

Научная статья

УДК 631.45:631.8:546.47

DOI: 10.36508/journal.2026.92.13.005

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (Сельскохозяйственные науки. Биологические науки)

4.1.3. Agrochemistry, Agrosoil Science, Plant Protection, and Quarantine (Agricultural Sciences. Biological Sciences)

БАЛАНС Zn В СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ ПРИ ВНЕСЕНИИ УДОБРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ СЕМЯОЧИСТИТЕЛЬНОГО ЗАВОДА В ЛИЗИМЕТРИЧЕСКОМ ОПЫТЕ

Захарова Ольга Алексеевна^{✉ 1}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», г. Рязань, Россия

[✉]ol-zahar-ru@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрен баланс Zn в серой лесной почве при внесении удобрения на основе отходов семяочистительного завода в лизиметрическом опыте при двуукосном пользовании многолетних трав.

Проблема и цель. Одним из приоритетных тяжелых металлов в регионе является цинк, являющийся биогенным. Zn в превышающих норматив концентрациях ведет к снижению урожайности и ухудшению качества продукции, а по трофической цепи может поступать и накапливаться в организме сельскохозяйственных животных и человека. Приход в агроэкосистему этого металла связан с атмосферными осадками, удобрениями и т.д. Нами рассчитан баланс Zn в серой лесной почве при внесении удобрения на основе отходов семяочистительного завода в лизиметрическом опыте, что и являлось целью исследований.

Методология. Исследования проведены на лизиметрической станции п. Полково. Удобрение разработано сотрудниками ВНИИГиМ и вносилось в почву лизиметров разными дозами. Методика исследований общепринятая.

Результаты. Основной приход Zn связан с атмосферными осадками, меньше – с вносимым удобрением. Содержание валовых форм Zn в слое почвы 0-25 см 78,6 мг/кг, 25-50 см – на 7,4% ниже; подвижных – 21,0 и 19,0 мг/кг. Внесение в почву удобрения привело к небольшому сдвигу валового Zn на 2,3 и 1,3% и подвижного – на 11,0 и 4,0% соответственно слоям почвы. Проведенный кластерный анализ зависимости содержания Zn в почве как валовых, так и подвижных форм от дозы удобрения установил прямую связь этих двух факторов. Урожайность трав за вегетацию достаточно высокая 6,6-9,2 кг на

лизиметр в зависимости от дозы внесения удобрения. Содержание Zn в растениях в первом укосе составило 39,5 мг/кг сухого вещества, во втором – на 12% ниже.

Заключение. Прогноз неблагоприятный, то есть концентрация Zn в почве ежегодно возрастает за счет поступления металла с осадками и последующей их седиментацией.

Ключевые слова: Zn, семяочистительный завод, удобрение, баланс, почва, травы

ZINC BALANCE IN GRAY FOREST SOIL WITH FERTILIZER BASED ON SEED CLEANING PLANT WASTE IN A LYSIMETRIC EXPERIMENT

Zakharova Olga Alekseevna ✉ 1

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev", Ryazan, Russia

✉ol-zahar-ru@yandex.ru

Abstract. The article examines the Zn balance in gray forest soil after application of fertilizer based on waste from a seed cleaning plant in a lysimetric experiment with double-cut perennial grasses.

Problem and purpose. According to Professor Yu.A. Mazhaisky (2010), one of the priority heavy metals in the region is zinc. This metal is considered a biogenic metal, as it performs vital functions in plants. At the same time, zinc in concentrations exceeding the standard leads to reduced yields and deterioration in product quality, and can enter the food chain and accumulate in bodies of farm animals and humans. The introduction of this metal into the agroecosystem is associated with precipitation, fertilizers, and other factors. We calculated the zinc balance in gray forest soil after applying a fertilizer based on seed cleaning plant waste in a lysimetric experiment, which was the purpose of our study.

Methodology. The studies were conducted at the Polkovo lysimetric station. The fertilizer was developed by VNIIGiM staff and applied to the soil at various doses. The research methodology was standard.

Results. The main input of Zn was associated with atmospheric precipitation, and a lesser amount with the applied fertilizer. The content of gross Zn forms in the 0-25 cm soil layer was 78.6 mg/kg, while in the 25-50 cm layer it was 7.4% lower; mobile forms were 21.0 and 19.0 mg/kg. The application of a fertilizer led to a slight shift in gross Zn by 2.3 and 1.3% and mobile forms by 11.0 and 4.0%, respectively, in the soil layers. The conducted cluster analysis of the dependence of Zn content in the soil, both gross and mobile forms, on the fertilizer dose established a direct relationship between these two factors. The yield of grasses during the growing season was quite high: 6.6-9.2 kg per lysimeter, depending on the fertilizer

application dose. The Zn content in plants in the first cutting was 39.5 mg/kg dry matter, while in the second it was 12% lower.

Conclusion. The prognosis is unfavorable, meaning that Zn concentration in the soil increases annually due to the metal's influx with precipitation and subsequent sedimentation.

Keywords: Zn, seed cleaning plant, fertilizer, balance, soil, herbs

Введение

Одним из жизненноважных для растений химических элементов является цинк (Zn) [2], но он же относится к тяжелым металлам из-за своей плотности, его химические и физические свойства обоснованы заполнением в атоме третьего электронного слоя, он имеет высокую температуру кипения, большую молярную теплоемкость, высокую твердость и электроположительность [4].

Учитывая приоритетность этого металла как загрязнителя окружающей природной среды, наряду с Cu, Cd, Pb, избыточное содержание в почве может вызвать негативные процессы и оказать неблагоприятное влияние на культурные растения. Известно, что избыток цинка нарушает обмен веществ растений, замедляет фотосинтез, подавляет рост корней и приводит к деформации листьев. Цинк способен конкурировать с другими элементами, такими как железо или марганец, за усвоение растениями [3, 4]. Он является цитоплазматическим ядом из-за токсического действия на механизмы регуляции растений вследствие превышения содержания ионов в цитоплазме, изменения внутриклеточного pH, повреждения митохондрий. Концентрация Zn в клетке регулируется с помощью транспортёров цинка и металлотионеинов (низкомолекулярных белков).

Исходя из этого, контроль концентрации Zn в растениях является актуальным. Определить поступление металла в растения можно в короткий срок при использовании лизиметрического метода исследований.

Материалы и методы исследований

Опыт проводился по договоренности с руководством агрохолдинга Новоселки, созданного на базе колхоза "Приокский". С 2018 г. агрохолдинг периодически дополнительно арендует 5 га земель, с 2021 г. – 30 га на мелиоративном объекте Тинки-II близ п. Полково Рязанского района Рязанской области.

В лизиметрическом опыте в почву вносилось удобрение на основе отходов семяочистительного завода п. Полково Рязанского района Рязанской области. Почва дерново-подзолистая. Исследуемые культуры – многолетние травы, двуукосное. Исследовалось содержание Zn в почве, растениях и лизиметрических водах на атомно-абсорбционном спектрометре «Квант-Ъ». Статистическая обработка результатов исследований на компьютерной программе Statistika 10.

Погодные условия в среднем за три года исследований соответствовали среднепогодным с небольшой тенденцией к засухе, ГТК = 0,98.

Цель исследований – установить роль Zn в жизни растений и его поступление в растения при внесении удобрения на основе отходов семяочистительного завода в лизиметрическом опыте.

Характеристика удобрения на основе отходов семяочистительного завода
Удобрение разработано сотрудниками ВНИИГиМ, в его состав (по весу) входит полова - отход при очистке семян многолетних трав - 50%, навоз крупного рогатого скота - 15%, торф низинный - 30%. В удобрении $N_{30}P_{45}K_{60}$, в качестве микроэлемента вносилась медь (25 кг/га), для нейтрализации кислотности почвы - известь в норме 1 т/га. Технология приготовления удобрения описана подробно в монографии «Восстановление деградированных осушаемых торфяников Рязанской Мещеры при внесении в почву удобрительных мелиорантов» (Ф. А. Мусаев, О. А. Захарова, К. Н. Евсенкин, Д. Е. Кучер, 2021) Определенный режим температуры обеспечивает условия как для протекания биохимических процессов по разложению целлюлозы полова, так и уничтожению семян сорной растительности и вредных микроорганизмов.

Характеристика лизиметрической станции

Село Полково Рязанского района находится в зоне осушаемого массива (рисунок 1). В соответствии с программой развития села, объект оказался в центре индивидуальной застройки. В восточной части села расположена лизиметрическая станция ВНИИГиМ. Общий вид лизиметрической станции показан на рисунке 1. Лизиметрическая станция состоит из лизиметров, каждый из которых представляет собой вертикальный образец почвенного профиля ненарушенной структуры мощностью 2 м и с площадью дневной поверхности $0,785 \text{ м}^2$ (диаметр лизиметра 1 м), метеостанции, испарителей.



Рисунок 1 – Общий вид лизиметрической станции
Figure 1 – General view of the lysimetric station

Характеристика серой лесной почвы

Изначально лизиметры были заряжены монолитом серой лесной почвы со следующими характеристиками: плотность пахотного горизонта $1,30 \text{ г/см}^3$, порозность и содержание воздуха 50% и 33% соответственно, pH в среднем 5,6, содержание гумуса 2,7%, содержание P_2O_5 и K_2O 12,55 и 10,20 мг/кг почвы соответственно. Нами установлено превышение допустимых концентраций Zn в почве на 35%, в результате чего он отнесен в разряд приоритетных для

региона среди таких металлов, как Cu, Cd, Pb. Это связано, в первую очередь, с техногенным приходом элемента. Большинство производств расположено на юге областного центра г. Рязани. Это объясняет обнаружение максимальных концентрации токсикантов именно там. На севере областного центра, где идет граница с Рязанским районом и находится с. Полково, промышленных объектов меньше, следовательно, и химический прессинг слабее. Но единый фон содержания Zn не отражает пестроты загрязнения. Надо учитывать локальные источники загрязнения, а также влияние основного объекта загрязнения среды в регионе - Рязанской ГРЭС, радиус распространения токсикантов которой более 96 км. Таким образом, своевременное исследование концентрации ТМ, в частности, цинка, в почве и растениях позволит при необходимости принять своевременные меры для снижения его токсического действия.

Результаты исследований

Формы нахождения Zn в почве и его усвоение растениями

Основная и наиболее подвижная форма цинка — его двухвалентный катион (Zn^{2+}). Однако в почве присутствуют и другие формы этого элемента: соединения, связанные с органическим веществом (гуматы и фульваты цинка, хелатные соединения), труднорастворимые соединения (филлосиликаты, карбонаты, сульфиды, фосфаты), соединения, прочно связанные силикатами в материнской породе. Подвижность цинка в почве зависит от соотношения различных форм нахождения элемента. Подвижность и биологическая доступность цинка вследствие специфической сорбции органическим веществом, глинистыми минералами, оксидами Fe и Al, а также процессов хемосорбции и соосаждения уменьшается. Zn в почвах, богатых кальцием, фосфором, серы снижается и он труднодоступен растениям [1, 5, 6]. Этот металл относится к биогенным и выполняет важную роль в растительном организме (таблица 1).

Таблица 1 – Ферменты, содержащие Zn, и их функции

Фермент	Функции в растительном организме	Участие Zn в ферменте
1	2	3
карбоангидраза	катализирует обратимую гидратацию CO_2 .	Поддерживает pH внутриклеточной среды,ставляет CO_2 в качестве субстрата для цикла Кальвина, преобразует CO_2 в форму HCO_3^- для образования оксалоацетата, что важно для цикла C4-растений.
супероксиддисмутаза	антиоксидантного фермента, способствующего инактивации супероксид-радикала.	входит в состав ферментов, участвующих в антиоксидантной защите, участвует в регуляции экспрессии генов.

1	2	3
пероксидаза	катализирует синтез рибонуклеиновой кислоты при выделении пирофосфата.	структурный компонент рибосом, участвует в репликации ДНК и транскрипции, входит в состав одного из факторов регуляции транскрипции в соединениях с остатками гистидина и цистеина.
триозофосфатдегидрогеназа	катализирует реакцию восстановления карбоксильной группы дифосфоглицериновой кислоты до альдегидной, катализирует реакцию гликолиза в процессе дыхания.	ион цинка связывается с атомом O_2 карбонильной группы при C-2. Ион Zn^{2+} поляризует карбонильную группу и стабилизирует фенольное промежуточное соединение, образующееся при разрыве связи C—C.
металлоферментные комплексы	участвуют в активации субстрата, воды и гидроксид-иона, образовании нуклеофильных частиц, участвующих в гидролизе. в окислительно-восстановительных процессах, стабилизирует отрицательные заряды .	активируются цинком и другими двухвалентными катионами Co^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+}
оксидаза	участвует в окислительно-восстановительных реакциях.	Ионы Zn^{2+} являются ингибитором этого фермента.
полифенолоксидаза	фермент из класса терминальных оксидаз растительной клетки	участвует в переносе водорода от субстрата к O_2 , биосинтезе гумусовых кислот .
медь-цинк-супероксиддисмутаза	катализирует дисмутацию супероксида, образующегося при аэробном метаболизме, в кислород и пероксид водорода.	фермент состоит из двух идентичных субъединиц, каждая из которых содержит по одному иону меди и цинка. Ионы цинка прямо не участвуют в реакции дисмутации, но выполняют структурную роль, обеспечивая конформацию белка, необходимую для работы активного центра фермента.

В тоже время, избыток цинка в почве может нанести вред растениям, что, в конечном итоге, приведет к снижению урожайности и ухудшению качества продукции.

Таким образом, своевременный контроль содержания цинка в окружающей среде необходим. Zn относится к высоко опасным соединениям. Изменение качественных характеристик почвы при внесении удобрений на основе отходов семяочистительного завода — есть действенный фактор, влияющий на поступление Zn в растения.

Почва является таким компонентом экосистемы, в которой наиболее интенсивно протекает взаимодействие живой и неживой материи, где замыкаются важнейшие процессы обмена веществ. Проблема загрязнения растений ТМ, вследствие интенсивного антропогенного загрязнения обостряется, потому что поступление этих элементов связано с приходом в почву из других сред.

Поступление и накопление ТМ в растениях определяется целым рядом закономерностей: различные виды растений обладают неодинаковой способностью поглощать и накапливать ТМ; растения имеют физиолого-биохимические защитные механизмы, препятствующие поступлению ТМ; отсутствует прямая связь между уровнем загрязнения и интенсивностью поступления ТМ в растения.

Итак, содержание валовых форм Zn в слое почвы 0-25 см 78,6 мг/кг, 25-50 см – на 7,4% ниже; подвижных – 21,0 и 19,0 мг/кг, что по шкале экологического нормирования ТМ по подвижным формам характеризуется как умеренно-опасное.

Внесение в почву удобрения привело к небольшому сдвигу валового Zn на 2,3 и 1,3% и подвижного – на 11,0 и 4,0% соответственно слоям почвы. Учитывая, что в удобрении содержание Zn 8 мг/кг за счет навоза, то приход этого элемента на первый взгляд кажется незначительным. Основное поступление его связано, по-видимому, с атмосферными осадками, в которых обнаружено превышение концентрации в 0,8 раза по сравнению с нормативом.

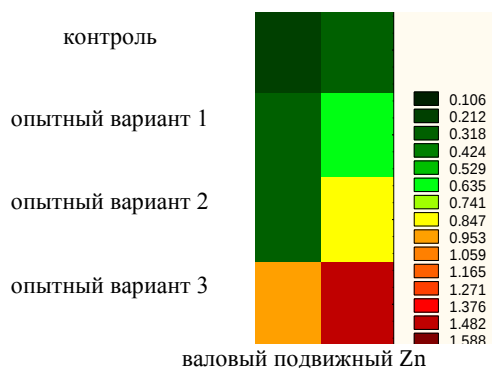


Рисунок 2 - Кластерный анализ зависимости содержания валового и подвижного Zn в почве от дозы удобрения
Figure 2 - Cluster analysis of the dependence of the content of total and mobile Zn in the soil on the fertilizer dose

Однако проведенный нами кластерный анализ зависимости содержания Zn в почве как валовых, так и подвижных форм от дозы удобрения установил прямую связь этих двух факторов (рисунок 2).

Так, анализируя рисунок 2, четко видно различие в содержании валового и подвижного Zn на вариантах опыта. Накопление валовых форм идет медленнее, о чем свидетельствует окраска от темно-зеленой до желтой и, наоборот, содержание подвижных форм растет быстрее, что показано изменением цвета от зеленого до красного.

Урожайность трав за вегетацию достаточно высокая 6,6-9,2 кг на лизиметр в зависимости от дозы внесения удобрения. Содержание Zn в растениях в первом укосе составило 39,5 мг/кг сухого вещества, во втором – на 12% ниже. Избыточное содержание металла в растениях составляет от 100 мг. В растительных образцах содержание Zn ниже, поэтому негативного влияния

металла на растения в лизиметрическом опыте не обнаружено. Ежегодный приход токсиканта составляет в среднем +22 мг/кг почвы.

Статистическая обработка результатов исследований показала прямую связь между переменными.

Для прогнозирования аккумуляции металла воспользовались математической моделью:

$$mS \frac{dC}{dt} - D_1 \frac{d^2 C}{dx^2} \pm q_1 \frac{dC}{dx} - \beta J(M, C) \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dt} = D_2 \frac{d^2 M}{dx^2} \pm q_2 \frac{dM}{dx} + J(M, C) - f(M) \quad (2)$$

где $C(x, t)$ – концентрация Zn,

$M(x, t)$ – концентрация биомассы микроорганизмов,

t – время,

x – направление оси диффузии,

D – эффективные коэффициенты диффузии загрязнителя и биомассы,

q – конвективный поток субстанции (теплообмен на основе результатов измерений температуры в почве),

β – количество поллютанта, разлагаемое 1 г микробной популяции,

m – пористость почвы,

S – влагонасыщенность почвы.

Уравнение для концентрации биомассы микроорганизмов:

$$(M(x, t)): dM/dt = D_2 (d^2 M)/dx^2 \pm q_2 dM/dx - J(M, C) - f(M), \quad (3)$$

где: $M(x, t)$ — концентрация биомассы;

остальные параметры и обозначения аналогичны уравнения (1), (2).

Оба уравнения являются дифференциальными уравнениями в частных производных, что характерно для моделей диффузии в пористых средах.

Система включает нелинейные члены (например, $J(M, C)$ и $f(M)$), что усложняет аналитическое решение, поэтому нами заданы начальные и граничные условия, использованы рекомендации Галёркина и учтены специфические свойства коэффициентов (объем лизиметрических вод, нелинейных функций взаимодействия). Все остальные данные получены в результате собственных исследований или, как например, количество Zn, разлагаемое 1 г микробной популяции, взято из научной литературы.

В результате расчетов нами получены следующие значения для Zn в серой лесной почвы в условиях лизиметрического опыта:

$$\text{АккZn} = 112 - 84 = 28 \text{ мг/кг за один вегетационный период}$$

$$M(\text{конц. биомассы микроорганизмов}) = 18 \text{ клеток/г почвы}$$

Как видно из результатов, экспериментальные данные оказались чуть ниже теоретических, что объясняется неучтенными факторами в формулах. Например, большое значение имеет синергетический эффект при взаимодействии многих металлов и почвенных факторов. Концентрация микроорганизмов выше нормы (10 кл/г почвы) почти в два раза. Это связано, на наш взгляд, с навозом, входящим в состав удобрения.

Прогнозирование загрязнения почвы тяжелыми металлами затруднено. По данным М.В. Евдокимовой с соавт. [2], выделяют 3 основных метода прогнозирования: экспертная оценка, статистические методы, аналитические методы. Технически прогнозы строятся на расчете баланса ТМ за определенный отрезок времени [2, 6].

Заключение

Обобщая вышеизложенное, отмечаем положительное влияние удобрения на основе отходов семяочистительного завода на свойства почвы и рост многолетних трав. Так, содержание Zn по экологической шкале относится к градации умеренно опасное, поэтому регулярным мониторингом его содержания в почве и растениях необходимо контролировать. Однако эта доза токсиканта не вызывает негативных реакций у многолетних трав, что подтверждается их высокой урожайностью. Баланс металла в лизиметрическом опыте уже сейчас положительный, что подтверждено эмпирическим путем при моделировании.

Прогноз складывается неблагоприятный, то есть концентрация Zn в почве ежегодно возрастает.

Библиографический список

1. Дубенок, Н.Н. Оценка агрохимического состояния почвы и урожайности многолетних трав в зависимости от удобрительных средств / Н.Н. Дубенок, Ю.А. Мажайский, О.А. Захарова // Сетевой научный журнал РГАТУ, 2025. - №2(8). – С. 1-11. DOI: 10.36508/journal.2025.45.48.002
2. Евдокимова, М.В. Исследование и прогноз микроэлементного состава почв модельных фитоценозов почвенных лизиметров / М.В. Евдокимова, В.М. Гендугов, Г.П. Глазунов, И.О. Плеханова // Вестник Моск.ун-та. Серия 17. Почвоведение, 2018. - №1. – С. 32-42. DOI: 10.3103/S0147687418010027
3. Огородников, Л.П. Лизиметрические исследования круговорота питательных элементов в агросистемах на темно-серой лесной почве / Л.П. Огородников, П.А. Постников // Агрохимический вестник, 2017. - №1. – С. 15-18. DOI: 10.26138/agrochemv.2017.1.2
4. Павлов, А.А. Определение фоновых концентраций почвенных элементов в серой лесной почве Рязанской области / А.А. Павлов, Ю.А. Мажайский // Вестник РГАТУ, 2022. – Т.14. – №4. – С. 33-40 DOI: 10.36508/RSATU.2022.35.33.006
5. Пироговская, Г.В. Экологическая и экономическая значимость лизиметрических исследований в системе «атмосферные осадки – почва – удобрение – растение» (по данным лизиметрической станции РУП «Институт почвоведения и агрохимии» за 1981–2020 гг.) / Г.В. Пироговская // Научное электронное периодическое издание ЮФУ «Живые и биокосные системы», 2023. - № 45. DOI: 10.18522/2308-9709-2023-45-2
6. Потапова, Н.В. Обобщение лизиметрических наблюдений при длительном применении минеральных удобрений и средств защиты в посадках картофеля /Н.В. Потапова, Н.В. Смолин, А.Н. Никольский, И.В. Потапов, Е.С.

Карманов// Аграрный научный журнал, 2024. - №4. – С. 33-39.DOI: 10/28983/asj.y2024i4pp50-55

References

1. Dubenok N. N. *Evaluation of the agrochemical state of soil and productivity of perennial grasses depending on fertilizers* // N. N. Dubenok, Y. A. Mazhaisky, O. A. Zakharova // *Network scientific journal of RSATU*, 2025. - №2 (8). – S.1-11. DOI:10.36508/journal.2025.45.48.002
2. Evdokimova, M.V. *Research and forecast of microelemental composition of soils under model phytocenoses in soil lysimeters* / M.V. Evdokimova, V.M. Gendugov, G.P. Glazunov, I.O. Plekhanova // *Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science*, 2018. - №1. – С. 32-42. DOI: 10.3103/S0147687418010027
3. Ogorodnikov, L.P. *Lysimetric studies of the nutrient cycle in agro-systems on dark gray forest soil* / L.P. Ogorodnikov, P.A. Postnikov // *Agrochemical Bulletin*, 2017. - No. 1. - Pp. 15-18 DOI: 10.26138/agrochemv.2017.1.2
4. Pavlov A. A., *Determination of background concentrations of soil elements in gray forest soil of the Ryazan region* / A.A. Pavlov, Yu. A. Mazhaysky // *Herald of Ryazan state agrotechnological university Named after P.A. Kostychev*, 2022. – S.33-40 DOI: 10.36508/RSATU.2022.35.33.006
5. Pirogovskaya, G.V. *Environmental and Economic Significance of Lysimetric Studies in the Atmospheric Precipitation – Soil – Fertilizer – Plant System (Based on Lysimetric Station Data from the Institute of Soil Science and Agrochemistry for 1981–2020)* / G.V. Pirogovskaya // *Scientific Electronic Periodical of SFU "Living and Biocosmic Systems"*, 2023. - No. 45. DOI: 10.18522/2308-9709-2023-45-2
6. Potapova, N.V. *Generalization of lysimetric observations during long-term use of mineral fertilizers and pesticides in potato plantations* / N.V. Potapova, N.V. Smolin, A.N. Nikolsky, I.V. Potapov, and E.S. Karmanov // *Agrarian Scientific Journal*, 2024. - No. 4. - Pp. 33-39. DOI: 10/28983/asj.y2024i4pp50-55

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

Статья поступила в редакцию 02.05.2026; одобрена после рецензирования 12.05.2026; принята к размещению на сайте 22.05.2026.

Contribution of the authors: All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest

The article was submitted 02.05.2026; approved after reviewing 12.05.2026; accepted for publication 22.08.2026