

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ВЕГЕТАЦИОННЫМИ ИНДЕКСАМИ, УРОЖАЕМ ЗЕРНА И ОПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЛИСТЬЕВ ПШЕНИЦЫ ПРИ РАЗНОМ СОДЕРЖАНИИ В ПОЧВЕ АЗОТА И ГУСТОТЕ ПОСЕВА*

В.П. ЯКУШЕВ, Е.В. КАНАШ, Д.В. РУСАКОВ,
В.В. ЯКУШЕВ, С.Ю. БЛОХИНА[✉], А.Ф. ПЕТРУШИН,
Ю.И. БЛОХИН, О.А. МИТРОФАНОВА, Е.П. МИТРОФАНОВ

Усовершенствование методов дистанционного мониторинга посевов в системах точного земледелия и разработка алгоритмов дешифрования космических и аэрофотоснимков требуют сопоставления полученных данных с результатами наземного обследования. В настоящей работе впервые получены данные о спектральных характеристиках диффузного отражения листьев яровой пшеницы, их связи с продуктивностью растений, колориметрическими характеристиками и вегетационными индексами отражения растительного покрова, сформированного этой культурой в зависимости от применяемых технологий управления посевами. Цель работы — на примере яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) оценить зависимость оптических характеристик и продуктивности посевов от нормы высева семян и дозы внесенных перед посевом азотных удобрений, а также определить наличие корреляционных связей между дистанционно измеренными оптическими характеристиками растительного покрова и спектральными характеристиками диффузного отражения листьев при регистрации контактным сенсором. Объектом исследования служили посевы яровой пшеницы сорта Дарья. Растения выращивали на поле Меньковского филиала ФГБНУ Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ) (Ленинградская обл., Гатчинский р-н) в 2019-2020 годах. Всего было заложено 6 тестовых площадок площадью по 100 м². Дозы азота варьировали от 0 (удобрения не вносили) до 200 кг/га с шагом 40 кг/га, норма высева семян составляла 6,0 и 5,0 млн/га (500 и 600 шт/м²). Спектральные характеристики диффузного отражения листьев определяли *in situ* на стадиях выход в трубку и колошение с помощью оптоволоконной спектрорадиометрической системы («Ocean Insight», США), в диапазоне от 350 до 1000 нм с шагом 0,3 нм. После регистрации спектров отражения растения высушивали до постоянной массы и взвешивали индивидуально. Биомассу одного растения использовали для изучения корреляционных связей с оптическими характеристиками листьев. По спектрам отраженной радиации определяли меру рассеяния света листом R₈₀₀ и рассчитывали индексы отражения, характеризующие активность фотосинтетического аппарата: содержание хлорофилла (ChlRI), фотохимическую активность фотосинтетического аппарата (PRI), содержание воды (WRI), антоцианов (ARI) и флавоноидов (FRI). Во время основных фаз развития яровой пшеницы (кущение, выход в трубку, колошение, цветение) проводили дистанционную фотосъемку посевов. Цифровые изображения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра получали с высоты 75-120 м с помощью двух синхронизированных цифровых камер Canon G7X («Canon, Inc.», Япония), установленных на квадрокоптере Геоскан 401 (ГК «Геоскан», Россия). При обработке оптических характеристик были рассчитаны вегетационные индексы NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс) и ARVI (устойчивый к влиянию атмосферы вегетационный индекс). Для количественного описания колориметрических характеристик листьев и сформированного посевом растительного покрова использовали трехмерную модель цветового пространства CIELAB. В период вегетации весовым методом определяли биомассу, в конце вегетации — зерновую продуктивность растений. В этом случае отбор растений проводился на выделенных учетных делянках площадью 0,25 м². Полученные результаты свидетельствуют, что на ранних этапах развития растений, пока сформированный ими покров остается разомкнутым, NDVI позволяет достаточно точно диагностировать степень обеспеченности растений азотом и выявлять участки поля, на которых они хуже развиты. Однако по мере развития растений и формирования сомкнутого растительного покрова этот показатель не давал надежных результатов. Использование ADVI также не позволяло получить надежную и достоверную информацию о состоянии яровой пшеницы и выявить участки посева, требующие внесения дополнительных удобрений. Тесная линейная корреляционная связь между дозой внесенных азотных удобрений, нетто продуктивностью растений и измеренными контактными спектральными характеристиками листьев сохранялась до поздних стадий развития (колошение, цветение). Диагностика состояния посевов по колориметрическим характеристикам давала возможность обнаружить изменения растительного покрова, связанные не только со степенью развития и густотой стояния растений, но и с особенностями спектральных характеристик диффузного отражения их

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-29-05184).

листьев. Сравнение данных, полученных дистанционно и с помощью контактного сенсора, позволяют сделать вывод, что индексы ChlRI, PRI, FRI и WRI могут быть успешно применены для выявления участков посева, в которых сложился дефицит азотного питания при формировании сомкнутого растительного покрова, когда обычно применяемые вегетационные индексы, например NDVI, не дают надежных результатов.

Ключевые слова: пшеница яровая, индексы отражения, спектральные характеристики, дистанционный мониторинг, дефицит азота, точное земледелие.

Пространственная вариабельность состояния посевов, которая определяется дистанционно, обусловлена многими факторами (почвенными, климатическими, биологическими, технологическими) и зависит от оптических свойств листьев, архитектоники растений, структуры посевов. Основная функция растительного покрова — перехват радиации для фотосинтеза и других метаболических процессов. Этот перехват происходит с разной степенью эффективности, которая зависит главным образом от площади сформированных листьев и их ориентации относительно солнца. Поскольку рост и урожайность растений определяются в основном фотосинтезом, они находятся в прямой зависимости от количества поглощенного света и эффективности его преобразования в хлоропластах. Агрофитоценоз, структура которого обеспечивает большее поглощение света и его наиболее эффективное использование, обычно характеризуется более высокими интенсивностью фотосинтеза растений и урожайностью. Для развития систем точного земледелия в настоящее время необходима принципиально новая методологическая, физико-техническая и экспериментальная база, которая станет основным структурным компонентом при оценке вариабельности характеристик посевов и мониторинга их состояния (1).

Радиация, отраженная листьями и другими фитоэлементами, несет полную информацию о биохимическом составе, архитектуре тканей, физиологическом состоянии растений, а специфические изменения их спектральных характеристик и количества отраженной радиации позволяют оценить реакцию на действие различных стрессоров (2-4) и сделать прогноз урожайности (5). Дешифрование информации, заложенной в оптических характеристиках растений, лежит в основе дистанционного и наземного зондирования растительности, однако сложный характер оптических систем растений делает этот процесс малоэффективным (3). В течение последних десятилетий были разработаны подходы, позволяющие получить представление о некоторых аспектах структуры и функций растений на основе данных мультиспектрального и гиперспектрального отражения. Содержание фотосинтетических пигментов, наличие в тканях антоцианов, флавоноидов и воды определяют активность процессов фотосинтеза, спектральные характеристики диффузного рассеяния листьев и растительного покрова в целом. Ранее описаны наиболее перспективные индексы отражения и рассмотрено их применение для диагностики физиологического состояния растений даже при отсутствии видимых симптомов торможения роста и угнетения (6, 7).

Картина отражения разных длин волн света листьями в диапазоне фотосинтетически активного излучения и ближнего инфракрасного излучения электромагнитного спектра сильно отличается от таковой для почвы (8). Различия в спектрах отражения почвы и сформированного агрофитоценозом растительного покрова имеют явный потенциал для дистанционной диагностики состояния растений как в селекционных программах при скрининге генотипов на эффективность (9), так и при оценке целесообразности и объемов использования различных агроприемов. Обычно наблюдаемая пространственная неоднородность оптических характеристик агрофитоценозов связана с различиями в содержании воды, питательных элементов и

других свойствах почвы, а также с особенностями сельскохозяйственных технологий, применяемых при возделывании культуры (нормы высева семян, их качество, степень засоренности посевов и т.д.).

Недостаточное использование средств дистанционного зондирования существенно ограничивает возможности технологий точного земледелия. В значительной степени это обусловлено отсутствием проблемно-ориентированных баз данных и существенным отставанием методов дешифрования информации, получаемой от сенсоров и устройств, с помощью которых выполняется мониторинг посевов. Простым показателем для измерения различий в отражении служит нормализованный разностный вегетационный индекс (normalized difference vegetation index, NDVI), который был предложен J.W. Rouse с соавт. (10) и применялся для оценки состояния растительности с использованием мультиспектрального дистанционного зондирования (11, 12). N. Oppelt с соавт. (13) применяли NDVI в гиперспектральных исследованиях с целью мониторинга физиологических параметров пшеницы. Они обнаружили, что NDVI становится нечувствительным к содержанию хлорофилла ниже $0,3 \text{ г/м}^2$, а также выше $1,5 \text{ г/м}^2$. Это, вероятно, наиболее часто используемый индекс для анализа состояния посевов, на основании которого проводится косвенная оценка индекса листовой поверхности, поглощения света и потенциальной фотосинтетической активности (8, 14, 15). Поскольку NDVI реагирует на изменения растительного покрова в процессе роста и развития сельскохозяйственной культуры, то часто используется для прогнозирования урожайности (16, 17).

Дистанционный мониторинг дает возможность существенно усовершенствовать методы прогноза урожая и оперативного контроля за состоянием посевов как в глобальном, так и локальном масштабе (18, 19). На начальных этапах развития и усовершенствования методов дистанционной диагностики необходимо сопоставление получаемых данных с результатами наземного обследования посевов (20). Данные, полученные при дистанционном и наземном обследовании посевов в одни и те же сроки, на одних и тех же участках полей, необходимы для увеличения точности диагностики и выявления критериев и идентификационных показателей состояния посевов (6, 7, 20). При дистанционном и наземном мониторинге широко применяются методы, позволяющие оценить оптические характеристики листьев, индекс листовой поверхности и/или проективное покрытие почвы, характерные для конкретного посева.

В настоящей работе впервые получены данные о спектральных характеристиках диффузного отражения листьев яровой пшеницы, их связи с продуктивностью растений, колориметрическими характеристиками и вегетационными индексами отражения растительного покрова, сформированного этой культурой в зависимости от применяемых технологий управления посевами.

Цель работы — на примере яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) оценить зависимость оптических характеристик и продуктивности посевов от нормы высева семян и дозы внесенных перед посевом азотных удобрений, а также определить наличие корреляционных связей между дистанционно измеренными оптическими характеристиками растительного покрова и спектральными характеристиками диффузного отражения листьев при регистрации контактными сенсорами.

Методика. Исследования выполняли на посевах яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья. Растения выращивали на поле Меньковского филиала ФГБНУ Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ) (Ленинградская обл., Гатчинский р-н) в 2019-2020 годах.

Почва — дерново-слабоподзолистая среднекультуренная легкосуглинистая с содержанием гумуса 2,07 %, обменного кальция — 8,38 ммоль/100 г, магния — 2,88 ммоль/100 г, подвижных соединений фосфора и калия — 565 и 140 мг/кг, аммонийного и нитратного азота — 12,37 и 8,21 мг/кг, рН_{KCl} 5,7. Мощность пахотного слоя — 22 см.

Всего было заложено 6 тестовых площадок площадью по 100 м², на которых доза равномерно внесенного азота (nitrogen rate, NR) варьировала от 0 (без внесения удобрений) до 200 кг/га с шагом 40 кг/га. Удобрения вносили в два этапа: азофоску перед посевом в количестве ²/₃ дозы азота и оставшуюся ¹/₃ дозы — в виде подкормки аммиачной селитрой на стадии завершения кушения (ВВСН 25-27). Для создания посева разной плотности каждую из тестовых площадок делили на два участка площадью по 50 м². Норма высева семян (seeds rate, SR) на одном из них была равна 6,0 млн/га, на втором — 5,0 млн/га, то есть 500 и 600 шт/м² (соответственно SR500 и SR600).

Спектральные характеристики диффузного отражения листьев определяли *in situ* на стадиях ВВСН 30-31 (выход в трубку) и ВВСН 53-55 (колошение) с помощью оптоволоконной спектрорадиометрической системы («Ocean Insight», США), в диапазоне от 350 до 1000 нм с шагом 0,3 нм. Для отбора растений с целью анализа спектральных характеристик листьев посев на тестовых площадках условно делили на 4 части и из центра каждой полученной части отбирали по 5-6 растений (всего 20-30 растений), которые перевозили с комом влажной земли в лабораторию. Для регистрации спектров диффузного отражения использовали полностью закончившие рост листья, располагая датчик в средней части листовой пластинки, слева и справа от центральной жилки. Записанные спектры (не менее 20 спектров для каждого варианта) обрабатывали в программе Microsoft Excel 2013, где рассчитывали средние значения коэффициентов отражения для всех длин волн измеряемого диапазона 350-1000 нм. После регистрации спектров отражения растения высушивали до постоянной массы при температуре 85 °С и взвешивали индивидуально. Полученный показатель (биомасса одного растения, В_р) использовали для изучения корреляционных связей с оптическими характеристиками листьев.

По спектрам отраженной радиации определяли меру рассеяния света листом R₈₀₀ (21) и рассчитывали индексы отражения, характеризующие активность фотосинтетического аппарата: содержание хлорофилла (ChlRI), фотохимическую активность фотосинтетического аппарата (PRI), содержание воды (WRI), антоцианов (ARI) и флавоноидов (FRI).

Использовали следующие формулы:

$$\text{ChlRI} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445}) \quad (21),$$

$$\text{PRI} = (R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531}) \quad (22),$$

$$\text{ARI} = R_{750} (1/R_{550} - 1/R_{700}) \quad (23),$$

$$\text{FRI} = [(1/R_{410}) - (1/R_{460})] \times R_{800} \quad (24),$$

$$\text{WRI} = (R_{970} - R_{920}) / (R_{970} + R_{920}) \quad (25),$$

где R — величина отражения, нижние индексы — длины волн, отраженных от поверхности листа.

В расчетные формулы PRI, ARI и FRI для удобства представления данных и получения положительных значений индексов была введена константная величина C, из которой вычитали значения перечисленных индексов. Получали модифицированные индексы отражения: PRI_{mod} = C₁ - PRI, ARI_{mod} = C₂ - ARI, FRI_{mod} = C₃ - FRI. Экспериментально подобранные значения констант C₁, C₂ и C₃ были равны соответственно 0,5; 0,7 и 0,7 (26).

Корреляционные зависимости между всеми перечисленными индексами отражения и нетто продуктивностью при действии различных абиотических стрессоров на растения пшеницы (5) и ячменя (26) рассмотрены ранее.

Во время основных фаз развития яровой пшеницы (кущение, ВВСН 25-25; выход в трубку, ВВСН 30-31; колошение, ВВСН 53-55; цветение, ВВСН 61-65) проводили дистанционную фотосъемку посевов. Цифровые изображения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра получали с высоты 75-120 м с помощью двух синхронизированных цифровых камер Canon G7X («Canon, Inc.», Япония), установленных на квадрокоптере Геоскан 401 (ГК «Геоскан», Россия). В результате дистанционной фотосъемки получали не менее трех изображений посева на каждой из тестовых площадок.

Анализ цифровых изображений посевов и регистрацию их спектральных характеристик проводили в программе Erdas Imagine («Erdas, Inc.», США).

При обработке оптических характеристик рассчитывали вегетационные индексы NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс, *normalized difference vegetation index*) и ARVI (устойчивый к влиянию атмосферы вегетационный индекс, *atmospherically resistant vegetation index*):

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED),$$

$$ARVI = (NIR - R_b)/(NIR + R_b),$$

где NIR и RED — отражение соответственно в ближней инфракрасной и красной области спектра, $R_b = RED - a \times (RED - BLUE)$, как правило, $a = 1$, при малом покрытии растительности и неизвестном типе атмосферы $a = 0,5$ (27).

Для количественного описания колориметрических характеристик листьев и сформированного посевом растительного покрова использовали трехмерную модель цветового пространства CIELAB, принятую Международной комиссией по освещению (28).

В период вегетации на стадиях ВВСН 25-27, ВВСН 30-31, ВВСН 53-55 и ВВСН 61-65 весовым методом определяли биомассу растений (B_p). Для этого на тестовых площадках выделяли учетные делянки площадью 0,25 м². Все растения с учетной делянки срезали на уровне корневой шейки, высушивали до постоянной массы при 85 °С и взвешивали. В конце вегетации была определена зерновая продуктивность растений (Y_g , масса зерна, г/м²). В этом случае отбор растений проводился на выделенных учетных делянках площадью 0,25 м². Повторность опыта при определении B_p и Y_g была 3-кратной.

Статистическую обработку данных выполняли в программах Microsoft Excel 2013 и Statistica 8 («StatSoft, Inc.» США). Определяли средние значения изучаемых показателей. Достоверность различий между вариантами оценивали методами параметрической (t -критерий Стьюдента) и непараметрической (коэффициент ранговой корреляции Спирмена и критерий парных сравнений Вилкоксона) статистики. Различия между вариантами считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$. Сила факторного эффекта (η^2 , *partial eta-squared*) для уровня азотного питания и нормы высева семян определяли в процентах как отношение соответствующей суммы квадратов отклонений изучаемых оптических показателей от их средних значений к общей сумме квадратов.

Результаты. Данные выполненных измерений представлены в виде дополнительных материалов (<http://www.agrobiology.ru>).

Дистанционная оценка посевов по вегетационным

индексам (NDVI и ARVI) и анализ их связи с нетто продуктивностью. Показано, что прогноз урожайности может быть сделан по результатам оценки состояния посевов в ранние сроки развития. Одним из основных критериев при такой оценке служит величина накопленной биомассы, которая может быть определена как прямым весовым методом, так и с помощью неинвазивных оптических методов, включая дистанционные.

Связь между зерновой продуктивностью (Y_g , г/м²) и биомассой растений пшеницы, сформированных на стадиях выход в трубку (B_{p1} , г/м²), колошение (B_{p2} , г/м²) и цветение (B_{p3} , г/м²), была линейной и достоверной:

$$Y_g = 48,76 + (0,30 \times B_{p1}) \quad (r = 0,64; p = 0,024; R^2 = 0,42),$$

$$Y_g = 36,06 + (0,15 \times B_{p2}) \quad (r = 0,82; p = 0,001; R^2 = 0,67),$$

$$Y_g = 97,41 + (0,13 \times B_{p3}) \quad (r = 0,88; p = 0,0001; R^2 = 0,78).$$

Наличие столь тесной корреляционной связи между урожайностью и биомассой даже на ранних этапах развития растений позволяет сделать вывод, что биомасса может служить одним из основных параметров при прогнозе урожая зерна, а возможность оценить ее с помощью дистанционных методов создает хорошие перспективы для мониторинга посевов и разработки новых технологий управления продукционным процессом растений.

1. Связь между биомассой растений яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья и вегетационными индексами NDVI (normalized difference vegetation index) и ARVI (atmospherically resistant vegetation index) на различных стадиях (Меньковский филиал ФГБНУ АФИ, Ленинградская обл., Гатчинский р-н, 2019-2020 годы)

Уравнение связи	ПП, %	r	p	R ²	
	Ку щ е н и е (ВВСН 25-27)				
$B_p = -0,913 + (2,674 \times NDVI)$	43,7	0,927	0,008	0,86	
$B_p = -0,104 + (0,257 \times ARVI)$		0,801	0,056	0,54	
	В ы х о д в т р у б к у (ВВСН 30-31)				
$B_p = -2,015 + (5,729 \times NDVI)$	62,4	0,810	0,009	0,66	
$B_p = -0,526 + (0,703 \times ARVI)$		0,798	0,057	0,64	
	К о л о ш е н и е (ВВСН 53-55)				
$B_p = 0,711 + (3,75 \times NDVI)$	65,0	0,138	0,795	0,019	
$B_p = 0,235 + (1,032 \times ARVI)$		0,545	0,263	0,297	
	Ц в е т е н и е (ВВСН 61-65)				
$B_p = -15,66 + (33,84 \times NDVI)$	48,1	0,730	0,097	0,533	
$B_p = -0,707 + (2,044 \times ARVI)$		0,843	0,035	0,716	

Примечание. B_p — биомасса растений, кг/м². ПП — проективное покрытие, сформированное растениями на стадии проведения анализа (максимальные значения для каждой из шести тестовых площадок площадью 100 м² при норме высева семян 600 шт/м²). Уравнения зависимости между B_p и вегетационными индексами NDVI и ARVI построены по средним значениям этих показателей, измеренных на трех учетных делянках, выделенных на каждой из шести тестовых площадок.

Анализ данных дистанционного мониторинга свидетельствует о зависимости показателей вегетационных индексов от густоты посева (нормы высева семян) и азотного питания. Максимальные величины индексов отмечали в фазу выхода в трубку (в среднем по вариантам 0,56-0,63), минимальные — в фазу кущения (0,49-0,56). В варианте SR500 значения NDVI возрастали до стадии колошения, а в варианте SR600 увеличение индекса происходило только до стадии выход в трубку. Вероятно, это связано с более быстрым смыканием растительного покрова при норме высева семян SR600. Наличие достоверной связи между биомассой растений и вегетационным индексом NDVI имело место только на ранних этапах развития растений и после выхода в трубку статистически значимая связь между признаками отсутствовала (табл. 1). Между биомассой растений, сформированных на 1 м² тестовой площадки, и ARVI достоверная связь отсутствовала во все сроки проведения анализа, за исключением стадии цветения. Можно сделать вывод, что этот индекс не подходит для мониторинга посевов яро-

вой пшеницы с целью обнаружения участков поля, требующих дополнительного внесения азотных удобрений и корректировки режима азотного питания растений.

При переходе к поздним этапам развития (стадия цветение) коэффициенты корреляции между биомассой растений и вегетационными индексами NDVI и ARVI были достаточно высокими (соответственно 0,730 и 0,843), однако из-за сильной вариабельности значений NDVI для сформированного на опытных делянках растительного покрова эта связь оказалась недостоверной, тогда как связь V_p с ARVI — статистически значимой.

В зависимости от дозы внесенного азота и густоты стеблестоя (SR500 или SR600) содержание хлорофилла (индекс хлорофилла, ChlRI) в листьях пшеницы существенно изменялось (табл. 2). Сила факторного влияния азотного питания на ChlRI оказалась высокой и была равна 35,1 % от общей изменчивости показателя в опыте. Густота стеблестоя оказала небольшое (3,7 %), но достоверное влияние на ChlRI (см. табл. 2). При этом статистически значимого взаимодействия между дозой внесенных азотных удобрений и густотой стеблестоя обнаружено не было.

2. Оценка достоверности и степени влияния технологических факторов на индексы отражения листьев яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья, измеренные с помощью контактного сенсора (стадия колошение, ВВСН 53-55) (Меньковский филиал ФГБНУ АФИ, Ленинградская обл., Гатчинский р-н, 2019-2020 годы)

Индекс отражения	Факторы воздействия					
	SR		NR		SR × NR	
	p	η^2	p	η^2	p	η^2
ChlRI	< 0,001	3,7	< 0,001	35,1	0,185	0,8
SIPI	0,051	0,9	< 0,001	11,8	0,108	1,1
R800	0,001	2,5	0,111	1,1	0,001	3,1
PRImod	0,630	1,0	< 0,001	30,4	0,661	0,1
ARImod	0,872	0,006	0,97	0,01	< 0,001	3,3
FRImod	0,001	2,4	< 0,001	27,0	0,043	1,5
WRI	< 0,001	28,7	< 0,001	9,5	0,96	0,1

Примечание. SR — норма высева семян (2 варианта), NR — доза азотных удобрений (6 вариантов), SR × NR — взаимодействие факторов; η^2 — сила факторного воздействия, p — уровень значимости, на котором влияние изучаемых факторов достоверно. Индексы отражения: ChlRI — хлорофилла, SIPI — отношения суммы каротиноидов к сумме хлорофиллов, R800 — рассеяния света внутри листа, PRImod — фотохимический индекс отражения, ARImod — антоцианов, FRImod — флавоноидов, WRI — содержания воды. Сила и достоверность влияния SR и NR на индексы отражения листьев определена по их средним значениям, обнаруженным у растений 6 вариантов NR и 2 вариантов SR (всего 12 вариантов). Среднее значение индексов отражения определено в выборке не менее 20 растений.

Внесение азотных удобрений, помимо увеличения содержания хлорофилла, изменяло также эффективность фотосинтетических процессов. Один из использованных в работе индексов — фотохимический индекс отражения (PRImod) позволял оценить эффективность работы фотосинтетического аппарата растений и регуляции светового потока в пигмент-белковых комплексах (22). Фотохимический индекс отражения по результатам испытания на различных культурах (29, 30) обеспечивает быструю и не требующую разрушения тканей листа диагностику эффективности фотосинтетических процессов, протекающих в листьях или растительном покрове. Этот индекс не зависит от структуры листа и определяется концентрацией каротиноидов и активностью их превращения в ксантофилловом цикле, что в итоге определяет эффективность использования энергии света и ее превращения в фотосистеме II (22).

На основании взаимосвязи между PRI и индексом листовой поверхности, а также PRI и содержанием хлорофилла на примере кукурузы и соевых бобов был сделан вывод, что динамика изменений PRI в процессе

роста и развития растений становится результатом сочетания работы ксантофиллового цикла и общего пула хлорофиллов и каротиноидов, который формируется при адаптации к условиям внешней среды (31).

Обычно увеличение значений PRI становится симптомом усиления тепловой диссипации вследствие уменьшения количества поглощенной энергии света, которая используется растением в фотохимических процессах фотосинтеза.

Наиболее сильное влияние на PRI_{mod} оказало азотное питание (см. табл. 2). Доза факторного влияния в этом случае превышала 30 %. При дефиците азотного питания (N₀) фотохимический индекс отражения имел наибольшую величину, свидетельствуя о рассеивании неиспользованной в фотосинтезе энергии света, то есть о наиболее низкой эффективности ее использования. Предпосевное внесение азота способствовало более эффективному преобразованию света в фотохимических процессах фотосинтеза, о чем можно судить по уменьшению PRI_{mod} по мере увеличения дозы внесенных перед посевом азотных удобрений.

Не наблюдалось статистически значимого влияния нормы высева семян (SR500 или SR600) на индекс фотохимической активности PRI_{mod}, однако тенденция к увеличению этого показателя имела место при дефиците азота (N₀) и большей густоте стеблестоя (SR600).

Независящий от структуры листа индекс пигментов (SIPI) позволяет оценить отношение содержания каротиноидов к количеству хлорофилла — Кар/Хл (21). G.A. Blackburn (32) подтвердил, что этот индекс имеет нелинейную зависимость от отношения Кар/Хл, которая наилучшим образом описывается с использованием логарифмической модели ($R^2 = 0,86$). SIPI не хватает чувствительности при низких значениях отношения Кар/Хл, но индекс становится более чувствительным при высоких значениях этого отношения. В настоящей работе доля влияния азотных удобрений на SIPI была равна 11,8 %. Не обнаружено достоверных изменений SIPI в зависимости от густоты посева.

Помимо хлорофиллов и каротиноидов, спектральные характеристики диффузного отражения листьев и других фитоэлементов определяются содержанием фенольных соединений (например, антоцианов и флавоноидов), присутствие которых изменяет качество и количество света, проникающего к хлоропластам. Обычно при окислительном стрессе содержание антоцианов и флавоноидов возрастает, что способствует экранированию хлоропластов, препятствуя их разрушению от поглощения излишней световой энергии и уменьшая или устраняя последствия окислительного стресса.

Не было обнаружено достоверных изменений индекса антоцианов (ARI_{mod}) как в зависимости от азотного питания, так и нормы высева семян. Индекс флавоноидов (FRI_{mod}) достоверно увеличивался при дефиците азотного питания ($\eta^2 = 27 \%$, $p < 0,001$) и в более густом посеве ($\eta^2 = 2,4 \%$, $p = 0,001$). Между дозой внесенного азота и густотой стояния растений наблюдалось небольшое, но достоверное взаимодействие (см. табл. 2).

В условиях выполненного эксперимента не было выявлено статистически значимого влияния азотного питания на показатель R₈₀₀, величина которого зависит от структуры листа, главным образом от размера клеток и межклеточного пространства. Однако небольшое, статистически значимое воздействие на этот индекс оказала густота стояния растений в посеве (см. табл. 2).

WRI был испытан в ряде исследований для оценки водного статуса растений (25, 33). М. Gutiérrez с соавт. (34) пришли к выводу, что WRI позволяет уловить генетические различия в устойчивости к засухе на уровне растительного покрова, сформированного сельскохозяйственной культурой, и что этот показатель может быть использован для быстрой и недорогой оценки водного статуса растений. Мы выявили, что WRI зависит и от дозы внесенного азота, и от густоты стояния растений в посевах. Причем плотность посева оказала более сильное влияние ($\eta^2 = 28,7\%$), чем дефицит азота ($\eta^2 = 9,5\%$) (см. табл. 2). Ранее было показано, что величина WRI связана с относительным содержанием воды, водным потенциалом листьев, устойчивой проводимостью и температурой растительного покрова при водном стрессе (35). На различных генотипах пшеницы выявлена тесная отрицательная линейная связь между зерновой продуктивностью и WRI и показана возможность прогнозировать урожайность растений, используя этот индекс водной полосы (38).

Оценка биомассы и индексов отражения листьев (ChlRI, SIPI, PRImod и FRImod) на разных стадиях развития растений позволила установить их тесную корреляционную связь с содержанием азота в почве (табл. 3). Характерно, что наблюдаемая на ранних этапах развития растений (стадия выхода в трубку) достоверная взаимосвязь между перечисленными признаками сохранялась и в более поздние сроки развития (стадия колошения). Как было показано ранее, использование NDVI не позволяло обнаружить различия в состоянии растений пшеницы на этапах развития более поздних, чем выход в трубку, при норме высева семян 500 и 600 шт/м² (см. табл. 1).

3. Ранговый коэффициент корреляции Спирмена между содержанием азота в почве, биомассой растений и индексами отражения листьев яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья, измеренными с помощью контактного сенсора в разные сроки вегетации (Меньковский филиал ФГБНУ АФИ, Ленинградская обл., Гатчинский р-н, 2019-2020 годы)

Показатель	Выход в трубку		Колошение	
	NR	V _{1р} , г	NR	V _{1р} , г
V _{1р}	0,95*		0,83*	
ChlRI	0,98*	0,91*	0,93*	0,76*
SIPI	-0,93*	-0,86*	-0,83*	-0,81*
R ₈₀₀	0,07	0,02	-0,59	-0,50
PRImod	-0,83*	-0,88*	-0,90*	-0,81*
ARImod	0,24	0,38	-0,28	-0,48
FRImod	-0,91*	-0,79*	-0,83*	-0,67*
WRI	0,63*	0,64*	0,72*	0,74*

Примечание. NR — доза азотных удобрений (от 0 до 200 кг/га с шагом 40 кг/га), V_{1р} — биомасса одного растения. Индексы отражения: ChlRI — хлорофилла, SIPI — отношения суммы каротиноидов к сумме хлорофиллов, R₈₀₀ — рассеяния света внутри листа, PRImod — фотохимический индекс отражения, ARImod — антоцианов, FRImod — флавоноидов, WRI — содержания воды. Коэффициент корреляции Спирмена определен для средних значений индексов отражения и биомассы растений V_{1р}, измеренных в 6 вариантах NR в 2-кратной повторности (всего 12 вариантов). Средние значения индексов отражения и V_{1р} для каждого варианта определены в выборке не менее 20 растений.

* Корреляция между признаками достоверна $p < 0,05$.

Оптические характеристики листьев пшеницы зависят от содержания хлорофилла (ChlRI), каротиноидов (SIPI), некоторых фенольных соединений (ARI и FRI), структуры листа (R₈₀₀) и содержания в них воды (WRI). Изменение каждого из перечисленных признаков сопровождается модификацией спектральных характеристик диффузного отражения листьев и изменением их колориметрических характеристик. Например, при уменьшении концентрации хлорофилла, поглощающего радиацию синего и красного диапазонов, в спектре диффузного отражения листа увеличивается доля желтой и сине-зеленой радиации, что неизбежно приводит к изменению колориметрических характеристик (цвета) листьев.

Полученные результаты свидетельствуют, что на ранних этапах развития растений, пока сформированный ими покров остается разомкнутым, NDVI позволяет достаточно точно диагностировать степень обеспеченности растений азотом и выявить участки поля, на которых растения хуже развиты. По результатам испытаний в полевых условиях (12, 17), NDVI тесно связан с биомассой растений и индексом листовой поверхности, что позволяет рассматривать этот вегетационный индекс как надежный показатель состояния растений, которое может быть оценено дистанционно. Однако по мере развития растений и формирования сомкнутого покрова результаты перестают быть надежными. Тесная связь между колориметрическими характеристиками сомкнутого растительного покрова и листьев верхнего яруса пшеницы (см. табл. 3) позволяет предполагать, что индексы ChlRI, PRI, FRI и WRI могут успешно применяться для дистанционной оценки участков посева, в которых сложился дефицит азотного питания.

Оценка состояния посевов по колориметрическим характеристикам их цифровых изображений. Для своевременной оценки потребности растений в азоте некоторые исследователи использовали изображения посевов, полученные с помощью цифровых камер, с последующей оценкой их состояния по колориметрическим характеристикам растительного покрова (6, 7, 33, 36). Методы цифровой визуализации также применяли для определения степени проективного покрытия почвы, которая тесно связана с индексом листовой поверхности, надземной биомассой и содержанием азота на ранних стадиях развития растений (19, 37, 38).

Согласно модели трехмерного цветового пространства CIELAB (21), величина *L* обозначает светлоту, *A* — величину красной/зеленой составляющей, *B* — величину желтой/синей составляющей. Максимальная величина, равная 100, соответствует идеальному отражающему рассеивателю (белый цвет), минимальная величина *L* равна нулю, что соответствует черному цвету. Оси *A* и *B* в цифровом выражении не имеют ограничений. Положительные значения *A* присущи объекту красного цвета, отрицательные — зеленого. Для объекта желтого цвета свойственны положительные значения *B*, для объекта синего цвета — отрицательные.

Как показали результаты исследования, колориметрические характеристики растительного покрова, сформированного растениями пшеницы в период перехода к колошению, существенно изменялись в зависимости от азотного питания. Дистанционная оценка колориметрических характеристик показала, что при увеличении дозы азота, внесенного перед посевом, с 40 до 200 кг/га, то есть в 5 раз, параметр *L* в среднем уменьшался с 48,3 до 33,2 (в 1,45 раза), *A* — возрастал с -9,7 до -7,7 (в 1,26 раза), *B* — уменьшался с 17,2 до 10,7 (в 1,64 раза). Измерения, выполненные с помощью контактного сенсора на верхних листьях в период колошения, также выявили вариабельность их колориметрических характеристик в зависимости от дозы внесенного перед посевом азота. При увеличении дозы азота от 40 до 200 кг/га параметр *L* изменился с 49,2 до 41,7 (в 1,18 раза), *A* — с -9,7 до -7,18 (в 1,35 раза), *B* — с 21,4 до 10,9 (в 1,96 раза). Полученные результаты свидетельствуют, что *B* служит наиболее чувствительным показателем, характеризующим обеспеченность растений азотом.

Статистически значимая корреляционная зависимость параметров *L*, *A*, *B* от дозы внесенного перед посевом азота имела место как при контактном определении колориметрических характеристик верхних листьев, так и при дистанционной оценке (табл. 4).

Значение параметра L трехмерной модели цветового пространства CIELAB по мере повышения дозы внесенного азота увеличивалось, то есть при дефиците азота сформированный растительный покров становился более светлым. Хроматические компоненты A и B также были чувствительны к изменениям азотного питания растений. Увеличение значений параметра B служит признаком дефицита азота и пожелтения листьев. Сдвиг в сторону больших отрицательных величин по оси A по мере увеличения дозы азотного питания свидетельствует, что листья пшеницы имеют более насыщенный зеленый цвет. При дистанционном обследовании посевов в начале стадии выход в трубку, когда растительный покров еще не сомкнулся, тесная связь между дозой внесенного перед посевом азота и хроматическими компонентами A и B отсутствовала ($p \leq 0,05$). Между параметром L и дозой азота в почве имела статистически достоверная связь ($r = -0,942$, $p = 0,0049$, $R^2 = 0,887$), по-видимому, как следствие увеличения вклада колориметрических характеристик фоновой почвы в посеве с менее развитыми растениями в колориметрические характеристики сформированного растительного покрова в целом.

4. Корреляционная связь между содержанием азота в почве и колориметрическими характеристиками посева и листьев яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья на стадии колошения (Меньковский филиал ФГБНУ АФИ, Ленинградская обл., Гатчинский р-н, 2019-2020 годы)

Колориметрический параметр CIELAB	r	p	R ²
Ld	-0,933	0,0065	0,811
Ad	0,977	0,0007	0,956
Bd	-0,977	0,0002	0,955
Lc	-0,943	0,0015	0,889
Ac	0,964	0,0019	0,930
Bc	-0,984	0,0001	0,969

Примечание. Параметры модели цветового пространства CIELAB, измеренные по цифровым изображениям посева дистанционно (Ld, Ad, Bd) и контактно у листьев верхнего яруса (Lc, Ac, Bc). Коэффициенты корреляции между дозой азотных удобрений NR и средними значениями дистанционно и контактно измеренных показателей модели LAB рассчитаны для 6 вариантов NR в 2-кратной повторности (всего 12 вариантов). Средние значения Lc, Ac и Bc определены для выборки из 20 растений в каждом варианте, средние значения Ld, Ad и Bd определены для трех изображений посева каждого из вариантов NR.

Взаимосвязь между параметрами трехмерной модели цветового пространства CIELAB, измеренными дистанционно с высоты 75-100 м (Ld, Ad и Bd) и контактно у листьев верхнего яруса (Lc, Ac и Bc) была линейной и особенно значимой между хроматическими компонентами Ld и Lc, а также Bd и Bc (табл. 5).

5. Уравнения связи между параметрами трехмерной модели цветового пространства CIELAB, полученными при дистанционном обследовании посева яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья (Ld, Ad, Bd) и при измерении с помощью контактного сенсора, выполненном на верхних листьях (Lc, Ac, Bc) (Меньковский филиал ФГБНУ АФИ, Гатчинский р-н Ленинградской обл., 2019-2020 годы)

Уравнение связи	r	p	R ²
$Ld = -31,463 + (1,585 \times Lc)$	0,845	0,034	0,714
$Ad = -2,541 + (0,715 \times Ac)$	0,969	0,0014	0,939
$Bd = 5,598 + (0,527 \times Bc)$	0,959	0,0006	0,919

Примечание. Варианты, повторения и размеры выборок см. табл. 4.

Хроматические компоненты A и B оказались тесно связаны с ChlRI, FRImod и PRImod ($p < 0,05$), тогда как величина L коррелировала с WRI и в меньшей степени — с ChlRI.

Наши результаты свидетельствуют, что на ранних этапах развития растений, пока сформированный ими покров остается разомкнутым, NDVI

позволяет достаточно точно диагностировать степень обеспеченности посевов азотом и выявить участки поля, на которых растения хуже развиты. По результатам многочисленных испытаний в полевых условиях (12, 17), NDVI тесно связан с биомассой растений и индексом листовой поверхности. Однако при формировании сомкнутого растительного покрова использование NDVI не позволяет надежно оценивать азотный статус растений. Тесная связь между колориметрическими характеристиками сомкнутого растительного покрова и листьев верхнего яруса пшеницы (см. табл. 5) дает основания предполагать, что индексы ChlRI, PRI, FRI и WRI могут быть успешно применены для дистанционной оценки участков посева, в которых сложился дефицит азотного питания.

Таким образом, установлена зависимость оптических характеристик сформированного яровой пшеницей сорта Дарья растительного покрова от густоты стояния растений и в наибольшей степени — от дозы внесенных азотных удобрений. Обнаружено, что вегетационный индекс NDVI с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0,85$, $p = 0,009$) отражает величину накопленной биомассы растений в первой половине вегетации вплоть до стадии ВВСН 31 (выход в трубку). При достижении проективного покрытия почвы 60 % и более достоверно оценить величину биомассы по NDVI нельзя. Использование вегетационного индекса ADVI также не позволяет получить надежную и достоверную информацию о состоянии растений яровой пшеницы и выявить участки посева, требующие внесения дополнительных удобрений. Показано, что при дефиците азота и высокой норме высева семян интенсивность работы фотосинтетического аппарата растений снижается, о чем свидетельствует более низкое содержание хлорофилла (ChlRI) в листьях. Помимо снижения интенсивности работы фотосинтетического аппарата растений, неблагоприятные условия вегетации приводят к уменьшению эффективности использования света в процессах фотосинтеза. Увеличение фотохимического индекса отражения (PRI_{mod}) и индекса флавоноидов (FRI_{mod}) свидетельствует о снижении эффективности использования света и угнетении роста растений. Предпосевное внесение азота способствовало более эффективному преобразованию света в фотохимических процессах фотосинтеза. Высокая норма высева семян (600 против 500 семян/м²) негативно влияла на эффективность использования света. Обнаружено, что индекс воды WRI возрастает в более плотном посеве и при дефиците азота. Такие изменения свидетельствуют о меньшем содержании воды и, вероятно, служат признаком старения листьев и снижения их фотосинтетической активности. Наиболее сильное негативное влияние на WRI оказала повышенная норма высева. Отрицательное воздействие повышенной нормы высева сохранялось в вариантах с предпосевным внесением азота. Диагностика состояния посевов по колориметрическим характеристикам (параметры L, A, и B трехмерной модели цветового пространства CIELAB) позволяет обнаружить изменения растительного покрова, связанные не только со степенью развития и густотой стояния растений, но и с особенностями спектральных характеристик диффузного отражения листьев растений.

ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт,

195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14,
e-mail: vyakushev@agrophys.ru, ykanash@yandex.ru, rdv_vgsha@mail.ru,
mail@agrophys.com, sblokhina@agrophys.ru ✉, alfiks@mail.ru,
blohin3k4@gmail.com, omitrofa@gmail.com, mjeka89@gmail.com

*Поступила в редакцию
11 октября 2021 года*

CORRELATION DEPENDENCES BETWEEN CROP REFLECTION INDICES, GRAIN YIELD AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF WHEAT LEAVES AT DIFFERENT NITROGEN LEVEL AND SEEDING DENSITY

V.P. Yakushev, E.V. Kanash, D.V. Rusakov, V.V. Yakushev, S.Yu. Blokhina[✉],
A.F. Petrushin, Yu.I. Blokhin, O.A. Mitrofanova, E.P. Mitrofanov

Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdanskii prosp., St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail vyakushev@agrophys.ru, ykanash@yandex.ru, rdv_vgsha@mail.ru, mail@agrophys.com, sblokhina@agrophys.ru (✉ corresponding author), alfiks@mail.ru, blohin3k4@gmail.com, omitrofa@gmail.com, mjeka89@gmail.com

ORCID:

Yakushev V.P. orcid.org/0000-0002-0013-0484

Kanash E.V. orcid.org/0000-0002-8214-8193

Rusakov D.V. orcid.org/0000-0001-8753-4440

Yakushev V.V. orcid.org/0000-0001-8434-5580

Blokhina S.Yu. orcid.org/0000-0002-0173-2380

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Supported financially from the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 19-29-05184)

Received October 11, 2021

Petrushin A.F. orcid.org/0000-0002-6482-8611

Blokhin Yu.I. orcid.org/0000-0002-2863-2734

Mitrofanova O.A. orcid.org/0000-0002-7059-4727

Mitrofanov E.P. orcid.org/0000-0002-1967-5126

doi: 10.15389/agrobiology.2022.1.98eng

Abstract

Improvement of crop remote sensing application in precision agriculture systems and development of algorithms for satellite and aerial imagery interpretation necessitate comparing remote sensing and ground-based survey data. This paper is the first to report data on spectral characteristics of the leaf diffuse reflection in spring wheat, their relationship with plant productivity, colorimetric characteristics and reflection indices of the crop vegetation cover, depending on the crop management technologies. The first research objective was to assess the dependence of crop canopy optical characteristics and productivity on seeding density and the rates of pre-treatment with nitrogen fertilizer. The second objective was to reveal correlations between the canopy remote sensing data and the leaf diffuse reflection parameters registered by a contact sensor (on the example of spring wheat *Triticum aestivum* L. cv. Daria). The plants were grown on the test plots (Menkovo experimental station of Agrophysical Research Institute, Leningrad Province, Gatchina District) in 2020–2021 years. In total, six test plots with an area of 100 m² were assigned. Nitrogen rates ranged from 0 (no fertilizers applied) to 200 kg/ha with increments of 40 kg/ha, and seeding rates of 500 and 600 seeds per m². The diffuse light reflection of leaves was registered in situ on stages BBCH 30–31 “booting” and BBCH 53–55 “earring” by a fiber-optical spectroradiometric system (Ocean Insight, USA) in the range from 350 to 1000 nm with a step size of 0.3 nm. After the reflectance spectra recording, the plants were dried to constant weight and each plant was weighed to assess correlations with the optical parameters of leaves. The light diffusion index R₈₀₀ was determined from the spectra of reflected radiation. The reflectance indices calculated were the following: ChRI (chlorophyll index), PRI (photochemical index), FRI (flavonoids index), WRI (water content index), ARI (anthocyanins content index) and FRI (flavonoids content index). These indices estimate the intensity of the photosynthetic apparatus function and the efficiency of light use in photosynthesis. The crop canopy remote sensing was performed at BBCH 25–27 (“tillering”), BBCH 30–31 (“booting”), BBCH 53–55 (“earring”), and BBCH 61–65 (“blossoming”) stages using two synchronized digital cameras Canon G7X (Canon Inc., Japan) mounted on a Geoscan 401 quadcopter (Geoscan, Russia). From a height of 75–120 m, the digital images were obtained in the visible and near infrared spectral ranges. The vegetation indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index) were calculated based on the optical characteristics. For quantitative interpretation of the colorimetric characteristics of leaves and the crop canopy, we used a three-dimensional model of the CIELAB color space. Plants were weighted during the growing season, and, after harvesting, the grain productivity was estimated for the plants sampled from 0.25 m² reference plots. The obtained results indicate that at the early stages of plant development when the vegetation cover remains open, NDVI characterizes the degree of nitrogen supply rather exactly and identifies areas with underdeveloped plants. However, with the development of plants and the formation of a closed vegetation cover this index fails to provide reliable results. ADVI also fails to provide reliable information about the state of spring wheat plants and identifies areas that require additional fertilize application. A close linear correlation between the rate of applied nitrogen fertilizer, the net productivity of plants and spectral characteristics of leaves measured in situ occurs until the late stages of development (BBCH 53–55 “earring”, BBCH 61–65 “blossoming”). Crop monitoring based on colorimetric characteristics made it possible to detect changes in the crop canopy associated not only with the plant development and crop density, but also

with the spectral characteristics of the diffuse reflection of plant leaves. A comparison of the remote and contact sensing data allows us to conclude that the ChIRI, PRI, FRI and WRI indices can successfully identify areas in which nitrogen deficiency has developed during the closed canopy formation, when the commonly used indices, for example, NDVI, fail to be reliable.

Keywords: spring wheat, reflection indices, spectral characteristics, remote monitoring, nitrogen deficiency, precision agriculture.

REFERENCES

1. Yakushev V.P., Dubenok N.N., Lupyan E.A. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, 16(3): 11-23 (doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23) (in Russ.).
2. Lu R., Van Beers R., Saeyns W., Li C., Cen H. Measurement of optical properties of fruits and vegetables: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 159: 111003 (doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.111003).
3. Gitelson A., Solovchenko A., Vica A. Foliar absorption coefficient derived from reflectance spectra: a gauge of the efficiency of in situ light-capture by different pigment groups. *Journal of Plant Physiology*, 2020, 254: 153277 (doi: 10.1016/j.jplph.2020.153277).
4. Fu P., Meacham-Hensold K., Guan K., Wu J., Bernacchi C. Estimating photosynthetic traits from reflectance spectra: A synthesis of spectral indices, numerical inversion, and partial least square regression. *Plant, Cell & Environment*, 2020, 43(5): 1241-1258 (doi: 10.1111/pce.13718).
5. Gaso D.V., Berger A.G., Ciganda V.S. Predicting wheat grain yield and spatial variability at field scale using a simple regression or a crop model in conjunction with Landsat images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 159: 75-83 (doi: 10.1016/j.compag.2019.02.026).
6. Yakushev V.P., Kanash E.V., Osipov Yu.A., Yakushev V.V., Lekomtsev P.V., Voropaev V.V. Optical criteria during contact and distant measurements sowing state of wheat and photosynthesis effectiveness on the background of deficit of mineral nutrition. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2010, 3: 94-101 (in Engl.).
7. Yakushev V.P., Kanash E.V. Evaluation of plants nitrogen status by colorimetric characteristics of crop canopy presented in digital images. *Proc. 8th European Conference on Precision Agriculture*. J.V. Stafford (ed.). Prague, 2011: 341-345.
8. Araus J.L., Casadesus J., Bort J. Recent tools for the screening of physiological traits determining yield. In: *Application of physiology in wheat breeding. Chapter 5*. M.P. Reynolds, J.I. Ortiz-Monasterio, A. McNab (eds.). CIMMYT, Mexico, 2001: 59-77.
9. Penuelas J., Pinol J., Ogaya R., Filella I. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13): 2869-2875 (doi: doi.org/10.1080/014311697217396).
10. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proc. Third ERTS Symposium. NASA SP-351. V. 1*. NASA, Washington, DS, 1973: 309-317.
11. Bannari A., Khurshid S.K., Staenz K., Schwatz J. Potential of Hyperion EO-1 hyperspectral data for wheat crop chlorophyll content extraction in precision agriculture. *Canadian Journal of Remote Sensing, Special Issue on Hyperspectral Remote Sensing*, 2008, 34(1): 139-157 (doi: 10.5589/m08-001).
12. Pinter Jr. P.J., Hatfield J.L., Schepers J.S., Barnes E.M., Moran M.S., Daughtry C.S.T., Upchurch D.R. Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69(6): 647-664 (doi: 10.14358/pers.69.6.647).
13. Oppelt N., Mauser W. Hyperspectral monitoring of physiological parameters of wheat during a vegetation period using AVIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(1): 145-159 (doi: 10.1080/0143116031000115300).
14. Gamon J.A. Reviews and syntheses: optical sampling of the flux tower footprint. *Biogeosciences*, 2015, 12(14): 4509-4523 (doi: 10.5194/bg-12-4509-2015).
15. Peñuelas J., Filella I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, 1998, 3(4): 151-156 (doi: 10.1016/S1360-1385(98)01213-8).
16. Gutiérrez-Rodríguez M., Reynolds M.P., Escalante-Estrada J.A., Rodríguez-González M.T. Association between canopy reflectance indices and yield and physiological traits in bread wheat under drought and well-irrigated conditions. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2004, 55(11): 1139-1147 (doi: 10.1071/ar04214).
17. Ji Z., Pan Y., Zhu X., Wang J., Li Q. Prediction of crop yield using phenological information extracted from remote sensing vegetation index. *Sensors*, 2021, 21(4): 1406 (doi: 10.3390/s21041406).
18. Yakushev V.P., Kanash E.V. Evaluation of wheat nitrogen status by colorimetric characteristics of crop canopy presented in digital images. *Journal of Agricultural Informatics*, 2016, 7(1): 65-74 (doi: 10.17700/jai.2016.7.1.268).

19. Yakushev V.P., Kanash E.V., Konev A.A., Kovtyukh S.N., Lekomtsev P.V., Matveenko D.A., Petrushin A.F., Yakushev V.V., Bure V.M., Rusakov D.V., Osipov Yu.A. *Teoreticheskie i metodicheskie osnovy vydeleniya odnorodnykh tekhnologicheskikh zon dlya differentsirovannogo primeneniya sredstv khimizatsii po opticheskim kharakteristikam poseva* [Theoretical and methodological foundations for the allocation of homogeneous technological zones for the differentiated use of chemicals according to the optical characteristics of sowing]. St. Petersburg, 2010 (in Russ.).
20. Matveenko D.A., Voropaev V.V., Yakushev V.V., Blokhin Yu.I., Blokhina S.Yu., Mitrofanov E.P., Petrushin A.F. *Agrofizika*, 2020, 1: 59-70 (doi: 10.25695/AGRPH.2020.01.09) (in Russ.).
21. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2-3): 337-354 (doi: 10.1016/s0034-4257(02)00010-x).
22. Pecuelas J., Barret F., Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 1995, 31(2): 221-230.
23. Merzlyak M.N., Gitel'son A.A., Chivkunova O.B., Solovchenko A.E., Pogosyan S.I. *Fiziologiya rastenii*, 2003, 50(5): 785-792 (in Russ.).
24. Merzlyak M.N., Solovchenko A.E., Smagin A.I., Gitelson A.A. Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and techniques for non-destructive assessment. *Journal of Plant Physiology*, 2005, 162(2): 151-160 (doi: 10.1016/j.jplph.2004.07.002).
25. Prasad B., Carver B.F., Stone M.L., Babar M.A., Raun W.R., Klatt A.R. Potential use of spectral reflectance indices as a selection tool for grain yield in winter wheat under Great Plains conditions. *Crop Science*, 2007, 47(4): 1426-1440 (doi: 10.2135/cropsci2006.07.0492).
26. Kanash E.V., Panova G.G., Blokhina S.Y. Optical criteria for assessment of efficiency and adaptive characteristics of biologically active preparations. *Acta Horticulturae*, 2013, 1009: 37-44 (doi: 10.17660/actahortic.2013.1009.2).
27. Kaufman Y.J., Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 261-270 (doi: 10.1109/36.134076).
28. *Colorimetry. 2nd edition*. Publication CIE no 15.2, Central Bureau of Commission Internationale de L'Eclairage, Vienna, Austria, 1986.
29. Garbulsky M.F., Peñuelas J., Gamon Y., Inoue Y., Filella I. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: a review and meta-analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 281-297 (doi: 10.1016/j.rse.2010.08.023).
30. Peñuelas J., Marino G., LLusia J., Morfopoulos C., Farré-Armengol G., Filella I. Photochemical reflectance index as an indirect estimator of foliar isoprenoid emissions at the ecosystem level. *Nature Communications*, 2013, 4: 3604 (doi: 10.1038/ncomms3604).
31. Gitelson A.A., Gamon J.A., Solovchenko A. Multiple drivers of seasonal change in PRI: Implications for photosynthesis I. Leaf level. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 191: 110-116 (doi: 10.1016/j.rse.2016.12.014).
32. Blackburn G.A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 58(4): 855-867 (doi: 10.1093/jxb/erl123).
33. Peñuelas J., Filella I., Biel C., Serrano L., Savé R. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(10): 1887-1905 (doi: 10.1080/01431169308954010).
34. Gutiérrez M., Reynolds M.P., Raun W.R., Stone M.L., Klatt A.R. Spectral water indices for assessing yield in elite bread wheat genotypes under well-irrigated, water-stressed, and high-temperature conditions. *Crop Science*, 2010, 50(1): 197-214 (doi: 10.2135/cropsci2009.07.0381).
35. Kendal D., Hauser C.E., Garrard G.E., Jellinek S., Giljohann K.M., Moore J.L. Quantifying plant colour and colour difference as perceived by humans using digital images. *PLoS ONE*, 2013, 8(8): e72296 (doi: 10.1371/journal.pone.0072296).
36. Wang Y., Wang D., Shi P., Omasa K. Estimating rice chlorophyll content and leaf nitrogen concentration with a digital still color camera under natural light. *Plant Methods*, 2014, 10: 36 (doi: 10.1186/1746-4811-10-36).
37. Jia L., Chen X., Zhang F., Buerkert A., Römheld V. Use of digital camera to assess nitrogen status of winter wheat in the northern China Plain. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, 27(3): 441-450 (doi: 10.1081/pln-120028872).
38. Lee K.J., Lee B.W. Application of color indices and canopy cover derived from digital camera image analysis to estimate growth parameters of rice canopy. *Proc. 8th European Conference on Precision Agriculture*. J.V. Stafford (ed.). Prague, 2011: 111-121.