

УДК 633.11:631.85(470.62/67)

<https://doi.org/10.31279/2949-4796-2025-15-3-78-87>

Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание стабильного стронция в черноземе слабосолонцеватом и зерне озимой пшеницы в условиях Центрального Предкавказья

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Юлия Ивановна Гречишкина

E-mail: lnwg@mail.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Гречишкина Ю.И., Матвиенко А.В.
Влияние фосфогипса
нейтрализованного
на содержание стабильного
стронция в черноземе
слабосолонцеватом и зерне
озимой пшеницы в условиях
Центрального Предкавказья.

*Аграрный вестник Северного**Кавказа*. 2025;15(3):78-87.<https://doi.org/10.31279/2949-4796-2025-15-3-78-87> EDN ZKWSYT**ПОСТУПИЛА:** 10.06.2025**ДОРАБОТАНА:** 24.08.2025**ПРИНЯТА:** 05.09.2025**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:**

авторы сообщают об отсутствии
конфликта интересов.

COPYRIGHT: © 2025 Гречишкина Ю.И.,
Матвиенко А.В.



Ю.И. Гречишкина , А.В. Матвиенко

Ставропольский государственный аграрный университет,
г. Ставрополь, Россия

АННОТАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ. В почвенных условиях Центрального Предкавказья применение фосфогипса нейтрализованного в качестве химического мелиоранта является эффективным средством повышения продуктивности возделывания сельскохозяйственных культур на солонцовых почвах. Так как мелиорант в своем составе содержит стронций, необходимо подтверждение экологической безопасности его применения.

ЦЕЛЬ. Определить влияние последствий от внесения фосфогипса нейтрализованного на содержание стабильного стронция в черноземе обыкновенном слабосолонцеватом и зерне озимой пшеницы в условиях Центрального Предкавказья.

МЕТОДЫ. Работу выполняли в 2021–2024 гг. в производственном опыте в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края России на территории Андроповского муниципального округа. Изучали эффект от внесения различных доз фосфогипса нейтрализованного (5, 10, 15 и 20 т/га). Почва опытного участка – чернозем обыкновенный слабосолонцеватый. Отбор почвенных образцов в опыте проводился из пахотного (0–20 см) и подпахотного (20–40 см) слоев.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Применение доз фосфогипса нейтрализованного не привело к статистически достоверному увеличению в почве содержания стабильного стронция, среднее за 3 года исследований содержание по вариантам опыта варьировало в интервале 109–132 мг/кг. В зерне озимой пшеницы было выявлено достоверное увеличение стабильного стронция на вариантах с внесением 10–20 т/га мелиоранта в интервале 0,44–0,68 мг/кг, при этом полученное соотношение кальция к стронцию подтвердило безопасность продукции.

ВЫВОДЫ. Применение фосфогипса нейтрализованного в дозах от 5 до 20 т/га на черноземе обыкновенном слабосолонцеватом не приводит к загрязнению стабильным стронцием почвы и зерна озимой пшеницы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фосфогипс нейтрализованный, дозы фосфогипса, чернозем обыкновенный, озимая пшеница, солонцеватые почвы, химическая мелиорация, стабильный стронций

<https://doi.org/10.31279/2949-4796-2025-15-3-78-87>

The effect of Neutralized Phosphogypsum on the Content of Stable Strontium in Slightly Saline Chernozem and Winter Wheat Grain in the Conditions of the Central Ciscaucasia

CORRESPONDENCE:

Yulia I. Grechishkina

E-mail: lnwg@mail.ru

FOR CITATION:

Grechishkina Yu.I., Matvienko A.V.
The effect of Neutralized
Phosphogypsum on the Content
of Stable Strontium in Slightly Saline
Chernozem and Winter Wheat Grain
in the Conditions of the Central
Ciscaucasia. *Agrarian Bulletin of the
North Caucasus*. 2025;15(3):78-87.
<https://doi.org/10.31279/2949-4796-2025-15-3-78-87> EDN ZKWSYT

RECEIVED: 10.06.2025

REVISED: 24.08.2025

ACCEPTED: 05.09.2025

DECLARATION OF COMPETING INTEREST:

none declared.

COPYRIGHT: © 2025 Grechishkina Yu.I.,
Matvienko A.V.



Yulia I. Grechishkina , Alexey V. Matvienko

Stavropol State Agrarian University,
Stavropol, Russia

ABSTRACT

INTRODUCTION. The use of neutralized phosphogypsum as a chemical ameliorant is an effective method for enhancing agricultural productivity on solonetz soils in the central Ciscaucasia region. However, given that the ameliorant contains strontium in its composition, confirmation of its environmental safety is required.

AIM. To determine the residual effect of neutralized phosphogypsum application on the content of stable strontium in slightly solonetzic common chernozem and winter wheat grain under the conditions of the central Ciscaucasia.

MATERIALS AND METHODS. The study was conducted from 2021 to 2024 in a production-scale experiment located in the zone of unstable moisture availability in the Stavropol Krai of Russia, within the Andropovsky municipal district. The effect of different application rates of neutralized phosphogypsum (5, 10, 15, and 20 t/ha) was investigated. The soil of the experimental site was slightly solonetzic common chernozem. Soil samples were collected from the plow layer (0–20 cm) and sub-plow layer (20–40 cm).

RESULTS. The application of neutralized phosphogypsum rates did not result in a statistically significant increase in the stable strontium content in the soil. The average content over the three years of study across the experimental treatments varied within the range of 109–132 mg/kg. A significant increase in stable strontium was detected in winter wheat grain in treatments with the application of 10–20 t/ha of the ameliorant, ranging from 0.44 to 0.68 mg/kg. However, the resulting calcium-to-strontium ratio confirmed the safety of the produced grain.

CONCLUSION. The application of neutralized phosphogypsum at rates ranging from 5 to 20 t/ha on slightly solonetzic common chernozem does not lead to contamination of the soil or winter wheat grain with stable strontium.

KEYWORDS: neutralized phosphogypsum, phosphogypsum doses, common chernozem, winter wheat, brackish soils, chemical reclamation, stable strontium

ВВЕДЕНИЕ

Для Российской Федерации химическая мелиорация солонцовых почв является довольно актуальной проблемой, так как на данные почвы приходится порядка 22,9 млн га [1]. Одним из самых эффективных способов повышения эффективности сельскохозяйственного производства на таких почвах является проведение гипсования с внесением фосфогипса в солонцовый горизонт [2]. Данный мелиорант является крупнотоннажным побочным продуктом при производстве фосфорных удобрений [3]. В своем составе он содержит кальций, серу, фосфор и ряд микроэлементов, что определяет его ценность для восстановления деградированных земель и повышения их плодородия [4–6].

Отвалы фосфогипса представляют собой определенную проблему для экологии, они оказывают негативное влияние не только на почву прилегающей территории, но и на подземные и поверхностные воды. Опасные вещества из отвалов попадают в окружающую среду со стоком атмосферных осадков или переносятся ветром в качестве пыли [7]. Данные экологические проблемы вызывают опасения среди представителей научного сообщества многих стран [8; 9].

При использовании фосфогипса в качестве мелиоранта ученые рекомендуют проводить периодический мониторинг экологической безопасности почвы [10]. Это обусловлено содержанием в нем таких опасных элементов, как фтор, свинец, мышьяк, ртуть, кадмий и др. [11]. Вторым по опасности среди элементов, содержащихся в фосфогипсе, является стабильный стронций (Sr) [12]. Стронций в фосфогипсе содержится в значительном объеме (до 3,5 %), цифры сопоставимы с его содержанием в фосфорных удобрениях или даже превышают их [13]. Опасность стронция обусловлена конкурентным взаимодействием с кальцием в процессах абсорбции, транспорта, биораспределения и накопления в костях [14]. Так, проводимые ранее исследования выявили, что при внесении 5 т/га фосфогипса содержание стронция в зерне озимой пшеницы хоть и не критически, но увеличилось [15].

Фосфогипс нейтрализованный только относительно недавно получил широкое распространение на территории Российской Федерации. Новые свойства, которые он приобретает в ходе процесса нейтрализации, вызывают исследовательский интерес [16]. После процедуры нейтрализации водо-

родный показатель мелиоранта повышается с $pH = 1,5-3,0$ до $pH = 5,0-7,0$ и токсиканты переходят менее доступные формы соединений и/или полностью выводятся из состава фосфогипса [17]. При этом количество стабильного стронция в мелиоранте снижается до 0,46 % [18]. Данную технологию обработки фосфогипса перед использованием рекомендуют и в международных исследовательских кругах, обосновывая это снижением потенциальных экологических и медицинских рисков [19]. Однако, несмотря на очевидные агроэкологические преимущества фосфогипса нейтрализованного, в настоящее время недостаточно публикаций по оценке его экологической безопасности на черноземах слабосолонцеватых Центрального Предкавказья.

Целью статьи является определение эффекта от внесения различных доз фосфогипса нейтрализованного на содержание стабильного стронция в черноземе обыкновенном слабосолонцеватом и зерне озимой пшеницы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

В качестве объектов исследования выступили фосфогипс нейтрализованный (ФГн), чернозем обыкновенный слабосолонцеватый и растения озимой пшеницы. В опыте был применен фосфогипс нейтрализованный (ФГн) производства АО «Минерально-химическая компания «ЕвроХим», г. Белореченск, Россия. Химический анализ мелиоранта установил следующие данные: содержание серы (S) – 17 %, содержание кальция (Ca) – 21,3 %, содержание фосфора (P_2O_5) – 1,2 %, массовая доля воды – 20 %, показатель активности водородных ионов 1 % суспензии – 6,0 ед.

На опытном участке объектом исследования выступила озимая пшеница сорта «Адель» селекции Национального центра зерна имени П. П. Лукьяненко, г. Краснодар, Россия. Сорт, допущенный к использованию в Северо-Кавказском регионе с 2014 г., характеризуется средней высотой стебля, повышенной устойчивостью к полеганию и высокой засухоустойчивостью при средней морозоустойчивости. Качество зерна соответствует категории «ценных». Потенциал урожайности в условиях региона оценивается в среднем в 4,16 т/га.

Методы

В рамках эксперимента, руководствуясь методикой регистрационных испытаний агрохимикатов (2018 г.), был проведен отбор проб почвы для последующего агрохимического и агроэкологического анализа. Параллельно осуществлялся биологический учет урожайности с отбором образцов продукции с каждой делянки для лабораторных исследований.

Содержание стабильного стронция в почве определяли в соответствии с методическими указаниями по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства [20]. Для анализа образцов зерна озимой пшеницы использовали ГОСТ 30178-96 (Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов, определение стабильного стронция, кадмия и свинца).

Лабораторные анализы выполнены в испытательном центре Ставропольского филиала ФГБУ «Агрохимическая служба России», ранее ФГБУ ГЦАС «Ставропольский».

Процедура исследования

Работы выполнены в 2020–2024 гг. на опытном участке, расположенном на территории ИП Глава К(Ф)Х Сабынин Г. К. Андроповского муниципального округа Ставропольского края. Опыт однофакторный, с систематическим размещением делянок. Ширина делянки – 20 м, длина – 200 м, площадь – 4000 м². Повторность опыта – трехкратная.

Данные исследования являются частью комплексной работы по оценке агроэкологического влияния фосфогипса на почву и растения. Агрономический аспект этого влияния мы уже раскрыли в нашей предыдущей статье [21], в данной же публикации сконцентрируем внимание на содержании стабильного стронция.

Полевой опыт был заложен в 2020 году. Подготовительный этап включал агрохимическое обследование участка, химический анализ фосфогипса и разработку схемы опыта. С помощью метода порога коагуляции высокодисперсных частиц была установлена оптимальная мелиорирующая доза нейтрализованного фосфогипса – 10 т/га. Схема опыта содержит варианты: без внесения мелиоранта (контроль); фосфогипс нейтрализованный, 5 т/га; фосфогипс нейтрализованный, 10 т/га; фосфогипс

нейтрализованный, 15 т/га; фосфогипс нейтрализованный, 20 т/га.

В 2021 г. для внесения мелиоранта на опытный участок был использован трактор New Holland 8040 с разбрасывателем UMEGA PI 20. Внесение выполнено по чистому пару. Затем фосфогипс нейтрализованный залущен и перемешан с почвой с помощью дисковой бороны Rubin. Заделка в почву осуществлено с помощью плуга KVERNELAND на глубину 25 см.

Минеральный фон (хозяйственный) ($N_{46}P_{52}K_{30}$) опыта соответствует технологии, принятой в хозяйстве, и включает внесение под основную обработку почвы аммофоса $N_{12}P_{52}$ и калия хлористого K_{30} , а также весеннюю азотную подкормку аммиачной селитрой в дозировке N_{34} . Для внесения удобрений использован разбрасыватель минеральных удобрений AMAZONE в сочетании с трактором New Holland 5670.

Почва опытного участка представлена черноземом обыкновенным слабосолонцеватым глубокосильносолончаковым малогумусным среднемощным. Агрохимический анализ почвенных образцов пахотного слоя почвы (0–20 см) опытного участка выявил: содержание органического вещества – 5,1 % (среднее), содержание подвижного фосфора – 32 мг/кг (повышенное), содержание подвижного калия – 423 мг/кг (высокое), реакция рН водной суспензии – 7,5 ед. (нейтральная), содержание обменного кальция – 21,2 ммоль/100 г почвы, содержание обменного магния – 11,8 ммоль/100 г почвы, содержание обменного натрия – 0,95 ммоль/100 г почвы.

Наблюдения на опыте проведены в период 2021–2024 гг. Три года подряд возделываемой культурой была озимая пшеница сорта Адель, предшественником был чистый пар. Сев культуры осуществлялся в конце октября – первых числах ноября. Сроки оптимальные для зоны возделывания. Для сева использован трактор New Holland 8040 с сеялкой Amazone DMC 9000. Норма высева – 220 кг/га или 5 млн всхожих семян на га.

Для защиты посевов от болезней и вредителей использовали гербицид Ирбис в дозе 0,8 л/га, двукратную обработку фунгицидом Новус-Ф, КС в дозе 0,6 л/га, обработку инсектицидом Альфа-циперметрин 0,15 л/га.

Отбор образцов зерна выполнен ручным способом в лучшие агротехнические сроки. Отбор почвенных

образцов для определения содержания стабильного стронция в пахотном (0–20 см) и подпахотном (20–40 см) слоях почвы проводили ежегодно после уборки урожая.

Анализ данных

Анализ и статистическую обработку результатов полевого опыта осуществляли методом дисперсионного анализа ежегодно с финальным обобщением данных за 3 года наблюдений. В качестве методической основы использованы указания Б. А. Доспехова [22]. Данный метод общепринят для интерпретации биологических и сельскохозяйственных исследований, учитывает воздействие как регулируемых, так и случайных факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдения показали, что вегетационный период 2024 г. существенно отличается по климатическим показателям от аналогичных периодов 2022–2023 гг. Для анализа использовался не календарный, а сельскохозяйственный год, границы которого определены периодом вегетации озимой пшеницы. Суммарное количество осадков в 2022 и 2023 гг. было близко к норме, составив 101 и 107 % соответственно. В то же время в 2024 г. этот показатель достиг лишь 74 % от многолетней нормы, что указывает на значительный дефицит влаги в течение вегетационного периода. Ситуацию усугубляло крайне неравномерное распределение осадков: в ноябре

их выпало 210 % от нормы, в декабре – 119 %, а в январе – 115 %. Что касается температурного режима, то во все годы наблюдений отмечалось отклонение среднесуточной температуры воздуха в сторону повышения. Так, в 2022 г. превышение составило +2,1 °С, в 2023 г. – +2,4 °С, а в 2024 г. температура была выше нормы на +4,0 °С.

Для контроля содержания стабильного стронция в течение трех лет исследований мы провели лабораторный анализ зерна озимой пшеницы и почвенных образцов по слоям.

Поскольку стабильный стронций представляет опасность для живых организмов не напрямую, а как биохимический аналог кальция, участвующий в тех же процессах, его предельно допустимая концентрация в почве и зерне официально не регламентирована. Анализ научных источников показал, что критерием безопасности сельскохозяйственной продукции служит соотношение Ca/Sr, которое должно составлять не менее 140/1. Что касается непосредственно почвы, то, согласно исследованиям, верхний безвредный предел содержания в ней стабильного стронция составляет 600 мг/кг [20].

В первый год после внесения мелиоранта дисперсионный анализ полученных данных показал, что достоверного статистически значимого влияния на содержание стабильного стронция в почве выявлено не было, несмотря на наблюдаемый разброс значений (таблица 1).

Таблица 1
Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание стабильного стронция в черноземе обыкновенном слабосолонцеватом и зерне озимой пшеницы в 2022 г., мг/кг

Table 1
The effect of neutralized phosphogypsum on the content of stable strontium in slightly salted common chernozem and winter wheat grain in 2022, mg/kg

Варианты / показатели	Почва, слой 0–20 см		Почва, слой 20–40 см		Зерно		
	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Ca/Sr
1. Контроль	101	–	97	–	1,07	–	806/1
2. ФГн 5 т/га	119	18	125	28	1,55	0,48	381/1
3. ФГн 10 т/га	107	6	104	7	1,07	0,00	403/1
4. ФГн 15 т/га	109	8	107	10	2,08	1,01	176/1
5. ФГн 20 т/га	153	52	144	47	1,33	0,26	426/1
НСР 05	18	–	39	–	0,55	–	–
F05	3,48	–	3,48	–	3,48	–	–
Fφ	1,33	–	2,46	–	5,77	–	–
Sx%	5,33	–	10,86	–	12,35	–	–

В пахотном горизонте концентрация стабильного стронция варьировала в диапазоне от 101 до 153 мг/кг, а в подпахотном – от 97 до 144 мг/кг. Хотя при внесении нейтрализованного фосфогипса в дозе 20 т/га расхождение с контрольным вариантом превышало величину наименьшей существенной разницы (НСР), полученное значение F-критерия оказалось ниже порогового уровня. Таким образом, нулевая гипотеза об отсутствии значимых эффектов от применения мелиоранта не может быть отвергнута.

Что касается содержания стабильного стронция в зерне озимой пшеницы, то внесение 15 т/га нейтрализованного фосфогипса достоверно его увеличило на 1,01 мг/кг. Однако этот факт не представляет угрозы, поскольку даже минимальное значение соотношения Ca/Sr (176/1) превышало безопасный порог (140/1). Это минимальное для 2022 года значение подтверждает безопасность всей продукции.

Содержание стронция в зерне по опыту варьировалось в диапазоне 1,07–2,08 мг/кг. В исследованиях наших коллег из Ростовской области при внесении 5 т/га фосфогипса на черноземе обыкновенном карбонатном содержание стабильного стронция в зерне озимой пшеницы составило в среднем по варианту 1,32 мг/кг, что полностью соотносится с нашими результатами [15]. Также эти показатели

укладываются в общий диапазон значений для зерновых культур 0,48–3,2 мг/кг [11].

На второй год исследований содержание стабильного стронция в почве варьировалось в пределах 117–153 мг/кг в пахотном слое и 106–128 мг/кг в подпахотном. Различия между опытными вариантами были статистически незначимы и не превышали значения наименьшей существенной разницы (таблица 2).

Одновременно с этим общее содержание стабильного стронция возросло в зерне озимой пшеницы. Достоверное увеличение на 0,51–0,79 мг/кг было вызвано внесением нейтрализованного фосфогипса в расчетной (10 т/га) и повышенных (15 и 20 т/га) дозах мелиоранта, при этом максимальный прирост наблюдался при дозе 10 т/га. Несмотря на это, экологическая безопасность продукции не была нарушена: минимальное зафиксированное соотношение Ca/Sr (191/1) превышало безопасный порог, а общее содержание стронция варьировалось в пределах 2,13–2,92 мг/кг.

На третий год исследований в почве также не было выявлено статистически значимого влияния доз фосфогипса нейтрализованного на содержание стабильного стронция. Интервалы значений его содержания по слоям почвы составили 107–124 и 109–125 мг/кг соответственно (таблица 3).

Таблица 2

Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание стабильного стронция в черноземе обыкновенном слабосолонцеватом и зерне озимой пшеницы в 2023 г., мг/кг

Table 2

The effect of neutralized phosphogypsum on the content of stable strontium in slightly salted common chernozem and winter wheat grain in 2023, mg/kg

Варианты / показатели	Почва, слой 0–20 см		Почва, слой 20–40 см		Зерно		
	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Ca/Sr
1. Контроль	131	–	114	–	2,13	–	283/1
2. ФГн 5 т/га	149	18	128	14	2,26	0,12	255/1
3. ФГн 10 т/га	153	22	118	4	2,92	0,79	217/1
4. ФГн 15 т/га	117	–14	126	12	2,65	0,51	201/1
5. ФГн 20 т/га	121	–10	106	–8	2,79	0,66	191/1
НСР 05	42	–	21	–	0,37	–	–
F05	3,48	–	3,48	–	3,48	–	–
Fφ	1,48	–	1,94	–	8,37	–	–
Sx%	9,85	–	5,53	–	4,63	–	–

Таблица 3
Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание стабильного стронция в черноземе обыкновенном слабосолонцеватом и зерне озимой пшеницы в 2024 г., мг/кг

Table 3
The effect of neutralized phosphogypsum on the content of stable strontium in slightly salted common chernozem and winter wheat grain in 2024, mg/kg

Варианты / показатели	Почва, слой 0–20 см		Почва, слой 20–40 см		Зерно		
	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Значение	Δ±	Ca/Sr
1. Контроль	107	–	116	–	2,13	–	360/1
2. ФГн 5 т/га	112	5	109	–7	2,05	–0,09	376/1
3. ФГн 10 т/га	124	17	125	9	2,67	0,53	319/1
4. ФГн 15 т/га	124	17	115	–1	2,64	0,51	328/1
5. ФГн 20 т/га	122	15	118	2	2,80	0,67	274/1
НСР 05	16	–	13	–	0,45	–	–
F05	3,48	–	3,48	–	3,48	–	–
Fφ	1,83	–	2,19	–	5,82	–	–
Sx%	4,39	–	3,54	–	5,79	–	–

Результаты анализа зерна озимой пшеницы за третий год исследований подтвердили тенденцию, выявленную ранее: внесение нейтрализованного фосфогипса в расчетной (10 т/га) и повышенных (15, 20 т/га) дозах вновь привело к достоверному увеличению содержания стабильного стронция в зерне озимой пшеницы на 0,51–0,67 мг/кг. При этом даже минимальное значение соотношения Ca/Sr (247/1) значительно превышало безопасный порог, что гарантирует отсутствие рисков для потребителей сельскохозяйственной продукции. Общее содержание элемента в зерне в 2023 году не выходило за пределы диапазона 2,13–2,80 мг/кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты трехлетнего мониторинга демонстрируют дифференцированное накопление стабильного стронция в почвенных горизонтах в зависимости от применяемой дозы фосфогипса нейтрализованного. В пахотном слое почвы (0–20 см) максимальная концентрация стабильного стронция была зарегистрирована на варианте с внесением нейтрализованного фосфогипса в дозе 20 т/га, где она составила 132 мг/кг. Статистически неразличимые между собой значения содержания элемента наблюдались при применении доз в 5 и 10 т/га, составившие 128 и 127 мг/кг соответственно. Минимальное содержание стронция в данном слое почвы отмечено при дозе мелиоранта 15 т/га – 121 мг/кг. В подпахотном слое почвы распределение стабиль-

ного стронция несколько отличается. Наибольшее содержание стабильного стронция зафиксировано при внесении 5 и 15 т/га фосфогипса нейтрализованного, оно составило 121 мг/кг. При дозе 10 т/га содержание элемента составило 116 мг/кг. Наименьшая концентрация в 112 мг/кг обнаружена на варианте с максимальной исследуемой дозой мелиоранта (20 т/га).

Учитывая тот факт, что в течение всех трех лет наблюдений статистической разницы между вариантами не наблюдалось, считаем, что применение фосфогипса нейтрализованного на черноземе обыкновенном слабосолонцеватом в дозах от 5 до 20 т/га не приводит к существенному увеличению стабильного стронция в почве.

Статистическая обработка усредненных за период исследований данных по содержанию стабильного стронция в зерне озимой пшеницы продемонстрировала достоверность полученных данных. Среднее содержание варьировало по вариантам опыта от 1,78 до 2,45 мг/кг. Увеличение относительно контроля выявлено на вариантах с применением расчетной (10 т/га) и повышенных доз (15 и 20 т/га) фосфогипса нейтрализованного и составило 0,44, 0,68 и 0,53 мг/кг соответственно. Среднее за три года минимальное значение соотношения Ca/Sr составило 233/1, что существенно превышает безопасный порог. Это позволяет сделать вывод об отсутствии опасной тенденции к накоплению стабильного стронция в зерне озимой пшеницы в течение всего периода наблюдений.

Вклад авторов

Ю. И. Гречишкина: руководство исследованием, концептуализация, создание рукописи и ее редактирование.

А. В. Матвиенко: формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи.

Contribution

Yu. I. Grechishkina: project administration, conceptualization, writing-review & editing.

A. V. Matvienko: formal analysis, investigation, writing-original draft.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабенко А.А., Бабичев А.Н. Влияние доз химических мелиорантов на степень засоления почвы и состав почвенного поглощающего комплекса. *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*. 2025;1(95):265-281.
Babenko A.A., Babichev A.N. Impact of Chemical Ameliorant Doses on the Degree of Salinity and Soil Absorption Complex Composition. *Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2025;1(95):265-281. (In Russ.).
2. Некрасов Р.В., Шеуджен А.Х., Байбеков Р.Ф. и др. Агроэкономические и экологические аспекты химической мелиорации засоленных почв. *Земледелие*. 2021;8:3-7.
Nekrasov R.V., Sheudzhen A.Kh., Baibekov R.F. et al. Agroecological and Ecological Aspects of Chemical Reclamation of Saline Soils. *Agriculture*. 2021;8:3-7. (In Russ.).
3. Soumya N., Mishra C.S.K., Guru B.C., Rath M. Effect of phosphogypsum amendment on soil physico-chemical properties, microbial load and enzyme activities. *Journal of Environmental Biology*. 2011;32(5):613-617.
4. Maina L.W., Kiegiel K., Zakrzewska G. Challenges and Strategies for the Sustainable Environmental Management of Phosphogypsum. *Sustainability*. 2025;17:3473. <https://doi.org/10.3390/su17083473>
5. Qi J., Zhu H., Zhou P., Wang X. Application of Phosphogypsum in Soilization: a Review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023;20(9). <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04783-2>
6. Mu L., Zhou H., Li A., Wang L. The Effects of the Combined Application of Biochar and Phosphogypsum on the Physicochemical Properties of Cd-Contaminated Soil and the Yield Quality of Chinese Cabbage. *Agriculture*. 2024;14(11):1865. <https://doi.org/10.3390/agriculture14111865>
7. Цыганова А.А., Хрипович А.А., Зеленуха Е.В., Скуратович И.В. Использование фосфогипса при рекультивации засоленных земель. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2025;1(136):165-170. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-136-1-165-170>
Tsyganova A.A., Khripovich A.A., Zelenukho E.V., Skuratovich I.V. Use of Phosphogypsum in the Reclamation of Saline Lands. *Bulletin of the Brest State Technical University*. 2025;1(136):165-170. (In Russ.). <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-136-1-165-170>
8. Maina L.W., Kiegiel K., Chajduk E., Zakrzewska G. Chemical and Radiochemical Characterization of Phosphogypsum from Poland. *Nukleonika*. 2024;69(2):113-117. <https://doi.org/10.2478/nuka-2024-0016>
9. Jin Y., Yang D., Wu Y., Zhou F. Preparation of Biofertilizer with Phosphogypsum and Straw: Microbial Community Changes and Plant Growth Effects. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2024;24(4). <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01806-w>
10. Куликова Е.В., Горбунова Н.С., Куликов Ю.А. Влияние мелиорации фосфогипсом на экологическое состояние черноземов Каменной степи. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2023;16,2(77):81-89.
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. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. 2023;2(77):81-89. (In Russ.).
11. Любимова И.Н., Борисочкина Т.И. Влияние потенциально-опасных химических элементов, содержащихся в фосфогипсе, на окружающую среду. Российская акад. с.-х. наук, Гос. науч. учреждение Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева. Москва : ГНУ Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева РАСХН; 2007.46.

- Lyubimova I.N., Borisochkina T.I. *Influence of Potentially Dangerous Chemical Elements Contained in Phosphogypsum on the Environment*. Russian Academy of Agricultural Sciences, State Scientific Institution Soil Institute Named after V. V. Dokuchaev. Moscow : GNU Soil Institute Named after V. V. Dokuchaev, RASN; 2007.46. (In Russ.).
12. Гречишкина Ю.И., Матвиенко А.В. Влияние фосфогипса нейтрализованного на содержание стронция стабильного в почве и зерне озимой пшеницы на черноземе слабосолонцеватом в условиях Центрального Предкавказья. *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. Том Часть 1. Уфа : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр «Вестник науки»; 2023;157-161.
- Grechishkina Yu.I., Matvienko A.V. The Effect of Neutralized Phosphogypsum on the Stable Strontium Content in Soil and Grain of Winter Wheat on Slightly Saline Chernozem in the Conditions of the Central Ciscaucasia. *Fundamental and Applied Scientific Research: Innovation in the Modern World : a Collection of Scientific Articles Based on the Materials of the X International Scientific and Practical Conference in 3 Parts*. Ufa, March 21, 2023. Volume Part 1. Ufa : Limited Liability Company Scientific Publishing Center «Bulletin of Science»; 2023;157-161. (In Russ.).
13. Belyuchenko I.S. Features of Mineral Waste and the Expediency of their Use in the Formation of Complex Composts. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014;101:875-895.
14. Гмошинский И.В., Хотимченко С.А. Стабильный стронций в окружающей среде и пищевой продукции: токсичность, оценка экспозиции и потенциальных рисков. *Анализ риска здоровью – 2024 : материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. В 2 томах, Пермь, 15–16 мая 2024 года. Пермь : Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения. 2024;292-301.
- Gmoshinsky I.V., Khotimchenko S.A. Stable Strontium in the Environment and Food Products: Toxicity, Assessment of Exposure and Potential Risks. *Health Risk Analysis – 2024: Proceedings of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. In 2 volumes, Perm, May 15–16, 2024. Perm : Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management. 2024;292-301. (In Russ.).
15. Визирская М.М., Аканова Н.И., Бельтюков Л.П. Эффективность применения фосфогипса при возделывании льна масличного и озимой пшеницы. *Плодородие*. 2020;5(116):66-68. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.116.19>
- Vizirskaya M.M., Akanova N.I., Beltyukov L.P. Efficiency of Phosphogypsum Application During Cultivation of Oil Flax and Winter Wheat. *Plodородие*. 2020;5(116):66-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.116.19>
16. Аканова Н.И. Фосфогипс нейтрализованный – перспективное агрохимическое средство интенсификации земледелия. *Плодородие*. 2013;1(70):2-7.
- Akanova N.I. Neutralized Phosphogypsum is a Promising Agrochemical Means of Agricultural Intensification. *Plodородие*. 2013;1(70):2-7. (In Russ.).
17. Агапова П.В., Киселев М.В., Фрейдкин И.А. Оценка биологической эффективности применения обесфторенного фосфогипса в качестве удобрения в последствии. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2024;1(75):48-57. <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2023-5-72-80>
- Agapova P.V., Kiselev M.V., Freidkin I.A. Assessment of Biological Efficiency of Application of De-fluorinated Phosphogypsum as Residual Fertilizer. *Proceedings of the St. Petersburg State Agrarian University*. 2024;1(75):48-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2023-5-72-80>
18. Байбеков Р.Ф., Шильников И.А., Аканова Н.И. и др. *Научно-практические рекомендации по применению фосфогипса нейтрализованного в качестве химического мелиоранта и серного удобрения*. Министерство сельского хозяйства РФ, Рос. акад. с.-х. наук, Всерос. науч.-исслед. ин-т агрохимии им. Д. Н. Прянишникова. Москва : Всерос. науч.-исслед. ин-т агрохимии им. Д. Н. Прянишникова; 2012.56.
- Baibekov R.F., Shilnikov I.A., Akanova N.I. et al. *Scientific and Practical Recommendations on the Use of Neutralized Phosphogypsum as a Chemical Meliorant and Sulfur Fertilizer*. Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Russian Academy of Agricultural Sciences, All-Russian Scientific Re-

- search. D.N. Pryanishnikov Institute of Agrochemistry. Moscow : All-Russian Scientific Research. D.N. Pryanishnikov Institute of Agrochemistry; 2012.56. (In Russ.).
19. Luo A., Li J., Xiao Y., He Z. Engineering Soil Quality and Water Productivity Through Optimal Phosphogypsum Application Rates. *Agronomy*. 2024;15(1):35. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010035>
20. Кузнецов А.В. и др. *Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственной и продукционной растениеводства*. Центр. ин-т агрохим. обслуж. сел. хоз-ва. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : ЦИНАО; 1992.61
Kuznetsov A.V. et al. *Guidelines for the Determination of Heavy Metals in Farmland Soils and Crop Production*. Center. agrochem Institute. rural household services. 2nd ed., revised and add. Moscow : TsINAO; 1992.61. (In Russ.).
21. Гречишкина Ю.И., Матвиенко А.В. Эффективность производства озимой пшеницы на черноземе обыкновенном слабосолонцеватом при использовании фосфогипса нейтрализованного в условиях Центрального Предкавказья. *Аграрный вестник Северного Кавказа*. 2025;15(2):63-73. <https://doi.org/10.31279/2949-4796-2025-15-2-63-73>
Grechishkina Y.I., Matvienko A.V. The Efficiency of Winter Wheat Production on Slightly Saline Common Chernozem Using Phosphogypsum Neutralized in the Conditions of the Central Ciscaucasia. *Agrarian Bulletin of the North Caucasus*. 2025;15(2):63-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.31279/2949-4796-2025-15-2-63-73> EDN VQYVVA
22. Доспехов Б.А. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*. Изд. 6-е, стер. Москва : Альянс; 2011.351.
Dospikhov B.A. *Methodology of Field Experience (With the Basics of Statistical Processing of Research Results)*. 6th ed., erased. Moscow : Alliance; 2011.351. (In Russ.).

Сведения об авторах

Гречишкина Юлия Ивановна –
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор кафедры агрохимии и физиологии
растений, Ставропольский государственный
аграрный университет, Ставрополь, Россия
<https://orcid.org/0000-0003-2236-5724>
SPIN-код: 1062-0407
lnwg@mail.ru

Матвиенко Алексей Викторович –
аспирант, Ставропольский государственный
аграрный университет, Ставрополь, Россия
<https://orcid.org/0009-0006-7568-9668>
SPIN-код: 7188-2197
stavgeo@rambler.ru

About the authors

Yulia I. Grechishkina –
Dr. Sci. (Agric.), Prof., Department
of Agrochemistry and Plant Physiology,
Stavropol State Agrarian University,
Stavropol, Russia
<https://orcid.org/0000-0003-2236-5724>
lnwg@mail.ru

Alexey V. Matvienko –
Postgraduate student,
Stavropol State Agrarian University,
Stavropol, Russia
<https://orcid.org/0009-0006-7568-9668>
stavgeo@rambler.ru