

## Перспективы использования гиперспектральной информации в задачах управления азотным режимом посевов зерновых культур

В. П. Якушев, В. В. Якушев, С. Ю. Блохина, Ю. И. Блохин,  
А. Ф. Петрушин, Д. А. Матвеевко

*Агрофизический научно-исследовательский институт  
Санкт-Петербург, 195220, Россия*

*E-mail: vyakushev@agrophys.ru, sblokhina@agrophys.ru*

Повышение устойчивости производства зерновых культур в значительной степени зависит от эффективного использования азотных удобрений. Точное земледелие (ТЗ), как жизнеспособное и масштабируемое решение для управления азотным режимом растений за счёт внесения оптимального количества удобрений на тех участках посева, в которых сложился дефицит азотного питания, способствует не только повышению урожайности, но и снижению потерь азота. Среди агрономических практик, в которых концепция ТЗ применяется в исследовательских и производственных целях, ключевую роль играет дифференцированное внесение азотных удобрений. Однако данная технология до сих пор не получила широкого распространения, поскольку для её реализации требуется детальная оценка внутривидовой изменчивости факторов урожайности и взаимосвязи этой изменчивости с условиями роста сельскохозяйственных культур. Гиперспектральное дистанционное зондирование открывает новые возможности для оперативной и более точной количественной оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур в основные фазы развития. Разработан алгоритм управления азотным режимом по данным гиперспектрального зондирования с выявлением участков посева, в которых сложился дефицит азотного питания. Цифровые изображения посевов яровой пшеницы получали с помощью гиперспектральной камеры Pika-L (Resoson, США), установленной на беспилотном воздушном судне Matrice 600 Pro (DJI, Китай), по снимкам вычисляли вегетационные индексы. Оценивали динамику изменений вычисленных индексов по фазам развития, сравнивая их с показателями, полученными в оптимальных и стрессовых условиях, и проводили функциональный анализ параметров, описывающих пространственную структуру варьируемых оптических характеристик посева. Для выполнения технологической операции по внесению азотных удобрений определяли зоны посева, испытывающие стресс по азоту, рассчитывали необходимые дозы, после чего формировали электронные карты-задания для роботизированной техники с указанием точного места внесения. При этом существенно уменьшены затраты ресурсов и времени на наземные полевые измерения и закладку тестовых площадок с перспективой отказа от их размещения на производственных полях.

**Ключевые слова:** точное земледелие, гиперспектральное зондирование, дефицит азота, дифференцированное внесение, азотные удобрения, вегетационные индексы, вариограммный анализ

Одобрена к печати: 29.05.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-188-203

Проблемы обеспечения продовольственной безопасности в мире обусловлены целым рядом антропогенных факторов, таких как истощение почвенного плодородия, сокращение площади пахотных и орошаемых земель, загрязнение агрохимикатами окружающей среды, особенно в районах интенсивного земледелия, а также изменения климата, которые усиливают непредсказуемые биотические и абиотические стрессы (Анищенко, Шутьков, 2021; Calicioglu et al., 2019; Mishra et al., 2023). Необходимость повышения урожайности и увеличения объёмов сельскохозяйственной продукции, в первую очередь зерновых, приводит к чрезмерному внесению удобрений, особенно азотных, несмотря на неблагоприятные экологические последствия (Завалин, Соколов, 2019; Мерзлая и др., 2019; Good, Beatty, 2011; van Grinsven et al., 2015). Важен и экономический аспект проблемы: внесение азотных удобрений при возделывании

вании, например, пшеницы составляет до 30 % общей стоимости производства, но 50–75 % азота, внесённого в начале вегетационного периода с удобрениями, не используется растениями, так как он мигрирует вглубь почвенного профиля, становясь малодоступным (Шарков и др., 2021; Baresel et al., 2008; Hirel et al., 2011; Sahoo et al., 2024).

Получение высокой урожайности с эффективным использованием питательных элементов удобрений представляется одной из основных агрономических, экономических и экологических целей в растениеводстве (Mălinaş et al., 2022). Для большинства сельскохозяйственных культур азот является ключевым элементом, необходимым для роста растений, и одним из наиболее важных питательных веществ, влияющих на урожайность во всех агроэкологических регионах мира (Guo et al., 2019). Оперативное и точное определение потребности растений в азоте имеет большое значение для диагностики роста и своевременного внесения необходимого количества азотных удобрений с целью получения стабильных урожаев, а также минимизации неблагоприятных экологических последствий (Chlingaryan et al., 2018; Mittermayer et al., 2024; Yang et al., 2019).

Точное земледелие (ТЗ) — это стратегия повышения устойчивости сельскохозяйственного производства за счёт эффективного управления сельскохозяйственными ресурсами (такими как вода, удобрения, гербициды, семена и топливо) с целью получения необходимых объёмов сельскохозяйственной продукции высокого качества; оно рассматривается как наиболее оптимальный подход для смягчения воздействия систем земледелия на окружающую среду (Якушев и др., 2021a; Basso, Antle, 2020). Эффективность использования ресурсов достигается за счёт дифференцированного технологического воздействия на систему «посев — среда обитания» с учётом внутривидовой неоднородности и степени интенсивности пространственного распределения по сельскохозяйственному полю показателей, определяющих условия роста и развития сельскохозяйственных культур (Якушев и др., 2023). Среди технологий ТЗ наибольшее внимание уделяется дифференцированному внесению азотных удобрений с целью сокращения их количества без потери урожайности (Argento et al., 2021; Basso et al., 2019; Stamatiadis et al., 2018; Walter et al., 2017; Wang et al., 2020) и возможности повышения содержания белка (Ma et al., 2022). Предполагается, что участки с более высокой пространственной неоднородностью имеют больший потенциал эффективного управления с учётом специфики участка и определения степени неоднородности по данным дистанционного зондирования с высоким пространственным разрешением (Basso et al., 2016; Pannell et al., 2019).

Для обнаружения и определения границ внутривидовой изменчивости по заданному параметру (параметрам) необходим постоянный мониторинг и оценка состояния посевов в основные фазы развития (Якушев, Якушев, 2018; Lu et al., 2020; Nutini et al., 2018).

В настоящее время внедрение технологий гиперспектрального зондирования в ТЗ открывает новые возможности для количественной оценки азотного статуса растений в режиме почти реального времени благодаря информативности узких спектральных полос в непрерывном диапазоне электромагнитного спектра (Blekanov et al., 2023; Guo et al., 2021; Ma et al., 2022) и точного управления азотным режимом на большой территории (Al Makdessi et al., 2019). Вегетационные индексы (ВИ), полученные на основе нескольких спектральных диапазонов, широко используются при разработке моделей мониторинга содержания азота для различных культур (Basyouni et al., 2015; Jiang et al., 2019; Xu et al., 2023). Данная технология применяется в качестве основного источника информации (Spati et al., 2021) для разработки алгоритмов дифференцированного внесения азотных удобрений на основе данных дистанционного зондирования (ДДЗ). Многие исследователи пытались получить биофизические и биохимические параметры сельскохозяйственных культур, используя ВИ, полученные на основе полевых спектральных измерений (Шпанев, Смур, 2022; Dehghan-Shoag et al., 2023), спутниковых данных (Jamali et al., 2023) и данных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (Buthelezi et al., 2023).

В настоящее время доступ к спутниковой гиперспектральной информации для производителей сельскохозяйственной продукции в России ограничен. Альтернативой спутниковым гиперспектральным изображениям могут стать снимки, получаемые с БПЛА, оснащённых гиперспектральной аппаратурой, которые обладают большим потенциалом для

определения обеспеченности растений азотом и, следовательно, оценки азотного стресса (Jiang et al., 2023; Pancorbo et al., 2023). Гиперспектральные датчики, регистрирующие данные квазинепрерывного спектра, более чувствительны к изменениям физиологического состояния растений, чем широкополосные мультиспектральные датчики, и предоставляют больше полезной информации для мониторинга посевов сельскохозяйственных культур (Li et al., 2021). Гиперспектральные данные могут быть использованы для дифференцированного внесения оптимального количества азотных удобрений на тех участках посева, в которых сложился дефицит азотного питания, что способствует не только повышению урожайности, но и снижению потерь азота. Однако необходимы дополнительные исследования для оценки биохимических характеристик посевов с целью прогнозирования урожайности и качества зерна (Raya-Sereno et al., 2021; Sahoo et al., 2023).

Цель работы — продемонстрировать потенциал использования гиперспектральной информации в части научного обоснования целесообразности дифференцированного применения азотных удобрений при возделывании зерновых культур в полевых условиях и в опытном деле. В настоящее время в планировании схемы эксперимента и последующем контроле продукционного процесса в опытах по ТЗ на основе ДДЗ активно используются тестовые площадки как своеобразные эталоны для выявления различных закономерностей между оптическими характеристиками посевов, изучаемым диапазоном изменений управляемых факторов урожайности и продуктивностью на сельскохозяйственном поле. Выполнение сопряжённых дистанционных и наземных измерений на тестовых площадках требует значительных затрат и ресурсов (от размещения на опытных полях до инструментального мониторинга в течение всего вегетационного периода). Поэтому поиск научно-обоснованных подходов сокращения трудоёмких полевых измерений становится актуальной и решаемой задачей для обоснования и масштабирования систем ТЗ.

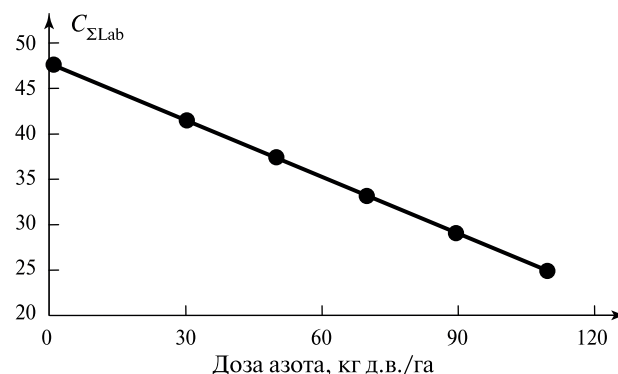
### Объекты, методы и научно-технологическая инфраструктура исследований

Объекты исследования — опытные поля Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ) (Ленинградская обл., Гатчинский р-н). Площадь земельных угодий составляет 538 га, из них сельскохозяйственные угодья — 445 га, пашня — 278 га. Климат характеризуется умеренно тёплым летом и продолжительной зимой с оттепелями. Весна и осень имеют затяжной характер. Средняя продолжительность вегетационного периода — 117 дней. Безморозный период составляет в среднем 120 дней. Среднегодовое количество осадков — 604 мм. Основными сельскохозяйственными культурами являются озимые и яровые зерновые, картофель и многолетние травы.

Для изучения преимуществ дифференцированного внесения агрохимических средств по технологии ТЗ, включая детальную оценку внутривидовой изменчивости факторов урожайности и разработку удобного алгоритма для применения данной технологии в производственных условиях, в АФИ проводятся многолетние комплексные исследования по использованию ТЗ. На начальном этапе изучалось влияние различных по интенсивности агротехнологий на продукционный процесс на фоне естественной неоднородности полей севооборотов с использованием тестовых площадок. Полученные результаты показали эффективность дифференцированного применения азотных удобрений в течение вегетационного периода для повышения урожайности и окупаемости удобрений (Матвеевко и др., 2019). Снимки посевов в видимой и инфракрасной областях спектра получали с БПЛА, на которых размещалась цифровая фотоаппаратура. На каждом снимке отображались тестовые участки с известной дозой внесённых азотных удобрений, что позволило вычислять средние значения колориметрических характеристик посева и, сравнивая их с остальными зонами сельскохозяйственного поля, определять потребности растений в азоте. На *рис. 1* (см. с. 191) приведена калибровочная кривая, характеризующая связь между дозой азота и значением обобщённой характеристики цвета  $C_{\Sigma Lab}$ , полученной по снимку посева (Yakushev, Kanash, 2016).

Рис. 1. Зависимость между цветом растительного покрова на тестовых площадках  $C_{\Sigma Lab}$  и дозой азотных удобрений (для данной кривой  $\alpha = 0,6, \beta_1 = 0,05, \beta_2 = 0,35$ )

Величина  $C_{\Sigma Lab}$  вычислялась по формуле:  $C_{\Sigma Lab} = \alpha L + \beta_1 a + \beta_2 b$ , где  $L$  — светлота;  $a$  — величина красной/зелёной составляющей;  $b$  — жёлтой/синей составляющей трёхмерной модели цветового пространства CIE (*фр.* Commission Internationale de l'Éclairage);  $\alpha, \beta_1, \beta_2$  — эмпирически подбираемые коэффициенты для каждого цифрового изображения посева,  $\alpha \geq 0, \beta_1 \geq 0, \beta_2 \geq 0$ , причём  $\alpha + \beta_1 + \beta_2 = 1$ . Важно отметить, что основным критерием подбора коэффициентов  $\alpha, \beta_1, \beta_2$  является обеспечение максимально выраженной линейной связи между дозой азота и значением  $C_{\Sigma Lab}$ . Выявленную зависимость рассмотрим в разд. «Результаты и обсуждение».



Дальнейшие исследования были направлены на создание простого и понятного механизма формирования нормативной базы применения агрохимических средств в рамках проведения прецизионных опытов в производственных посевах с характерной для местных условий вариабельностью параметров плодородия. Методика проведения полевых экспериментов детально разработана в АФИ и успешно применяется на опытном полигоне. Закладка и сопровождение опытов, требующих реализации многофакторной или полнофакторной схемы, до сих пор остаётся трудоёмкой и ресурсозатратной задачей, что существенно ограничивает объёмы исследований и получение соответствующих результатов. Технические средства ТЗ позволили усовершенствовать планирование и проведение прецизионных полевых опытов, включая полную факториальную схему, для совершенствования нормативной базы применения агрохимических средств. Реализация в полевых условиях полной факториальной схемы представляется наиболее грамотным решением оптимизационной задачи — выбора оптимальных доз удобрений в конкретных почвенно-климатических условиях.

В рамках проведения прецизионных опытов с тестовыми площадками оптимальные дозы азотных, фосфорных и калийных удобрений определяли по ДДЗ. Однако внесение оптимальных доз в полном объёме в начале вегетационного периода не всегда эффективно, но допустимо для калийных и фосфорных удобрений, и всегда не эффективно для азотных. Для достижения эффективности применения азотных удобрений их необходимо вносить дробно, по мере наступления дефицита, в определённой фазе вегетации. Именно такой подход управления азотным режимом реализован с помощью регулярного дистанционного мониторинга полей с размещёнными на них тестовыми площадками, на которых вносятся азотные удобрения в диапазоне от нуля до максимального уровня обеспеченности. Для выявления внутриполевой неоднородности и границ её интенсивности по ДДЗ разработаны методы и соответствующий инструментарий для управления азотным режимом на сельскохозяйственном поле. Для перехода на качественно новый уровень с существенным сокращением затрат времени и ресурсов (закладка тестовых площадок, проведение наземных измерений) необходимо разработать эффективный научно-обоснованный подход обнаружения дефицита азота, границ его пространственного распределения на поле с созданием карты-задания для дифференцированного внесения. Без решения данной задачи растениеводческая отрасль агропромышленного комплекса будет развиваться лишь по догоняющей модели.

## Результаты и обсуждение

На рис. 2 (см. с. 192) представлена блок-схема алгоритма, обеспечивающего решение задачи обнаружения границ участков с дефицитом азота, сложившегося на сельскохозяйственном поле, и формирование электронной карты-задания для выполнения роботизированным

агрегатом технологической операции «азотная подкормка» с целью устранения возникшего стресса по азоту в определённую фазу развития растений. Электронная карта-задание содержит необходимую информацию по дозам удобрений с указанием точного местоположения их внесения на поле в зависимости от степени интенсивности внутриполевой неоднородности по азоту. Внутриполевая неоднородность и её интенсивность определяются на основе системной оценки динамики изменения оптических критериев и функционального анализа параметров нормированных моделей экспериментальных вариограмм, описывающих пространственную структуру варьируемых показателей на сельскохозяйственном поле (Митрофанова и др., 2023; Якушев и др., 2020а). При этом к минимуму сводятся затраты ресурсов и времени на закладку тестовых площадок и наземных измерений. Тестовые площадки закладываются автоматически и используются для верификации значений оптических критериев на начальной стадии исследований. По мере накопления соответствующих статистических данных для конкретных почвенно-климатических условий и применения нейросетевых технологий интеллектуального анализа с целью выявления закономерностей изменения диапазона значений оптических критериев можно ожидать, что тестовые площадки не потребуются.

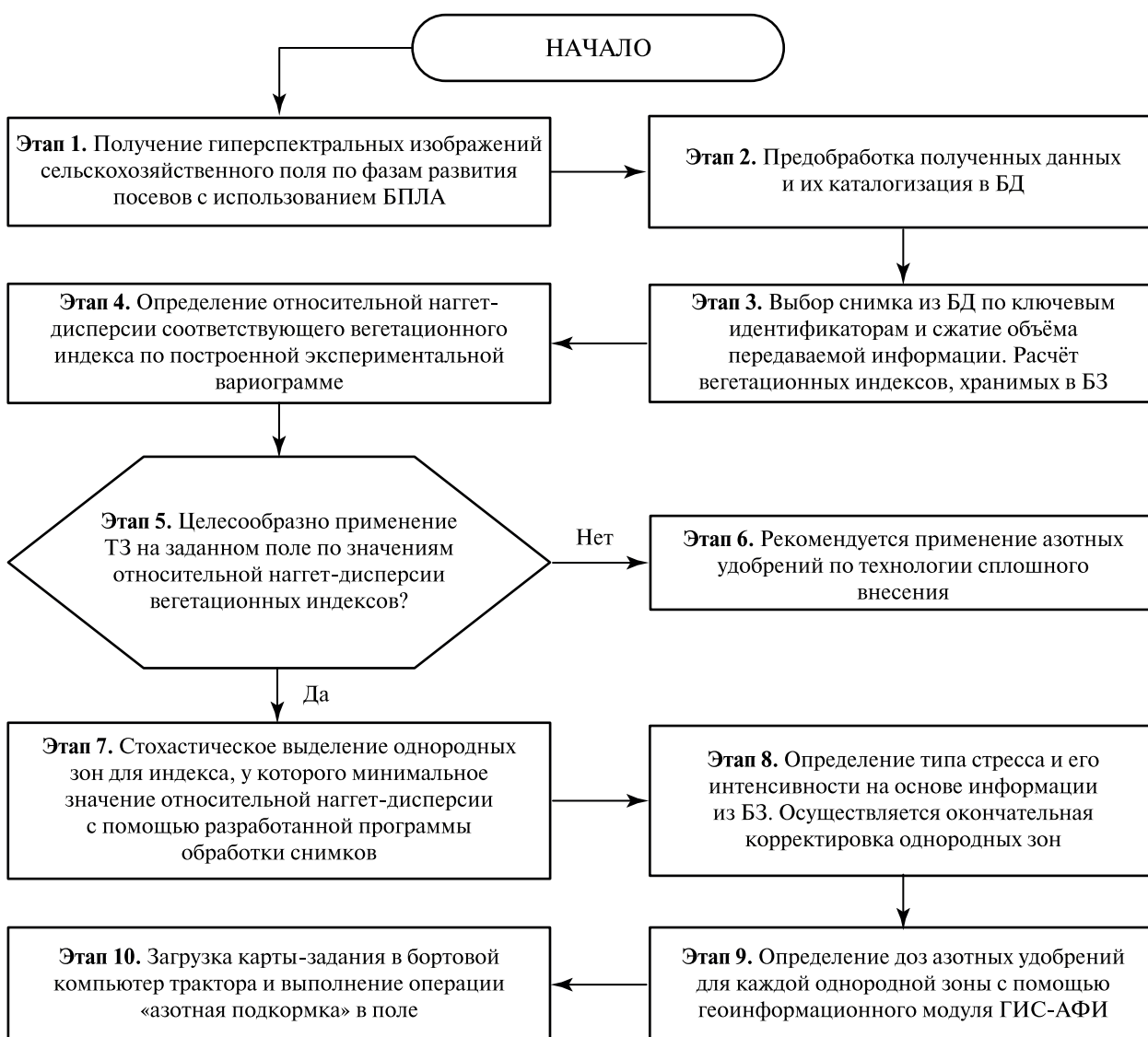


Рис. 2. Блок-схема алгоритма по планированию и реализации технологической операции «азотная подкормка»

Рассмотрим поэтапную последовательность реализации алгоритма.

Цифровые изображения (этап 1) в диапазоне от 400 до 1000 нм получали с помощью гиперспектральной камеры Pika-L (Resoson, США), установленной на БПЛА. Гиперспектральная информация формируется в виде гиперкубов, где каждый пиксель представляет определённую область электромагнитного спектра (спектральный канал). Опытным путём было установлено, что сканирование лучше осуществлять с высоты 50 м и скоростью полёта 4 м/с, для получения пространственного разрешения пикселя  $1,7 \times 1,6$  см. Для повышения качества съёмки камера интегрирована с приёмником глобальной системы позиционирования GPS (*англ.* Global Positioning System) и инерциальной системой IMU (*англ.* Inertial Measurement Unit) для формирования информации о координатах сканирования в режиме реального времени, что способствует более успешной калибровке получаемых данных и географическому выравниванию.

Первичная обработка полученных гиперспектральных данных (этап 2) включает радиометрическую и геометрическую коррекцию в программе SpectronPro (версия 3.4.5, Resoson). При условии выполнения съёмки на высоте 50 м атмосферная коррекция не требуется. Для радиометрической коррекции набор данных яркости отдельных линий сканирования был обработан с использованием эталонного белого цвета, сгенерированного с использованием данных об отражательной способности пикселей калибровочного брезента, размещённого на поле во время полёта. Площадь брезентового полотна ( $4 \text{ м}^2$ ) разделена на две равные части с разными значениями отражения (12 и 24 %), характеристики которых были измерены спектрометром в лабораторных условиях. Для ортотрансформации использовалась цифровая модель поверхности, полученная в программном продукте Agisoft Metashape обработкой результатов аэрофотосъёмки в видимом диапазоне с БПЛА Геоскан-401. Кубы георектифицированных гиперспектральных данных были сшиты вместе и проверены наложением на изображения ГИС Спутник-Агро. Обработанные снимки размещались в базе данных с ключевыми идентификаторами: дата съёмки; адрес поля; возделываемая культура, сорт, фаза развития.

На третьем этапе происходит вычисление значений оптических критериев по формулам расчёта ВИ для последующего анализа. Вычисления проводятся с помощью специализированного модуля, разработанного для выделения внутривидовой неоднородности по аэрокосмическим снимкам и оптическим критериям, включающего проблемно-ориентированную базу знаний (БЗ) и геопространственную базу разнородных данных (БД) (Петрушин и др., 2023). В БЗ хранятся формулы расчёта различных ВИ (без ограничений) и диапазоны их изменения в оптимальных и стрессовых условиях. В БД хранятся гиперспектральные снимки и информация наземных измерений для верификации значений оптических критериев, а также накапливаются и сохраняются вычисленные значения индексов, характеризующих физиологическое и биохимическое состояние посевов. Диапазоны изменений ВИ в оптимальных и стрессовых по азоту и водному режиму условиях впервые применены при разработке базового алгоритма (Якушев и др., 2019). Выбор ВИ для последующей интерпретации ДДЗ проводили в регулируемых условиях выращивания растений, в результате были выявлены следующие вегетационные индексы: ChlRI (*англ.* chlorophyll index, индекс хлорофилла), SIPI (*англ.* Structural Independent Pigment Index, отношение каротиноидов к хлорофиллу),  $R_{800}$  — мера рассеяния света листом), PRI (*англ.* photochemical index, фотохимический индекс), FRI (*англ.* flavonoids index, содержание флавоноидов), ARI (*англ.* Anthocyanin Reflectance Index, содержание антоцианов), WRI (*англ.* Water Ratio Index, содержание воды). Системная оценка динамики изменения перечисленных индексов позволяет оценить активность фотосинтеза, а также выявить на сельскохозяйственном поле участки, на которых возник дефицит азотного питания и (или) воды. Также было показано, что данные гиперспектральной съёмки обеспечивают расчёт динамики изменения вышеуказанных индексов по фазам развития посева с высокой степенью точности. Результаты полевых исследований подтвердили зависимость дистанционно измеренных значений выбранных индексов от дозы внесённых азотных удобрений по фазам развития яровой пшеницы (*рис. 3, 4*, см. с. 194) (Якушев и др., 2022).

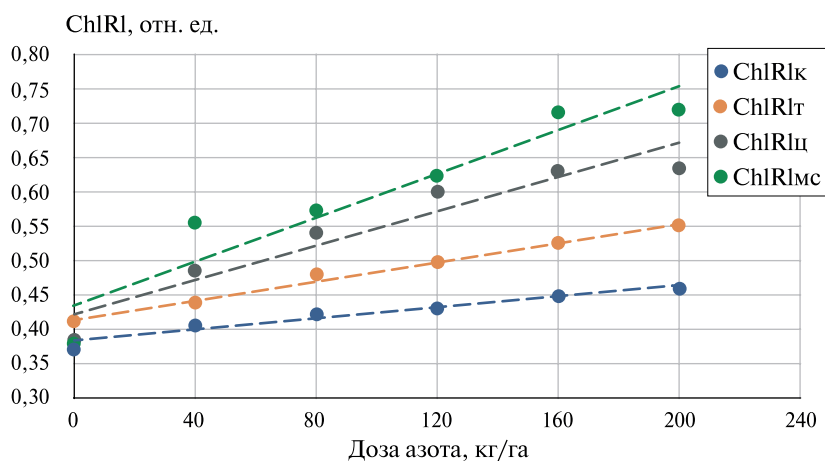


Рис. 3. Индекс отражения хлорофилла (ChlRI) листьев пшеницы в зависимости от дозы внесённых азотных удобрений. Приведены значения ChlRI, полученные на стадиях кушения (ChlRIк), выхода в трубку (ChlRIт), цветения (ChlRIц) и молочной спелости (ChlRIмс)

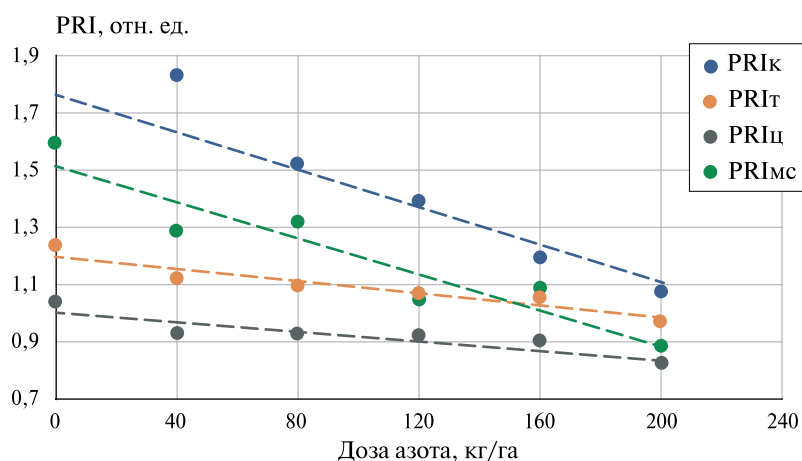


Рис. 4. Фотохимический индекс отражения (PRI) листьев пшеницы в зависимости от дозы внесённых азотных удобрений. Приведены значения PRI, полученные на стадиях кушения (PRIк), выхода в трубку (PRIт), цветения (PRIц) и молочной спелости (PRIмс)

На третьем этапе также осуществляется корректировка объёма входной информации. Объём входной растровой информации по каждому снимку можно уменьшить минимум в 200 раз. В работе (Якушев и др., 2021б) показано, что, если имеются снимки с разрешением меньше 7 см/пиксель (гиперсъёмка на полигоне АФИ — около 3 см/пиксель), то оптимально учитывать только 0,5 % от общего числа пикселей с равномерным распределением точек на снимке. Такая возможность обеспечивает решение проблемы избыточности входной информации, сокращает время выполнения расчётов и повышает эффективность вычислений без снижения качества проводимого анализа на результат.

На четвёртом этапе происходит функциональное описание пространственной структуры варьирующих показателей каждого ВИ на сельскохозяйственном поле с использованием вариограммного анализа. Выполнены геостатистические исследования распределения значений ВИ по полю с целью дальнейшего определения целесообразности применения ТЗ на исследуемой территории. Сначала для каждого ВИ строится экспериментальная вариограмма по растровой информации, предварительно каждый пиксель исходного гиперснимка замещён вычисленным значением данного индекса. Затем эмпирическая вариограмма аппроксимируется теоретической моделью.

На *рис. 5* в качестве примера приведён общий вид сферической нормированной вариограммы. По величине  $\xi$  — относительной наггет-дисперсии, рассчитанной по значениям изучаемого ВИ (Митрофанова и др., 2023) — определяется целесообразность применения технологии ТЗ на заданном сельскохозяйственном поле. Чем меньше данная величина, тем выше внутривариограммная неоднородность, а следовательно, возрастает роль дифференциации норм применения азотных удобрений на заданном сельскохозяйственном поле.

На этапе 5 проводится сравнение значений относительных наггет-дисперсий и определяется целесообразность применения технологии ТЗ на изучаемой сельскохозяйственной территории. Если выполняется условие  $\xi \leq 0,25$  хотя бы для одного из индексов ChlRI, PRI, FRI, NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index, нормализованный разностный водный индекс), то целесообразность применения ТЗ высокая и осуществляется переход на этап 7, в противном случае — на этап 6.

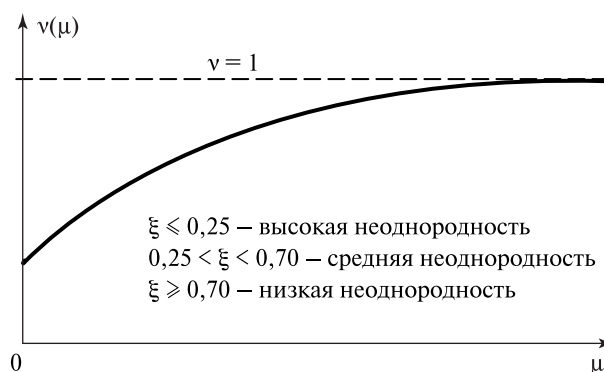
На этапе 6 при условии, что значения относительной наггет-дисперсии  $\xi > 0,25$  и степень внутривариограммной неоднородности невысокая, рекомендуется применять технологию сплошного внесения. Вместе с тем, если  $0,25 < \xi < 0,50$ , то дифференцированное внесение азотных удобрений может быть экономически обоснованным. Необходимо более детально проанализировать распределение значений ВИ, а также оценить возможную прибавку урожайности.

На этапе 7 осуществляется стохастическое выделение однородных зон по распределению значений ВИ с минимальной относительной наггет-дисперсией на сельскохозяйственном поле. Важным преимуществом данного подхода является отсутствие каких-либо априорных предположений о числе однородных зон и их локализации на поле. Вводится только естественная верхняя граница числа однородных зон, которая предполагает, что в процессе кластеризации всё поле можно разделить на пять кластеров (пять зон однородности). В действительности на заданном сельскохозяйственном поле количество однородных зон может быть меньше пяти, а иногда поле в целом может представлять собой однородную зону. Решение задачи кластеризации основано на разделении смеси вероятностных распределений, в котором отдельные компоненты моделируются нормальными распределениями с различными параметрами. Математическое ожидание соответствует среднему значению ВИ внутри одной зоны однородности, а дисперсия характеризует разброс внутри выделенной зоны однородности.

На этапе 8 проводится выделение однородных зон по типу стресса и его интенсивности. Соответствующее выделение основано на распределении значений оптических критериев из специализированной БЗ. Для этой цели используется снимок распределения значений ВИ по полю на этапе 7. Выбор осуществляется по минимальному значению относительной наггет-дисперсии. На *рис. 6* (см. с. 196) приведён пример выделения зон по типу стресса для индекса ChlRI. Используя полученный результат, а также результат стохастического выделения однородных зон на седьмом этапе, осуществляется окончательная корректировка локализации однородных зон и переход на следующий этап для определения доз азотных удобрений.

На этапе 9 проводится определение доз азотных удобрений по электронной карте с выделенными однородными зонами на сельскохозяйственном поле. С использованием геоинформационного модуля ГИС-АФИ (Якушев и др., 2020б) формируется электронная карта-задание с точным указанием координат внесения рекомендуемых доз азотных удобрений (*рис. 7*, см. с. 196).

На этапе 10 электронная карта-задание загружается в бортовой компьютер агрегата (*рис. 8*, см. с. 196), и операция «азотная подкормка» реализуется на поле.



*Рис. 5.* Общий вид нормированной вариограммы



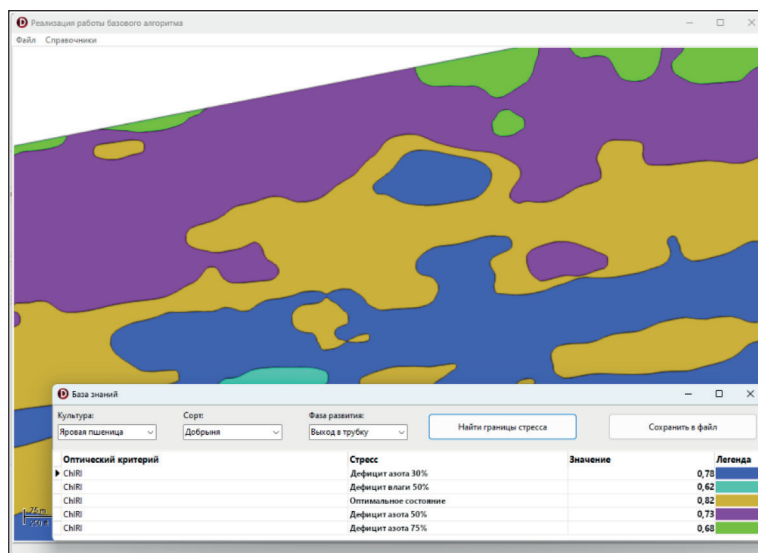


Рис. 6. Выделение однородных зон по индексу ChIRI по типу стресса и интенсивности на опытном поле с посевом яровой пшеницы сорта «Добрыня» в фазу выхода в трубку (съёмка 2023 г.)

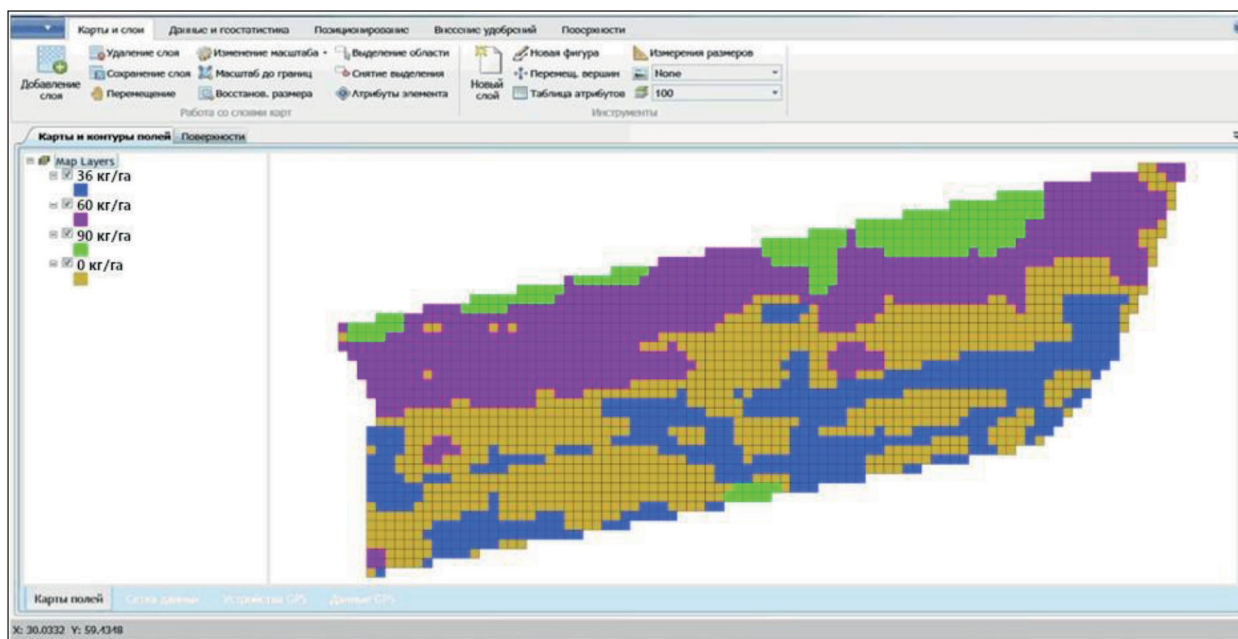


Рис. 7. Карта-задание на внесение азотных удобрений



Рис. 8. Азотная подкормка на основе карты-задания

В разд. «Объекты, методы и научно-технологическая инфраструктура исследований» отмечалось значение выявленной линейной зависимости между рекомендуемыми дозами азотных удобрений и обобщённой оптической характеристикой цвета посева для дальнейших исследований. Такая же зависимость обнаружена между дистанционно измеренными значениями ВИ и дозами азотных удобрений в прецизионных опытах с тестовыми площадками. Результаты исследований подтверждают, что для построения линейной зависимости достаточно двух значений ВИ, и можно предположить, что на полях, где ещё не сформирована БЗ (для опытных полей, где проводилась апробация предложенного алгоритма, она сформирована), достаточно закладывать максимум две площадки на поле: с дозой удобрений, соответствующей 50 % от средней для возделываемой культуры конкретного хозяйства, и с удвоенной дозой, т.е. полной рекомендуемой. При наличии в хозяйстве разбрасывателя для дифференцированного внесения удобрений закладка таких площадок осуществляется практически в автоматическом режиме. В результате для верификации значений ВИ и определения доз азотных удобрений закладываются три площадки на поле (одна из них — площадка, на которой удобрения не вносятся). В перспективе, по мере накопления статистической информации, можно ожидать, что тестовые площадки не потребуются.

## Заключение

Стремление к получению максимальной урожайности зерновых культур с использованием инновационных технологий должно обосновываться не только с позиции экономической эффективности, но и экологической безопасности. При этом острота экологического аспекта проблемы может быть существенно снижена благодаря технологиям дифференцированного внесения минеральных удобрений при возделывании важнейших сельскохозяйственных культур.

Для обоснования целесообразности дифференцированного применения азотных удобрений при возделывании зерновых культур разработан алгоритм управления азотным режимом по данным гиперспектрального зондирования с выявлением участков посевов, в которых сложился дефицит азотного питания. По гиперспектральным снимкам проводились вычисления вегетационных индексов, оценивалась динамика их изменения по фазам развития. По результатам функционального анализа параметров, описывающих пространственную структуру варьируемых оптических характеристик посева, определяли зоны, испытывающие стресс по азоту, и рассчитывали дозы удобрений. При этом существенно сократились затраты ресурсов и времени на наземные полевые измерения и закладку тестовых площадок с перспективой отказа от их размещения на производственных полях.

Интеграция небольшого количества наземных измерений и гиперспектральной информации позволяет получать пространственно распределённые карты обеспеченности растений азотом и выявлять участки посева, в которых сложился дефицит азотного питания, ограниченными усилиями по сравнению с использованием только наземных данных. Таким образом, практику использования гиперспектральной информации в решении актуальной задачи точного земледелия по выявлению границ внутриполевой изменчивости и управлению азотным режимом при возделывании зерновых культур уже сегодня можно отнести к масштабируемому потенциалу развития современного земледелия.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-16-00203 (<https://rscf.ru/project/24-16-00203/>).

## Литература

1. Анищенко А. Н., Шутьков А. А. Проблемы реализации Доктрины продовольственной безопасности России // Продовольственная политика и безопасность. 2021. Т. 8. № 1. С. 9–22. DOI: 10.18334/ppib.8.1.111777.

2. Завалин А. А., Соколов А. О. Коэффициент использования растениями азота удобрений и его регулирование // *Международ. с.-х. журн.* 2019. № 4(370). С. 71–75. DOI: 10.24411/2587-6740-2019-14070.
3. Матвеев Д. А., Якушев В. П., Якушев В. В. Прецизионное управление азотным режимом яровой пшеницы на основе дистанционного зондирования посевов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2019. Т. 16. № 3. С. 79–86. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-79-86.
4. Мерзлая И. В., Понкратенкова И. В., Гаврилова А. Ю. Агроэкологическая оценка длительного применения органических и минеральных удобрений при возделывании яровой пшеницы в агротехнологиях разной интенсивности // *Агрохимия.* 2019. № 9. С. 18–25. DOI: 10.1134/S0002188119090060.
5. Митрофанова О. А., Митрофанов Е. П., Якушев В. П. и др. Блохина С. Ю. Инструментарий для принятия решения о целесообразности применения технологий точного земледелия на основе геостатистического анализа данных дистанционного зондирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2023. Т. 20. № 5. С. 71–84. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-71-84.
6. Петрушин А. Ф., Якушев В. П., Якушев В. П., Блохина С. Ю., Матвеев Д. А., Блохин Ю. И., Митрофанов Е. П., Митрофанова О. А. Программа обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по аэрокосмическим снимкам и оптическим критериям. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023611147. Рег. 17.01.2023.
7. Шарков И. Н., Колбин С. А., Самохвалова Л. М. Проблема азота при использовании чернозёма выщелоченного по интенсивной технологии в лесостепи Западной Сибири // *Агрохимия.* 2021. № 2. С. 3–10. DOI: 10.31857/S0002188121020101.
8. Шпанев А. М., Смур В. В. Изменение спектральных характеристик культурных и сорных растений под влиянием минеральных удобрений в агроценозах Северо-Запада России // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2022. № 3. С. 165–177. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-165-177.
9. Якушев В. П., Якушев В. В. Перспективы «умного сельского хозяйства» в России // *Вестн. Российской акад. наук.* 2018. Т. 88. № 9. С. 773–784. DOI: 10.31857/S086958730001690-7.
10. Якушев В. П., Канаеш Е. В., Якушев В. В. и др. Новые возможности автоматизации процесса обнаружения внутриполевой неоднородности по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2019. Т. 16. № 3. С. 24–32. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32.
11. Якушев В. П., Буре В. М., Митрофанова О. А. и др. (2020а) Оценка внутриполевой изменчивости посевов с помощью вариограммного анализа спутниковых данных для точного земледелия // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2020. Т. 17. № 2. С. 114–122. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-114-122.
12. Якушев В. П., Якушев В. В., Матвеев Д. А. (2020б) Интеллектуальные системы поддержки технологических решений в точном земледелии // *Земледелие.* 2020. № 1. С. 33–37. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10109.
13. Якушев В. П., Якушев В. В., Блохина С. Ю. и др. (2021а) Информационное обеспечение современных систем земледелия в России // *Вестн. Российской акад. наук.* 2021. Т. 91. № 8. С. 755–768. DOI: 10.31857/S0869587321080090.
14. Якушев В. П., Буре В. М., Митрофанова О. А. и др. (2021б) Особенности обработки аэрокосмических снимков для оптимизации геостатистических исследований внутриполевой изменчивости в задачах точного земледелия // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2021. Т. 18. № 4. С. 128–139. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-128-139.
15. Якушев В. П., Канаеш Е. В., Русаков Д. В. и др. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева // *Сельскохозяйственная биология.* 2022. Т. 57. № 1. С. 98–112. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.1.98rus.
16. Якушев В. П., Якушев В. В., Блохина С. Ю. и др. Роль дистанционного зондирования земли в точном земледелии // *Вестн. Российской акад. наук.* 2023. Т. 93. № 10. С. 955–969. DOI: 10.31857/S0869587323100110.
17. Al Makdessi N., Ecarnot M., Roumet P. et al. Spectral correction method for multi-scattering effects in close range hyperspectral imagery of vegetation scenes: application to nitrogen content assessment in wheat // *Precision Agriculture.* 2019. V. 20. No. 2. P. 237–259. DOI: 10.1007/s11119-018-9613-2.
18. Argento F., Anken T., Abt F. et al. Site-specific nitrogen management in winter wheat supported by low-altitude remote sensing and soil data // *Precision Agriculture.* 2021. V. 22. P. 364–386. DOI: 10.1007/s11119-020-09733-3.
19. Baeresel J. P., Zimmermann G., Reents H. J. Effects of genotype and environment on N uptake and N partition in organically grown winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in Germany // *Euphytica.* 2008. V. 163. No. 3. P. 347–354. DOI: 10.1007/s10681-008-9718-1.
20. Basso B., Antle J. Digital agriculture to design sustainable agricultural systems // *Nature Sustainability.* 2020. V. 3(4). P. 254–256. DOI: 10.1038/s41893-020-0510-0.

21. *Basso B., Dumont B., Cammarano D. et al.* Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone // *Science of the Total Environment*. 2016. V. 545–546. P. 227–235. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.104.
22. *Basso B., Shuai G., Zhang J. et al.* Yield stability analysis reveals sources of large-scale nitrogen loss from the US Midwest // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. No. 1. P. 1–9. DOI: 10.1038/s41598-019-42271-1.
23. *Basyouni R., Dunn B. L., Goad C.* Use of nondestructive sensors to assess nitrogen status in potted poinsettia (*Euphorbia pulcherrima* L. (Willd. ex Klotzsch)) production // *Scientia Horticulturae*. 2015. V. 192. P. 47–53. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.05.011.
24. *Blekanov I., Molin A., Zhang D. et al.* Monitoring of grain crops nitrogen status from uav multispectral images coupled with deep learning approaches // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. V. 2012. Article 108047. DOI: 10.1016/j.compag.2023.108047.
25. *Buthelezi S., Mutanga O., Sibanda M. et al.* Assessing the prospects of remote sensing maize leaf area index using UAV-derived multi-spectral data in smallholder farms across the growing season // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. No. 6. Article 1597. DOI: 10.3390/rs15061597.
26. *Calicioglu O., Flammini A., Bracco S. et al.* The future challenges of food and agriculture: an integrated analysis of trends and solutions // *Sustainability*. 2019; V. 11. No. 1. Article 222. DOI: 10.3390/su11010222.
27. *Chlingaryan A., Sukkarieh S., Whelan B.* Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. V. 151. P. 61–69. DOI: 10.1016/j.compag.2018.05.012.
28. *Dehghan-Shoar M. H., Orsi A. A., Pullanagari R. R. et al.* A hybrid model to predict nitrogen concentration in heterogeneous grassland using field spectroscopy // *Remote Sensing of Environment*. 2023. V. 285. Article 113385. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113385.
29. *Good A. G., Beatty P. H.* Fertilizing nature: a tragedy of excess in the commons // *PLoS Biology*. 2011. V. 9. No. 8. Article e1001124. DOI: 10.1371/journal.pbio.1001124.
30. *Guo J., Jia Y., Chen H. et al.* Growth, photosynthesis, and nutrient uptake in wheat are affected by differences in nitrogen levels and forms and potassium supply // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. Article 1248. DOI: 10.1038/s41598-018-37838-3.
31. *Guo J., Zhang J., Xiong S. et al.* Hyperspectral assessment of leaf nitrogen accumulation for winter wheat using different regression modeling // *Precision Agriculture*. 2021. V. 22. P. 1634–1658. DOI: 10.1007/s11119-021-09804-z.
32. *Hirel B., Tetu T., Lea P. J. et al.* Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture // *Sustainability*. 2011. V. 3. No. 9. P. 1452–1485. DOI: 10.3390/su3091452.
33. *Jamali M., Soufizadeh S., Yeganeh B. et al.* Wheat leaf traits monitoring based on machine learning algorithms and high-resolution satellite imagery // *Ecological Informatics*. 2023. V. 74. Article 101967. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2022.101967.
34. *Jiang J., Cai W., Zheng H. et al.* Using digital cameras on an unmanned aerial vehicle to derive optimum color vegetation indices for leaf nitrogen concentration monitoring in winter wheat // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 22. Article 2667. DOI: 10.3390/rs11222667.
35. *Jiang J., Atkinson P. M., Chen C. et al.* Combining UAV and Sentinel-2 satellite multi-spectral images to diagnose crop growth and N status in winter wheat at the county scale // *Field Crops Research*. 2023. V. 294. Article 108860. DOI: 10.1016/j.fcr.2023.108860.
36. *Li F., Li D., Elsayed S. et al.* Using optimized three-band spectral indices to assess canopy N uptake in corn and wheat // *European J. Agronomy*. 2021. V. 127. Article 126286. DOI: 10.1016/j.eja.2021.126286.
37. *Lu B., Dao P. D., Liu J. et al.* Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 16. Article 2659. DOI: 10.3390/rs12162659.
38. *Ma J., Zheng B., He Y.* Applications of a hyperspectral imaging system used to estimate wheat grain protein: a review // *Frontiers in Plant Science*. 2022. V. 13. Article 837200. DOI: 10.3389/fpls.2022.837200.
39. *Mãlinaş A., Vidican R., Rotar I. et al.* Current status and future prospective for nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Plants*. 2022. V. 1. No. 2. Article 217. DOI: 10.3390/plant11020217.
40. *Mishra D., Muduli K., Sevcik L. et al.* Combating of associated issues for sustainable agri-food sectors // *Sustainability*. 2023. V. 15. No. 3. Article 10096. DOI: 10.3390/su151310096.
41. *Mittermayer M., Donauer J., Kimmelmann S. et al.* Effects of different nitrogen fertilization systems on crop yield and nitrogen use efficiency — results of a field experiment in southern Germany // *Heliyon*. 2024. V. 10. No. 7. Article e28065. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e28065.
42. *Nutini F., Confalonieri R., Crema A. et al.* An operational workflow to assess rice nutritional status based on satellite imagery and smartphone apps // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. V. 154. P. 80–92. DOI: 10.1016/j.compag.2018.08.008.
43. *Pancorbo J. L., Alonso-Ayuso M., Camino C. et al.* Airborne hyperspectral and Sentinel imagery to quantify winter wheat traits through ensemble modeling approaches // *Precision Agriculture*. 2023. V. 24. P. 1288–1311. DOI: 10.1007/s11119-023-09990-y.

44. Pannell D. J., Gandorfer M., Weersink A. How flat is flat? Measuring payoff functions and the implications for site-specific crop management // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. V. 162. P. 459–465. DOI: 10.1016/j.compag.2019.04.011.
45. Raya-Sereno M. D., Alonso-Ayuso M., Pancorbo J. L. et al. Residual effect and N fertilizer rate detection by high-resolution VNIR-SWIR hyperspectral imagery and solar-induced chlorophyll fluorescence in wheat // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2021. V. 60. P. 1–17. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3099624.
46. Sahoo R. N., Gakhar S., Rejith R. G. et al. Optimizing the retrieval of wheat crop traits from UAV-borne hyperspectral image with radiative transfer modelling using Gaussian process regression // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. No. 23. Article 5496. DOI: 10.3390/rs15235496.
47. Sahoo R. N., Rejith R. G., Gakhar S. et al. Drone remote sensing of wheat N using hyperspectral sensor and machine learning // *Precision Agriculture*. 2024. V. 25. No. 2. P. 704–728. DOI: 10.1007/s11119-023-10089-7.
48. Spati K., Huber R., Finger R. Benefits of increasing information accuracy in variable rate technologies // *Ecological Economics*. 2021. V. 185. Article 107047. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2021.107047.
49. Stamatiadis S., Schepers J. S., Evangelou E. et al. Variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat under high spatial resolution // *Precision Agriculture*. 2018. V. 19. No. 3. P. 570–587. DOI: 10.1007/s11119-017-9540-7.
50. van Grinsven H. J., Bouwman L., Cassman K. G. et al. Losses of ammonia and nitrate from agriculture and their effect on nitrogen recovery in the European Union and the United States between 1900 and 2050 // *J. Environmental Quality*. 2015. V. 44. No. 2. P. 356–367. DOI: 10.2134/jeq2014.03.0102.
51. Walter A., Finger R., Huber R. et al. Opinion: smart farming is key to developing sustainable agriculture // *Proc. National Academy of Sciences*. 2017. V. 114. No. 24. P. 6148–6150. DOI: 10.1073/pnas.1707462114.
52. Wang X., Miao Y., Dong R. et al. Economic optimal nitrogen rate variability of maize in response to soil and weather conditions: implications for site-specific nitrogen management // *Agronomy*. 2020. V. 10. No. 9. Article 1237. DOI: 10.3390/agronomy10091237.
53. Xu S., Xu X., Blacker C. et al. Estimation of leaf nitrogen content in rice using vegetation indices and feature variable optimization with information fusion of multiple-sensor images from UAV // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. No. 3. Article 854. DOI: 10.3390/rs15030854.
54. Yakushev V. P., Kanash E. V. Evaluation of wheat nitrogen status by colorimetric characteristics of crop canopy presented in digital images // *J. Agricultural Informatics*. 2016. V. 7. No. 1. P. 65–74. DOI: 10.17700/jai.2016.7.1.268.
55. Yang B., Wang M., Sha Z. et al. Evaluation of aboveground nitrogen content of winter wheat using digital imagery of unmanned aerial vehicles // *Sensors (Switzerland)*. 2019. V. 19. No. 20. Article 4416. DOI: 10.3390/s19204416.

## Benefits of hyperspectral information for nitrogen management in grain crop production

V. P. Yakushev, V. V. Yakushev, S. Yu. Blokhina, Yu. I. Blokhin,  
A. F. Petrushin, D. A. Matveenko

*Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia*  
E-mails: vyakushev@agrophys.ru, sblokhina@agrophys.ru

Improvements in the sustainability of grain crop production depend essentially on the efficient use of nitrogen fertilizers. Precision agriculture, as a viable and scalable solution for nitrogen nutrition management of plants by applying the optimal amount to those crop areas in which nitrogen deficiency has developed, is used not only to increase yields, but also to avoid nitrogen losses. Among the agronomic practices for which the concept of precision agriculture was applied for research and operational purposes, variable rate nitrogen fertilization plays a key role. However, this technology is still not widely adopted, since its implementation requires a detailed assessment of within-field variability of yield factors and the relationship of this variability with crop growth conditions. Hyperspectral remote sensing opens up new opportunities for rapid and more precise quantitative assessment of the crop canopy state during the main stages of plant development. An algorithm is presented to control the nitrogen regime on the basis of hyperspectral sensing data with the identification of crop areas in which nitrogen deficiency has developed. Digital images of crop canopy with spring wheat were obtained using a Pika-L hyperspectral camera (Resoson, USA) installed on a Matrice 600 Pro unmanned aerial vehicle (DJI,

China), and vegetation indices were calculated from the images. The dynamics of the indices value changes in the main stages of plant development were estimated in comparison with the values obtained under optimal and stressful conditions, and a functional analysis of the parameters describing the spatial structure of changeable optical characteristics was carried out. In order to perform the technological operation of nitrogen fertilizer application, the crop canopy zones under nitrogen stress were determined, the required fertilizer rates were calculated, the spread rate map based on these data was generated for the robotized equipment, indicating the exact place of application. At the same time, the costs of resources and time for ground-based field measurements and laying out test sites have been significantly reduced with the prospect of abandoning their placement on operational fields.

**Keywords:** precision agriculture, hyperspectral sensing, nitrogen deficiency, variable rate application, nitrogen fertilizers, vegetation indices, variogram analysis

Accepted: 29.05.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-188-203

## References

1. Anishchenko A. N., Shut'kov A. A., Problems of implementation of the Doctrine of food security in Russia, *Prodovol'stvennaya politika i bezopasnost'*, 2021, Vol. 8, No. 1, pp. 9–22 (in Russian), DOI: 10.18334/ppib.8.1.111777.
2. Zavalin A. A., Sokiliv A. O., Utilization by plants of nitrogen fertilizer and its regulation, *Intern. Agricultural J.*, 2019, No. 4(370), pp. 71–75 (in Russian), DOI: 10.24411/2587-6740-2019-14070.
3. Matveenkov D. A., Yakushev V. V., Yakushev V. P., Precision management of the nitrogen status of spring wheat crops based on remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 79–86 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-79-86.
4. Merzlaya G. E., Ponkratenkova I. V., Gavrilova A. Yu., Agroecological assessment of continuous application of organic and mineral fertilizers in the cultivation of spring wheat in technologies of different intensity, *Agrokimiya*, No. 9, pp. 18–25 (in Russian), DOI: 10.1134/S0002188119090060.
5. Mitrofanova O. A., Mitrofanov E. P., Yakushev V. P. et al., Decision making tools on precision farming technologies feasibility based on geostatistical analysis of remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 71–84 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-71-84.
6. Petrushin A. F., Yakushev V. P., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu., Vatveenkov D. A., Blokhin Yu. I., Mitrofanov E. P., Mitrofanova O. A., *A program for detecting and highlighting the boundaries of within-field variability based aerospace images and optical criteria*, Certificate of state computer program registration No. 2023611147 (RU), Reg. 17.01.2023 (in Russian).
7. Sharkov I. N., Kolbin S. A., Samokhvalova S. M., Problem of nitrogen when using leached cherozem on intensive technology in forest-steppe of Western Siberia, *Agrokimiya*, No. 2, pp. 3–10 (in Russian), DOI: 10.31857/S0002188121020101.
8. Shpanyov A. M., Smuk V. V., Changes in the spectral characteristics of cultivated and weed plants under the influence of mineral fertilizers in agrocenoses of the North-West of Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 165–177 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-165-177.
9. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Prospects for smart agriculture in Russia, *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2018, Vol. 88, No. 5, pp. 330–340, DOI: 10.1134/S1019331618040135.
10. Yakushev V. P., Kanash E. V., Yakushev V. V. et al., Advanced features of automated detection of within-field variability based on hyperspectral images and optical criteria, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 24–32 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32.
11. Yakushev V. P., Bure V. M., Mitrofanova O. A. et al. (2020a), Within-field variability estimation based on variogram analysis of satellite data for precision agriculture, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 114–122 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-114-122.
12. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Matveenkov D. A. (2020b), Intelligent systems for technology decision support in precision agriculture, *Zemledelie*, 2020, No. 1, pp. 33–37 (in Russian), DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10109.
13. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu. et al. (2021a), Information support for modern agricultural systems in Russia, *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2021, Vol. 91, No. 8, pp. 755–768 (in Russian), DOI: 10.31857/S0869587321080090.

14. Yakushev V. P., Bure V. M., Mitrofanova O. A. et al. (2021b), The specifics of aerospace image processing to optimize geostatistical approaches to within-field variability estimation in precision agriculture, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 128–139 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-128-139.
15. Yakushev V. P., Kanash E. V., Rusakov D. V. et al., Correlation dependences between crop reflection indices, grain yield and optical characteristics of wheat leaves at different nitrogen level and seeding density, *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2022, Vol. 57, No. 1, pp. 98–112 (in Russian), DOI: 10.15389/agrobiology.2022.1.98rus.
16. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu. et al., The role of remote sensing of the Earth in precision agriculture, *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2023, Vol. 93, No. 10, pp. 955–969 (in Russian), DOI: 10.31857/S0869587323100110.
17. Al Makdessi N., Ecartot M., Roumet P. et al., A spectral correction method for multi-scattering effects in close range hyperspectral imagery of vegetation scenes: application to nitrogen content assessment in wheat, *Precision Agriculture*, 2019, Vol. 20, No. 2, pp. 237–259, DOI: 10.1007/s11119-018-9613-2.
18. Argento F., Anken T., Abt F. et al., Site-specific nitrogen management in winter wheat supported by low-altitude remote sensing and soil data, *Precision Agriculture*, 2021, Vol. 22, pp. 364–386, DOI: 10.1007/s11119-020-09733-3.
19. Baresel J. P., Zimmermann G., Reents H. J., Effects of genotype and environment on N uptake and N partition in organically grown winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in Germany, *Euphytica*, 2008, Vol. 163, No. 3, pp. 347–354, DOI:10.1007/s10681-008-9718-1.
20. Basso B., Antle J., Digital agriculture to design sustainable agricultural systems, *Nature Sustainability*, 2020, Vol. 3(4), pp. 254–256, DOI: 10.1038/s41893-020-0510-0.
21. Basso B., Dumont B., Cammarano D. et al., Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone, *Science of the Total Environment*, 2016, Vol. 545–546, pp. 227–235, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.104.
22. Basso B., Shuai G., Zhang J. et al., Yield stability analysis reveals sources of large-scale nitrogen loss from the US Midwest, *Scientific Reports*, 2019, Vol. 9, No. 1, pp. 1–9, DOI: 10.1038/s41598-019-42271-1.
23. Basyouni R., Dunn B. L., Goad C., Use of nondestructive sensors to assess nitrogen status in potted poinsettia (*Euphorbia pulcherrima* L. (Willd. ex Klotzsch)) production, *Scientia Horticulturae*, 2015, Vol. 192, pp. 47–53, DOI: 10.1016/j.scienta.2015.05.011.
24. Blekanov I., Molin A., Zhang D. et al., Monitoring of grain crops nitrogen status from UAV multispectral images coupled with deep learning approaches, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, Vol. 2012, Article 108047, DOI: 10.1016/j.compag.2023.108047.
25. Buthelezi S., Mutanga O., Sibanda M. et al., Assessing the prospects of remote sensing maize leaf area index using UAV-derived multi-spectral data in smallholder farms across the growing season, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, No. 6, Article 1597, DOI: 10.3390/rs15061597.
26. Calicioglu O., Flammini A., Bracco S. et al., The future challenges of food and agriculture: an integrated analysis of trends and solutions, *Sustainability*, 2019, Vol. 11, No. 1, Article 222, DOI: 10.3390/su11010222.
27. Chlingaryan A., Sukkarieh S., Whelan B., Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: a review, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, Vol. 151, pp. 61–69, DOI: 10.1016/j.compag.2018.05.012.
28. Dehghan-Shoar M. H., Orsi A. A., Pullanagari R. R. et al., A hybrid model to predict nitrogen concentration in heterogeneous grassland using field spectroscopy, *Remote Sensing of Environment*, 2023, Vol. 285, Article 113385, DOI: 10.1016/j.rse.2022.113385.
29. Good A. G., Beatty P. H., Fertilizing nature: a tragedy of excess in the commons, *PLoS Biology*, 2011, Vol. 9, No. 8, Article e1001124, DOI: 10.1371/journal.pbio.1001124.
30. Guo J., Jia Y., Chen H. et al., Growth, photosynthesis, and nutrient uptake in wheat are affected by differences in nitrogen levels and forms and potassium supply, *Scientific Reports*, 2019, Vol. 9, Article 1248, DOI: 10.1038/s41598-018-37838-3.
31. Guo J., Zhang J., Xiong S. et al., Hyperspectral assessment of leaf nitrogen accumulation for winter wheat using different regression modeling, *Precision Agriculture*, 2021, Vol. 22, pp. 1634–1658, DOI: 10.1007/s11119-021-09804-z.
32. Hirel B., Tetu T., Lea P. J., Dubois F., Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture, *Sustainability*, 2011, Vol. 3, No. 9, pp. 1452–1485, DOI: 10.3390/su3091452.
33. Jamali M., Soufizadeh S., Yeganeh B. et al., Wheat leaf traits monitoring based on machine learning algorithms and high-resolution satellite imagery, *Ecological Informatics*, 2023, Vol. 74, Article 101967, DOI: 10.1016/j.ecoinf.2022.101967.
34. Jiang J., Cai W., Zheng H. et al., Using digital cameras on an unmanned aerial vehicle to derive optimum color vegetation indices for leaf nitrogen concentration monitoring in winter wheat, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 22, Article 2667, DOI: 10.3390/rs11222667.

35. Jiang J., Atkinson P. M., Chen C. et al., Combining UAV and Sentinel-2 satellite multi-spectral images to diagnose crop growth and N status in winter wheat at the county scale, *Field Crops Research*, 2023, Vol. 294, Article 108860, DOI: 10.1016/j.fcr.2023.108860.
36. Li F., Li D., Elsayed S. et al., Using optimized three-band spectral indices to assess canopy N uptake in corn and wheat, *European J. Agronomy*, 2021, Vol. 127, Article 126286, DOI: 10.1016/j.eja.2021.126286.
37. Lu B., Dao P. D., Liu J. et al., Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 16, Article 2659, DOI: 10.3390/rs12162659.
38. Ma J., Zheng B., He Y., Applications of a hyperspectral imaging system used to estimate wheat grain protein: a review, *Frontiers in Plant Science*, 2022, Vol. 13, Article 837200, DOI: 10.3389/fpls.2022.837200.
39. Mälinas A., Vidican R., Rotar I. et al., Current status and future prospective for nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.), *Plants*, 2022, Vol. 1, No. 2, Article 217, DOI: 10.3390/plant11020217.
40. Mishra D., Muduli K., Sevcik L. et al., Combating of associated issues for sustainable agri-food sectors, *Sustainability*, 2023, Vol. 15, No. 3, Article 10096, DOI: 10.3390/su151310096.
41. Mittermayer M., Donauer J., Kimmelmann S. et al., Effects of different nitrogen fertilization systems on crop yield and nitrogen use efficiency — results of a field experiment in southern Germany, *Heliyon*, 2024, Vol. 10, No. 7, Article e28065, DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e28065.
42. Nutini F., Confalonieri R., Crema A. et al., An operational workflow to assess rice nutritional status based on satellite imagery and smartphone apps, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, Vol. 154, pp. 80–92, DOI: 10.1016/j.compag.2018.08.008.
43. Pancorbo J. L., Alonso-Ayuso M., Camino C. et al., Airborne hyperspectral and Sentinel imagery to quantify winter wheat traits through ensemble modeling approaches. *Precision Agriculture*, 2023, Vol. 24, pp. 1288–1311, DOI: 10.1007/s11119-023-09990-y.
44. Pannell D. J., Gandorfer M., Weersink A., How flat is flat? Measuring payoff functions and the implications for site-specific crop management, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, Vol. 162, pp. 459–465, DOI: 10.1016/j.compag.2019.04.011.
45. Raya-Sereno M. D., Alonso-Ayuso M., Pancorbo J. L. et al., Residual effect and N fertilizer rate detection by high-resolution VNIR-SWIR hyperspectral imagery and solar-induced chlorophyll fluorescence in wheat, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2021, Vol. 60, pp. 1–17, DOI: 10.1109/TGRS.2021.3099624.
46. Sahoo R. N., Gakhar S., Rejith R. G. et al., Optimizing the retrieval of wheat crop traits from UAV-borne hyperspectral image with radiative transfer modelling using Gaussian process regression, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, No. 23, Article 5496, DOI: 10.3390/rs15235496.
47. Sahoo R. N., Rejith R. G., Gakhar S. et al., Drone remote sensing of wheat N using hyperspectral sensor and machine learning, *Precision Agriculture*, 2024, Vol. 25, No. 2, pp. 704–728, DOI: 10.1007/s11119-023-10089-7.
48. Spati K., Huber R., Finger R., Benefits of increasing information accuracy in variable rate technologies, *Ecological Economics*, 2021, Vol. 185, Article 107047, DOI: 10.1016/j.ecolecon.2021.107047.
49. Stamatiadis S., Schepers J. S., Evangelou E. et al., Variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat under high spatial resolution, *Precision Agriculture*, 2018, Vol. 19, No. 3, pp. 570–587, DOI: 10.1007/s11119-017-9540-7.
50. van Grinsven H. J., Bouwman L., Cassman K. G. et al., Losses of ammonia and nitrate from agriculture and their effect on nitrogen recovery in the European Union and the United States between 1900 and 2050, *J. Environmental Quality*, 2015, Vol. 44, No. 2, pp. 356–367, DOI: 10.2134/jeq2014.03.0102.
51. Walter A., Finger R., Huber R., Buchmann N., Opinion: smart farming is key to developing sustainable agriculture, *Proc. National Academy of Sciences*, 2017, Vol. 114, No. 24, pp. 6148–6150, DOI: 10.1073/pnas.1707462114.
52. Wang X., Miao Y., Dong R. et al., Economic optimal nitrogen rate variability of maize in response to soil and weather conditions: implications for site-specific nitrogen management, *Agronomy*, 2020, Vol. 10, No. 9, Article 1237, DOI: 10.3390/agronomy10091237.
53. Xu S., Xu X., Blacker C. et al., Estimation of leaf nitrogen content in rice using vegetation indices and feature variable optimization with information fusion of multiple-sensor images from UAV, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, No. 3, Article 854, DOI: 10.3390/rs15030854.
54. Yakushev V. P., Kanash E. V., Evaluation of wheat nitrogen status by colorimetric characteristics of crop canopy presented in digital images, *J. Agricultural Informatics*, 2016, Vol. 7, No. 1, pp. 65–74, DOI: 10.17700/jai.2016.7.1.268.
55. Yang B., Wang M., Sha Z. et al., Evaluation of aboveground nitrogen content of winter wheat using digital imagery of unmanned aerial vehicles, *Sensors (Switzerland)*, 2019, Vol. 19, No. 20, Article 4416, DOI: 10.3390/s19204416.