

ОПТИЧЕСКИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ ОТРАЖЕНИЯ КАК ОДИН ИЗ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА И ЦИФРОВИЗАЦИИ СЕЛЕКЦИОННЫХ ПОСЕВОВ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ

С.Д. ВИЛЮНОВ, ORCID ID: 0000-0002-7373-5951

В.С. СИДОРЕНКО, кандидат сельскохозяйственных наук,
ORCID ID: 0000-0002-9921-6105

Е.В. ЖУРАВЛЕВА*, доктор сельскохозяйственных наук, профессор РАН,
ORCID ID: 0000-0002-3253-0730

Н.А. СТЕПАНОВА, старший научный сотрудник,
ORCID ID: 0009-0005-5219-143X

М.А. ШАПОРОВА, научный сотрудник, ORCID ID: 0009-0004-9928-2868

ФГБНУ ФНЦ ЗЕРНОБОБОВЫХ И КРУПЯНЫХ КУЛЬТУР

*РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК, МОСКВА

Аннотация. В статье рассматривается возможность оперативного получения дополнительной цифровой фенотипической информации селекционных образцов растений озимой и яровой мягкой пшеницы, с целью получения статистически значимых критериев в анализе на различия. Выявлена достоверность цифровых данных получаемых в результате обследования приборами для измерения и оценки содержания хлорофилла в листьях растений, а также раскрыта объективность анализа через различные вегетационные индексы, получаемые по цифровой фотографии посева. Установлено, что в случае фотосъемки селекционных опытов одним устройством – вегетационные индексы более объективно выявляют различия (влияние варианта прослеживается на 65...97% уровне), чем портативные хлорофиломеры (38...69%). Работа через смартфон с вегетационными индексами является более экономичной альтернативой мультиспектральным камерам и такой подход дает возможность объективно дифференцировать селекционный материал. Отмечено, что весенние показатели RGB-индексов с цифровой фотографии, способны сравнить и оценить перезимовку посевов. Обнаружено, что визуальный анализ распределения частот индексов отражения выявляет проявление фенотипических особенностей образцов, как на фоне различной пигментации разновидностей (индексы EXG, GLI, NGRDI), так и в проявлении зеленого хлорофиллового (RGBVI, VARI) пигмента, характеризующего фотосинтез.

Ключевые слова: вегетационные индексы, селекция, селекционные образцы, фенотипирование, анализ цифровых изображений.

Для цитирования: Вилюнов С.Д., Сидоренко В.С., Журавлёва Е.В., Степанова Н.А., Шапорова М.А. Оптические вегетационные индексы отражения как один из методов мониторинга и цифровизации селекционных посевов мягкой пшеницы. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2025. № 4 (56):145-158 DOI: 10.24412/2309-348X-2025-4-145-158

OPTICAL VEGETATION REFLECTION INDICES AS ONE OF THE METHODS OF MONITORING AND DIGITALIZATION OF BREEDING CROPS OF SOFT WHEAT

S.D. Vilyunov, V. S. Sidorenko, E.V. Zhuravleva*, N.A. Stepanova, M.A. Shaporova

FSBSI FEDERAL SCIENTIFIC CENTER OF LEGUMES AND GROAT CROPS

* RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, Leninskii prosp., 14, Moscow

Abstract: *The article considers the possibility of quickly obtaining additional digital phenotypic information from breeding samples of winter and spring soft wheat plants in order to obtain statistically significant criteria in the analysis of differences. The reliability of digital data obtained as a result of examination by devices for measuring and evaluating the chlorophyll content in plant leaves has been revealed, as well as the objectivity of analysis through various vegetation indices obtained from digital photographs of crops. It was found that in the case of photographing breeding experiments with one device, vegetation indexes more objectively reveal differences (the effect of the variant can be traced to 65...97% higher) than portable chlorophyllometers (38...69%). Using a smartphone with vegetation indexes is a more economical alternative to multispectral cameras, and this approach makes it possible to objectively differentiate breeding material. It is noted that the spring RGB indices from digital photography are able to compare and evaluate the overwintering of crops. It was found that visual analysis of the frequency distribution of reflection indices reveals the manifestation of phenotypic features of the samples, both against the background of different pigmentation of varieties (EXG, GLI, NGRDI indices) and in the manifestation of green chlorophyll (RGBVI, VARI) pigment characterizing photosynthesis.*

Keywords: vegetation indexes, breeding, breeding samples, phenotyping, digital image analysis.

Введение

Использование фотосинтетически активной радиации (ФАР) растением – выступает одним из основных факторов продуктивности растений и специфично в своем проявлении у различных видов растительности за вегетацию. Так же достоверные различия отмечают и на фенотипически однородных сортах, как в динамике, так и в конкретные фазы развития растений [1, 2]. Показатель ФАР отражает процесс роста и служит биометрическим показателем, который достаточно просто фиксировать, как для отдельных частей растения, так и на поле, в общем посеве. Данные по его динамике могут быть использованы в разработке алгоритмов управления продуктивностью растений в агроценозе. В последние годы для этих целей активно используют портативные приборы быстрого измерения и оценки содержания хлорофилла в листьях растений. Хлорофилломеры (N-тестеры) показывают коэффициент содержания хлорофилла в ткани листьев на основе пересчета пропускания спектра двух электромагнитных волн, где одна волна компенсирует различия механического характера (разную толщину ткани) при поглощении другой хлорофиллом. А соотношения спектрального отражения нескольких электромагнитных волн с фотосинтезирующих поверхностей в агроценозе позволили сформулировать множество вегетационных индексов, характеризующих растительный покров. Самый известный из них – нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (normalized difference vegetation index), сформулированный как соотношение между разницей в красном и инфракрасном излучении, с их суммой. Этот индекс посредством спектрального канала NIR, невидимого для человека, компенсирует влияние интенсивности других оптических каналов от зенитного угла Солнца. В последние годы для оценки содержания зеленого хлорофилла и других пигментов разработано более 150 вегетационных индексов отражения для разных условий. Кроме этого еще больше существует спектральных индексов отражения для оценки неживых объектов. Каждый из них позволяет учитывать специфику развития, фотосинтетическую активность, накопленную биомассу в различные фазы развития растений, что позволяет дистанционно анализировать состояние растительного покрова и оценивать продуктивность сельского и лесного хозяйства, следить за изменениями климатических условий и динамикой различных экосистем. [3, 4, 5].

Физика процесса основана на том, что живые растения отражают излучение в ближней инфракрасной спектральной области, куда приходится примерно половина всей поступающей солнечной энергии. Это вызвано тем, что энергия фотонов с длиной волны более 700 нм (инфракрасное, тепловое излучение) слишком мала для синтеза органических молекул. Соответственно, поглощение на этих длинах волн привело бы к перегреву клеток растений, излишнему расходу влаги и, возможно, к повреждению тканей. В то же время высокоэнергичные фотоны с длиной волны 190...280 нм (ультрафиолетовое излучение типа

УФ-С/UVC) даже в маленьких дозах вызывают разрушение белка, липидов и фотосинтетических пигментов в клетках листьев, что приводит к их гибели. При этом наблюдали и нелетальные эффекты воздействия ультрафиолетовыми лучами типа УФ-А/UVA (320...400 нм, 95% всего ультрафиолета солнечного излучения), вызывающие изменение морфологии и формирующие более кустистые и компактные формы, с массивными, мясистыми листьями. Так же отмечено, что кратковременное воздействие умеренными дозами УФ-А и УФ-В (280...320 нм) в сочетании с синим спектром стимулирует фотосинтез, хотя и зависит от вида растения и условий облучения. В целом же растениями для процесса фотосинтеза используется спектр от 400 до 700 нм, в синем (400...500 нм, 2,6...2,8 эВ) и красном (600...700 нм, 1,7...2,0 эВ) спектре, пик приходится на 445 и 660 нм. Однако у зеленого света и близкого к нему желтого (500...600 нм, 2,19...2,48 эВ) тоже прослеживается важная роль в общем формировании продуктивности растения. Зеленый свет проникает глубже, к нижним листьям, и в более глубокие слои листа, куда не долетают ни красный, ни синий, стимулируя и активируя большее количество хлоропластов, что актуально и для находящихся в тени растений. Фиксация показателей уровня поглощения растениями различного спектрального излучения в течение вегетации через вегетационные индексы на основе видимого спектра RGB (от 380 до 780 нм) позволяет прогнозировать урожайность посевов [6, 7, 8]. Но в селекционном процессе на продуктивность и адаптивность к зоне возделывания этот фенотипический признак слабо задействован, так как для работы с малыми селекционными делянками посевов (менее 1...10 кв.м) потомств отдельных растений необходима съемка с высоким разрешением дорогостоящим мультиспектральным оборудованием. Ранее нами выявлено, что динамика проявления показателей вегетационных индексов, на основе NIR-канала, включая RGB-индекс зеленых листьев GLI, позволяет выделять уникальность в селекционных образцах единого гибридного происхождения, не отличимых по визуальным фенотипическим признакам, что позволяет включать вегетационные индексы в фенотипирование селекционного материала и оценку по качеству перезимовки сортообразцов озимых культур. То есть, включение RGB индексов отражения, получаемых с фотографии можно включать в комплексную оценку селекционного материала. Однако, использование таких фотографий требует определенных навыков сбора, обработки и анализа цифровых данных [8, 9].

Цели исследования – провести анализ объективности цифровых характеристик фотосинтезирующей активности селекционных посевов мягкой пшеницы, получаемых с различных портативных устройств с целью их применения в селекционном процессе. Выявить возможность получения достоверных показателей вегетационных индексов с цифровых фотографий посевов с целью фенотипирования селекционных образцов мягкой пшеницы

Условия, материалы и методы

В исследовании использовали данные, полученные с делянок (площадь учетной делянки 10 кв.м.) конкурсного испытания озимых и яровых зерновых культур ФНЦ ЗБК (2025 г). Особенностью полевых опытов озимых культур была осень 2024 г., которая характеризовалась засушливостью, за сентябрь выпало всего 10 мм осадков (по данным сайта www.pogodaiklimat.ru) при норме 57 мм, семена долго не прорастали и растения кустились только весной 2025 г. (рис. 1).

Для измерения содержания хлорофилла в листьях были сняты показания двумя различными портативными измерителями хлорофилла – ССМ-200 plus (дата – 25.06.2025) и SPAD-502Plus (дата – 27.06.2025). Методика измерения приборами включала замер по центру флагового листа у пяти удаленных (10...30 см) друг от друга растений одной делянки. N-Тестеры определяют относительное количество присутствующего количества хлорофилла измерением оптической плотности листа в двух диапазонах длин волн, вследствие поглощения в красном (R, 600...700 нм) и ближней инфракрасной области (NIR, 740...1400 нм.). Используя два показателя спектрального поглощения, устройство рассчитывает числовое значение, пропорциональное хлорофиллу (прямая зависимость), содержащемуся в листе.

Одновременно проводили пятикратную съемку варианта на два смартфона (Xiaomi Redmi Note 9 Pro и Xiaomi Mi A2). Настройки смартфонов были типовые, обусловленные их техническими характеристиками. Съемку соответствующей деланки вели горизонтально к поверхности, на расстоянии 30...40 см от растений.

Статистическую обработку цифровых данных проводилась в MS Excel надстройкой Agcstat «С/Х статистика, ФГБНУ ФНЦО». Расчет и графическую визуализацию вегетационных индексов с полученных фотоматериалов выполняли в программной среде на языке Python 3 с применением библиотеки для работы с растровой графикой PIL (Python Imaging Library) и NumPy (Numerical Python). Все обрабатываемые фотоматериалы (RGB – исходное цветное изображение) предварительно преобразовывали к стандартному разрешению 600000...1000000 пикселей на фотографию (не более 1000×1000), в зависимости от оригинала. В исследовании при обработке трех основных каналов (R – красный канал; G – зеленый канал; B – синий канал) и дополнительного серого (Grey – микширование RGB в серый цвет) были получены соответствующие вегетационные индексы: EXG – избыточный индекс зеленого (EXcess Green index); GLI (VDVI) – индекс зеленых листьев (Green Leaf Index) или вегетационный индекс разницы в видимом диапазоне (Visible-band Difference Vegetation Index); RGBVI – красный-зеленый-синий вегетационный индекс (Red-Green-Blue Vegetation Index); NGRDI – нормализованный разностной зеленый красный индекс (Normalized Green-Red Difference Index); TGI – треугольный вегетационный индекс зелёности листьев (Triangular Greenness Index).

Результаты и обсуждение

Оптические индексы растительности, основанные на цветовом пространстве RGB, были рассчитаны путем объединения нескольких цветовых каналов (рис.1, 2), в соответствии со спектральными характеристиками растительности по формулам вегетационных индексов.

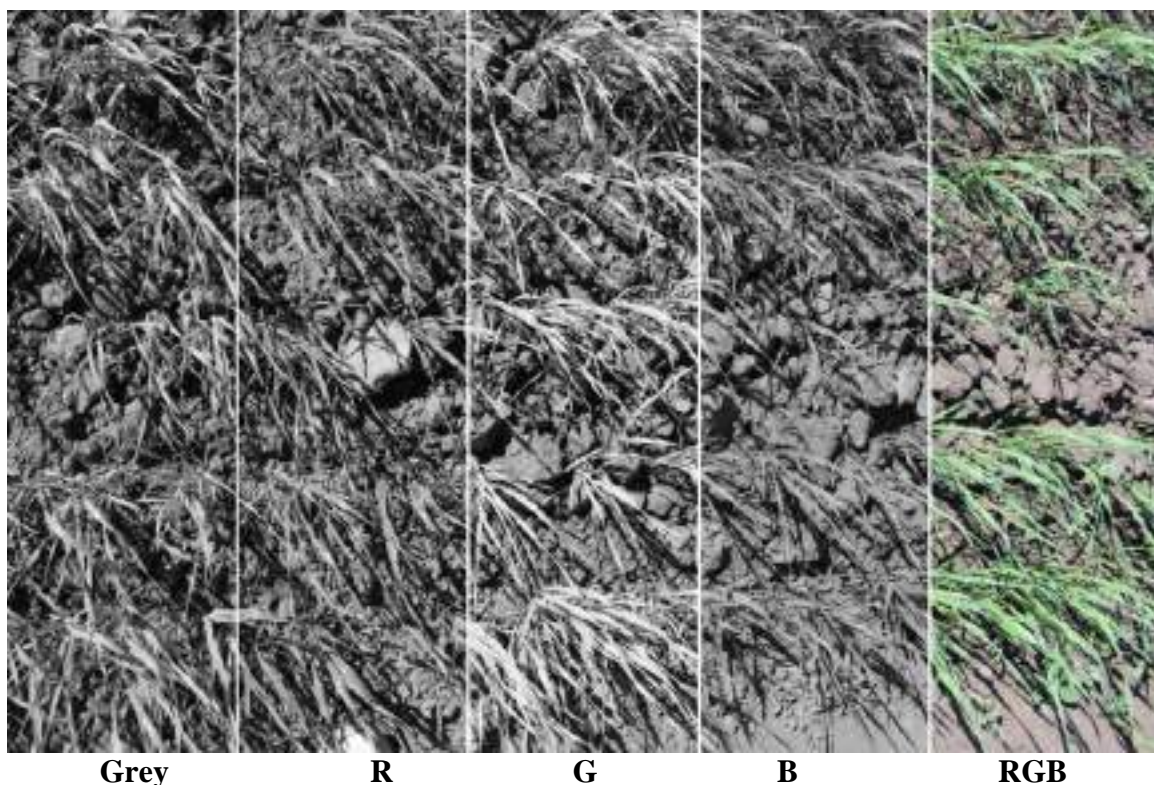


Рис. 1. Визуализация RGB каналов фотографии зеленых растений озимой мягкой пшеницы в фазе куцения с элементами почвы, ФГБНУ ФНЦ ЗБК, 2025 г.

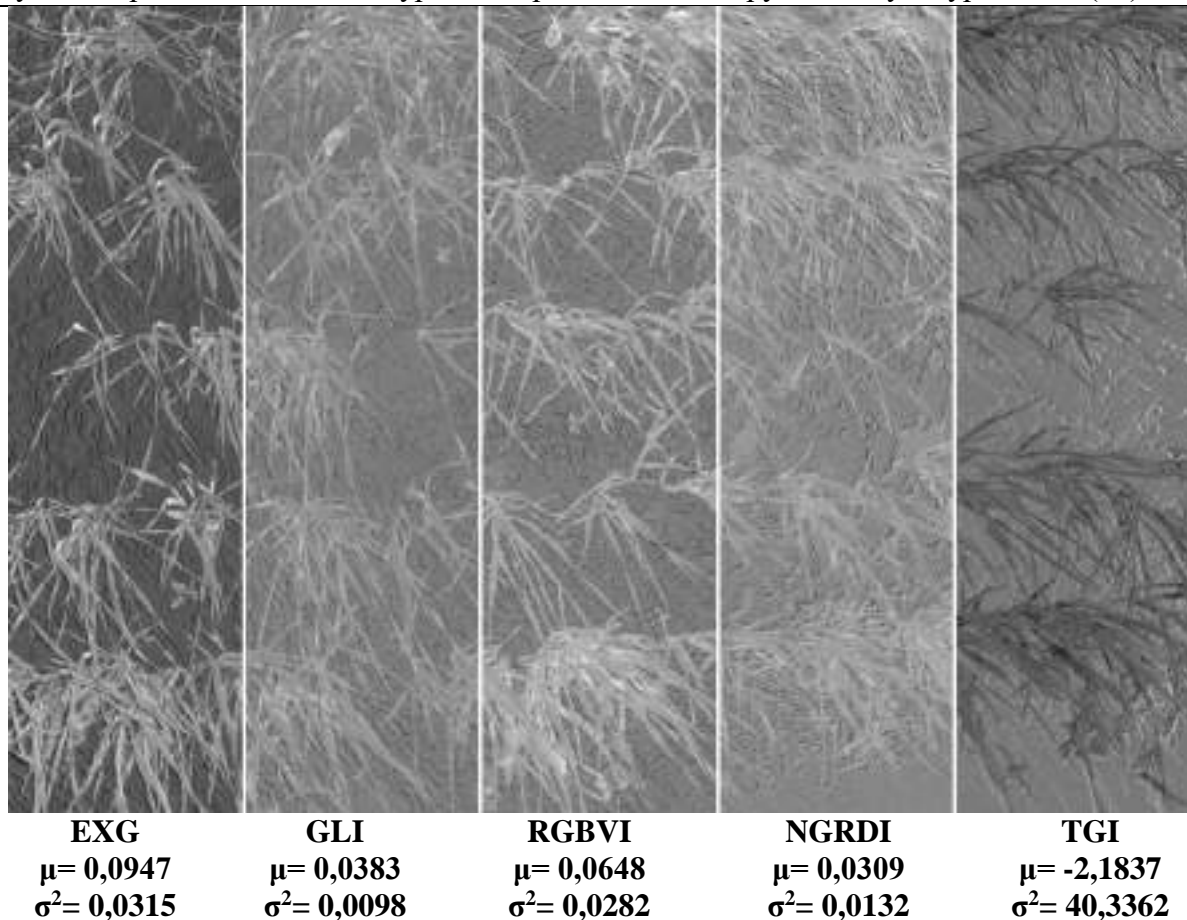


Рис. 2. Визуализация различных вегетационных индексов, полученных с RGB фотографии озимой пшеницы в фазе кущения, ФНЦ ЗБК, 2025 г.

Анализируя рисунок 2 в сравнении с рисунком 1, можно судить о значительном сглаживании оптическими индексами контрастного фона не живых (не зеленых) объектов в виде почвы в градациях базовых цветов RGB. Это хорошо прослеживается и в распределении частоты показателей отдельных цветовых каналов и индексов (рис. 3).

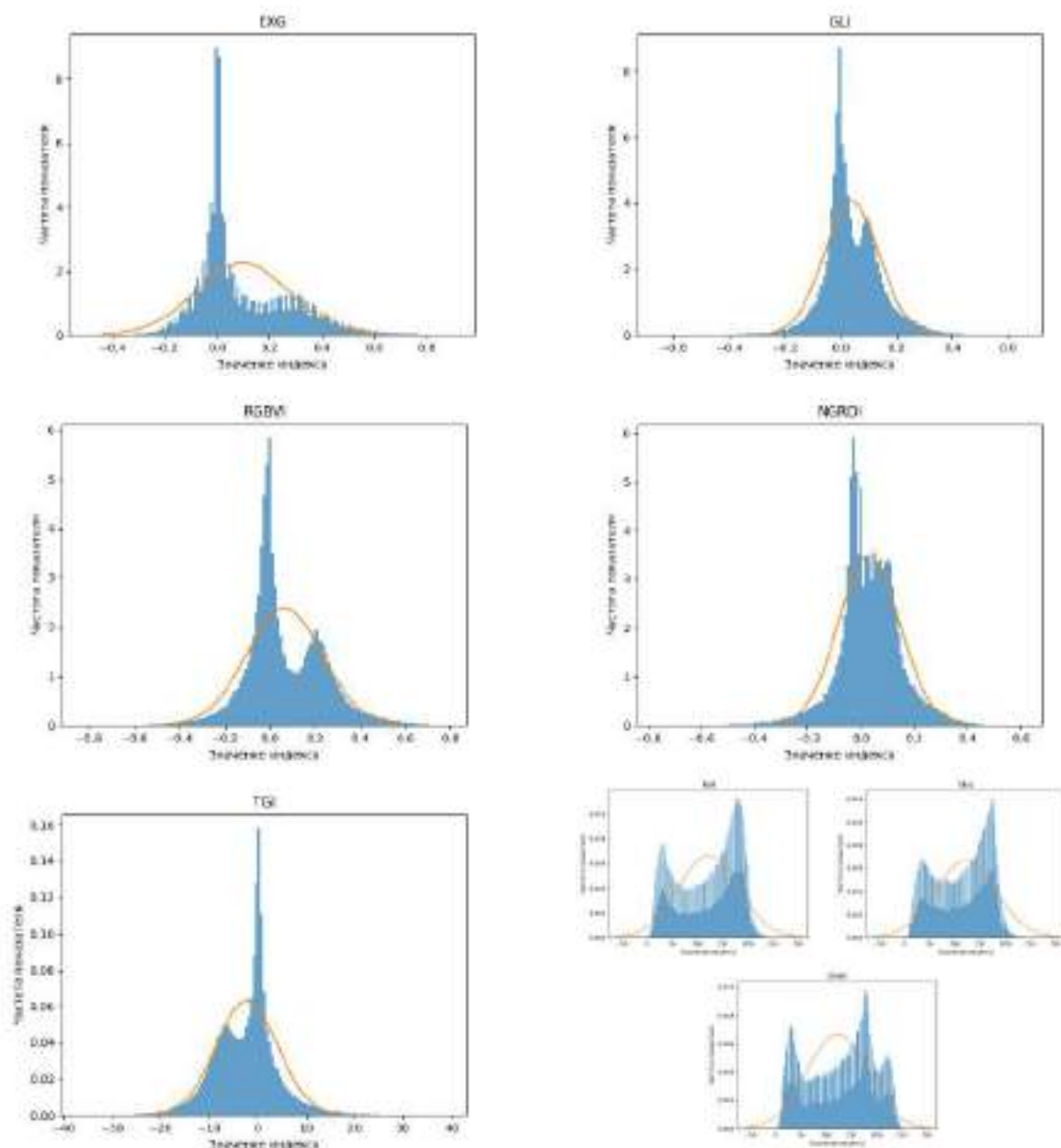


Рис. 3. Распределение показателей частоты различных вегетационных индексов и RGB каналов, полученных по цветной фотографии озимой пшеницы в фазе кущения, в сравнении с нормальным распределением, ФНЦ ЗБК, 2025 г.

Оптические индексы сглаживают на изображении посева перепады частот проявления объектов не растительного происхождения (почва). Кроме анализа селекционного материала, этот подход можно применять в алгоритмах машинного зрения, при формировании пиксельных зон растительности, вычлняя не вегетирующие объекты. Из наглядного представления частот проявления величины индекса следует, что цветовые каналы (рис. 3, Red, Green, Blue) и вегетационные индексы (рис. 3, EXG, GLI, RGBVI, NGRDI и TGI) имеют два пика в своем распределении и связаны с фенотипическими особенностями зеленых растений и черной почвы. Наложение двух градаций, нормально распределённых цветовых величин (зеленых вегетирующих растений и других цветовых объектов), позволяет разбить общее нормальное распределение показателей индексов на группы со своими средними и дисперсиями для оценки интенсивности развития растений.

В целях изучения объективности анализа распределения показателей частоты для сплошного массива вегетирующих растений, при фенотипировании селекционных линий RGB-индексами, была обработана общая фотография делянок образцов озимой мягкой

пшеницы, отличающихся цветовой гаммой их разновидностей (рис. 4). Разновидности эритроспермум (*Erytrospermum* – неопушённый, остистый, белого цвета и остистыми отростками колос) и ферругинеум (*Ferrugineum* – неопушённый, остистый, с красным цветом колоса и остистых отростков) в фазе налива отличаются цветом. В этой фазе растения еще фотосинтезируют, но уже имеют проявление уникальной индивидуальной окраски. Для изучения сглаживания чувствительности к отражению синего спектра в анализ был включен дополнительный индекс устойчивости к видимой атмосфере VARI (Visible Atmospherically Resistant Index).

Анализ цветовых значений пикселей выявил, что RGB каналы имеют нормальное гауссово распределение с характерным разбросом частот, при наличии небольшого отклонения от средней величины. В то же время, на некоторых индексах отмечено значительное смещение максимальной частоты от среднего значения, что вызвано преобладанием на снимке одной разновидности культуры (*Ferrugineum* – правые две делянки, рис. 4). Откуда RGB-индексы можно использовать в привязке к уникальному цветовому признаку. Но исследователю важна не только уникальность сортового посева, отличающегося тонкими цветовыми градациями, вследствие присутствия цветовых пигментов и антоциана, но имеет значение и зеленая визуальная компонента, характеризующая уровень хлорофилла в растении и, соответственно, продуктивность. Вегетативные индексы VARI и NGRDI показали более выразительное совмещение с нормальным распределением их величин, с одновременной контрастной визуализацией разновидностей (рис. 4), при равномерном проявлении отражения зелёного спектра фотосинтезирующими растениями. Кроме того, индекс VARI, в своем среднем значении, имел частичную дифференциацию, то есть индекс более универсален и объективно улавливает интенсивность отражения зеленого спектра с меньшей дифференциацией на другие окраски.

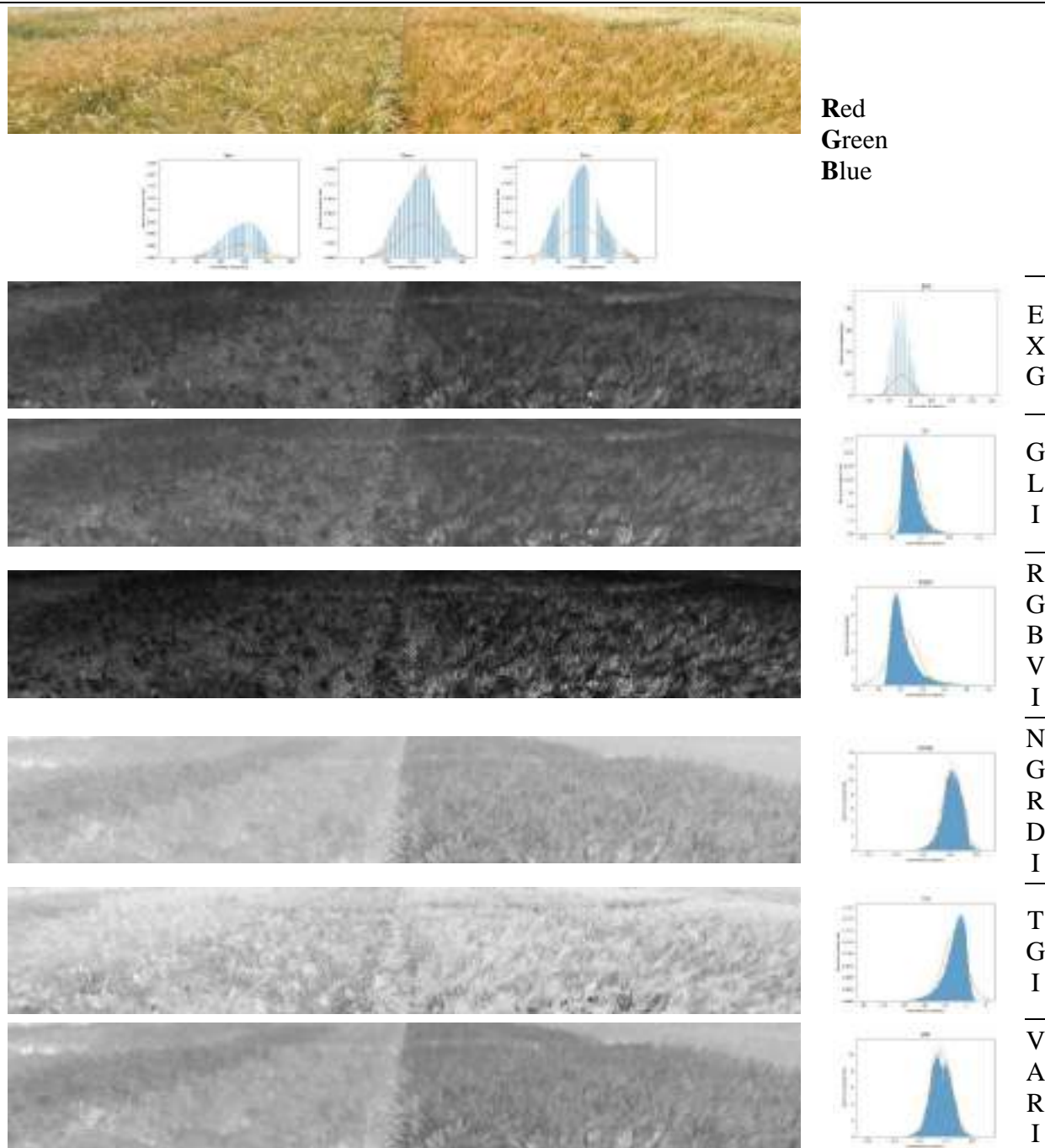


Рис. 4. Делянки озимой мягкой пшеницы (разновидность *Erytrospermum* и *Ferrugineum*) в деляночном массиве, RGB-оригинал и визуализация вегетационных индексов с распределением частот их проявления в сравнении с нормальным распределением, ФНЦ ЗБК, 08.07.2025 г.

В фазе цветения и налива на шести фенотипически различных селекционных образцах озимой мягкой пшеницы был осуществлен замер уровня хлорофилла двумя различными портативными приборами (табл. 1): CCM-200 plus и SPAD-502 Plus.

**Характеристики показателей сортообразцов и дисперсионный анализ данных
портативных хлорофилломеров на селекционных делянках озимой мягкой пшеницы,
ФНЦ ЗБК, 2025 г.**

№	Сортообразец	Среднее		Дисперсия		Ошибка		Точность, %	
		CCM-200 plus	SPAD-502Plus	CCM-200 plus	SPAD-502Plus	CCM-200 plus	SPAD-502Plus	CCM-200 plus	SPAD-502Plus
1	Мильтурум*	23,88	46,48	4,62	5,95	0,96	1,09	4,02	2,35
2	Тимирязевская одностебельная *	37,92	46,96	64,10	30,03	3,58	2,45	9,44	5,22
3	Аквамарин*	34,70	50,26	20,06	18,28	2,00	1,91	5,77	3,80
4	Скипетр*	42,18	54,94	58,37	8,01	3,42	1,27	8,10	2,30
5	Лютесценс 132*	48,14	49,88	23,36	20,81	2,16	2,04	4,49	4,09
6	Аквамарин**	38,88	50,88	22,02	6,89	2,10	1,17	5,40	2,31
Корреляция		0,55							
Прибор	Сред. .	Fфакт при Fтабл05=2,7	Ош. ср.	Точ. опыта, %	НСР 05	Влияние фактора, %			
						Случ.	Вар-та	Повт.	
CCM-200 plus	37,62	11,33	2,42	6,42	7,15	24,08	68,21	7,71	
SPAD-502Plus	49,90	3,30	1,69	3,38	4,99	47,85	39,42	12,73	

Примечание: *) Рядовой посев; **) Широкоярдный посев

Коэффициент корреляции Пирсона между показаниями разных приборов по уровню хлорофилла проявил умеренное значение $r = 0,56$. Проведенный дисперсионный анализ выявил существенные различия вариантов и наличие сортовой специфики. А содержание хлорофилла позволили определить образцы, имеющие уникальные индивидуальные значения на 95% уровне значимости. Можно также сделать вывод, что умеренный коэффициент корреляции между средними значениями приборов и существенное влияние случайных факторов (24...48%) требует обязательность определенного навыка при снятии показаний.

Одновременно со снятием показаний приборов была осуществлена съемка двумя разными смартфонами Xiaomi Mi A2 и Xiaomi Redmi Note 9 Pro, в целях получения RGB-вегетационных индексов (рис. 5, табл. 2).



Xiaomi Mi A2 (3000 x 4000 pix)



Xiaomi Redmi Note 9 Pro(2088 x 4640 pix)

Рис. 5. Пример фотографий с разных смартфонов озимой мягкой пшеницы сорта Акварин в фазе начала налива, ФНЦ ЗБК 27.06.2025 г.

Таблица 2

Характеристики показателей вегетационных индексов сортообразцов и дисперсионный анализ данных обработки фотоматериала с селекционных делянок озимой мягкой пшеницы, ФНЦ ЗБК, 2025 г.

№	Сортообразец	Среднее EXG		Среднее GLI		Среднее VARI		Среднее RGBVI	
		Устр.1	Устр.2	Устр.1	Устр.2	Устр.1	Устр.2	Устр.1	Устр.2
1	Мильтурум*	0,29	0,37	0,30	0,34	0,24	0,24	0,57	0,62
2	Тимирязевская одностебельная*	0,25	0,24	0,25	0,22	0,19	0,21	0,51	0,43
3	Акварин*	0,14	0,25	0,12	0,20	0,27	0,31	0,24	0,38
4	Скипетр*	0,23	0,32	0,24	0,25	0,22	0,28	0,47	0,46
5	Лютесценс 132*	0,26	0,26	0,23	0,20	0,21	0,23	0,44	0,38
6	Акварин**	0,17	0,18	0,16	0,13	0,21	0,16	0,32	0,25
Корреляция между устройствами		0,62		0,75		0,71		0,74	
Fфакт при Fтабл05=2,7		210,18	216,42	110,43	411,73	10,81	30,62	144,49	388,03
Ош. ср.		0,004	0,005	0,006	0,003	0,010	0,007	0,010	0,006
Точ. опыта, %		1,72	1,68	2,87	1,55	4,65	3,07	2,44	1,46
НСР 05		0,011	0,013	0,018	0,010	0,030	0,022	0,031	0,02
Влияние, %	Повторений	2,269	2,207	1,471	1,946	10,796	2,758	0,908	2,15
	Вариантов	95,91	96,02	95,09	97,11	65,11	86,01	96,42	96,85
	Случайное	1,83	1,77	3,44	0,94	24,10	11,23	2,67	0,99

Примечание: * - Рядовой посев; ** - Широкорядный посев; Устр.1 - Xiaomi Mi A2 и Устр.2 - Xiaomi Redmi Note 9 Pro

Анализируя полученные значения индексов (табл. 2), можно сделать вывод, что влияние специфики вариантов значительно (более 90 %, на большинстве вегетационных индексов). Таким образом, RGB-индексы более объективно позволяют зафиксировать

В то же время умеренно-сильная корреляция полученного индекса между устройствами предполагает включение в объективный анализ получение данных только с одного устройства. В целях проверки этого предположения была проведена дополнительная одновременная съемка места делянки с 4 разных устройств: Смартфон Apple iPhone 15, Смартфон Xiaomi Mi 8, Смартфон Xiaomi Mi A2 и Фотоаппарат Canon EOS 600D Kit. (рис. 6, табл. 3).

Несмотря на очень сильную положительную связь между различными индексами по устройствам ($r=0,99...0,99$), в проявлении RGB-индексов отмечена очень высокая вариация (29...79 %). Что подтверждает включение в фенотипический анализ данных вегетационных индексов отражения, полученных только с одного устройства, через оригинальные, не подвергшиеся дополнительной обработке фотографии.



Apple iPhone 15

Xiaomi Mi 8

Xiaomi Mi A2

Canon EOS 600D Kit

Рис. 6. Пример разной цветопередачи при одновременной съемке одного места селекционной делянки яровой мягкой пшеницы в фазе начала налива на разные устройства, ФНЦ ЗБК 18.07.2025 г.

Таблица 3

Величины вегетационных индексов RGB и их корреляция между разными устройствами при съемке одного места посева яровой мягкой пшеницы, ФНЦ ЗБК, 18.07.2025 г.

Марка Устройства	GLI	NGRDI	VARI	EXG	RGBVI	TGI
Xiaomi Mi A2	0,012	0,071	0,158	0,139	0,196	-6,761
Xiaomi Mi 8	0,029	0,100	0,147	0,308	0,352	-13,381
Apple iPhone 15	0,018	0,191	0,499	0,301	0,371	-12,479
Canon EOS 600D Kit	0,012	0,067	0,113	0,205	0,257	-9,224
Вариация, %	29,05	53,84	78,92	33,85	27,90	29,11
Корреляционная матрица	<i>Xiaomi Mi A2</i>		<i>Xiaomi Mi 8</i>		<i>Apple iPhone 15</i>	<i>Canon EOS 600D Kit</i>
<i>Xiaomi Mi A2</i>	1					
<i>Xiaomi Mi 8</i>	0,9999		1			
<i>Apple iPhone 15</i>	0,9999		0,9997	1		
<i>Canon EOS 600D Kit</i>	0,9999		0,9999	0,9997	1	

В то же время многие авторы отмечают, что для формирования более объективной характеристики индексов в RGB-пространстве необходимо провести нормирование [11], то есть получать RGB-индексы уже после предварительной обработки снимков в цветовом пространстве HSV (Hue, Saturation, Value). В зоне HSV цвета формируются на основе трёх компонентов: оттенка (тип цвета), насыщенности (его интенсивность) и значения (его яркость) [11, 12], при этом S и V отвечают за «количество» белого и черного в конкретном цвете и имеют умеренную корреляционную связь. А так как значения полученных индексов

(см. табл. 3), имеют сильную линейную зависимость между разными устройствами, необходимо исходный фотоматериал подвергать цветовой коррекции. Показатели вегетационных RGB-индексов основаны на линейной регрессии в пространстве HSV через коррекцию насыщенности и яркости $S_y = f(S_x, V_x)$ и оттенка цвета $V_y = f(S_x, V_x)$ [12, 13]. Откуда аппроксимируя оригинальные фотоматериалы через эталонные белые и черные цвета, можно получать единые величины с любых фотокамер. Это раскрывается вариацией вегетационных индексов одного места посева с разных устройств и имеющих прямую регрессионную зависимость (табл. 3, $r=0,99$).

Заключение

Характеристики вегетационных индексов отражения, полученных с фотографии, в большей степени отражают фенотипическую уникальность сортообразца в посеве ($r=0,62...0,75$, влияние варианта $65,1...97,1\%$), чем прибор-хлорофилломер ($r=0,56$ между приборами, влияние варианта $39,4...68,2\%$).

В анализе на фенотипические отличия селекционных образцов следует задействовать данные, полученные с одного и того же устройства (показатели портативного хлорофилломера, вегетационные индексы с необработанных фотографий с камеры смартфона).

Анализ распределения частот значений вегетационных RGB-индексов по цифровой фотографии выявил дифференциацию здоровой растительности и неживых объектов.

Визуальные фенотипические различия селекционных образцов (различная пигментация разновидностей озимой пшеницы) фиксируется вегетационными индексами (EXG, GLI, NGRDI) при стабильном проявлении зеленого хлорофиллового (RGBVI, VARI) пигмента фотосинтезирующих растений.

Существует возможность стандартизировать показания вегетационных индексов, полученных по фотографиям разных устройств, посредством цветовой коррекции через аппроксимацию значений RGB пикселей в других цветовых пространствах.

Работа выполнена за счет средств Федерального научного центра зернобобовых и крупяных культур по теме государственного задания № FGZZ-2024-0003 «Цифровое фенотипирование зерновых и крупяных культур в селекционном процессе на высокую продуктивность и качество». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Литература

1. Шабалдас О.Г., Есаулко А.Н., Власова О.И. и др. Фотосинтетическая активность посевов сои в зависимости от сорта в условиях Центрального Предкавказья. // Земледелие. – 2022. – № 8. – С. 31-34. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-8-31-34.
2. Сурин Н.А., Липшин А.Г., Плеханова Л.В. и др. Фотосинтетическая продуктивность пшеницы в условиях светокультуры, имитирующих свето-температурный режим региона культивирования. // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2021. – № 4. – С. 8-12. DOI: 10.30850/vrsn/2021/4/8-12.
3. Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Application of vegetation indexes to assess the condition of crops // Agricultural Machinery and Technologies. – 2020. Vol. 14. No. 4. – P. 4-11. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-4-11.
4. Маневич П.П., Антошин В.В., Коликов К.С. Вегетационные и почвенные индексы для спутникового мониторинга земель в районах открытой разработки угля // Горная промышленность. – 2025. – № 1. – С. 118-122. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-118-122.
5. Monitoring of *Heracleum sosnowskyi* Manden Using UAV Multisensors: Case Study in Moscow Region, Russia / R. K. Kurbanov, A. N. Dalevich, A. S. Dorokhov [et al.] // Agronomy. – 2024. – Vol. 14, No. 10. – P. 2451. – DOI: 10.3390/agronomy14102451.
6. Щербенок С.В., Лисина Т.Н., Елисеев С.Л. и др. Влияние УФ-А на некоторые морфометрические и биохимические показатели растений-регенерантов картофеля. //

Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2024. – Т. 25. – № 4. – С. 592-601. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.4.592-601.

7. Гретченко А.Е., Михайлова М.П., Блинова А.А. Применение ультрафиолетового облучения для предпосевной обработки семян сои. // Агронаука. – 2025. – Т. 3. № 1. – С. 22-27. DOI: 10.24412/2949-2211-2025-3-1-22-27.

8. Вилунов С. Д., Зотиков В.И., Сидоренко В.С. и др. Применение вегетационных индексов в селекции озимой мягкой пшеницы. // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2022. – № 3 (43). – С. 73-83. DOI: 10.24412/2309-348X-2022-3-73-83.

9. Аюржанаев А.А., Ильин Ю.М., Содномов Б.В., Вилунов С.Д. Влияние высоты съемки и зенитного угла Солнца на вегетационные индексы пшеницы по данным БПЛА. // Вестник КрасГАУ. – 2024. – № 5 (206). – С. 12-18. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-5-12-18.

10. The use of vegetation indices in comparison to traditional methods for assessing overwintering of grain crops in the breeding process / R. Kurbanov, N. Zakharova, V. Sidorenko, et al. // Advances in Artificial Systems for Power Engineering II: Conference proceedings, Москва, 17-19 декабря 2021 года. Vol. 119. M.: Springer Nature Switzerland AG, – 2022. – P. 52-64. DOI: 10.1007/978-3-030-97064-2_6.

11. A New Remote Sensing Desert Vegetation Detection Index / Zh. Song, Yu. Lu, Z. Ding [et al.] // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, No. 24. – P. 5742. – DOI: 10.3390/rs15245742.

12. Кулакова А. Д. Галкин В.А., Макаренко А.В. Анализ методов цветовой калибровки изображений с использованием цветовых пространств rgb и hsv в задачах интеллектуального машинного зрения (на примере изображений, получаемых в условиях промышленных теплиц). // Управление большими системами: сборник трудов. – 2022. – № 97. – С. 87-107. DOI: 10.25728/ubs.2022.97.5.

13. Abdalla A., Cen H., et al. Color calibration of proximal sensing RGB images of oilseed rape canopy via deep learning combined with K-means algorithm // Remote Sensing. – 2019, – 11, 3001. DOI: 10.3390/rs11243001.

References

1. Shabalda O.G., Esaulko A.N., Vlasova O.I. et al. Photosynthetic activity of soybean crops depending on the variety in the conditions of the Central Pre-Caucasus. *Zemledelie*, 2022, no. 8, pp. 31-34. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-8-31-34. (In Russ.)

2. Surin N.A., Lipshin A.G., Plekhanova L.V. et al. Photosynthetic productivity of wheat in light-culture conditions that mimic the light-temperature regime of the cultivation region. *Vestnik rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*. 2021, no. 4, pp. 8-12. DOI: 10.30850/vrsn/2021/4/8-12. (In Russ.)

3. Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Application of vegetation indexes to assess the condition of crops. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. No. 4. Pp. 4-11. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-4-11.

4. Manevich P.P., Antoshin V.V., Kolikov K.S. Vegetatsionnye i pochvennye indeksy dlya sputnikovogo monitoringa zemel' v raionakh otkrytoi razrabotki uglya. *Gornaya promyshlennost'*. 2025, no. 1, pp. 118-122. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-118-122. (In Russ.)

5. Kurbanov R. K., Dalevich A. N., Dorokhov A. S. [et al.] Monitoring of *Heracleum sosnowskyi* Manden Using UAV Multisensors: Case Study in Moscow Region, Russia. *Agronomy*. 2024, Vol. 14, no. 10, pp. 2451. DOI: 10.3390/agronomy14102451.

6. Shcherbenok S.V., Lisina T.N., Eliseev S.L. et al. Vliyanie UF-A na nekotorye morfometricheskie i biokhimicheskie pokazateli rastenii-regenerantov kartofelya. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2024, Vol. 25, no. 4, pp. 592-601. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.4.592-601. (In Russ.)

7. Gretchenko A.E., Mikhailova M.P., Blinova A.A. Primenenie ul'trafiioletovogo oblucheniya dlya predposevnoi obrabotki semyan soi. *Agronauka*, 2025, Vol. 3, 1. S. 22-27. DOI: 10.24412/2949-2211-2025-3-1-22-27. (In Russ.)

8. Vilyunov S.D., Zotikov V.I., Sidorenko V.S. et al. Primenenie vegetatsionnykh indeksov v seleksii ozimoi myagkoi pshenitsy. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury*, 2022, no. 3 (43), pp. 73-83. DOI: 10.24412/2309-348X-2022-3-73-83. (In Russ.)

9. Ayurzhanayev A.A., Il'in Yu.M., Sodnomov B.V., Vilyunov S.D. Vliyanie vysoty s'emki i zenitnogo ugla Solntsa na vegetatsionnye indeksy pshenitsy po dannym BPLA. *Vestnik KrasGAU*. 2024, no. 5 (206), pp. 12-18. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-5-12-18. (In Russ.)
10. Kurbanov R., Zakharova N., Sidorenko V., et al. The use of vegetation indices in comparison to traditional methods for assessing overwintering of grain crops in the breeding process. [Advances in Artificial Systems for Power Engineering II: Conference proc., 17-19 Dec., 2021. Vol. 119. Moscow], *Springer Nature Switzerland AG*, 2022, pp. 52-64. DOI: 10.1007/978-3-030-97064-2_6.
11. Song Zh., Lu Yu., Ding Z. [et al.] A New Remote Sensing Desert Vegetation Detection Index. *Remote Sensing*. 2023, Vol. 15, no. 24, p. 5742. - DOI: 10.3390/rs15245742.
12. Kulakova A.D., Galkin V.A., Makarenko A.V. Analiz metodov tsvetovoi kalibrovki izobrazhenii s ispol'zovaniem tsvetovykh prostranstv rgb i hsv v zadachakh intellektual'nogo mashinnogo zreniya (na primere izobrazhenii, poluchaemykh v usloviyakh promyshlennykh teplits). *Upravlenie bol'shimi sistemami: proceed.*, 2022, no. 97, pp. 87-107. doi: 10.25728/ubs.2022.97.5. (In Russ.)
13. Abdalla A., Cen H., et al. Color calibration of proximal sensing RGB images of oilseed rape canopy via deep learning combined with K-means algorithm. *Remote Sensing*. 2019, 11, 3001. doi: 10.3390/rs11243001.