмечалось в варианте с применением 4,0 т/га ФГ – 21,9 мг-экв./100 г, самое низкое – в фоновом варианте – 15,0 мг-экв./100 г (табл. 4). Исходное содержание натрия в контрольном варианте составляло 0,1 мг-экв./100 г, таким же оно оказалось и в варианте с внесением 8,0 т/га ФГ. В остальных вариантах показатель увеличился: в фоновом варианте – 0,9 мг-экв./100 г, в варианте с 2,0 и 4,0 т/га ФГ – 0,8 мг-экв./100 г. Фосфогипс, как фосфорсодержащее удобрение, оказал положительное влияние на фосфатный режим почвы. Так, в варианте с 4,0 и 8,0 т/га ФГ содержание подвижного фосфора наибольшее – 182 и 138 мг/кг, соответственно. В остальных вариантах (2,0 и 6,0 т/га ФГ) показатель меньше достоверной разницы с контролем. В калийном режиме почв в посадках картофеля при внесении ФГ существенных изменений не обнаружено. Некоторое повышение обменного калия отмечено при внесении 2,0 т/га ФГ (217 мг/кг) и 4,0 т/га ФГ (175 мг/кг). Повышение дозы ФГ до 6,0 и 8,0 т/га достоверного положительного влияния не оказало. При внесении ФГ как кальцийсодержащего мелиоранта увеличивалось содержание кальция, что улучшало структуру почвы, а входящая в состав ФГ сульфатная сера положительно воздействовала на минеральную часть и разрыхляла почву. Вероятнее всего внесение ФГ в качестве почвоулучшителя будет иметь нарастающий эффект во времени. В посадках картофеля в первый год внесения ФГ не выявлено

значительного влияния на плотность почвы, показатель по вариантам колебался в пределах 2,4-2,5 г/см³.

Экологическая оценка влияния ФГ на почву показала, что содержание тяжелых металлов, в том числе ртути, кадмия, мышьяка, во всех вариантах опыта практически одинаковое и в два раза ниже ПДК (табл. 5-6).

Таблица 5

Влияние фосфогипса на агрохимические показатели ченоземных почв, 2021-2022 гг.

№	Вариант опыта	рН KCl	ЕКО, ммоль/100 г	Гумус, %	Нитраты, мг/100 г	S подв., мг/кг	Mg обм.	Ca обм.	Na	P ₂ O ₅	N лг	K ₂ O	Плотность почвы, г/см ³
							мг-экв./100 г			мг/кг			
1	Контроль	7,4	29,3	4,7	13	19,7	1,5	16,5	0,1	112	73	50	2,5
2	Фон	6,6	30,7	4,8	33	32,4	1,7	15,0	0,9	142	156	76	2,5
3	Фон + ФГ 2 т/га	6,5	21,2	5,0	38	48,7	1,8	18,0	0,8	153	161	217	2,4
4	Фон + ФГ 4 т/га	6,5	31,4	4,8	35	64,2	1,9	21,9	0,8	182	158	175	2,4
5	Фон + ФГ 6 т/га	7,3	31,9	4,8	41	87,3	1,9	19,6	0,9	102	156	95	2,4
6	Фон + ФГ 8 т/га	7,5	32,4	5,0	34	110,7	1,9	16,6	0,1	138	150	51	2,4

Таблица 6

Влияние фосфогипса на валовое содержание тяжелых металлов в почве
под посевами картофеля, мг/кг

№	Вариант опыта	Тяжелые металлы, мг/кг								
		Hg	Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	Ni	As
1	Контроль	>0,005	> 1,0	13,5	18,0	9,3	270	2800	14,0	1,03
2	Фон	>0,005	> 1,0	7,2	18,0	10,6	260	3010	15,0	> 1,0
3	Фон + ФГ 2 т/га	>0,005	> 1,0	9,7	17,0	11,0	290	3700	15,0	> 1,0
4	Фон + ФГ 4 т/га	>0,005	> 1,0	9,6	14,0	8,8	210	3300	13,0	> 1,0
5	Фон + ФГ 6 т/га	>0,005	> 1,0	7,8	17,0	10,5	220	3800	15,0	> 1,0
6	Фон + ФГ 8 т/га	>0,005	> 1,0	5,0	14,0	9,3	250	3100	15,0	> 1,0
ПДК		2,1	2,00	32,0	100,0	14,00	1500	ОДК 40000	85	2,0

Анализ динамики валового содержания тяжелых металлов показал, что при внесении в почву минеральных удобрений отмечено некоторое снижение содержания свинца (на 47%) и марганца (на 3,7%) по сравнению с контролем. Однако наблюдается увеличение в почве (мг/кг): меди на 1,3, железа на 210 и никеля на 1,0. Следует отметить, что содержание всех тяжелых металлов не превышает допустимых норм, т.е. ниже значений ПДК и ОДК. Применение минеральных удобрений в сочетании с ФГ в дозе 2,0 т/га способствовало снижению содержания в почве свинца на 28% и цинка на 5,5%. Концентрация меди, марганца, железа и никеля была больше, чем в контрольном варианте, но не превышала значения ПДК и ОДК (табл. 7).

Таблица 7

Влияние фосфогипса на содержание подвижных форм тяжелых металлов в почве
под посевами картофеля, мг/кг

№	Вариант опыта	Тяжелые металлы, мг/кг						
		Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	Ni
1	Контроль	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	19	>5,0	> 1,0
2	Фон	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	15	>5,0	> 1,0
3	Фон + ФГ 2 т/га	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	11,0	>5,0	> 1,0
4	Фон + ФГ 4 т/га	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	11,0	>5,0	> 1,0
5	Фон + ФГ 6 т/га	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	11,0	>5,0	> 1,0
6	Фон + ФГ 8 т/га	> 1,0	> 1,0	> 1,0	> 1,0	14,0	>5,0	> 1,0
ПДК		0,5	6,0	23,00	3,00	140,0	-	4,0

При увеличении дозы ФГ до 4,0 т/га отмечено снижение содержания свинца на 29%, цинка на 22%, меди на 5%, марганца на 22% и никеля на 7%. Концентрация Zn, Cu, Mn и Ni является минимальной по сравнению с другими вариантами опыта. Применение удобрений и ФГ в дозе 6,0 т/га обеспечивает снижение содержания свинца в 1,7 раза и в 1,2 раза марганца, снижение содержания цинка было незначительным (на 1,0 мг/кг). При этом наблюдается увеличение концентрации меди на 13%, железа на 36% и никеля на 7%. Количество железа в почве максимально среди всех вариантов опыта, но ниже значения ОДК более чем в 10 раз. Содержание остальных металлов

не превышает пределов ПДК. При внесении 8,0 т/га ФГ были выявлены аналогичные закономерности: установлено снижение концентрации свинца на 63%, цинка на 22%, марганца на 7,4%, показатели по Pb и Zn в почве достигли минимальных значений среди всех вариантов опыта. Содержание Cu осталось неизменным (9,3 мг/ка). Анализируя динамику подвижных форм тяжелых металлов в почве, можно отметить, что содержание кадмия, свинца, цинка, меди, железа и никеля остается неизменным как при внесении $N_{150}P_{150}K_{300}$, так и при добавлении к ним фосфогипса различных норм. При этом содержание ТМ значительно ниже установленных ПДК (в 3-23 раза) (табл. 7).

Таким образом, применение удобрений в сочетании с ФГ не влияет на содержание подвижных форм большинства тяжелых металлов в почве, но снижает концентрацию марганца на 21-42%.

Оценка качества клубней картофеля по содержанию тяжелых металлов не выявила значимого загрязнения продукции, все показатели находятся значительно ниже установленных допустимых норм. Это подтверждает экологическую безопасность применения фосфогипса (независимо от доз) для получения продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим нормам (табл. 8).

Таблица 8

Влияние фосфогипса на содержание тяжелых металлов в клубнях картофеля, мг/кг

№	Вариант опыта	Тяжелые металлы, мг/кг						
		Cd	Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	Ni
1	Контроль	> 0,001	> 0,001	> 1,0	> 0,5	> 1,0	> 10,0	> 0,001
2	Фон	> 0,001	> 0,001	> 1,0	> 0,5	> 1,0	> 10,0	> 0,001
3	Фон + ФГ 2 т/га	> 0,001	> 0,001	> 1,0	> 0,5	> 1,0	> 10,0	> 0,001
4	Фон + ФГ 4 т/га	> 0,001	> 0,001	> 1,0	> 0,5	> 1,0	> 10,0	> 0,001
5	Фон + ФГ 6 т/га	> 0,001	> 0,001	> 1,0	> 0,5	> 1,0	> 10,0	> 0,001
6	Фон + ФГ 8 т/га	> 0,001	> 0,001	> 1,0	> 0,5	> 1,0	> 10,0	> 0,001
ПДК		0,100	0,50	50,00	10,0	-	-	-

Заключение. Внесение в почву фосфогипса в сочетании с минеральными удобрениями достоверно обеспечивает получение прибавки урожая картофеля на 25-26,8% – 12,1-13,3 т/га клубней при сборах на уровне 48,4-49,6 т/га. Наибольшая масса товарного картофеля получена в варианте с внесением 6,0 т/га фосфогипса. Применение фосфогипса способствует снижению валового содержания в почве свинца на 28-63%, цинка на 5,5-22% и железа на 7,5-36% по сравнению с контролем. Концентрация других анализируемых токсикантов, в том числе ртути, мышьяка и кадмия, практически не изменяется и находится значительно ниже ПДК и ОДК, что позволяет сделать вывод об экологической чистоте используемых препаратов, а также о возможности использовать фосфогипс в качестве микроудобрения.

Список источников

1. Троц В. Б., Троц Н. М. Использование нетрадиционных материалов для гипсования почв под яровой ячмень // Современное состояние и инновационные пути развития земледелия, мелиорации и защиты почв от эрозии : сборник трудов конференции. Ижевск : Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2022. С. 128–131.
2. Аканова Н. И. Фосфогипс нейтрализованный – перспективное агрохимическое средство интенсификации земледелия // Плодородие. 2013. №1. С. 2–7.
3. Аканова Н. И., Троц Н. М., Троц В. Б. Агроэкологическая эффективность применения калийно-натриевого глинистого удобрения на посевах сельскохозяйственных культур в условиях Среднего Поволжья // Самара АгроВектор. 2021. № 1. С. 32–39. doi: 10.55170/77962_2021_1_1_32.
4. Троц Н. М., Боровкова Н. В., Соловьев А. А. Оценка эффективности фосфогипса в агроценозах ярового ячменя // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 1. С. 3–11.
5. Кирейчева Л. В., Нефедов А. В., Виноградов Д. В. Обоснование использования удобрительно-мелиорирующей смеси на основе торфа и сапропеля для повышения плодородия деградированных почв // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2016. № 3 (31). С. 12–17.
6. Чекмарев П. А., Обущенко С. В., Троц В. Б., Троц Н. М. Влияние минеральных удобрений и биологически активных веществ на урожайность пшеницы // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т.32, № 8. С. 28–31.
7. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. 5 изд., перераб. и доп. М. : Агропромиздат, 1985. 351 с.
8. Чекмарев П. А., Обущенко С. В., Троц Н. М. Влияние системного применения минеральных удобрений на содержание гумуса в черноземе обыкновенном // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 4. С. 32–34.

9. Liu X., He P., Jin J., Zhou W., Sulewski G., Phillips S. Yield gaps, indigenous nutrient supply, and nutrient use efficiency of wheat in China // *Agronomy Journal*. 2011. Vol. 103, Iss. 5. P. 1452–1463.
10. Исайчев В. А., Андреев Н. Н. Влияние препаратов серии МЕГАМИКС на биометрические показатели и урожайность яровой пшеницы // *Нива Поволжья*. 2022. № 3(63). С. 1005.
11. Костин В. И., Дозоров А. В., Исайчев В. А. К вопросу о стимуляции сельскохозяйственных растений под действием физических и химических факторов при обработке семян // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. № 2(42). С. 67–77.

References

1. Trots, V. B. & Trots, N. M. (2022). The use of non-traditional materials for gypsuming soils under spring barley. Current state and innovative ways of developing agriculture, melioration and soil protection from erosion '22: *proceedings of the conference*. (pp. 128–131). Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy (in Russ.).
2. Akanova, N. I. (2013). Neutralized phosphogypsum – a promising agrochemical means of agricultural intensification. *Plodorodie (Plodorodie)*, 1, 2–7 (in Russ.).
3. Akanova, N. I., Trots, N. M. & Trots, V. B. (2021). Agro-ecological efficiency of the use of potassium-sodium clay fertilizer on crops in the conditions of the Middle Volga. *Samara AgroVector (Samara AgroVector)*, 1, 32–39. doi: 10.55170/77962_2021_1_1_32 (in Russ.).
4. Trots, N. M., Borovkova, N. V. & Soloviev, A. A. (2022). Evaluation of the effectiveness of phosphogypsum in agrocenoses of spring barley. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara state agricultural academy)*, 1, 3–11 (in Russ.).
5. Kireycheva, L. V., Nefedov, A. V. & Vinogradov, D. V. (2016). Substantiation of the use of a fertilizer-meliorating mixture based on peat and sapropel to increase the fertility of degraded soils. *Vestnik Riazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P. A. Kostycheva (Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostycheva)*, 3 (31), 12–17 (in Russ.).
6. Chekmarev, P. A., Obushchenko, S. V., Trots, V. B. & Trots, N. M. (2018). Influence of mineral fertilizers and biologically active substances on the productivity of wheat. *Dostizheniia nauki i tekhniki APK (Achievements of Science and Technology of AICis)*, 8, 28–31 (in Russ.).
7. Dospekhov, B. A. (1985). *Methodology of field experience*. Moscow: Agropromizdat (in Russ.).
8. Chekmarev, P. A., Obushchenko, S. V. & Trots, N. M. (2013). Influence of systemic application of mineral fertilizers on the content of humus in ordinary chernozem. *Dostizheniia nauki i tekhniki APK (Achievements of Science and Technology of AICis)*, 4, 32–34 (in Russ.).
9. Liu, X., He, P., Jin, J., Zhou, W., Sulewski, G. & Phillips, S. (2011). Yield gaps, indigenous nutrient supply, and nutrient use efficiency of wheat in China. *Agronomy Journal*, 103, 5, 1452–1463.
10. Isaichev, V. A. & Andreev, N. N. (2022). Influence of preparations of the MEGAMIX series on biometric indicators and productivity of spring wheat. *Niva Povolzhia (Niva Povolzhya)*, 3(63), 1005. (in Russ.).
11. Kostin, V. I., Dozorov, A. V. & Isaichev, V. A. (2018). On the issue of stimulation of agricultural plants under the influence of physical and chemical factors during seed treatment. *Vestnik Uliianovskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii (Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy)*, 2(42), 67–77 (in Russ.).

Информация об авторах:

Н. И. Аканова – доктор биологических наук, профессор;
 Н. М. Троц – доктор сельскохозяйственных наук, профессор;
 М. Н. Можаренко – главный специалист управления по реализации фосфогипса, АО «Апатит»;
 Н. В. Боровкова – аспирант.

Information about the authors:

N. I. Akanova – Doctor of Biological Sciences, Professor;
 N. M. Trots – Doctor of Agricultural Sciences, Professor;
 M. N. Mozharenskiy – chief specialist of the department for the sale of phosphogypsum, JSC «Apatit»;
 N. V. Borovkova – post-graduate student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.03.2023; одобрена после рецензирования 1.04.2023; принята к публикации 10.04.2023.

The article was submitted 16.03.2023; approved after reviewing 1.04.2023; accepted for publication 10.04.2023.