На правах рукописи

МАТВИЕНКО АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ФОСФОГИПСА НЕЙТРАЛИЗОВАННОГО НА ЧЕРНОЗЁМЕ ОБЫКНОВЕННОМ СЛАБОСОЛОНЦЕВАТОМ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Ставрополь – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО СтГАУ)

Научный руководитель:	**Гречишкина Юлия Ивановна** — доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры агрохимии и физиологии растений ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет»
Официальные оппоненты:	**Аканова Наталья Ивановна** — доктор биологических наук, профессор, заведующая лабораторией агрохимии органических, известковых удобрений и химической мелиорации ВНИИ агрохимии имени Д. Н. Прянишникова; **Онищенко Людмила Михайловна** — доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры агрономической химии ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»
Ведущая организация:	федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева**»

Защита диссертации состоится 01 июля 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.036.01 при ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет» по адресу: 355017, Ставропольский край, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12, аудитория № 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет» http://www.stgau.ru

Автореферат разослан «__»_____2025 г. и размещен на сайте ВАК Министерства науки и высшего образования РФ: http://vak.minobrnauki.gov.ru и на сайте ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ: http://www.stgau.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета Безгина Юлия Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ставропольский край является одним из ведущих регионов Российской Федерации по производству сельскохозяйственной продукции и темпам химизации сельскохозяйственной отрасли. Несмотря на все достигнутые успехи, в крае остаётся нерешенной проблема химической мелиорации солонцовых почв. По данным мониторинга агрохимической службы Ставропольского края, с 1995 г. объёмы гипсования снизились до критически низких значений.

Во времена масштабной кампании по гипсованию государственное финансирование работ предполагалось только для солонцов, сильно- и среднесолонцеватых почв. Государственное финансирование химической мелиорации слабосолонцеватых почв не проводилось. В связи с этим считаем, что изучение возможности повышения эффективности сельскохозяйственного производства на данных почвах является актуальным вопросом.

Ранее для проведения научных исследований и химической мелиорации на территории Ставропольского края использовали физиологически кислый фосфогипс. С 2021 г. появилась возможность использования нейтрализованного фосфогипса, хранимого в отвалах АО «Минерально-химическая компания «ЕвроХим» и ООО «Алмаз Удобрения».

Также фактором, повышающим актуальность использования фосфогипса в сельском хозяйстве, выступает рост цен на фосфоросодержащие удобрения. В этом случае фосфогипс выступает дополнительным источником подвижных форм фосфора для питания растений.

Степень её разработанности. Многие ученые неоднократно изучали свойства солонцовых почв и пути их химической мелиорации. В ходе многочисленных исследований было описано влияние фосфогипса на агрохимические и водно-физические свойства почв. Исследовалось влияние фосфогипса на урожайность сельскохозяйственных культур как в виде мелиоранта, так и в виде поликомпонентного удобрения.

Изучению влияния фосфогипса на свойства почвы и урожайность сельскохозяйственных культу посвящены работы К. К. Гедройц (1955), Л. Н. Петрова (1982), Л. М. Карасенко (1983), А. А. Сидько (1985), А. Ф. Харитоновой (1987), А. Н. Верещагина (1987), А. И. Подколзина (1988, 2004), А. В. Бурлай (1988, 2004), Б. С. Маслова (1989), Н. С. Скуратова (1990), Н. М. Кремзина (1990), В. В. Окоркова (2002, 2012, 2013), С. В. Беликовой (2004), И. С. Белюченко (2005, 2008, 2010, 2013), И. Н. Любимовой (2006, 2007), А. А. Воронина (2007), Н. И. Акановой (2012, 2013, 2015, 2018, 2019, 2024), В. Г. Сычева (2013), А. Х. Шеуджена (2013, 2015, 2016, 2018, 2019, 2024), В. С. Цховребова (2016, 2017, 2018, 2019), А. Н. Есаулко (2017), М. М. Визирской (2020), О. А. Подколзина (2024).

Цель и задачи. Цель исследования — агроэкологическая оценка применения фосфогипса нейтрализованного на чернозёме обыкновенном

слабосолонцеватом и установление его влияния на продуктивность озимой пшеницы в условиях Центрального Предкавказья.

Для достижения поставленной цели предусматривалось решение следующих задач:

— изучить влияние фосфогипса нейтрализованного на агрохимические показатели чернозёма обыкновенного слабосолонцеватого;

— определить влияние фосфогипса нейтрализованного на рост и развитие растений, урожайность и качество зерна озимой пшеницы;

— изучить влияние фосфогипса нейтрализованного на агроэкологические показатели чернозёма обыкновенного слабосолонцеватого и содержание токсикантов в зерне озимой пшеницы;

— определить экономическую эффективность применения фосфогипса нейтрализованного.

Научная новизна. Впервые в условиях чернозёмов обыкновенных слабосолонцеватых Центрального Предкавказья проведено комплексное исследование применения фосфогипса нейтрализованного на посевах озимой пшеницы с учётом агроэкологических показателей почвы и содержания токсикантов в растениях.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическое значение работы заключается в обосновании эффективных доз фосфогипса нейтрализованного для химической мелиорации чернозёмов обыкновенных слабосолонцеватых при возделывании озимой пшеницы в условиях Центрального Предкавказья.

Дана экономическая оценка применения изучаемых доз мелиоранта при возделывании озимой пшеницы на чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом в условиях Центрального Предкавказья.

Опыт зарегистрирован в реестре длительных опытов Геосети ВНИИА РФ «Исследования направленности почвенных процессов и путей регулирования физико-химических агрохимических свойств различных типов почв, их питательного режима в условиях действия химической мелиорации и применения известь- и гипсосодержащих отходов промышленности».

Полученные результаты подтверждены производственной проверкой и внедрением в сельхозпредприятиях Ставропольского края: ИП Глава К(Ф)Х Сабынин Г. К. Андроповского муниципального округа и АО «ТПКЗ № 169» Минераловодского городского округа.

Результаты исследований использованы для обновления методических рекомендаций по подготовке проектно-технологической документации гипсования солонцовых почв в Ставропольском крае с целью повышения продуктивности сельскохозяйственных культур.

Методология и методы исследований. В основу исследования было положено изучение и анализ научной литературы отечественных и зарубежных авторов. Методы исследований: теоретические — обработка результатов исследований методами статистического анализа; эмпирические —

лабораторные и полевые исследования, графическое и табличное отображение полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

— использование фосфогипса нейтрализованного на чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом снижает показатели реакции pH почвы, увеличивает содержание подвижных форм фосфора и серы, а также снижает долю обменных магния и натрия в сумме обменных оснований;

— использование фосфогипса нейтрализованного на чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом повышает урожайность озимой пшеницы;

— использование фосфогипса нейтрализованного на чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом не приводит к нарушению экологических норм по содержанию токсикантов в почве, полученное зерно озимой пшеницы соответствует требованиям безопасности.

Степень достоверности. Исследования проведены в течение трёхлетнего периода на основе методики проведения полевого опыта, выполнения лабораторных анализов и в соответствии с требованиями географической сети опытов с удобрениями. Все наблюдения выполнены в 3-кратном повторении в различных погодных условиях с последующей статистической обработкой данных.

Апробация результатов. Материалы диссертации были представлены на: VI Международной научной конференции «Эволюция и деградация почвенного покрова» (Ставрополь, 2022); X Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: инноватика в современном мире» (Уфа, 2023); Международной научно-практической конференции «Биологизация земледелия — основа продовольственной безопасности России в длительной перспективе» (Ставрополь, 2024). Также ежегодно в географическую сеть опытов с удобрениями были представлены установленного образца отчёты по проведённым исследованиям.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 8 научных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объём работы. Диссертация изложена на 217 страницах стандартного печатного текста, иллюстрирована 6 рисунками, 37 таблицами, включает 38 приложений. Работа состоит из введения, 6 глав, заключения, предложения производству. Список литературы включает 231 источник, в том числе 34 иностранных авторов.

Личный вклад автора. Автор участвовал в определении научной проблемы, разработке цели и задач исследований, закладке и проведении полевых исследований, отборе почвенных и растительных образцов, учёте урожайности озимой пшеницы, анализе и обобщении полученных материалов, статистической обработке данных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

На основе анализа научной литературы изучены основные проблемы химической мелиорации солонцовых почв. Обобщены данные по влиянию применения фосфогипса на агрохимические свойства различных типов почв. Описывается воздействие мелиоранта на продуктивность сельскохозяйственных культур. Рассмотрен агроэкологический аспект применения фосфогипса нейтрализованного при проведении химической мелиорации почв.

2. УСЛОВИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования были проведены в условиях Ставропольского края в зоне неустойчивого увлажнения. Опыт был заложен на территории ИП Глава К(Ф)Х Сабынин Г. К., которое находится в Андроповском муниципальном округе.

Место исследований относится к III агроклиматической зоне Ставропольского края. За год выпадает 450–550 мм осадков при гидротермическом коэффициенте (ГТК) 0,9–1,1 и сумме температур 3000º–3200 ºС. Зима умеренно мягкая, среднемесячная температура января от –3,0º до –0,5 ºС, минимальная от –32º до –34 ºС.

В целом данные за период исследований, 2021–2024 гг., свидетельствуют о годовом повышении температуры воздуха относительно нормы на 2,8 ºС. Самым тёплым стал период 2023–2024 гг., когда превышение нормы среднесуточной температуры составило 4,0 ºС.

По количеству выпавших осадков среднее значение за период исследований составило 94 % от нормы. Полученные данные свидетельствуют о варьировании в течение периодов наблюдения выпавших за месяц осадков относительно средних многолетних значений. Суммарное количество выпавших осадков за 2021–2022 и 2022–2023 гг. было близко к норме и составляло 101 и 107 % соответственно. В период 2023–2024 гг. сумма осадков составила 74 % от нормы, что является свидетельством дефицита влаги.

Объекты исследований — чернозём обыкновенный слабосолонцеватый, фосфогипс нейтрализованный и озимая пшеница сорта Адель.

Предмет исследований — определение эффективности влияния фосфогипса нейтрализованного на агрохимические и агроэкологические свойства чернозёма обыкновенного слабосолонцеватого и продуктивность озимой пшеницы.

Опыт однофакторный с систематическим размещением делянок. Ширина делянки — 20 м, длина — 200 м, общая площадь делянки — 4000 м^2. Опыт проводился в 3-кратном повторении.

Почва опытного участка представлена чернозёмом обыкновенным слабосолонцеватым глубокосильносолончаковатым малогумусным среднемощным. Для оценки агрохимической характеристики опытного участка

до закладки опыта были отобраны почвенные образцы в слоях 0–20 и 20–40 см (Таблица 1).

В пахотном горизонте почва опытного участка содержит 5,1 % органического вещества, что соответствует средней группировке содержания. Запасы подвижного фосфора по методу Мачигина в модификации ЦИНАО составили 32 мг/кг и являются повышенными, подвижного калия — 423 мг/кг, что соответствует высокому содержанию.

Таблица 1 — Агрохимические показатели опытного участка

Глубина взятия обр., см	pH_{H2O}	Подвижн. P_2O_5, мг/кг	Подвижн. K_2O, мг/кг	Орган. в-во, %	Обмен. Ca, ммоль на 100 г	Обмен. Mg, ммоль на 100 г	Обмен. Na, ммоль на 100 г
0–20	7,5	32	423	5,1	21,2	11,8	0,95
20–40	7,4	18	297	4,8	21,3	10,9	1,73

Реакция pH водной суспензии составляет 7,5 ед., что соответствует нейтральной группировке.

В опыте использован фосфогипс нейтрализованный производства АО «Минерально-химическая компания «ЕвроХим», г. Белореченск (Таблица 2).

Фосфогипс нейтрализованный был внесён в 2021 г. с помощью трактора New Holland 8040 с разбрасывателем UMEGA PI 20 по чистому пару. Затем проведено лущение и перемешивание мелиоранта с помощью дисковой бороны Rubin. Заделка в почву — с помощью плуга KVERNELAND на глубину 25 см.

Таблица 2 — Химическая характеристика фосфогипса нейтрализованного производства АО «Минерально-химическая компания «ЕвроХим»

Показатели	Ед. измер.	Норма*	Фактические значения
Массовая доля основного вещества:	–	–	–
в пересчёте на содержание серы (S)	%	12-18	17,0
в пересчёте на содержание кальция (Ca)	%	15-23	21,3
Массовая доля фосфора в пересчёте на P_2O_5	%	0,5-1,5	1,2
Массовая доля воды, не более	%	25	20,0
Кислотность: показатель активности водородных ионов 1 % суспензии	ед. pH	5,0–8,0	6,0

** по ТУ 20.15.49-011-36196786*

На опытном участке с 2021 по 2024 г. в условиях хозяйства возделывалась озимая пшеница как монокультура, предшественник — чистый пар. Норма высева семян составила 220 кг/га, или 5 млн всхожих семян на 1 га. Сорт Адель. Селекцией данного сорта занималось ФГБНУ «Национальный центр зерна имени П. П. Лукьяненко», в реестр допущенных к возделыванию на

территории Северо-Кавказского региона он включен в 2014 г. Сорт среднерослый, с повышенной устойчивостью к полеганию. Качество зерна позволило внести сорт в список «ценных». Морозоустойчивость сорта — средняя, засухоустойчивость — высокая. Средняя урожайность в регионе составляет 4,16 т/га.

Изучение мелиоранта проведено на хозяйственном минеральном фоне: аммофос N12P52 и калий хлористый K30 под основную обработку почвы. В весенний период проведена подкормка аммиачной селитрой в дозировке N34.

По результатам данных агрохимического обследования опытного участка был произведён расчёт оптимальной дозы фосфогипса нейтрализованного (ФГн), которая составила 10 т/га. На её основе с шагом в 5 т/га были подобраны сниженная и повышенные дозировки фосфогипса нейтрализованного. Для расчётов оптимальной дозы фосфогипса был использован метод определения по порогу коагуляции высокодисперсных частиц.

С учётом вышеизложенного разработана следующая схема опыта:

1. Контроль. 2. ФГн 5 т/га. 3. ФГн 10 т/га. 4. ФГн 15 т/га. 5. ФГн 20 т/га.

В опыте проводился отбор почвенных образцов с целью агрохимического и агроэкологического анализа, отбор растительных образцов с целью определения химического состава и биологический учёт урожайности с формированием образцов сельскохозяйственной продукции для лабораторного анализа в соответствии с руководством по проведению регистрационных испытаний агрохимикатов в сельском хозяйстве (2018).

В почвенных образцах определяли: pH по ГОСТ 17.5.4.01–84, содержание подвижных фосфора и калия по ГОСТ 26205-91, органического вещества по ГОСТ 26213-2021, подвижной серы по ГОСТ 26490–85, обменных кальция и магния по ГОСТ 26487–85, обменного натрия по ГОСТ 26950–86, стабильного стронция по М-МВИ-80–2001, кадмия, свинца, ртути и мышьяка по методическим указаниям по определению тяжёлых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства ЦИНАО (1992).

В образцах растений определяли: азот по ГОСТ 13496.4–2019, фосфор по ГОСТ 26657–97, калий по ГОСТ 30504–97. В образцах зерна определяли: содержание белка по ГОСТ 10846–91, содержание и качество клейковины по ГОСТ Р 54478–2011, массу 1000 зёрен по ГОСТ 10842–89, стабильный стронций, кадмий и свинец по ГОСТ 30178–96, мышьяк по ГОСТ 26930–86.

Биологический учёт урожайности озимой пшеницы осуществляли с каждой делянки. Расчёт экономической эффективности изучаемых препаратов производился по технологическим картам с использованием действующих нормативных затрат и цен. Статистическую обработку полученных результатов осуществляли дисперсионным анализом по Б. А. Доспехову (2011).

ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ФОСФОГИПСА НЕЙТРАЛИЗОВАННОГО НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЧЕРНОЗЁМА ОБЫКНОВЕННОГО СЛАБОСОЛОНЦЕВАТОГО

Чернозёмы обыкновенные солонцеватые на территории Ставропольского края по основным показателям плодородия почвы обладают хорошей агрохимической характеристикой, но из-за солонцовых свойств на них нельзя в

полной мере нельзя реализовать весь агрономический потенциал. Для отслеживания влияния фосфогипса нейтрализованного на агрохимические показатели исследуемой почвы после уборки озимой пшеницы мы провели систематический отбор почвенных образцов из пахотного (0–20 см) и подпахотного (20–40 см) слоёв почвы.

Первой из рассмотренных нами агрохимических показателей чернозёма обыкновенного слабосолонцеватого стала реакция pH почвенного раствора. Сводная информация по данному показателю почвенного плодородия представлена в Таблице 3.

Таблица 3 — Влияние фосфогипса нейтрализованного на показатель pH_{H2O} чернозёма обыкновенного слабосолонцеватого

Варианты / показатели	Глубина взятия обр., см	2022 г.		2023 г.		2024 г.		Среднее за 3 года	
		Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±
1. Контроль	0–20	7,4	–	7,5	–	7,4	–	7,4	–
	20–40	7,4	–	7,4	–	7,3	–	7,4	–
2. ФГн 5 т/га	0–20	7,3	–0,1	7,4	–0,1	7,4	0,0	7,4	0,0
	20–40	7,4	0,0	7,5	0,1	7,4	0,1	7,4	0,0
3. ФГн 10 т/га	0–20	7,3	–0,1	7,3	–0,2	7,2	–0,2	7,3	–0,1
	20–40	7,3	–0,1	7,4	0,0	7,3	0,0	7,3	–0,1
4. ФГн 15 т/га.	0–20	7,3	–0,1	7,3	–0,2	7,2	–0,2	7,3	–0,1
	20–40	7,3	–0,1	7,5	0,0	7,3	0,0	7,4	0,0
5. ФГн 20 т/га	0–20	7,3	–0,1	7,3	–0,2	7,2	–0,2	7,3	–0,1
	20–40	7,6	0,2	7,5	0,1	7,4	0,1	7,5	0,1
НСР 05	0–20	0,5	–	0,2	–	0,2	–	0,2	–
	20–40	0,5	–	0,3	–	0,2	–	0,2	–

В первый год после внесения фосфогипса нейтрализованного существенного влияния на реакцию pH чернозёма обыкновенного слабосолонцеватого установлено не было, об этом свидетельствует анализ данных по *F*-критерию (*F*ф < *F*05). На второй и третий год наблюдений в пахотном слое почвы на вариантах с внесением 10, 15 и 20 т/га мелиоранта получена разница, превышающая значение НСР. Таким образом, к концу наблюдений расчётная (10 т/га) и повышенные дозы (15 и 20 т/га) фосфогипса нейтрализованного привели к снижению реакции pH на 0,2 ед.

Также нами был выявлен эффект от применения доз фосфогипса нейтрализованного на содержание подвижного фосфора в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом (Таблица 4).

Статистическая обработка данных продемонстрировала их релевантность за весь период наблюдений. Максимальный эффект по влиянию фосфогипса

нейтрализованного на содержание подвижного фосфора в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом был проявлен на третий год после внесения, что является следствием достаточной влагообеспеченности за два предыдущих года.

Таблица 4 — Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание подвижного фосфора в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом, мг/кг

Варианты / показатели	Глубина взятия обр., см	2022 г.		2023 г.		2024 г.		Среднее за 3 года	
		Зна-чение	Δ±	Зна-чение	Δ±	Зна-чение	Δ±	Зна-чение	Δ±
1. Контроль	0–20	33	–	29	–	36	–	33	–
	20–40	28	–	21	–	27	–	25	–
2. ФГн 5 т/га	0–20	38	5	28	–1	42	6	36	3
	20–40	25	–3	23	2	26	–1	25	0
3. ФГн 10 т/га	0–20	35	2	30	1	50	14	38	5
	20–40	21	–7	23	2	35	8	26	1
4. ФГн 15 т/га.	0–20	33	0	38	9	52	16	41	8
	20–40	14	–14	24	3	36	9	25	0
5. ФГн 20 т/га	0–20	30	–3	44	15	51	15	42	9
	20–40	12	–16	37	16	36	9	28	3
НСР 05	0–20	7	–	12	–	9	–	8	–
	20–40	10	–	10	–	8	–	8	–

Наилучший эффект показали повышенные дозы (15 и 20 т/га) фосфогипса нейтрализованного, которые обеспечили увеличение исследуемого показателя в пахотном слое почвы на 15–16 мг/кг соответственно, а в подпахотном — на 9 мг/кг. Варианты с внесением расчётной дозы (10 т/га) фосфогипса нейтрализованного привели к увеличению содержания подвижного фосфора по слоям почвы на 14 и 8 мг/кг соответственно.

Фосфогипс нейтрализованный является хорошим источником поступления серы в почву, ведь в зависимости от влажности мелиоранта в нём может содержаться от 21,0 до 24,3 % серы. Результаты наших исследований установили достоверное увеличение содержания подвижной серы в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом на протяжении всего периода наблюдений. Эффект прямо пропорционален внесённым дозам фосфогипса нейтрализованного (Таблица 5).

Уже в первый год после внесения мелиоранта присутствует достоверное увеличение исследуемого показателя для пахотного слоя почвы в диапазоне от 6,8 до 13,4 мг/кг, для подпахотного — от 3,8 до 5,6 мг/кг. Во второй год данное увеличение по слоям почвы варьировало от 6,3 до 14,9 мг/кг в пахотном слое и от 7,9 до 12,8 мг/кг в подпахотном. В третий год прежняя тенденция также

подтвердилась: увеличение в пахотном слое составило от 5,2 до 10,1 мг/кг, в подпахотном — от 5,9 до 9,8 мг/кг. Максимальный эффект получен при внесении 20 т/га фосфогипса нейтрализованного. Применение фосфогипса нейтрализованного позволило перевести обеспеченность почвы данным элементом питания из средней в высокую группировку.

Таблица 5 — Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание подвижной серы в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом, мг/кг

Варианты / показатели	Глубина взятия обр., см	2022 г.		2023 г.		2024 г.		Среднее за 3 года	
		Зна-чение	Δ±	Зна-чение	Δ±	Зна-чение	Δ±	Зна-чение	Δ±
1. Контроль	0–20	8,7	–	10,1	–	7,0	–	8,6	–
	20–40	9,8	–	9,5	–	7,1	–	8,8	–
2. ФГн 5 т/га	0–20	15,5	6,8	16,5	6,3	12,2	5,2	14,7	6,1
	20–40	13,6	3,8	17,4	7,9	13,1	5,9	14,7	5,9
3. ФГн 10 т/га	0–20	16,9	8,2	18,9	8,7	13,4	6,4	16,4	7,8
	20–40	13,9	4,1	18,4	8,9	14,0	6,9	15,4	6,6
4. ФГн 15 т/га	0–20	21,6	12,9	23,3	13,2	16,7	9,6	20,5	11,9
	20–40	14,9	5,1	20,2	10,7	15,4	8,3	16,8	8,0
5. ФГн 20 т/га	0–20	22,1	13,4	25,1	14,9	17,1	10,1	21,4	12,8
	20–40	15,3	5,6	22,3	12,8	16,9	9,8	18,2	9,4
НСР 05	0–20	3,9	–	4,4	–	2,6	–	2,0	–
	20–40	2,5	–	2,5	–	1,9	–	1,6	–

Также фосфогипс в своём составе содержит порядка 40 % кальция, на внесении которого базируется мелиорирующий эффект при химической мелиорации солонцовых почв. Донасыщение почвенного поглощающего комплекса кальцием может привести к вытеснению обменного натрия и магния либо снижению их доли в сумме поглощённых оснований. Данные по влиянию фосфогипса нейтрализованного на содержание обменного кальция в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом представлены в Таблице 6.

Эффект от доз фосфогипса нейтрализованного по влиянию на содержание обменного кальция в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом проявился в динамике к третьему году после внесения мелиоранта. Наилучший результат был получен на вариантах с применением расчётной дозы (10 т/га) фосфогипса нейтрализованного, которая относительно контроля повысила содержание обменного кальция в пахотном слое почвы почвы на 11 %, до 24,3 ммоль/100 г, а в подпахотном — на 8 %, до 23,7 ммоль/100 г.

Варианты с повышенным дозами (15 и 20 т/га) фосфогипса нейтрализованного тоже показали достоверный эффект, но в меньшей степени. На варианте с внесением пониженной дозы (5 т/га) фосфогипса

нейтрализованного статистически значимого результата за период наблюдений выявлено не было.

Таблица 6 — Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание обменного кальция в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом, ммоль/100 г

Варианты / показатели	Глубина взятия обр., см	2022 г.		2023 г.		2024 г.		Среднее за 3 года	
		Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±
1. Контроль	0–20	21,9	–	21,3	–	22,4	–	21,9	–
	20–40	21,5	–	20,7	–	21,8	–	21,5	–
2. ФГн 5 т/га	0–20	21,9	0,0	21,2	–0,1	23,2	0,8	22,1	0,2
	20–40	22,0	0,5	21,5	0,8	22,6	0,8	22,0	0,5
3. ФГн 10 т/га	0–20	25,5	3,6	22,5	1,2	24,8	2,4	24,3	2,4
	20–40	23,0	1,5	23,6	2,9	24,4	2,6	23,7	2,2
4. ФГн 15 т/га	0–20	23,4	1,5	23,6	2,3	25,0	2,6	24,3	2,4
	20–40	22,7	1,2	21,9	1,2	24,4	2,6	23,0	1,5
5. ФГн 20 т/га	0–20	24,0	2,1	20,9	–0,4	24,9	2,5	22,9	1,0
	20–40	23,0	1,5	21,3	0,6	24,4	2,6	22,8	1,3
НСР 05	0–20	3,4	–	3,2	–	2,0	–	1,5	–
	20–40	2,9	–	2,2	–	2,0	–	1,3	–

Анализ научных источников свидетельствует о том, что избыточное содержание магния в почвенном поглотительном комплексе негативно влияет на возделывание сельскохозяйственных культур. При накапливании магния свыше 25 % от ёмкости ППК возрастает набухаемость и усиливается пептизация коллоидов, снижается устойчивость агрономической структуры, ухудшаются фильтрационные свойства почв, усиливаются механизмы разрушения и выноса гумуса, возрастают расходы воды на получение единицы продукции.

Данные по влиянию фосфогипса нейтрализованного на содержание обменного магния в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом, полученные на нашем опыте, представлены в Таблице 7.

Самыми эффективными по влиянию на содержание обменного магния в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом стали варианты с внесением расчётной дозой (10 т/га) фосфогипса нейтрализованного.

Данная доза мелиоранта по отношению к контрольному варианту в среднем за 3 года снизила исследуемый показатель в пахотном слое почвы на 30 %, до 8,2 ммоль/100 г, а в подпахотном — на 18 %, до 8,1 ммоль/100 г. Доля в сумме поглощённых оснований обменного магния на вариантах с внесением 10 т/га мелиоранта в пахотном слое почвы составила 20,6 %, в

подпахотном — 22,5 %. Для контрольного варианта данные значения составили 32 и 31 % соответственно.

Таблица 7 — Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание обменного магния в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом, ммоль/100 г

Варианты / показатели	Глубина взятия обр., см	2022 г.		2023 г.		2024 г.		Среднее за 3 года	
		Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±
1. Контроль	0–20	12,7	–	11,6	–	10,9	–	11,7	–
	20–40	8,9	–	10,8	–	9,9	–	9,9	–
2. ФГн 5 т/га	0–20	15,9	3,2	10,3	–1,3	8,4	–2,5	11,5	–0,2
	20–40	15,3	6,4	9,6	–1,1	9,3	–0,6	11,4	1,5
3. ФГн 10 т/га	0–20	8,0	–4,8	10,0	–1,6	6,6	–4,3	8,2	–3,5
	20–40	8,4	–0,5	8,7	–2,1	7,3	–2,6	8,1	–1,8
4. ФГн 15 т/га	0–20	13,9	1,2	9,0	–2,6	6,5	–4,4	9,8	–1,9
	20–40	13,0	4,1	10,0	–0,8	7,6	–2,3	8,8	–1,1
5. ФГн 20 т/га	0–20	13,9	1,2	9,5	–2,1	7,3	–3,6	8,4	–3,3
	20–40	16,3	7,4	12,4	1,7	7,9	–2,0	12,2	2,3
НСР 05	0–20	5,1	–	1,5	–	2,7	–	2,3	–
	20–40	3,0	–	3,0	–	1,8	–	2,2	–

Натрий содержится в той или иной форме во всех материнских породах и почвах, растениях и животных. В слабосолонцеватых почвах, как правило, обменного натрия изначально содержится значительно меньше, поэтому по своему негативному воздействию он на данных почвах сопоставим с обменным магнием. В наших исследованиях использование фосфогипса нейтрализованного позволило снизить содержание обменного натрия в пахотном и подпахотном слоях почвы (Таблица 8).

Таблица 8 — Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание обменного натрия в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом, ммоль/100 г

Варианты / показатели	Глубина взятия обр., см	2022 г.		2023 г.		2024 г.		Среднее за 3 года	
		Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±
1. Контроль	0–20	0,90	–	0,93	–	0,98	–	0,92	–
	20–40	1,63	–	1,65	–	1,73	–	1,64	–
2. ФГн 5 т/га	0–20	0,75	–0,15	0,57	–0,36	0,68	–0,30	0,67	–0,27
	20–40	1,37	–0,27	0,65	–1,00	0,99	–0,75	1,00	–0,67
3. ФГн 10 т/га	0–20	0,46	–0,44	0,56	–0,37	0,56	–0,42	0,53	–0,41
	20–40	0,78	–0,85	0,58	–1,07	0,74	–1,00	0,70	–0,97

Продолжение

4. ФГн 15 т/га	0–20	0,43	–0,47	0,61	–0,32	0,30	–0,68	0,45	–0,49
	20–40	0,58	–1,06	0,67	–0,98	0,69	–1,04	0,65	–1,02
5. ФГн 20 т/га	0–20	0,39	–0,51	0,58	–0,36	0,38	–0,61	0,45	–0,49
	20–40	0,59	–1,04	0,60	–1,05	0,74	–1,00	0,64	–1,03
НСР 05	0–20	0,20	–	0,25	–	0,29	–	0,15	–
	20–40	0,48	–	0,29	–	0,39	–	0,24	–

По влиянию на содержание обменного натрия в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом самыми эффективными стали варианты с повышенными дозами (15 и 20 т/га) фосфогипса нейтрализованного. Для обеих доз мелиоранта среднее за 3 года снижение показателя в пахотном и подпахотном слоях почвы составило порядка 0,49 и 1,02 ммоль/100 г, а доля в сумме поглощённых оснований — 1,2 и 1,8 % соответственно (Таблица 3). На втором месте по эффективности выступила расчётная доза (10 т/га), где снижение по слоям почвы составило 0,41 и 0,97 ммоль/100 г соответственно. Меньше всего содержание обменного натрия снизилось на вариантах с пониженной дозой (5 т/га) фосфогипса нейтрализованного — на 0,27 и 0,67 ммоль/100 г соответственно.

Таблица 9 — Доля элементов в сумме обменных оснований чернозёма обыкновенного слабосолонцеватого

Варианты / показатели	Эле-менты	Слой 0–20 см						Слой 20–40 см					
		2022 г.		2023 г.		2024 г.		2022 г.		2023 г.		2024 г.	
		ммоль /100 г	%	ммоль /100 г	%	ммоль /100 г	%	ммоль /100 г	%	ммоль /100 г	%	ммоль /100 г	%
1. Контроль	Ca	21,9	61,7	21,3	63,0	22,4	65,3	21,5	67,2	20,7	62,3	21,8	65,3
	Mg	12,7	35,8	11,6	34,3	10,9	31,8	8,9	27,8	10,8	32,5	9,9	29,6
	Na	0,9	2,5	0,9	2,7	1,0	2,9	1,6	5,0	1,7	5,1	1,7	5,1
	∑	35,5	100	33,8	100	34,3	100	32,0	100	33,2	100	33,4	100
2. ФГн 5 т/га	Ca	21,9	56,7	21,2	66,0	23,2	71,8	22,0	58,9	21,5	67,6	22,6	68,7
	Mg	15,9	41,2	10,3	32,1	8,4	26,0	15,3	41,0	9,6	30,2	9,3	28,3
	Na	0,8	2,1	0,6	1,9	0,7	2,2	1,4	0,1	0,7	2,2	1,0	3,0
	∑	38,6	100	32,1	100	32,3	100	38,7	100	31,8	100	32,9	100

Продолжение

Варианты / показатели	Эле-менты	Слой 0–20 см						Слой 20–40 см					
		2022 г.		2023 г.		2024 г.		2022 г.	2023 г.	2024 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
		ммоль /100 г	%	ммоль /100 г	%	ммоль /100 г	%	ммоль /100 г	%	ммоль /100 г	%	ммоль /100 г	%
3. ФГн 10 т/га	Ca	25,5	76,1	22,5	68,0	24,8	77,5	23,0	71,4	23,6	71,7	24,4	75,3
	Mg	8,0	23,8	10,0	30,2	6,6	20,6	8,4	26,1	8,7	26,4	7,3	22,5
	Na	0,5	0,1	0,6	1,8	0,6	1,9	0,8	2,5	0,6	1,8	0,7	2,2
	∑	34,0	100	33,1	100	32,0	100	32,2	100	32,9	100	32,4	100
4. ФГн 15 т/га	Ca	23,4	62,1	23,6	71,1	25,0	78,6	22,7	62,5	21,9	67,2	24,4	74,6
	Mg	13,9	36,6	9,0	27,1	6,5	20,4	13,0	35,8	10,0	30,7	7,6	23,2
	Na	0,4	1,1	0,6	1,8	0,3	0,9	0,6	1,7	0,7	2,1	0,7	2,1
	∑	37,7	100	33,2	100	31,8	100	22,7	100	32,6	100	32,7	100
5. ФГн 20 т/га	Ca	24,0	63,3	20,9	67,4	24,9	76,4	23,0	57,6	21,3	62,1	24,4	73,9
	Mg	13,9	36,6	9,5	30,6	7,3	22,4	16,3	40,9	12,4	36,2	7,9	23,9
	Na	0,39	0,1	0,6	1,9	0,4	1,2	0,6	1,5	0,6	1,7	0,7	2,1
	∑	38,3	100	31,0	100	32,6	100	39,9	100	34,3	100	33,0	100

Влияния внесения доз фосфогипса нейтрализованного на содержание органического вещества и подвижного калия в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом в ходе наших исследований не установлено. При наличии статистически достоверных результатов по данным агрохимическим показателям разница между вариантами укладывается в значение НСР.

В пахотном слое почвы по вариантам опыта среднее за период исследований содержание органического вещества варьировало от 3,9 до 4,3 %, содержание подвижного калия — от 368 до 403 мг/кг. Для подпахотного эти значения составили от 3,8 до 4,1 % и от 330 до 363 мг/кг соответственно.

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ФОСФОГИПСА НЕЙТРАЛИЗОВАННОГО НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

С целью определения влияния фосфогипса нейтрализованного на рост и развитие растений озимой пшеницы в период исследований нами были проведены наблюдения за высотой растений, количеством продуктивных колосьев, массы 1000 зёрен и количеством зёрен в колосе.

В ходе нашей работы был получен достоверный результат по влиянию доз фосфогипса нейтрализованного на количество продуктивных стеблей растений озимой пшеницы (Таблица 10).

Данный эффект в полной мере проявился на третий год после внесения мелиоранта. Минимальный результат по количеству продуктивных стеблей озимой пшеницы получен на вариантах с внесением 5 т/га фосфогипса нейтрализованного — 462 шт/м^2, что ниже на 2 % значений на контрольном варианте. Максимальный результат получен по вариантам с расчётной дозой (10 т/га) фосфогипса нейтрализованного — 486 шт/м^2, что выше контрольного на 3 %.

Таблица 10 — Влияние фосфогипса нейтрализованного на количество продуктивных стеблей озимой пшеницы, шт/м^2

Варианты / показатели	2022 г.		2023 г.		2024 г.		Среднее за 3 года	
	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±
1. Контроль	493	–	486	–	441	–	473	–
2. ФГн 5 т/га	459	–34	459	–27	468	27	462	–11
3. ФГн 10 т/га	470	–23	499	13	490	49	486	13
4. ФГн 15 т/га	494	1	453	–33	494	53	480	7
5. ФГн 20 т/га	435	–58	494	8	495	54	475	1
НСР 05	37	–	35	–	36	–	29	–

Статистическая обработка данных по массе 1000 зёрен озимой пшеницы на вариантах опыта показала достоверность полученных результатов за весь период наблюдений. Варианты с внесением расчётной 10 т/га и повышенных 15 и 20 т/га доз мелиоранта увеличили среднюю массу 1000 зёрен на 1,4–1,5 г, что на 5 % больше контрольного значения. Также стоит отметить высокую зависимость данного показателя от погодных условий периода наблюдений, в ходе корреляционного анализа нами была выявлена сильная положительная связь
(r = 0,81) с количеством выпавших осадков, а с показателями температуры воздуха — сильная отрицательная (r = –0,81).

На высоту растений и количество зёрен в колосе исследуемые дозы фосфогипса за период исследований оказали незначительное воздействие. Среднегодовой показатель высоты растений по вариантам опыта варьировал от 89,6 см при внесении 20 т/га фосфогипса нейтрализованного и до 92,1 см при внесении 5 т/га. Для количества зёрен в колосе озимой диапазон значений составил от 24 до 27 шт. Кроме того, оба показателя продемонстрировали сильную положительную корреляционная связь с количеством выпавших осадков, а также сильную отрицательную с показателями температуры воздуха.

Проведенная нами в фазу колошения растительная диагностика на посевах озимой пшеницы не выявила значительного влияния доз исследуемого

мелиоранта на химический состав растений. В отобранных листьях озимой пшеницы среднее за 3 года содержание общих форм элементов питания варьировало следующим образом: для азота — от 3,37 до 3,56 %, для фосфора — от 0,69 до 0,71 %, для калия — от 2,77 до 2,92 %.

При этом содержание общего азота и фосфора в растениях озимой пшеницы соответствовало оптимальной или высокой обеспеченности данными элементами питания. По калию в 2022–2023 гг. обеспеченность была аналогичной, в 2024 г. нами был выявлен его недостаток. Данное явление можно объяснить погодным фактором, так как последний год был более засушливым и тёплым, чем два предыдущих. Корреляционный анализ выявил для данного элемента питания сильную прямую корреляционную связь (r = 0,99) с количеством выпавших за период вегетации осадков, а также среднюю обратную (r = –0,92) с температурой воздуха.

Также по влиянию на урожайность нами было установлено, что озимая пшеница отзывчива на применяемые дозы фосфогипса нейтрализованного. Определение биологической урожайности в опыте проведено в оптимальные агротехнические сроки и с учётом погодных условий и развития растений озимой пшеницы за каждый год наблюдений (Таблица 11).

Результаты опыта достоверны в течение всех трёх лет наблюдений, что подтверждается статистической обработкой данных по F-критерию, значение которого по годам составляло от 3,61 до 15,46.

Средняя урожайность озимой пшеницы по вариантам опыта варьировала от 3,84 до 4,13 т/га. Минимальная прибавка урожайности озимой пшеницы была получена на вариантах с внесение 20 т/га фосфогипса нейтрализованного, что составило разницу по сравнению с контролем в 0,05 т/га, или 1 %.

Таблица 11 — Влияние фосфогипса нейтрализованного на урожайность озимой пшеницы, т/га

Варианты / показатели	2022 г.		2023 г.		2024 г.		Среднее за 3 года	
	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±
1. Контроль	5,01	–	4,18	–	2,34	–	3,84	–
2. ФГн 5 т/га	5,06	0,05	4,48	0,30	2,62	0,28	4,05	0,21
3. ФГн 10 т/га	5,24	0,23	4,49	0,31	2,67	0,33	4,13	0,29
4. ФГн 15 т/га	4,87	–0,14	4,55	0,37	2,67	0,33	4,02	0,18
5. ФГн 20 т/га	4,51	–0,50	4,51	0,33	2,64	0,30	3,89	0,05
НСР 05	0,22	–	0,25	–	0,21	–	0,19	–

На вариантах с внесением 15 и 5 т/га мелиоранта прибавка урожайности составила 0,19 и 0,21 т/га соответственно, что выше контроля на 5 %. Максимальная средняя прибавка урожайности озимой пшеницы выявлена на вариантах с внесением 10 т/га мелиоранта на полном минеральном фоне, где она составила 0,29 т/га, или 8 %.

В период исследований была подтверждена корреляция урожайности озимой пшеницы с погодными условиями. С количеством выпавших за вегетационный период осадков выявлена сильная положительная корреляционная связь (r = 0,92), а с показателями температуры воздуха — сильная отрицательная (r = –0,98).

На качественные показатели зерна озимой пшеницы применённые дозы фосфогипса не оказали однозначного эффекта. Средние за период наблюдений значения по вариантам опыта составили: для содержания белка — от 11,6 до 12,3 %, для содержания клейковины — от 18,3 до 19,1 %, для показателя индекса деформации клейковины — от 68,8 до 71,3 ед.

В первые два года после внесения мелиоранта на всех вариантах опыта зерно озимой пшеницы соответствовало 5-му классу. На третий год последействия на контрольных вариантах было получено зерно озимой пшеницы, соответствующее 4-му классу, а на вариантах с внесением фосфогипса нейтрализованного в дозах 5–20 т/га — 3-му классу. Оценка класса зерна проведена по содержанию клейковины.

При этом заметную роль по влиянию на показатели качества оказали погодные условия наблюдаемого периода. Так для содержания белка и клейковины в зерне озимой пшеницы корреляционный анализ выявил сильную отрицательную связь с количеством выпавших осадков, а также сильную положительную связь с температурой воздуха.

ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ ФОСФОГИПСА НЕЙТРАЛИЗОВАННОГО НА АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЧЕРНОЗЁМА ОБЫКНОВЕННОГО СЛАБОСОЛОНЦЕВАТОГО И СОДЕРЖАНИЕ ТОКСИКАНТОВ В ЗЕРНЕ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

Фосфогипс содержит в себе потенциально опасные для живых организмов элементы и вещества, его применение в сельском хозяйстве должно сопровождаться контролем за показателями экологической безопасности. Поэтому в отобранных образцах из пахотного (0–20 см) и подпахотного (20–40 см) слоёв почвы нами было определено содержание следующих токсикантов: стронция стабильного, кадмия, свинца, ртути и мышьяка. Стронций и кадмий относят ко второму классу опасности, а свинец, ртуть и мышьяк к первому. Данные элементы внесены в перечень обязательных показателей при проведении эколого-токсикологического обследования в рамках государственной системы мониторинга почв.

По влиянию доз фосфогипса нейтрализованного на содержание стабильного стронция и кадмия в ходе наших исследований достоверных отличий между вариантами опыта не выявлено. По содержанию стабильного стронция среднегодовые значения для пахотного слоя почвы варьировали от 113 до 132 мг/кг, для подпахотного — от 109 до 121 мг/кг. Максимальное значение содержания данного тяжёлого металла не превышало 26 % от рекомендованного безвредного уровня. По кадмию были выявлены следующие диапазоны значений: для пахотного слоя почвы — от 0,12 до 0,16 мг/кг, для подпахотного — от 0,14 до 0,16 мг/кг. Максимальное выявленное значение содержания данного элемента по вариантам не превысило 10 % процентов от ПДК.

Влияние доз мелиоранта на содержание в почве свинца было ограниченным и проявилось только на третий год наблюдений в подпахотном слое почвы, где данный показатель при внесении фосфогипса нейтрализованного снизился на

2,29–4,37 мг/кг. Средние значения показателя для пахотного слоя почвы варьировали от 13,53 до 15,92 мг/кг, для подпахотного — от 13,16 до 14,85 мг/кг. Максимальное выявленное значение содержания данного элемента по вариантам не превысило 15 % от ПДК.

Внесение фосфогипса нейтрализованного в первые два года наблюдений привело к достоверному снижению содержания мышьяка в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом (Таблица 12).

Таблица 12 — Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание мышьяка в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом, мг/кг

Варианты / показатели	Глубина взятия обр., см	2022 г.		2023 г.		2024 г.		Среднее за 3 года	
		Зна-чение	Δ±	Зна-чение	Δ±	Зна-чение	Δ±	Значение	Δ±
1. Контроль	0–20	3,12	–	4,17	–	3,23	–	3,51	–
	20–40	3,03	–	4,07	–	2,70	–	3,27	–
2. ФГн 5 т/га	0–20	2,54	–0,58	3,63	–0,54	2,87	–0,37	3,01	–0,50
	20–40	2,46	–0,57	3,53	–0,54	2,63	–0,07	2,87	–0,40
3. ФГн 10 т/га	0–20	2,66	–0,46	3,10	–1,07	2,93	–0,30	2,90	–0,61
	20–40	2,43	–0,60	3,00	–1,07	2,97	0,27	2,80	–0,47
4. ФГн 15 т/га	0–20	3,15	0,03	2,73	–1,44	2,90	–0,33	2,93	–0,58
	20–40	2,61	–0,42	2,73	–1,34	2,80	0,10	2,71	–0,56
5. ФГн 20 т/га	0–20	2,72	–0,40	1,83	–2,34	2,83	–0,40	2,46	–1,05
	20–40	2,51	–0,52	1,83	–2,24	2,80	0,10	2,38	–0,89
НСР 05	0–20	0,24	–	0,51	–	0,41	–	0,45	–
	20–40	0,14	–	0,63	–	0,37	–	0,46	–

**ОДК для содержания мышьяка в почве составляет 10,0 мг/кг.*

Среднее за период наблюдений содержание мышьяка по вариантам опыта варьировало в пахотном слое почвы от 2,46 до 3,01 мг/кг. Снижение для пахотного слоя почвы составляло 14–30 %. Для подпахотного слоя почвы снижение составило 12–27 %, и оно прямо пропорционально дозе вносимого фосфогипса нейтрализованного. По годам можно проследить затухание данного эффекта. Максимальное выявленное значение содержания данного элемента по вариантам не превысило 42 % от ПДК, угрозы для экологии не выявлено.

По влиянию на содержание в почве ртути существенная разница между вариантами опыта была выявлена на второй год после внесения фосфогипса нейтрализованного. В данный период произошло увеличение содержания ртути на вариантах с расчётной (10 т/га) и повышенными (15 и 20 т/га) дозами фосфогипса нейтрализованного. Увеличение составило для пахотного слоя почвы от 0,010 до 0,012 мг/кг, для подпахотного — от 0,008 до 0,010 мг/кг. В целом за период наблюдений тенденция по влиянию доз мелиоранта на содержание данного токсиканта в почве не просматривается. Максимальное выявленное

значение содержания данного элемента по вариантам опыта не превысило 2 % от ПДК.

Параллельно анализу почвенных образцов было проведено определение содержания токсикантов в зерне озимой пшеницы. Анализ научных работ других авторов по применению фосфогипса в сельском хозяйстве свидетельствует об увеличении содержания стабильного стронция в растениях после внесения мелиоранта. Рост данного показателя, как правило, прямо пропорционален внесённой дозе фосфогипса.

В нашем исследовании расчётные 10 т/га и повышенные 15 и 20 т/га дозы фосфогипса нейтрализованного на второй и третий год последействия привели к достоверному увеличению содержания стабильного стронция в зерне озимой пшеницы, повысив его содержание относительно контроля на 24–37 % (Таблица 13).

Таблица 13 — Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание стабильного стронция в зерне озимой пшеницы, мг/кг

Вариант/показатель	2022		2023		2024		Среднее за 3 года	
	Зна-чение	Δ±	Зна-чение	Δ±	Зна-чение	Δ±	Зна-чение	Δ±
1. Контроль	1,07	–	2,13	–	2,13	–	1,78	–
2. ФГн 5 т/га	1,55	0,48	2,26	0,12	2,05	–0,09	1,95	0,18
3. ФГн 10 т/га	1,07	0,00	2,92	0,79	2,67	0,53	2,22	0,44
4. ФГн 15 т/га	2,08	1,01	2,65	0,51	2,64	0,51	2,45	0,68
5. ФГн 20 т/га	1,33	0,26	2,79	0,66	2,80	0,67	2,31	0,53
$НСР_{05}$	0,55	–	0,37	–	0,45	–	0,34	–

Среднее за 3 года наблюдений содержание стабильного стронция в зерне озимой пшеницы на вариантах с внесением фосфогипса нейтрализованного варьировало от 1,78 до 2,45 мг/кг. Максимальное увеличение исследуемого показателя выявлено на вариантах с повышенными дозами (20 и 15 т/га) мелиоранта, где увеличение относительно контроля составило 30–38 %. На вариантах с расчётной дозой фосфогипса нейтрализованного увеличение составило 25 %, а на вариантах с внесением 5 т/га — 10 %.

Данный фактор не оказал негативного влияния на безопасность продукции, так, на вариантах с самым высоким содержанием стабильного стронция соотношение Ca/Sr составило 169/1, при минимальном безопасном 140/1, что абсолютно безопасно.

Также внесённые дозы фосфогипса нейтрализованного на второй год последействия оказали достоверное снижение содержания кадмия в зерне озимой пшеницы на всех вариантах опыта, снижение составило от 0,01 до 0,02 мг/кг. В среднем за 3 года исследований содержание данного тяжёлого металла составило от 0,03 до 0,04 мг/кг. Максимальное за период

наблюдения содержание кадмия в зерне озимой пшеницы на вариантах опыта не превышало 40 % от ПДК.

Влияние на содержание свинца и мышьяка в зерне озимой пшеницы не выявлено. Полученные по вариантам опыта значения содержания в зерне данных токсикантов находились на нижней границе определения выбранных методов. Максимально возможные значения содержания свинца и мышьяка значительно ниже установленных ПДК.

ГЛАВА 6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ФОСФОГИПСА НЕЙТРАЛИЗОВАННОГО

С целью экономического обоснования проведенных исследований в работе была выполнена оценка эффективности возделывания озимой пшеницы в среднем за 2022–2024 гг. с учётом применения различных норм внесения мелиоранта на основе разработки типовых технологических карт (Таблица 14).

Таблица 14 — Показатели экономической эффективности возделывания озимой пшеницы при применении фосфогипса нейтрализованного в среднем за 2022–2024 гг.

Показатель	Вариант опыта				
	1. Контроль	2. ФГн 5 т/га	3. ФГн 10 т/га	4. ФГн 15 т/га	5. ФГн 20 т/га
Урожайность с 1 га, т	3,84	4,05	4,13	4,03	3,89
Цена реализации 1 т, руб.	12000,0	13000,0	13000,0	13000,0	13000,0
Выручка от реализации с 1 га, руб.	46080,0	52650,0	53690,0	52390,0	50570,0
Затраты труда на 1 га, чел.-ч.	8,5	8,9	8,9	8,9	8,9
Затраты труда на 1 т, чел.-ч.	2,2	2,2	2,2	2,2	2,3
Производственные затраты на 1 га, руб.	36346,9	40821,7	44129,1	47293,0	50425,0
Себестоимость 1 т продукции, руб.	9465,3	10079,4	10685,0	11735,2	12962,7
Прибыль на 1 га, руб.	9733,1	11828,3	9560,9	5097,0	145,0
Уровень рентабельности, %	26,8	29,0	21,7	10,8	0,3

Учитывая однократность внесения мелиоранта, затраты на его использование пропорционально распределены по всем годам исследования с целью более обоснованного сопоставления результатов расчётов.

Проведённая нами оценка эффективности применения фосфогипса нейтрализованного на чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом установила что:

— в среднем за период исследований наибольшая урожайность озимой пшеницы получена при внесении расчётной дозы (10 т/га) фосфогипса нейтрализованного 4,13 т/га, что выше контроля на 7 %;

— по выручке от реализации сельскохозяйственной продукции за 3 года самыми лучшими по данному показателю стали варианты с внесением

расчётной дозы (10 т/га) фосфогипса нейтрализованного, на них выручка равна 53690,0 руб/га, что выше контроля на 16 %;

— производственные затраты на применение фосфогипса нейтрализованного при возделывании озимой пшеницы росли вместе с ростом дозы мелиоранта. Самые низкие затраты получены при применении пониженной дозы (5 т/га) мелиоранта — 40821,7 руб/га;

— наибольшая прибыль получена при внесении пониженной дозы (5 т/га) мелиоранта, она составила 11828,3 руб/га;

— самый высокий уровень рентабельности соответствует вариантам с внесением пониженной дозы (5 т/га) фосфогипса нейтрализованного — 29,0 %. Данный результат на 7,3 процентных пункта выше, чем в варианте с использованием расчётной дозы (10 т/га) фосфогипса нейтрализованного (21,7 %), где была достигнута наибольшая урожайность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённых в 2021–2024 гг. полевых опытов и лабораторных исследований по эффективности использования фосфогипса нейтрализованного на чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом в условиях зоны неустойчивого увлажнения Центрального Предкавказья мы пришли к следующему заключению.

Внесённые расчётные 10 т/га и повышенные 15 и 20 т/га дозы фосфогипса нейтрализованного на полном минеральном фоне привели к снижению реакции pH чернозёма обыкновенного слабосолонцеватого. Данный эффект достигнут на второй и третий год последействия мелиоранта в пахотном слое почвы, разница по сравнению с контролем на вариантах с внесением 10, 15 и 20 т/га мелиоранта составила 0,2 ед.

Применение фосфогипса нейтрализованного оказало влияние на содержание подвижных форм фосфора. Максимальный эффект был проявлен на третий год после внесения, чему поспособствовала достаточная влагообеспеченность за два предыдущих. Наибольший эффект показали повышенные дозы 15 и 20 т/га фосфогипса нейтрализованного. Они смогли обеспечить увеличение исследуемого показателя в слое почвы 0–20 см на 15–16 мг/кг, а в слое 20–40 см – на 9 мг/кг. Расчётная доза (10 т/га) фосфогипса нейтрализованного повысила показатели для пахотного слоя почвы на 14 мг/кг, для подпахотного – на 8 мг/кг.

Эффект от применения фосфогипса нейтрализованного на содержание подвижной серы в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом прямо пропорционален дозам вносимого мелиоранта. Полученная разница по вариантам опыта статистически достоверна на протяжении всего периода исследований. Среднее за 3 года увеличение содержания подвижной серы в пахотном слое почвы составило от 6,1 до 12,8 мг/кг (71–149 %), в подпахотном — от 5,9 до 9,4 мг/кг (67–107 %). Это позволило перевести обеспеченность почвы данным элементом питания из средней в высокую группировку.

Влияние применения фосфогипса нейтрализованного на содержание обменного кальция в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом проявлялось в динамике: наибольший эффект выявлен на 3 год последействия. Наиболее эффективными по влиянию на данный агрохимический показатель оказались варианты с применением расчётной дозы (10 т/га) фосфогипса нейтрализованного: разница с контролем в среднем за 3 года составила 2,4 ммоль/100 г для слоя почвы 0–20 см и 2,2 ммоль/100 г для слоя 20–40 см, что составляет 11 и 8 % соответственно.

Изучение влияния фосфогипса нейтрализованного на содержание обменного магния в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом показало наиболее эффективным вариант с расчётной дозой (10 т/га). На данных вариантах с увеличением года последействия содержание обменного магния составило в пахотном и подпахотном слоях почвы 8,2 и 8,1 ммоль/100 г, что ниже значений на контрольном варианте на 3,5 и 1,8 ммоль/100 г соответственно. Доля в сумме поглощённых оснований обменного магния на вариантах с внесением 10 т/га мелиоранта в пахотном слое почвы составила 20,6 %, в подпахотном — 22,5 %. Для контрольного варианта данные значения составили 31,8 и 29,6 % соответственно.

Существенное влияние на содержание обменного натрия в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом оказали все дозы фосфогипса нейтрализованного. Лучший эффект выявлен на вариантах с повышенными дозами мелиоранта в 15 и 20 т/га, где среднее за 3 года содержание обменного натрия в пахотном слое почвы составило 0,45 ммоль/100 г, что ниже контроля на 49 %. В подпахотном слое почвы данный показатель равен 0,64–0,65 ммоль/100 г, что ниже контроля на 60 %. Доля в сумме поглощённых оснований обменного натрия на вариантах с внесением повышенных доз мелиоранта в пахотном слое почвы составила 1,2, в подпахотном — 1,8 %. Для контрольного варианта данные значения составили 2,9 и 5,1 % соответственно.

По показателю количества продуктивных стеблей эффект от применения различных доз фосфогипса нейтрализованного в полной мере проявился на третий год после внесения. Минимальный результат по количеству продуктивных стеблей озимой пшеницы получен на вариантах с внесением 5 т/га фосфогипса нейтрализованного — 462 шт/м^2, что ниже на 2 % значений на контрольном варианте. Максимальный результат получен по вариантам с расчётной дозой 10 т/га фосфогипса нейтрализованного — 486 шт/м^2, что выше контрольного на 3 %.

Показатель массы 1000 зёрен озимой пшеницы в среднем за 3 года по вариантам опыта варьировал от 32,7 до 34,0 г. Варианты с внесением расчётной (10 т/га) и повышенных (15 и 20 т/га) доз мелиоранта увеличили среднюю массу 1000 зёрен на 1,4–1,5 г, или 5 %.

Средняя урожайность озимой пшеницы по вариантам опыта варьировала от 3,84 до 4,13 т/га. Достоверная за 3 года наблюдений средняя прибавка урожайности выявлена на вариантах с пониженной (5 т/га) и расчётной

(10 т/га) дозами фосфогипса нейтрализованного, она составила 0,21 и 0,29 т/га соответственно, или от 5 до 8 %.

Статистически достоверного влияния внесения фосфогипса нейтрализованного на содержание в зерне озимой пшеницы белка и клейковины, а также показатель ИДК не установлено. В 2022–2023 гг. на всех вариантах опыта получено зерно, соответствующее 5-му классу. В 2024 г. (третий год последействия) на контрольных вариантах было получено зерно озимой пшеницы, соответствующее 4-му классу, а на вариантах с внесением фосфогипса нейтрализованного в дозах от 5 до 20 т/га – 3-му классу.

Фосфогипс нейтрализованный в изученных дозах не представляет угрозы для почвы в отношении загрязнения стабильным стронцием, кадмием, свинцом, ртутью и мышьяком. Все полученные по вариантам опыта значения не превышали ПДК/ОДК.

Внесённые дозы фосфогипса нейтрализованного привели к существенному снижению содержания мышьяка в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом. Снижение прямо пропорционально дозе мелиоранта, для пахотного слоя почвы оно составляло 14–30 %, для подпахотного — 12–27 %. По годам можно проследить затухание данного эффекта. Максимальное выявленное значение содержания данного элемента по вариантам не превысило 42 % от ПДК, угрозы для экологии не выявлено.

Фосфогипс нейтрализованный на содержание свинца и ртути в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом оказал ограниченное влияние, по полученным данным выявить тенденцию не представляется возможным. Максимальное выявленное значение содержания данного свинца не превысило 15 % от ПДК, ртути — 2 % от ПДК.

Внесённые дозы фосфогипса нейтрализованного на содержание стабильного стронция и кадмия в чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом существенного влияния не оказали. Содержание стронция не превышает 26 % от рекомендованного безвредного уровня, кадмия — 10 % от ПДК.

Дозы фосфогипса нейтрализованного в 10, 15 и 20 т/га в среднем за 3 года привели к статистически достоверному увеличению содержания стабильного стронция в зерне озимой пшеницы на 10–38 %. Данный фактор не оказал негативного влияния на безопасность продукции, так, на вариантах с самым высоким содержанием стабильного стронция соотношение Ca/Sr составило 169/1, при минимальном безопасном — 140/1.

Внесённые дозы фосфогипса нейтрализованного в среднем за 3 года снизили содержания кадмия в зерне озимой пшеницы на величину от 0,01 до 0,02 мг/кг, при содержании на контрольном варианте — в 0,04 мг/кг. Максимальное за период наблюдения содержание кадмия в зерне озимой пшеницы на вариантах опыта не превышало 40 % от ПДК.

Экономическая оценка применения различных доз фосфогипса нейтрализованного на чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом при возделывании озимой пшеницы выявила, что наибольшая прибыль получена при внесении 5 т/га мелиоранта, она составила 11828,3 руб./га. На данных

вариантах также получена максимальная рентабельность — 29,0 %. На втором месте по экономической эффективности расчётная доза мелиоранта, которая обеспечивает прибыль в 9560,9 руб/га при уровне рентабельности в 21, 7 %.

ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВУ

По результатам проведённых исследований предлагаем следующие рекомендации при возделывании озимой пшеницы на чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом в зоне неустойчивого увлажнения Центрального Предкавказья:

1. Для достижения максимального экономического эффекта рекомендуется вносить дозу фосфогипса нейтрализованного в 5 т/га. Данная доза фосфогипса нейтрализованного обеспечивает среднюю прибыль в 11828,3 руб/га при рентабельности в 29,0 %.

2. Внесение расчётной дозы фосфогипса нейтрализованного 10 т/га рекомендуется проводить в целях поддержания плодородия почвы. Данная доза мелиоранта с учётом последействия повышает содержание подвижного фосфора в пахотном слое почвы на 14 мг/кг, подвижной серы на 7,8 мг/кг, обменного кальция на 2,4 ммоль/100 г при средней прибыли в 9560,9 руб/га и рентабельности в 21,7 %.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Учитывая эффективность и экономическую целесообразность использования фосфогипса нейтрализованного на чернозёме обыкновенном слабосолонцеватом в условиях Центрального Предкавказья, в ходе дальнейших исследований необходимо произвести его сравнительную оценку с кислой формой фосфогипса как в порошковидной, так и гранулированной форме.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, которые входят в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. Проблемы гипсования солонцовых почв в Ставропольском крае / В. Г. Сычев, Ю. И. Гречишкина, В. П. Егоров, **А. В. Матвиенко** // Плодородие. — 2021. — № 5(122). — С. 37–43. (**К1**)

2. Гречишкина, Ю. И. Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание мышьяка в почве и зерне озимой пшеницы на чернозёме слабосолонцеватом / Ю. И. Гречишкина, В. П. Егоров, **А. В. Матвиенко** // Плодородие. — 2023. — № 4(133). — С. 92–94. (**К1**)

3. Егоров, В. П. Оценка поступления мышьяка из фосфогипса нейтрализованного в почву и сельскохозяйственную продукцию на черноземе слабосолонцеватом / В. П. Егоров, Ю. И. Гречишкина, **А. В. Матвиенко** // Агрохимический вестник. — 2024. — № S3. — С. 79–82. (**К1**)

Статьи в научных сборниках и журналах

1. Агроэкологическая оценка влияния фосфогипса нейтрализованного на урожай и качество озимой пшеницы / В. Г. Сычев, В. А. Шевченко, Ю. И. Гречишкина, **А. В. Матвиенко** // Мелиорация и водное хозяйство. — 2023. — № 6. — С. 36–39.

2. Гречишкина, Ю. И. Влияние фосфогипса нейтрализованного на урожайность и качество озимой пшеницы на чернозёмах слабосолонцеватых в условиях Центрального Предкавказья / Ю. И. Гречишкина, А. В. Матвиенко // Эволюция и деградация почвенного покрова : сборник научных статей по материалам VI Международной научной конференции, Ставрополь, 19–22 сентября 2022 года. — Ставрополь : Общество с ограниченной ответственностью «СЕКВОЙЯ», 2022. — С. 100–103.

3. Гречишкина, Ю. И. Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание стронция стабильного в почве и зерне озимой пшеницы на чернозёме слабосолонцеватом в условиях Центрального Предкавказья / Ю. И. Гречишкина, **А. В. Матвиенко** // Фундаментальные и прикладные научные исследования: инноватика в современном мире : сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции в 3 частях, Уфа, 21 марта 2023 года. Часть 1. — Уфа : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023. — С. 157–161.

4. **Матвиенко, А. В.** Сравнительная характеристика агрохимических показателей чернозёма обыкновенного солонцеватого в условиях Центрального Предкавказья / А. В. Матвиенко, Ю. И. Гречишкина // Биологизация земледелия — основа продовольственной безопасности России в длительной перспективе : сборник научных статей, Ставрополь, 12–14 ноября 2024 года. — Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, 2024. — С. 96–101.

5. Grechishkina Y., Egorov V. P., **Matvienko A. V.** (2024). The Effect of Neutralized Phosphogypsum on the Productivity and Safety of Winter Wheat Grain. In: Samoylenko, I., Rajabov, T. (eds) Innovations in Sustainable Agricultural Systems, Volume 1. ISAS 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1130. Springer, Cham.

Подписано в печать 17.04.2025. Формат 60x84 1/16. Гарнитура «Таймс». Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ № 204.

Отпечатано в типографии издательско-полиграфического комплекса СтГАУ «АГРУС», г. Ставрополь, ул. Пушкина, 15.