

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.489-512>

EDN: <https://elibrary.ru/bhcaov>

УДК 630*424.6

Оригинальная статья / Original article

Эффективность дифференцированного внесения азотных удобрений с использованием модели искусственного интеллекта

Е. В. Труфляк¹✉, Л. В. Рагозин²

¹ Кубанский государственный аграрный университет,

г. Краснодар, Российская Федерация

² Группа компаний «Прогресс Агро»,

г. Усть-Лабинск, Российская Федерация

✉ trufliak@mail.ru

Аннотация

Введение. Озимая пшеница – ключевая зерновая культура, продуктивность которой во многом определяется оптимальным азотным питанием. Оптимизация азотного питания озимой пшеницы в современных условиях крупного агрохолдинга требует дифференцированного внесения удобрений, однако агрономы сталкиваются с проблемой выбора доз и отсутствием комплексных, валидированных методик применительно к большому количеству полей. Существующие подходы не учитывают всего спектра факторов, что затрудняет принятие решений. Разработка методов валидации и моделей искусственного интеллекта для дифференцированного внесения азотных удобрений критически актуальна для повышения продуктивности и эффективности возделывания озимой пшеницы. Проблемой является отсутствие методов валидации и модели дифференцированного внесения азотных удобрений в работе нейросети для оптимизации процессов возделывания озимой пшеницы и повышения производительности сельскохозяйственных угодий.

Цель исследования. Разработка и внедрение технологии дифференцированного внесения азотных удобрений для оптимизации процессов возделывания озимой пшеницы.

Материалы и методы. Выполнялся сравнительный полевой эксперимент на полях АО «Рассвет» Усть-Лабинского района Краснодарского края дифференцированного внесения азотных удобрений (две подкормки). Для проведения исследований выбраны два поля с озимой пшеницей площадью 83 и 68 га. Каждое поле было разделено на три варианта: российская схема – в зону низкой продуктивности вносилось больше удобрений, европейская схема – в зону низкой продуктивности вносилось меньше удобрений, хозяйственная схема – единая доза удобрений. Разрабатывалась LSTM-модель на основе усредненных вегетационных индексов (EVI, NDWI, REP, SR) со спутниковых снимков Sentinel-2 за девять месяцев. Для увеличения обучающей выборки была предпринята попытка синтеза данных на пиксельном уровне, а итоговые прогнозы продуктивности сглаживались и конвертировались в карты-

© Труфляк Е. В., Рагозин Л. В., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

задания для дифференцированного внесения удобрений с нормами, рассчитанными по исторической корреляции. Лабораторные исследования отбора растений проводились в Кубанском ГАУ и на опытной станции учебно-опытного хозяйства «Кубань». Объектом исследования являлся технологический процесс дифференцированного внесения удобрений по модели искусственного интеллекта и его влияние на вегетацию, урожайность и качественные показатели озимой пшеницы.

Результаты исследования. Диапазон урожайности озимой пшеницы (комбайновой и биологической) по российской схеме на первом поле составил 90,9...101,5 ц/га; европейской схеме – 89,2...96,4 ц/га; хозяйственной схеме – 89,9...90,9 ц/га. На втором поле соответственно 87,4...99,6 ц/га; 92,4...98,5 ц/га; 87,8...93,6 ц/га. Усредненная урожайность по первому полю выше на 6,31 % по российской схеме и на 2,56 % по европейской схеме по сравнению с хозяйственной схемой. По второму полю выше на 5,25 % по европейской и на 3,08 % по российской по сравнению с хозяйственной схемой. Практически все исследованные варианты можно отнести к 3-му классу зерна. Увеличение натуре прямо пропорционально снижению содержания протеина и клейковины по обоим полям вариантов искусственного интеллекта. Содержание протеина по всем вариантам искусственного интеллекта (кроме варианта европейской схемы второго поля) ниже на 0,23–1,5 %. Содержание клейковины по всем вариантам искусственного интеллекта (кроме варианта европейской схемы второго поля) ниже на 0,53–3,3 %. Натура по вариантам искусственного интеллекта выше на 0,33–1,6 %. Содержание клейковины по всем вариантам искусственного интеллекта (кроме варианта европейской схемы второго поля) ниже на 0,53–3,3 %.

Обсуждение и заключение. Экономический анализ хозяйства по комбайновой урожайности показал, что при использовании европейской технологии производственные затраты снизились на 400 тыс. руб. по сравнению с контрольной схемой, а затраты на удобрения уменьшились на 2 567 руб. с одного гектара. Выручка с одного гектара увеличилась на 6 401 руб. и условной прибыли на 9 546 руб. Валовая прибыль также увеличилась на 150 тыс. руб., а рентабельность выросла на 5,3 % по сравнению с контрольной схемой. Результаты предложенных методов валидации и созданной модели дифференцированного внесения азотных удобрений использовались в работе нейросети. Эффективность работы нейросети оценена в реальных условиях сельского хозяйства по урожайности путем создания шкалы работы по отношению с существующими методами внесения удобрений (повышение урожайности от 2,56 до 6,31 %). Представленные результаты полевых экспериментов демонстрируют высокую практическую значимость предложенной технологии дифференцированного внесения азотных удобрений, которая требует проверки производственных испытаний на большем количестве полей. Перспективы исследования включают дальнейшее расширение площади применения разработанной технологии и ИИ-модели. Дальнейшее совершенствование нейросетевой модели предполагает интеграцию более широкого спектра динамических данных и использование ее не только на азотной подкормке, но и основном внесении удобрений. Это позволит повысить адаптивность модели к изменяющимся условиям вегетации и принимать управленческие решения в более короткие сроки. В конечном итоге, данное исследование закладывает основу для создания комплексных цифровых платформ управления агроценозами, где ИИ-модели будут играть ключевую роль в оптимизации всех этапов сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова: дифференцированное внесение удобрений, NDVI, искусственный интеллект

Благодарности: авторы благодарят за поддержку при реализации проекта фонд Сколково и ООО «ПрофАгро».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Труфляк Е.В., Рагозин Л.В. Эффективность дифференцированного внесения азотных удобрений с использованием модели искусственного интеллекта. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(3):489–512. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.489-512>

Efficiency of Variable Rate Application of Nitrogen Fertilizers Using Artificial Intelligence Model

E. V. Truflyak^a ✉, L. V. Ragozin^b

^a *Kuban State Agrarian University,
Krasnodar, Russian Federation*

^b *Group of Companies “Progress Agro”,
Ust-Labinsk, Russian Federation*

✉ trufliak@mail.ru

Abstract

Introduction. Winter wheat is a key grain crop, the productivity of which is largely determined by optimal nitrogen nutrition. Optimization of nitrogen nutrition for winter wheat in modern conditions of a large agroholding requires variable rate fertilizer application, however, agronomists face the problem of selecting doses and the lack of comprehensive, validated methods for a large number of fields. Existing approaches do not take into account the full range of factors that complicates decision-making process. The development of validation methods and artificial intelligence models for variable rate application of nitrogen fertilizers is critically important for increasing productivity and efficiency of winter wheat cultivation. The problem is that in the neural network, there are not validation methods and a model for variable rate application of nitrogen fertilizers to optimize the processes of cultivation of winter wheat and increase the agricultural land productivity.

Aim of the Study. The study is aimed at developing and introducing a technology for variable rate application of nitrogen fertilizers to optimize the processes of winter wheat cultivation.

Materials and Methods. On the fields of JSC Rassvet in the Ust-Labinsk district of the Krasnodar Territory, there was performed comparative field experiment for the variable rate application of nitrogen fertilizers (two top dressings). Two fields with 83 and 68 hectares of winter wheat were selected for the study. Each field was divided into 3 variants: the Russian scheme is when more fertilizers were applied to the zone of low productivity, the European scheme is when less fertilizers were applied to the zone of low productivity, and the economic scheme is when a single dose of fertilizers was applied. An LSTM model was developed based on the average vegetation indexes (EVI, NDWI, REP, SR) from Sentinel-2 satellite images obtained during nine months. To increase the training sample, there was made an attempt to synthesize the data at the pixel level; the final productivity forecasts were smoothed and converted into job cards for variable rate application of fertilizers with norms calculated based on historical correlation. Laboratory studies of plant selection were conducted at the Kuban State Agrarian University (Department of Operation and Technical Service and at the experimental station of the Kuban experimental farm). The object of the study was the technological process of variable rate application of fertilizers based on the artificial intelligence model and its impact on vegetation, yield and quality indicators of winter wheat.

Results. The actual winter wheat yields (combine and biological) under the Russian scheme on the first field was 90.9...101.5 c/ha; European scheme – 89.2...96.4 c/ha; economic scheme – 89.9...90.9 c/ha. On the second field respectively 87.4...99.6 c/ha; 92.4...98.5 c/ha; 87.8...93.6 c/ha. The average yield on the first field is higher by 6,31 % on the Russian scheme and by 2,56% on the European scheme in comparison with the economic scheme; on the second field is higher by 5,25% on the European scheme and by 3,08 % on the Russian scheme in comparison with the economic scheme. Almost all the studied variants can be attributed to the 3rd statutory grade. The increase in grain-unit is directly proportional to the decrease in protein and gluten content in both fields of AI variants. Protein content for all AI variants (except for the variant of European scheme on the second field) is 0.23–1.5% less. Gluten content is 0.53–3.3% less in all AI variants (except for the European variant of the second field). The grain-unit of the AI variants is 0.33–1.6% more. Gluten content is 0.53–3.3% less for all AI variants (except for the European variant on the second field).

Discussion and Conclusion. Economic analysis of the farm on yield of grain when combine harvesting showed that when using European technology, production costs decreased by 400 thousand rubles compared to the control scheme, and fertilizer costs decreased by 2 567 rubles per one hectare. Revenue from one hectare increased by 6 401 rubles and attributable profit by 9 546 rubles. Gross profit also increased by 150 thousand rubles, and profitability increased by 5.3% compared to the control scheme. The results of the proposed validation methods and created model of variable rate application of nitrogen fertilizers were used in the work of neural network. Under real agricultural conditions, there was evaluated the efficiency of the neural network in terms of yield by creating a scale of performance in relation to existing methods of fertilizer application (increase in yield from 2.56 to 6.31%). The presented results of field experiments demonstrate the high practical significance of the proposed technology for variable rate application of nitrogen fertilizers, which requires checking the results of farm tests on a larger number of fields. The study prospects include further expansion of the application area for the developed technology and AI model. Further improvement of the neural network model involves the integration of a wider range of dynamic data and its use not only for nitrogen fertilization, but also for basic fertilization. This will increase the adaptability of the model to changing vegetation conditions and make management decisions in a shorter time. The study lays the foundation for the creation of integrated digital agrocenosis management platforms, where AI models will play a key role in optimizing all stages of agricultural production.

Keywords: variable fertilizer application, NDVI, artificial intelligence

Acknowledgements: The project was implemented with the support of the Skolkovo Foundation and ProfAgro LLC.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Truflyak E.V., Ragozin L.V. Efficiency of Variable Rate Application of Nitrogen Fertilizer Using Artificial Intelligence Model. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(3):489–512. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.489-512>

ВВЕДЕНИЕ

Для вегетации озимой пшеницы важное значение в минеральном питании имеет азот. В основе точного земледелия лежит дифференцирование удобрений, в том числе азотных, в рамках конкретного поля¹.

В настоящее время существуют следующие способы дифференцированного внесения удобрений: онлайн (используются азотные сканеры); офлайн (используются карты-задания на основе данных продуктивности, агрохимобследования почв, картирования урожайности, индексов вегетации, электропроводности почв и др.). Наибольшее распространение получил последний способ, когда в создании карт-заданий и принятии решения по дозам внесения принимает участие специалист (агроном, агрохимик и др.). При этом возникает затруднение – в «слабую» зону нужно вносить больше или меньше удобрений.

Несмотря на многочисленные отечественные и зарубежные исследования в данной сфере, существует проблема выбора методики создания карт-задания с учетом правильности расчета доз удобрений, которые подкреплены достоверными комплексными данными для соответствующей природно-климатической зоны.

¹ Якушев В. П. Актуальная проблема информационного обеспечения современного земледелия, новые методы и технологии, направленные на ее решение // Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего: материалы IV Междунар. науч. конф. (13–15 сентября, 2023 г., г. Санкт-Петербург). СПб.: Агрофизический научно-исследовательский институт, 2023. С. 33–38. <https://elibrary.ru/ilscke>

При этом важен комплексный подход учета факторов: продуктивности, агрохимического обследования почв, плодородия почв, севооборота, урожайности культур, зависимости «доза внесения удобрений – урожайность», архивных метеоданных, индексов вегетации и др. Учесть все эти факторы агроному при принятии решения о дозе внесения по каждому полю является затруднительным.

Актуальными задачами являются обоснование методов валидации и модели искусственного интеллекта (ИИ) дифференцированного внесения азотных удобрений при возделывании озимой пшеницы с использованием для сравнения трех технологии производства: контрольной (хозяйственная схема или схема агронома); отечественной («низкая продуктивность – больше удобрений») и европейской («низкая продуктивность – меньше удобрений»).

Проблемой является отсутствие методов валидации и модели дифференцированного внесения азотных удобрений в работе нейросети для оптимизации процессов возделывания озимой пшеницы и повышения производительности сельскохозяйственных угодий.

Целью работы является разработка и внедрение технологии дифференцированного внесения азотных удобрений для оптимизации процессов возделывания озимой пшеницы.

Задачи: выбор однородных по продуктивности полей для проведения сравнительного эксперимента; разработка модели ИИ на базе архитектуры LSTM с использованием мультиспектральных спутниковых индексов в условиях ограниченности и недостаточной детализации обучающих данных; апробация полученной модели при технологическом процессе дифференцированного внесения удобрений и анализ его влияния на вегетацию, урожайность и качественные показатели озимой пшеницы.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Эффективность дифференцированного внесения удобрений зависит от правильности расчета доз удобрений. В работе [1] предложен алгоритм расчета оптимальных доз удобрений для построения электронных карт на основе вариабельности значений плодородия почвы и функций отзывчивости.

Электронные карты для бортовых компьютеров разбрасывателей удобрений строятся на основе анализа карт продуктивности и урожайности, вегетации, заданий по отбору проб почвы, карт текстуры и тестов почвы, снимков с дронов.

Технологии дифференцированного внесения удобрений осуществляются специальными машинами, содержащими устройство для изменения подачи материала по электронной карте-заданию. В исследовании В. А. Смелика и др.² представлена блок-схема модели управления такого устройства.

Рассмотрим эффективность дифференцированного внесения удобрений в различных регионах по результатам анализа научных работ. При возделывании яровой пшеницы в Новосибирской области получена высокая зависимость урожайности

² Смелик В. А., Цыганова Н. А., Теплинский И. З. Обоснование дифференцированных доз внесения минеральных удобрений как основа управления технологическими машинами в точном земледелии // Сборник научных докладов ВИМ. 2010. Т. 2. С. 714–720. <https://elibrary.ru/ozamux>

от среднего уровня плодородия и всхожести семян³. При недостаточном влагообеспечении увеличение дозы удобрений в зоне высокого плодородия снижает урожайность. В Алтайском крае при возделывании яровой пшеницы в 2022–2023 гг. различия средней биологической урожайности в 2,5–3 раза больше, чем при вариациях нормы посева семян и доз удобрений [2]. В Костанайском районе Республики Казахстан промежуточное внесение азотных удобрений с последующим припосевным внесением фосфора в зоны высокой продуктивности повысило урожайность на 127 %⁴.

Исследования [3] по формированию зерна яровой пшеницы высокого качества за счет дифференцированного внесения удобрений проводились в северной лесостепи Тюменской области. Такая технология позволила получить зерно яровой пшеницы первого класса, увеличение белка составило 0,47 %, сырой клейковины – 5,70 %, стекловидности – 3,00 %.

Дифференцированное внесение удобрений с использованием геоинформационных технологий показало эффективность в лесостепи Новосибирского Приобья [4]. Прибавка урожая яровой пшеницы составила 24–34 %. В Омской области прибавка урожая достигла 14–23 %, белок вырос на 0,92–1,03 %⁵.

В работе [5] представлен алгоритм управления азотным режимом на основе гиперспектрального зондирования и определения участков с дефицитом азота.

Для расчета доз удобрений разработана база⁶ со сведениями о содержании фосфора, калия и азота по элементарным участкам 5–7 га. База содержит карты в виде векторных слоев.

Программы создают карты по данным с беспилотных летательных аппаратов и со спутников в результате анализа вегетационных индексов⁷ [6].

Проведенные нами исследования в учебно-опытном хозяйстве «Краснодарское» Кубанского ГАУ [7], сравнения онлайн- и офлайн-технологий показали снижение использования минеральных удобрений на 16 кг/га, повышение содержания клейковины в зерне на 2,3 %, содержание белка на 0,6 % при онлайн-технологии.

³ Беляев В. И., Тагильцев А. В., Соколова Л. В. Агрономическая эффективность применения дифференцированного способа внесения семян и удобрений на яровой пшенице // Аграрная наука – сельскому хозяйству : сб. материалов XIX Междунар. науч.-практ. конф. (8–9 февраля 2024 г., г. Барнаул). Барнаул : Алтайский государственный аграрный университет, 2024. С. 161–163. <https://elibrary.ru/ryghkl>

⁴ Производственное испытание дифференцированного внесения минеральных удобрений при возделывании яровой пшеницы / С. А. Тулькубаева [и др.] // Актуальные вопросы растениеводства и кормопроизводства : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (28 февраля 2024 г., г. Кинель). Кинель : ИБЦ Самарского ГАУ, 2024. С. 131–139. <https://www.elibrary.ru/aynhwr>

⁵ Влияние дифференцированного внесения азотных удобрений на урожайность и качество зерна яровой пшеницы / Н. Ф. Балабанова [и др.] // Инновационные технологии в земледелии и растениеводстве : сб. науч. статей, посвящ. 70-летию д-р с.-х. н. Юшкевича Леонида Витальевича (25 октября 2022 г., г. Омск). Омск : ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», 2022. С. 10–16. <https://elibrary.ru/hhqrdr>

⁶ Сахабиев И. А., Смирнова Е. В., Гиниятуллин К. Г. База данных агрохимического обследования пахотных угодий для дифференцированного внесения удобрений : свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023620787 Российская Федерация. № 2023620367 ; заявл. 13.02.2023 ; опубл. 03.03.2023. <https://elibrary.ru/wmauyk>

⁷ Ботвич И. Ю., Емельянов Д. В. Построение карт-заданий для дифференцированного внесения азотных удобрений по беспилотным и спутниковым данным : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688068 Российская Федерация. № 2023685918 ; заявл. 30.11.2023 ; опубл. 20.12.2023. <https://elibrary.ru/goksmv>

В работе [8] нами предложен алгоритм обработки снимков анализа растений риса полученных с камер беспилотных летательных аппаратов, разработанный нами в Федеральном научном центре риса. Алгоритм выполнен в программе Mathcad, с помощью которой определялось среднее значение кода плотности тона изображения.

Исследования, выполненные нами в Кушевском районе Краснодарского края (АО фирма «Агрокомплекс» имени Н. И. Ткачева»), показали преимущества дифференцированного внесения удобрений⁸. Съемка с последующим созданием карты-задания осуществлялась беспилотником мультироторного типа Phantom 4 Pro с камерой RGB. В результате урожайность озимой пшеницы на опытном участке составила на 6 % выше по сравнению с контрольным.

Проведена апробация внесения азотных удобрений агродроном Agras T10 при возделывании опытных делянок озимого ячменя в учебно-опытном хозяйстве «Кубань» Кубанского ГАУ [9]. В результате урожайность повысилась на 3,6 % при снижении затрат на удобрения 2 %.

На основании проведенного обзора можно утверждать, что присутствует интерес со стороны науки и производства к дифференцированным технологиям при внесении удобрений в различных регионах Российской Федерации с доказанным экономическим эффектом. По данным Росстата с 2015 по 2022 г. заметна динамика ежегодного увеличения внесения азотных удобрений на 69 % в сельскохозяйственных организациях без учета микропредприятий. Анализируя статистику за 2018–2022 гг., можно заметить рост как по внесению удобрений (47 %), так и по полученной урожайности (26 %).

При изучении влияния минеральных удобрений на урожайность зерновых и зернобобовых культур были выявлены высокий уровень корреляции и значение ожидаемой прибыли от 1 руб. вложенных средств в удобрения на уровне 0,8–3,7 руб. (если использовать средние цены на минеральные удобрения и стоимость реализованной продукции в Нижегородской области)⁹.

Рассмотрим наиболее распространенные системы с возможностью создания карт для дифференцированного внесения удобрений. Среди цифровых сервисов для сельского хозяйства наибольшее распространение имеют «История поля», «Агросигнал», Cropwise, OneSoil, ExactFarming¹⁰ и др.

Для дифференцированного внесения удобрений используются зарубежные сервисы, например, FarmCalculators, Fertilizer Removal. Agrio¹¹ – программа на основе малой нейронной сети, способная выявлять болезни растений, связанные

⁸ Труфляк Е. В. Цифровые технологии в сельском хозяйстве и городской среде : учебник для вузов. СПб. : Лань, 2024. 448 с.

⁹ Оценка влияния вносимых удобрений на урожайности различных культур в разрезе субъектов РФ [Электронный ресурс]. URL: <https://stratanda.pro> (дата обращения: 21.10.2024).

¹⁰ История поля [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://info.agrohistory.com/> (дата обращения: 21.10.2024); Агросигнал [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://agrosignal.com> (дата обращения: 21.10.2024); Cropwise [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://www.syngenta.ru/cropwise> (дата обращения: 21.10.2024); OneSoil [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://onesoil.ai/ru> (дата обращения: 21.10.2024); ExactFarming [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://exactfarming.com> (дата обращения: 21.10.2024).

¹¹ Agrio [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://agrio.app/agrio-protect-your-crops-harvest-more-ru> (дата обращения: 21.10.2024).

с вредителями и недостатком питательных веществ. Программа Lab-Soil¹² помогает рассчитывать дозы для внесения удобрений на основе химического анализа почвы.

Российская платформа «АгроМон»¹³ позволяет рассчитывать нормы макро- (N, P, K) и мезоэлементов (S, Ca, Mg) на основе прогнозируемого урожая. Программа «Агроинтегратор»¹⁴ используется для ведения учета обрабатываемых площадей, подбирает оптимальный севооборот, удобрения и средства защиты растений.

Исследователями предпринимаются попытки использования нейросети для получения моделей внесения удобрений. В работе зарубежных авторов [10] представлена модель глубокого обучения для расчета и прогнозирования дифференцированного внесения удобрений (N, P и K) при выращивании капусты. Значение прогноза и рекомендуемого количества вносимого удобрения меняется с применением в нейросети различных передаточных функций.

Ученые из США и Ирака [11] описали технологию интеллектуального внесения подкормок (наноудобрения и удобрения с контролируемым или замедленным действием).

Рекуррентные нейросети (RNN) находят применение в сельском хозяйстве для решения различных задач: прогнозирования урожайности (анализ ретроспективных данных о погоде, почвенных условиях и др.); мониторинга вегетации растений (отслеживание состояния растений и выявление болезней с помощью сенсоров); оптимизации полива (анализ данных о влажности почвы, погодных условиях и др.).

Ключевые особенности LSTM (*long short-term memory*), которые делают ее подходящей для этой сферы: 1) ячейка памяти позволяет сохранять важную информацию о состоянии растений, погодных условиях и др., что важно для прогнозирования урожайности; 2) входные, выходные и забывающие гейты контролируют, какая информация сохраняется или игнорируется, что позволяет управлять данными, учитывая сезонные изменения или временные колебания в урожайности; 3) может учитывать данные, находящиеся на большом расстоянии во времени, что важно для анализа влияния прошлых условий на текущие результаты, например, как погодные условия в прошлом сезоне влияют на текущий урожай; 4) может работать с неполными или зашумленными данными, что актуально в условиях, когда данные о состоянии растений или погоде могут быть неполными.

Статьи [12–14] описывают работу беспилотных летательных аппаратов в аграрном секторе. С помощью данных машин специалисты делают мультиспектральные снимки засеянных полей и пространственное картирование влажности почвы [15–17]. Несомненный плюс в использовании беспилотников – широкий спектр выполняемых работ (от составления простых карт участков до точечного разбрасывания удобрения и опрыскивания растений).

На данный момент отсутствуют производственно-проверенные системы, позволяющие на основе анализа данных о хозяйстве принимать решения о дозах и зонах при дифференцированном основном внесении и подкормке на основе

¹² Lab-Soil [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://lab-soil.com> (дата обращения: 21.10.2024).

¹³ АгроМон [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://agromon.ru> (дата обращения: 21.10.2024).

¹⁴ Агроинтегратор [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://www.agrointegrator.ru/mobile-app> (дата обращения: 21.10.2024).

моделей ИИ без агронома и агрохимика [18]. Эффективность дифференцированного внесения азотных удобрений с использованием модели ИИ является актуальным направлением исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сравнительный полевой эксперимент дифференцированного внесения азотных удобрений (первая и вторая подкормки) выполнялся на полях АО «Рассвет» Усть-Лабинского района Краснодарского края. Для проведения исследований были выбраны два поля однородной продуктивности с озимой пшеницей площадью 83 и 68 га. Каждое поле было разделено на три варианта: российская схема – в зону низкой продуктивности вносилось больше удобрений, европейская схема – в зону низкой продуктивности вносилось меньше удобрений, хозяйственная схема – единая доза удобрений. В течение всей вегетации проводился анализ наземных частей растений и корневой системы путем отбора растений в различных частях полей. Лабораторные исследования отобранных растений проводились в Кубанском ГАУ (кафедра эксплуатации и технического сервиса) и на опытной станции учебно-опытного хозяйства «Кубань».

Объектом исследования являлся технологический процесс дифференцированного внесения удобрений по модели ИИ и его влияние на вегетацию, урожайность и качественные показатели озимой пшеницы.

В исследовании использовались следующие материалы: образцы озимой пшеницы, отобранные в поле в различных фазах вегетации; образцы почвы с полей для агрохимического анализа перед проведением эксперимента; данные полевого эксперимента (урожайность, качественные показатели, показатели вегетации); спутниковые данные (спектральные снимки Sentinel-2, рассчитанные вегетационные индексы); исторические данные (данные об урожайности за предыдущие годы, данные о предшественниках, нормах внесения удобрений и др.).

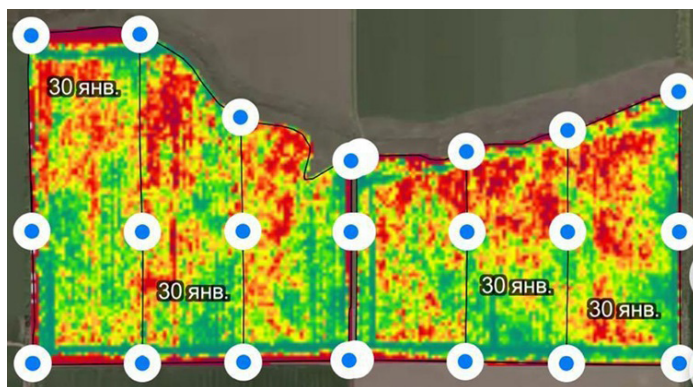
Применялись общие и частные методы полевых исследований. При дифференцированном внесении удобрений использовались разные нормы удобрений по зонам поля в соответствии с картами-заданиями. Исследование отобранных образцов растений выполнялось в специализированной лаборатории (Кубанский ГАУ) для определения качественных показателей (белок, клейковина). Это позволило получить объективные данные о влиянии различных схем внесения удобрений на качество зерна, что является важным экономическим фактором.

Процедура исследований включала в себя: 1) планирование (определение целей, задач, выбор полей и методов, сбор исторической информации); 2) сбор и подготовку данных для ИИ – получение спутниковых снимков, расчет индексов, формирование обучающей выборки (включая попытку синтеза данных), нормализация; 3) разработку и обучение модели – создание и обучение LSTM-модели, постобработка прогнозов (сглаживание, расчет норм, форматирование Shape); 4) полевой эксперимент (разделение полей на зоны, дифференцированное внесение удобрений по ИИ-картам и контрольным схемам, мониторинг вегетации, сбор данных урожайности и качества); 5) анализ результатов и выводы (экономическая оценка, статистическое сравнение схем, оценка эффективности ИИ-модели).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения сравнительных исследований предложенной ООО «ПрофАгро» модели экспериментальных исследований выбраны следующие поля в АО «Рассвет» Усть-Лабинского района Краснодарского края: поле № 221 (83 га); поле № 226 (68 га). Предшественником на обоих полях была кукуруза. Тип почвы – чернозем обыкновенный. Каждое поле было разделено на три варианта (рис. 1): 221_1, 226_1 – в зону низкой продуктивности вносилось больше удобрений; 221_2, 226_2 – в зону низкой продуктивности вносилось меньше удобрений; 221_3, 226_3 – удобрения вносились одной дозой (хозяйственная схема).

Была проведена разметка вариантов полей по геометкам и дальнейший анализ в системах OneSoil и Cropwise.



Р и с. 1. Схема вариантов полей с контрастным отображением вегетации (слева направо): 221_1; 221_2; 221_3; 226_1; 226_2; 226_3

F i g. 1. Scheme of field variants with contrasting vegetation display (from left to right): 221_1; 221_2; 221_3; 226_1; 226_2; 226_3

Источник: рисунки 1, 2, 8 адаптированы из источника¹⁵.
Source: figures 1, 2, and 8 are adapted from the source.

Для модели ИИ взяты за основу прогнозирование урожайности поля через соотношение индексов EVI (улучшенный индекс растительности), NDWI (нормализованный разностный водный индекс), REP (индекс положения красных краев), SR (простой вегетационный индекс), рассчитанные на основании спектральных спутниковых снимков Sentinel-2. Во время обучения бралось среднее значение каждого индекса по изображению, так как известно было только общее число урожайности по полю. Для конфигурации сети за основу была взята LSTM архитектура с большим слоем и другими измененными гиперпараметрами.

В процессе обучения в модель подавались последовательности по четырем усредненным индексам по каждому изображению за девять посевных месяцев, таргет – урожайность. Урожайность нормализуется от 0 до 1. Выход модели – число от 0 до 1, значение продуктивности (урожайности).

¹⁵ ООО «ПрофАгро» [Электронный ресурс]. URL: [file:///C:/Users/User/Downloads/kq52zissq9%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/kq52zissq9%20(2).pdf) (дата обращения: 21.10.2024).

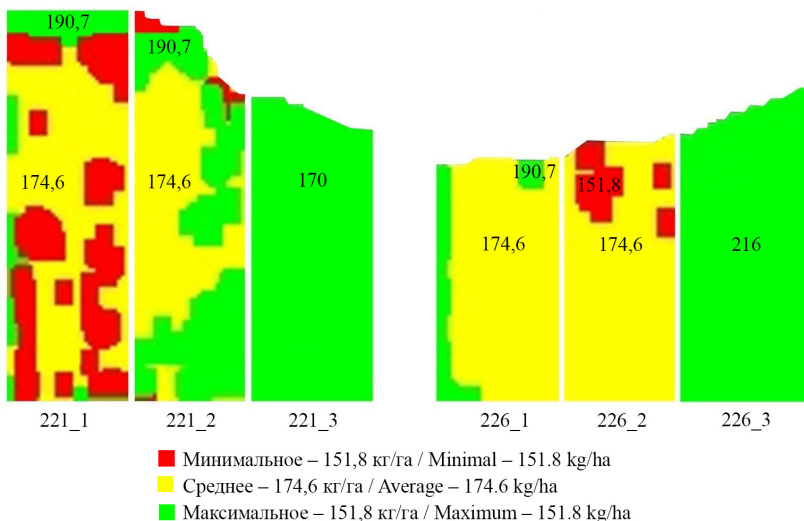
В качестве обучающих данных были взяты 200 полей с имеющейся информацией об урожайности. Для каждого поля были использованы снимки во всех спектрах, и выбраны по одному наилучшему снимку за каждый месяц посевного года (без облаков).

Так как обучающих данных было недостаточно, предпринята попытка синтеза данных. Урожайность для всего поля разделялась по пикселям согласно значениям NDVI. В модель подавались уже не средние значения, а значения индексов в каждом пикселе, в качестве таргета использовалась урожайность в соответствующем пикеле. Таким образом кратно увеличивались данные, но существенного прироста в качестве модели достигнуто не было.

Для полученных из модели прогнозов продуктивности проведено сглаживание. Необходимость сглаживания карты вызвана техническими ограничениями: разбрасыватель удобрений работает единой нормой на всю ширину захвата (в нашем случае обработка проводилась с шириной захвата 24 м). После сглаживания на карту была добавлена информация о нормах внесения, карта преобразована в карту-задание для техники формата Shape.

Итоговые нормы для первой подкормки аммиачной селитрой рассчитали по данным об урожайности за 2020–2023 гг. путем построения корреляции между культурой предшественником, первой подкормкой и урожайностью. Были выбраны значения с максимальной урожайностью для полей с предшественником «кукуруза». Получены нормы первой подкормки 151,8–174,6–190,7 кг/га для прогнозируемой урожайности 72 ц/га.

В результате анализа данных получена модель на основе ИИ, которая позволила получить карты-задания для первой подкормки аммиачной селитрой (рис. 2).



Р и с. 2. Графическое отображение карт-заданий для дифференцированного внесения удобрений на полях 221 (слева) и 226 (справа) по вариантам с дозами (первая подкормка)

F i g. 2. Graphic representation of task maps for variable rate application of fertilizers in fields 221 (left) and 226 (right) through the variants with doses (first feeding)

Внесение удобрений осуществлялось на участках 226_1, 226_2, 226_3 агрегатом трактор Axion 850 + разбрасыватель Amazone ZG-TS 7501 Profis (рис. 3); на поле 221_1, 221_2 – трактор Fendt 720 + разбрасыватель Amazone ZG-TS 7501; на участке хозяйственной схемы 221_3 – самоходный разбрасыватель Туман-3 (рис. 4).



Р и с. 3. Агрегат Axion 850 +
Amazone ZG-TS 7501 Profis
F i g. 3. Unit Axion 850 +
Amazone ZG-TS 7501 Profis



Р и с. 4. Разбрасыватель Туман-3
F i g. 4. Spreader Fog-3

Источник: фотографии для рисунков 3–6 сделаны Е. В. Труфляком при второй подкормке в Усть-Лабинском районе 19 марта 2024 г.

Source: the photographs for figures 3–6 were taken by E. V. Truflyak during the second feeding in Ust-Labinsky district on March 19, 2024.

Проводились наземные измерения растений до и после азотных подкормок. Проводился отбор растений с 1 погонного метра (рис. 5), замеры ручным Гринсикером индекса вегетации NDVI на каждом варианте по 20 повторностей (рис. 6).

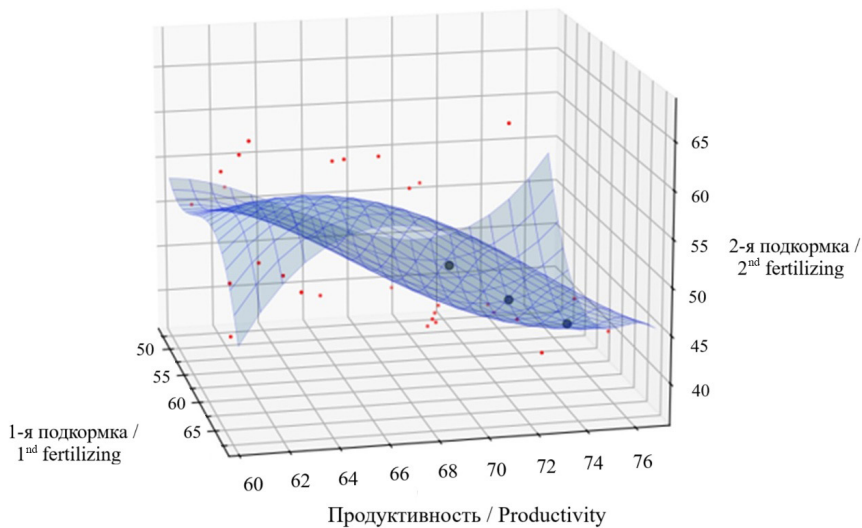


Р и с. 5. Отбор растений
F i g. 5. Plant selection



Р и с. 6. Измерения Гринсикером
F i g. 6. Greensicker measurements

Для определения доз внесения селитры построен график зависимости урожайности от первой и второй подкормки по данным об урожайности за 2020–2023 гг. Была построена «обратная» зависимость второй подкормки от первой урожайности. Аппроксимирован график и получена трехмерная квадратичная плоскость (рис. 7).



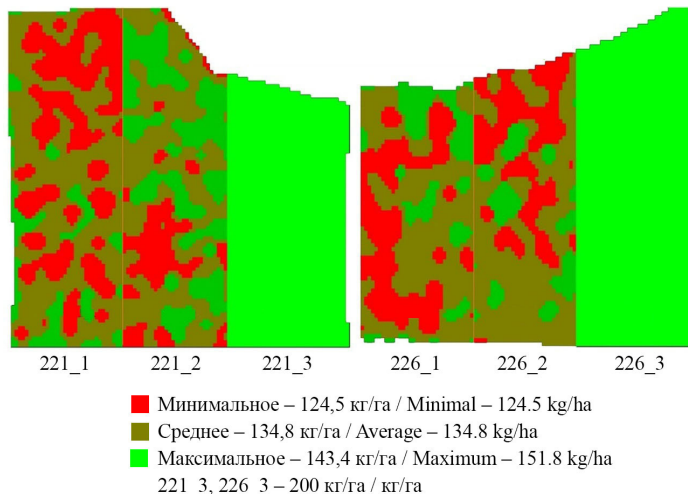
Р и с. 7. Трехмерная квадратичная плоскость

F i g. 7. Three-dimensional quadratic plane

Источник: рисунок составлен ООО «ПрофАгро».

Source: diagram was compiled by ProfAgro LLC.

В результате анализа данных за три года получена модель на основе ИИ, которая позволила получить карты-задания для второй подкормки аммиачной селитрой (рис. 8).



Р и с. 8. Графическое отображение карт-заданий для дифференцированного внесения удобрений на полях 221 (слева) и 226 (справа) по вариантам с дозами (вторая подкормка)

F i g. 8. Graphical representation of task maps for variable rate application of fertilizers on fields 221 (left) and 226 (right) through the variants with doses (second top dressing)

Получили значения норм второй подкормки 124,5–134,8–143,4 кг/га для прогнозируемой урожайности 72 ц/га.

Сводные результаты измерений отобранных растений до и после подкормок представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Сводные результаты измерения

Summarized measurement results

Общая масса растений с 1 погонного метра, г / Total weight of plants from 1 linear meter, g						
1	2	3	4	5	6	7
До подкормки / Before feeding	73,76	45,65	45,62	50,84	54,02	42,88
После первой подкормки / After the first top dressing	198,87	166,07	132,24	86,53	106,02	118,77
Разница, раз / Difference, times	↑ 2,7	↑ 3,6	↑ 2,9	↑ 1,7	↑ 2	↑ 2,8
После второй подкормки / After the second top dressing	394,74	385,35	371,16	218,03	242,07	250
Разница, раз / Difference, times	↑ 2	↑ 2,3	↑ 2,8	↑ 2,5	↑ 2,3	↑ 2,1
Масса растения, г / Plant weight, g						
До подкормки / Before feeding	0,811	0,692	0,634	0,598	0,702	0,604
После первой подкормки / After the first top dressing	2,486	1,661	1,812	1,082	1,683	1,627
Разница, раз / Difference, times	↑ 3,1	↑ 2,4	↑ 2,9	↑ 1,8	↑ 2,4	↑ 2,7
После второй подкормки / After the second top dressing	5,298	5,033	5,718	3,523	3,39	3,847
Разница, раз / Difference, times	↑ 2,1	↑ 3	↑ 3,2	↑ 3,3	↑ 2	↑ 2,4
Количество растений на 1 погонном метре, шт. / Number of plants per 1 linear meter, pcs.						
До подкормки / Before feeding	91	66	72	85	77	71
После первой подкормки / After the first top dressing	80	100	73	80	63	73
Разница, % / Difference, %	↓ 12	↑ 66	↑ 1,4	↓ 6	↓ 18	↑ 3
После второй подкормки / After the second top dressing	77	77	65	62	74	69
Разница, % / Difference, %	↓ 4	↓ 23	↓ 11	↓ 23	↑ 15	↓ 5
Длина растения, мм / Plant length, mm						
До подкормки / Before feeding	217,0	207,0	193,6	172,0	187,1	171,4
После первой подкормки / After the first top dressing	233,4	237,8	235,4	203,9	212	210,2
Разница, % / Difference, %	↑ 7	↑ 13	↑ 17	↑ 16	↑ 12	↑ 18
После второй подкормки / After the second top dressing	507,6	501,4	498,3	467,4	477,0	468,9
Разница, раз / Difference, times	↑ 2,2	↑ 2,1	↑ 2,1	↑ 2,3	↑ 2,3	↑ 2,2
Количество стеблей на растении, шт. / Number of stems per plant, pcs.						
До подкормки / Before feeding	2,7	2,6	2,4	2,3	2,8	2,6
После первой подкормки / After the first top dressing	3,9	3,2	3,5	3,3	3,4	2,8
Разница, % / Difference, %	↑ 31	↑ 19	↑ 31	↑ 30	↑ 18	↑ 7
После второй подкормки / after the second top dressing	3,1	2,9	2,9	2,9	2,3	2,3
Разница, % / Difference, %	↓ 21	↓ 9	↓ 17	↓ 12	↓ 32	↓ 18

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2	3	4	5	6	7
<i>Количество листьев на растении, шт. / Number of leaves on the plant, pcs.</i>						
До подкормки / Before feeding	5,3	6,3	4,8	6,0	8,1	6,5
После первой подкормки / After the first top dressing	5,3	6,9	5,5	6,3	8	6,6
<i>Разница, % / Difference, %</i>	–	↑ 9	↑ 13	↑ 5	–	–
После второй подкормки / After the second top dressing	5,5	5,4	5,4	6,2	5,1	5
<i>Разница, % / Difference, %</i>	↑ 4	↓ 28	↓ 2	↓ 2	↓ 36	↓ 24
<i>Длина корня, мм / Root length, mm</i>						
До подкормки / Before feeding	99,6	88,8	87,8	91,1	90,8	104,3
После первой подкормки / After the first top dressing	80,3	110,6	90,8	53,5	65,5	72,2
<i>Разница, % / Difference, %</i>	↓ 19	↑ 20	↑ 3	↓ 41	↓ 28	↓ 31
После второй подкормки / After the second top dressing	91,1	77,5	96,1	94,5	87,6	79,2
<i>Разница, % / Difference, %</i>	↑ 12	↓ 30	↑ 6	↑ 43	↑ 25	↑ 9
<i>Ширина корня, мм / Root width, mm</i>						
До подкормки / Before feeding	3,3	3,0	2,8	4,2	4,3	4,7
После первой подкормки / After the first top dressing	4,6	4,3	4,3	4,5	4,8	4,4
<i>Разница, % / Difference, %</i>	↑ 28	↑ 30	↑ 35	↑ 7	↑ 10	↓ 6
После второй подкормки / After the second top dressing	5,2	6,2	4,4	5,3	4	5
<i>Разница, % / Difference, %</i>	↑ 12	↑ 31	↑ 2	↑ 15	↓ 17	↑ 12

Примечание: жирным выделены наибольшие значения; курсивом – относительная разница; 221_1, 226_1 – в зону низкой продуктивности вносилось больше удобрений; 221_2, 226_2 – в зону низкой продуктивности вносилось меньше удобрений; 221_3, 226_3 – удобрения вносились одной дозой (хозяйственная схема).

Note: the largest values are highlighted in bold; the relative difference is in italics; 221_1, 226_1 – more fertilizers were applied to the zone of low productivity; 221_2, 226_2 – less fertilizers were applied to the zone of low productivity; 221_3, 226_3 – fertilizers were applied in one dose (economic scheme).

После второй подкормки по варианту 221_1 наибольшими были 5 показателей размерно-массовых характеристик растений (рис. 9). При этом до подкормок по варианту 221_1 были наилучшими 7 показателей из 8.

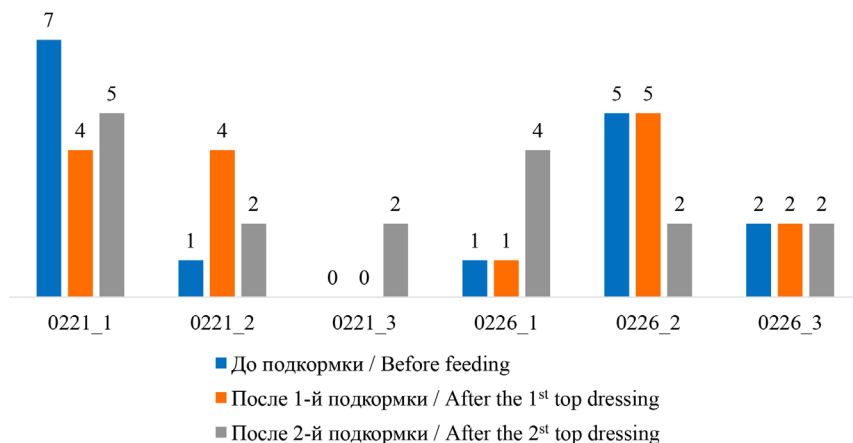
По варианту 221_2 после второй подкормки наибольшими были 2 показателя, вариант 226_1 до второй подкормки показывал наименьшие показатели, после второй подкормки получено 4 наибольших показателя.

Наилучшие показатели до и после первой подкормки показывал вариант 226_2 (5 показателей), после второй эти показатели снизились до 2.

Уборка урожая в поле 221 осуществлялась 22.06.2024 г., в поле 226 – 23.06.2024 г. Уборка проходила с использованием четырех комбайнов Torum 750, Torum 785 и RSM 161. Каждый комбайн был оборудован системой GPS, позволяющей точно определить площадь убранного участка. При выгрузке фиксировалась площадь обработанного участка для дальнейшего расчета урожайности.

Для определения биологической урожайности пшеницы использовалась следующая методика. Сначала по каждому варианту поля были выбраны три

произвольные точки вначале, середине и конце участка. В произвольном месте каждой геометки устанавливалась квадратная рамка площадью 1 м² (рис. 10).



Р и с. 9. Сравнение вариантов по количеству наибольших значений размерно-массовых показателей растений

F i g. 9. Comparison of variants by the number of the highest values of size-mass indices of plants

Источник: рисунки 9, 11 составлены авторами статьи.

Source: diagrams 9, 11 are compiled by the authors of the article.



Р и с. 10. Сбор биологической массы в варианте 221_1

F i g. 10. Collection of biological mass in variant 221_1

Источник: фотография сделана Е. В. Труфляком при уборке урожая в Усть-Лабинском районе 22 июня 2024 г.

Source: the photo was taken during harvesting in Ust-Labinsk district on June 22, 2024, by E. V. Truflyak.

Все колосья внутри рамки аккуратно срезались и складывались в мешок, который маркировался номером для идентификации проб. Также собирались все потерянные колоски. Затем мешки с пробами доставлялись в лабораторию опытной станции учебно-опытного хозяйства «Кубань» Кубанского ГАУ для дальнейшего анализа.

В лаборатории колосья обмолачивались молотилкой Wintersteiger LD 35, зерно взвешивалось (весы CAS ED–H), упаковывалось в пакеты для дальнейшего анализа в лаборатории. Для определения показателей зерна, таких как влажность, натура, протеин, клейковина и крахмал, использовался анализатор Perten Instruments IM 9500.

В таблице 2 представлены обобщенные качественные показатели зерна.

Таблица 2

Table 2

Результаты определения качественных показателей зерна по вариантам
Results of determination of grain quality indicators by variants

Качественные показатели зерна / Quality indicators of grain		Вариант / Variant					
		221_1	221_2	221_3	226_1	226_2	226_3
Протеин, % / Protein, %	Значение / Significance	11,867	12,333	13,367	12,367	12,700	12,600
	Разница с хозяй- ственной схемой, % / Difference with the farm scheme, %	↓ 1,500	↓ 1,030	–	↓ 0,230	↑ 0,100	–
Клейковина, % / Gluten, %	Значение / Significance	23,367	24,400	26,667	24,467	25,300	25,000
	Разница с хозяй- ственной схемой, % / Difference with the farm scheme, %	↓ 3,300	↓ 2,270	–	↓ 0,530	↑ 0,300	–
Натура, г/л / Natura, g/l	Значение / Significance	813,333	808,333	805,667	822,333	818,667	809,333
	Разница с хозяй- ственной схемой, % / Difference with the farm scheme, %	↑ 0,950	↑ 0,330	–	↑ 1,600	↑ 1,150	–
Класс / Class		4–3	3	3	3	3	3

Проанализировав результаты по качеству зерна, можно сделать вывод, что практически все варианты относятся к 3-му классу. Увеличение натуры прямо пропорционально снижению содержания протеина и клейковины по обоим полям вариантов ИИ. Содержание протеина по всем вариантам ИИ (кроме варианта 226_2) ниже на 0,23–1,5 %. Содержание клейковины по всем вариантам ИИ (кроме варианта 226_2) ниже на 0,53–3,3 %. Натура по вариантам ИИ выше на 0,33–1,6 %. Содержание клейковины по всем вариантам ИИ (кроме варианта 226_2) ниже на 0,53–3,3 %. Итоговая урожайность по вариантам представлена в таблице 3.

Графическое изображение сравнения урожайностей для наглядности приведено на рисунке 11.

Т а б л и ц а 3

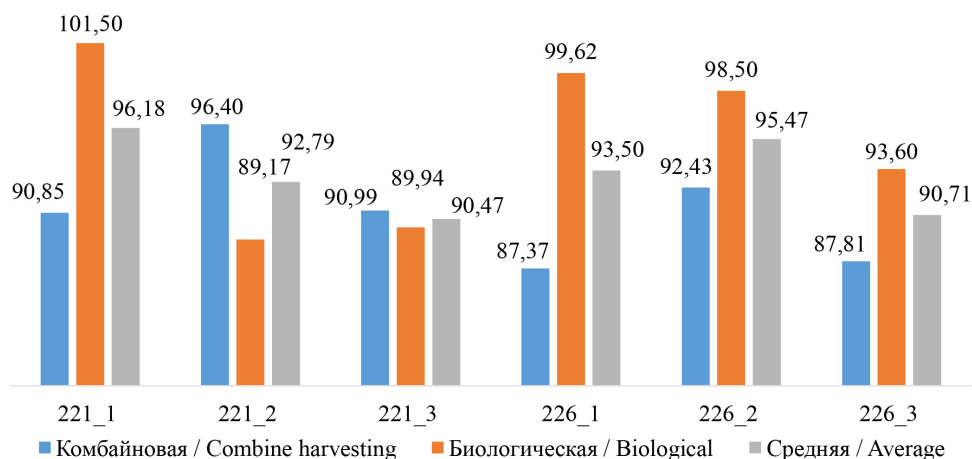
T a b l e 3

Итоговые результаты с учетом комбайновой и биологической урожайности по вариантам
Final results taking into account biological yield and yield when combine harvesting by variants

Вариант / Variant	Урожайность, ц/га / Yield, c/ha				
	Комбайновая / Combine harvesting	Биологическая / Biological	Средняя / Average	Разница с хозяйственной схемой / Difference with the farm scheme	
				ц/га / c/ha	%
221_1 (низкая продуктив- ность – больше удобрений) / 221_1 (low productivity – more fertilizer)	90,85	101,50	96,18	↑ 5,71	↑ 6,31
221_2 (низкая продуктив- ность – меньше удобрений) / 221_2 (low productivity – less fertilizer)	96,40	89,17	92,79	↑ 2,32	↑ 2,56
221_3 (хозяйственная схе- ма) / 221_3 (farm scheme)	90,99	89,94	90,47	–	–
226_1 (низкая продуктив- ность – больше удобрений) / 226_1 (low productivity – more fertilizer)	87,37	99,62	93,50	↑ 2,79	↑ 3,08
226_2 (низкая продуктив- ность – меньше удобрений) / 226_2 (low productivity – less fertilizer)	92,43	98,50	95,47	↑ 4,76	↑ 5,25
226_3 (хозяйственная схе- ма) / 226_3 (farm scheme)	87,81	93,60	90,71	–	–

Примечание: жирным выделены средние значения урожайности.

Note: the average yields are highlighted in bold.



Р и с. 11. Урожайность вариантов, ц/га

F i g. 11. Yield of variants, c/ha

В результате усредненная урожайность по полю 221 выше на 6,31 % по варианту «низкая продуктивность – больше удобрений» и на 2,56 % по варианту «низкая продуктивность – меньше удобрений». Усредненная урожайность по полю 226 выше на 5,25 % по варианту «низкая продуктивность – меньше удобрений» и на 3,08 % по варианту «низкая продуктивность – больше удобрений». Изменчивость признака в среднем по признаку «биологическая урожайность» незначительная, так как она менее 10 %. Относительная ошибка менее 7–8 %, что удовлетворительно для полевых экспериментов.

Наилучшие данные по усредненной урожайности показали варианты 221_1 и 226_2. Эти варианты имели оптимальные показатели размерно-массовых характеристик растений до проведения эксперимента (7 и 5 показателей соответственно). Для достоверности полученной урожайности по вариантам 221_1 и 226_2 и понятия насколько сработала в данных случаях модель ИИ при подкормках требуются трехлетние исследования в данной природно-климатической зоне.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент проводился для оценки экономической эффективности различных схем внесения удобрений. Сравнение делалось между контрольной схемой, отечественной и европейской технологиями. В ходе эксперимента были измерены урожайность, затраты на производство, себестоимость продукции, выручка и прибыль с одного гектара.

Представлен расчет экономической эффективности по данным АО «Рассвет» с учетом комбайновой урожайности (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

**Экономическая эффективность использования модели
искусственного интеллекта полей 221 и 226**
Cost-effectiveness of using the AI model on fields 221 and 226

Показатель / Indicator	Схема / Scheme			Отклонение схемы 1 от контроля / Deviation of scheme 1 from control	Отклонение схемы 2 от контроля / Deviation of scheme 2 from control
	Контроль / Control	1. Российская / 1. Russian	2. Европей- ская / 2. European		
1	2	3	4	5	6
<i>Производство / Production</i>					
Уборочная площадь, га / Harvest area, ha	46	49	42	–	–
Объем производства (физический вес), т / Production volume (physical weight), t	412,50	437,30	395,10	–	–
Объем производства (зачетный вес), т / Production volume (net weight), t	379,50	402,30	363,50	–	–
Урожайность (физический вес), ц/га / Yield (physical weight), c/ha	89,40	89,50	94,50	0,20	5,20
Урожайность (зачетный вес), ц/га / Yield (net weight), c/ha	82,20	82,40	87,00	0,20	4,80

Окончание табл. 4 / End of table 4

1	2	3	4	5	6
<i>Реализация / Realization</i>					
Объем реализованной продукции, т / Volume of products sold, t	379	402	364	22,90	–16,00
Средняя цена реализации 1 т (без НДС), руб. / Average selling price per ton (excluding VAT), rub.	13 463	13 463	13 463	0,00	0,00
Себестоимость 1 т реализованной продук- ции, руб. / Cost of 1 ton of sales, rub.	6 536	6 253	5 817	–283,0	–719,0
Выручка от реализации (без НДС), млн руб. / Sales revenue (net of VAT), million rub.	5,10	5,40	4,90	0,30	–0,20
Себестоимость реализованной продукции, млн руб. / Cost of sales, million rub.	2,50	2,50	2,10	0,00	–0,40
Валовая прибыль, млн руб. / Gross profit, million rub.	2,63	2,90	2,78	0,27	0,15
Рентабельность (убыточность), % / Profitability (unprofitability), %	51,50	53,60	56,80	2,10	5,30
Выручка с 1 га, руб. / Revenue per 1 ha, rub.	110 678	110 905	117 079	228	6 401
Условная прибыль с 1 га уборочной пло- щади, руб. / Conditional profit per 1 ha of harvested area, rub.	56 947	59 395	66 493	2 448	9 546
<i>Затраты на производство / Production costs</i>					
Удобрения минеральные, руб./га / Mineral fertilizers, rub./ha	16 545	14 732	13 977	–1 813	–2 567

Расчет экономической эффективности выполнялся АО «Рассвет» с учетом полученной комбайновой урожайности для полей 221 и 226 вместе.

При использовании европейской технологии на двух экспериментальных полях производственные затраты снизились на 400 тыс. руб. по сравнению с контрольной схемой, а затраты на удобрения уменьшились на 2 567 руб./га. Выручка с 1 га увеличилась на 6 401 руб., условная прибыль на 9 546 руб. Валовая прибыль по европейской схеме также увеличилась на 150 тыс. руб., а рентабельность на 5,3 % по сравнению с контрольной схемой.

Результаты предложенных методов валидации и созданной модели дифференцированного внесения азотных удобрений использовались в работе нейросети. Эффективность работы нейросети оценена в реальных условиях сельского хозяйства по урожайности путем создания шкалы работы по отношению с существующими методами внесения удобрений (повышение урожайности от 2,56 до 6,31 %).

Предложена рабочая модель ИИ для точного земледелия, которая позволяет экономить удобрения при одновременном сохранении или увеличении урожайности; повышать экономическую эффективность за счет сокращения затрат и роста прибыли; снижать негативное воздействие на окружающую среду путем оптимизации использования агрохимикатов; предоставлять агрономам инструмент для обоснованного управления питанием растений.

Для достоверности полученной урожайности и понятия насколько сработала в данных случаях модель ИИ по отношению к урожайности при подкормках

с агрономической точки зрения требуются трехлетние исследования в данной природно-климатической зоне.

В 2024–2025 гг. запущены производственные испытания дифференцированного внесения удобрений (основное внесение и две подкормки) под озимую пшеницу по модели ИИ.

Для проведения производственных испытаний первоначально выбрано 25 опытных и 25 контрольных полей АО «Рассвет». Общая площадь составляет 4 250 га, опытных полей – 2 322 га, контрольных – 1 928 га.

Дальнейшее развитие включает улучшение и расширение баз данных для обучения модели, адаптацию технологии для других культур и регионов, создание комплексных систем для управления всеми агротехническими операциями, разработку ПО для широкого внедрения ИИ-решений в сельском хозяйстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Личман Г.И., Батурин В.А., Марченко А.Н. Определение доз при дифференцированном внесении комплексных удобрений. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2012;(3):35–37. <https://elibrary.ru/oxupvv>
2. Беляев В.И., Садов В.В., Смышляев А.А., Кошелева Е.Д. Оценка эффективности точного земледелия при возделывании яровой пшеницы в Алтайском крае в 2022 и 2023 гг. *Дальневосточный аграрный вестник*. 2024;18(2):5–16. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-2-5-16>
3. Абрамов Н.В., Шерстобитов С.В. Формирование зерна яровой пшеницы высокого качества при дифференцированном внесении азотных удобрений. *Земледелие*. 2024;(3):33–39. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2024-3-33-39>
4. Альберт М.А., Галеев Р.Р., Ковалев Е.А. Совершенствование технологии дифференцированного внесения удобрений в лесостепи Новосибирского Приобья. *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2022;(2):4–10. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-63-2-4-10>
5. Якушев В.П., Якушев В.В., Блохина С.Ю., Блохин Ю.И., Петрушин А.Ф., Матвеев Д.А. Перспективы использования гиперспектральной информации в задачах управления азотным режимом посевов зерновых культур. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2024;21(3):188–203. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-3-188-203>
6. Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Шевырногов А.П. Дифференцированное внесение удобрений на полях ОПХ «Курагинское» ФИЦ КНЦ СО РАН. Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023) : сб. тр. Всеросс. конф. с междунар. участием (22–25 августа 2023 г., г. Бердск). 2023:221–225. <https://doi.org/10.25743/sdm.2023.39.68.037>
7. Truflyak E.V., Kurchenko N.Yu., Kuryan V.E., Mones D. Comparative Tests of Differentiated Fertilizer Application for Wheat Using Task Cards and Nitrogen Scanner. In: E3S Web of Conferences. 2021;285:01016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128501016>
8. Труфляк Е.В., Скубиев С. И., Цыбулевский В. В., Малашихин Н. В. Дистанционный мониторинг посевов риса и алгоритм выявления неоднородностей. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019;16(3):110–124. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-110-124>
9. Truflyak E.V., Dadou Mones M.Y., Truflyak I.S. Comparative Experiment on the Use of Unmanned and Ground-Based Technologie of Fertilizer and Crop Protection Products on Winter Barley. In: E3S Web of Conferences. 2023;398:01024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339801024>

10. Sajindra H., Abekoon T., Jayakody J.A.D.C.A., Rathnayake U. A Novel Deep Learning Model to Predict the Soil Nutrient Levels (N, P, and K) in Cabbage Cultivation. *Smart Agricultural Technology*. 2024;7:100395. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100395>
11. Singh S., Singh R., Singh K., Katoch K., Zaeen A.A., Birhan D.A., et al. Smart Fertilizer Technologies: An Environmental Impact Assessment for Sustainable Agriculture. *Smart Agricultural Technology*. 2024;8:100504. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100504>
12. Khose S.B., Mailapalli D.R. Spatial Mapping of Soil Moisture Content Using Very-High Resolution UAV-Based Multispectral Image Analytics. *Smart Agricultural Technology*. 2024;8:100467. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100467>
13. Zhang C., Yi Y., Wang L., Chen S., Li P., Zhang S., et al. Efficient Physics-Informed Transfer Learning to Quantify Biochemical Traits of Winter Wheat from UAV Multispectral Imagery. *Smart Agricultural Technology*. 2024;9:100581. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100581>
14. Papadopoulos G., Mavroeidis A., Roussis I., Kakabouki I., Stavropoulos P., Bilalis D. Evaluation of Tillage & Fertilization in Carthamus Tinctorius L. Using Remote Sensing. *Smart Agricultural Technology*. 2023;4:100158. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100158>
15. Jiang X., Sun S., Adamchuk V., Weisman G., Ramsay P., Rincon A.R. Spinach Yield Mapping Using Multispectral UAV Imagery. *Smart Agricultural Technology*. 2024;7:100389. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100389>
16. Cavalaris C., Karamoutis C., Markinos A. Efficacy of Cotton Harvest Aids Applications with Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and Ground-Based Field Sprayers – A Case Study Comparison. *Smart Agricultural Technology*. 2024;2:100047. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100047>
17. Lago P.D., Vavlas N., Kooistra L., De Deyn G.B. Estimation of Nitrogen Uptake, Biomass, and Nitrogen Concentration, in Cover Crop Monocultures and Mixtures from Optical UAV Images. *Smart Agricultural Technology*. 2024;9:100608. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100608>
18. Труфляк Е.В., Курченко Н.Ю. Оценка готовности регионов к внедрению цифровых технологий в сельское хозяйство. *Вестник Самарского государственного экономического университета*. 2019;(10):22–26. <https://elibrary.ru/zoatgg>

Об авторах:

Труфляк Евгений Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации и технического сервиса Кубанского государственного аграрного университета (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4914-0309>, Researcher ID: D-1301-2018, Scopus ID: 57188716454, trufljak@mail.ru

Рагозин Леонид Викторович, вице-президент группы компаний «Прогресс Агро» (352330, Российская Федерация, г. Усть-Лабинск, ул. Мира, д. 77), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7547-7895>, PorovaEP@aoorassvet.com

Вклад авторов:

Е. В. Труфляк – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Л. В. Рагозин – административное управление планированием и проведением исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 07.02.2025; поступила после рецензирования 29.04.2025;
принята к публикации 15.05.2025

REFERENCES

1. Lichman G.I., Baturin V.A., Marchenko A.N. [Determination of Doses at Differentiated Application of Complex Fertilizers]. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2012;(3):35–37. (In Russ.) <https://elibrary.ru/oxupvv>
2. Belyaev V.I., Sadov V.V., Smyshlyaev A.A., Kosheleva E.D. Evaluation of Effectiveness of Precision Farming in Spring wheat Cultivation in Altai Krai in 2022 and 2023. *Dal'nevostochnyy Agrarnyy Vestnik*. 2024;18(2):5–16. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-2-5-16>
3. Abramov N.V., Sherstobitov S.V. Formation of High-Quality Spring Wheat Grain with Differentiated Application of Nitrogen Fertilizers. *Zemledeliye*. 2024;(3):33–39. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2024-3-33-39>
4. Albert M.A., Galeev R.R., Kovalev E.A. Improvement of Differentiated Fertilizer Application Technology in the Forest-Steppe of Novosibirsk Pribye. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2022;(2):4–10. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-63-2-4-10>
5. Yakushev V.P., Yakushev V.V., Blokhina S.Yu., Blokhin Yu.I., Petrushin A.F., Matveenkov D.A. Benefits of Hyperspectral Information for Nitrogen Management in Grain Crop Production. *Sovremennyye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2024;21(3):188–203. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-3-188-203>
6. Botvich I.Yu., Emelyanov D.V., Shevyrnogov A.P. Variable Rate Fertilization on the Fields of the EPF Kuraginskoe FRC KSC SB RAS. In: *Spatial Data Processing in the Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes (SDM-2023) : Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation (2023 August 22–25, Berdsk)*. 2023:221–225. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25743/sdm.2023.39.68.037>
7. Truflyak E.V., Kurchenko N.Yu., Kuryan V.E., Mones D. Comparative Tests of Differentiated Fertilizer Application for Wheat Using Task Cards and Nitrogen Scanner. In: *E3S Web of Conferences*. 2021;285:01016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128501016>
8. Truflyak E.V., Skubiev S.I., Tsybulevsky V.V., Malashikhin N. V. Rice Crops Remote Monitoring and Heterogeneities Detection Algorithm. *Sovremennyye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2019;16(3):110–124. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-110-124>
9. Truflyak E.V., Dadou Mones M.Y., Truflyak I.S. Comparative Experiment on the Use of Unmanned and Ground-Based Technologie of Fertilizer and Crop Protection Products on Winter Barley. In: *E3S Web of Conferences*. 2023;398:01024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339801024>
10. Sajindra H., Abekoon T., Jayakody J.A.D.C.A., Rathnayake U. A Novel Deep Learning Model to Predict the Soil Nutrient Levels (N, P, and K) in Cabbage Cultivation. *Smart Agricultural Technology*. 2024;7:100395. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100395>
11. Singh S., Singh R., Singh K., Katoch K., Zaeen A.A., Birhan D.A., et al. Smart Fertilizer Technologies: An Environmental Impact Assessment for Sustainable Agriculture. *Smart Agricultural Technology*. 2024;8:100504. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100504>
12. Khose S.B., Mailapalli D.R. Spatial Mapping of Soil Moisture Content Using Very-High Resolution UAV-Based Multispectral Image Analytics. *Smart Agricultural Technology*. 2024;8:100467. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100467>
13. Zhang C., Yi Y., Wang L., Chen S., Li P., Zhang S., et al. Efficient Physics-Informed Transfer Learning to Quantify Biochemical Traits of Winter Wheat from UAV Multispectral Imagery. *Smart Agricultural Technology*. 2024;9:100581. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100581>
14. Papadopoulos G., Mavroeidis A., Roussis I., Kakabouki I., Stavropoulos P., Bilalis D. Evaluation of Tillage & Fertilization in Carthamus Tinctorius L. Using Remote Sensing. *Smart Agricultural Technology*. 2023;4:100158. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100158>

15. Jiang X., Sun S., Adamchuk V., Weisman G., Ramsay P., Rincon A.R. Spinach Yield Mapping Using Multispectral UAV Imagery. *Smart Agricultural Technology*. 2024;7:100389. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100389>
16. Cavalari C., Karamoutis C., Markinos A. Efficacy of Cotton Harvest Aids Applications with Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and Ground-Based Field Sprayers – A Case Study Comparison. *Smart Agricultural Technology*. 2024;2:100047. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100047>
17. Lago P.D., Vavlas N., Kooistra L., De Deyn G.B. Estimation of Nitrogen Uptake, Biomass, and Nitrogen Concentration, in Cover Crop Monocultures and Mixtures from Optical UAV Images. *Smart Agricultural Technology*. 2024;9:100608. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100608>
18. Truflyak E.V., Kurchenko N.Yu. Assessment of Regions Readiness to Implement Digital Technologies in Agriculture. *Vestnik of Samara State University of Economics*. 2019;(10):22–26. <https://elibrary.ru/zoatgg>

About the authors:

Evgeny V. Truflyak, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Operation and Technical Service, Kuban State Agrarian University (13 Kalinina St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4914-0309>, Researcher ID: D-1301-2018, Scopus ID: 57188716454, trufliak@mail.ru

Leonid V. Ragozin, Vice-President of Group of Companies “Progress Agro” (77 Mira St., Ust-Labinsk 352330, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7547-7895>, PopovaEP@aorassvet.com

Contribution of the authors:

E. V. Truflyak – oversight and leadership responsibility for the study activity planning and conducting, including mentorship external to the core team; conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualization/data presentation.

L. V. Ragozin – management and coordination responsibility for the study activity planning and conducting.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 07.02.2025; revised 29.04.2025; accepted 15.05.2025