

УДК 633.11: 631.58: 528.8

UDC 633.11: 631.58: 528.8

4.1.1 Общее земледелие и растениеводство

4.1.1 General agriculture and crop production

**СВЯЗЬ ПОКАЗАНИЙ УЗКОПОЛОСНЫХ  
ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ С  
УРОЖАЙНОСТЬЮ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ**

**THE RELATIONSHIP OF THE READINGS OF  
NARROW-BAND VEGETATION INDICES  
WITH THE YIELD OF WINTER WHEAT**

Савинский Алексей Олегович  
Старший преподаватель  
РИНЦ SPIN-код: [8663-1083](https://orcid.org/8663-1083)  
email: [savinskiy.aleksey@yandex.ru](mailto:savinskiy.aleksey@yandex.ru)

Savinsky Alexey Olegovich  
Senior Lecturer  
RSCI SPIN code: [8663-1083](https://orcid.org/8663-1083)  
email: [savinskiy.aleksey@yandex.ru](mailto:savinskiy.aleksey@yandex.ru)

Подушин Юрий Викторович  
Кандидат с.-х. наук, доцент  
РИНЦ SPIN-код: 9089-8888  
email: [yrapod@mail.ru](mailto:yrapod@mail.ru)  
AuthorID: 554281

Podushin Yuri Viktorovich  
Candidate of Agricultural Sciences, Associate  
Professor, RSCI SPIN code: 9089-8888  
email: [yrapod@mail.ru](mailto:yrapod@mail.ru)  
AuthorID: 554281

*Кубанский государственный аграрный  
университет имени И.Т. Трубилина, Россия,  
Краснодар 350044, Калинина 13*

*Kuban State Agrarian University named after I.T.  
Trubilin, Krasnodar 350044, Kalinina 13, Russia*

Исследование посвящено поиску спектральных предикторов урожайности озимой пшеницы. Цель исследования – поиск узкополосных вегетационных индексов (УВИ), обладающих более тесной корреляцией с урожайностью озимой пшеницы, чем значения широкополосного NDVI. Установлено, что показания индексов BGI2, CTR, OSAVI и ONLI в отдельные фазы вегетации демонстрировали более высокие коэффициенты корреляции с урожайностью. Индекс CTR был отмечен наибольшей детерминацией с урожайностью – 56 %. Трехлетнюю стабильную силу связи с урожайностью демонстрировали индексы mNDVI (924, 703, 423), 675/700, CRI700 и SR3

The study is devoted to the search for spectral predictors of winter wheat yield. The aim of the research was to identify narrow-band vegetation indices (NVIs) that exhibit a stronger correlation with winter wheat yield than the values of the broadband NDVI. It was established that the readings of the BGI2, CTR, OSAVI, and ONLI indices during specific phenological stages demonstrated higher correlation coefficients with yield. The CTR index was noted for having the highest coefficient of determination with yield, reaching 56%. The indices mNDVI (924, 703, 423), 675/700, CRI700, and SR3 demonstrated a stable, significant correlation with yield over the three-year study period

Ключевые слова: ПРОГНОЗ УРОЖАЙНОСТИ, NDVI, ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ, ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ СЪЕМКА, ОЗИМАЯ ПШЕНИЦА

Keywords: YIELD FORECAST, NDVI, VEGETATION INDICES, HYPERSPECTRAL SURVEY, WINTER WHEAT

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-218-023>

## Введение

Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур до сих пор является направлением, требующим дополнительного изучения и доработки. С развитием технологий дистанционного зондирования появился дополнительный предиктор прогнозирования урожайности - показания вегетационных индексов (ВИ). Преимущественно используется индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [2, 21, 22], как

<http://ej.kubagro.ru/2026/04/pdf/23.pdf>

наиболее доступный и широко используемый ВИ, реже применяются другие индексы [18]. NDVI, несмотря на свои положительные аспекты, обладает важным ограничением - быстрой насыщенностью: при значениях индекса листовой поверхности свыше 2-3 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> данный индекс теряет чувствительность [26].

NDVI и его модификации - EVI, GNDVI, RENDVI относятся к группе широкополосных вегетационных индексов, их расчеты производят с помощью мультиспектральных камер. Помимо мультиспектральных камер, которые чаще всего состоят из 4-5 спектральных каналов и открывают возможность к расчету нескольких десятков ВИ, постепенно внедряются гиперспектральные камеры. Они содержат свыше сотни спектральных каналов, открывают возможность рассчитывать узкополосные вегетационные индексы (УВИ), количество которых сложно поддается подсчету, однако счет идет на сотни.

Цель исследования – поиск узкополосных вегетационных индексов, обладающих более тесной корреляцией с урожайностью озимой пшеницы, чем значения широкополосного NDVI.

В задачи исследования входило:

1. Выявить коэффициенты корреляции между NDVI и урожайностью озимой пшеницы.
2. Выявить коэффициенты корреляции между показаниями узкополосных вегетационных индексов и урожайностью.
3. Выявить вегетационные индексы, обладающие стабильным трехлетним характером связи с урожайностью.

### **Материалы и методы исследования**

Исследование проводилось на базе стационарного многолетнего многофакторного опыта учебно-опытного хозяйства «Кубань» [1]. В нем изучается 4 фактора - уровень плодородия почвы (дозы органического и

фосфорного удобрений), система минерального питания, система защиты растений, и система основной обработки почвы.

Форма записи схемы имеет две формы: полная -  $A_0B_0C_0D_2$ , сокращенная - 0002. Для исследования были отобраны 18 базовых технологий возделывания - 0001, 0002, 0003, 0022, 0202, 0222, 1111, 1112, 1113, 2002, 2022, 2202, 2221, 2222, 2223, 3331, 3332 и 3333 (табл. 1).

Таблица 1 – Схема многофакторного стационарного опыта учхоза «Кубань»

Фактор	Уровень фактора			
	0	1	2	3
Плодородие почвы А	Исходное	Среднее	Повышенное	Высокое
		200 т/га + 200 кг/га	400 т/га + 400 кг/га	600 т/га + 600 кг/га
Минеральное питание В	Без питания	Половинная	Рекомендованная	Двойная
		$N_{60}P_{30}K_{20} + N_{30} + N_{30}$	$N_{120}P_{60}K_{40} + N_{60} + N_{30}$	$N_{240}P_{120}K_{80} + N_{120} + N_{30}$
Защита растений С	Без защиты	Биологическая	Гербицидная	Интегрированная
Обработка почвы Д	Не представлена	Безотвальная	Рекомендуемая	Отвальная с периодическим глубоким рыхлением

В рамках данной схемы опыта, различия в технологии возделывания создавали варьирование как урожайности, так и спектральных характеристик посевов озимой пшеницы сорта Эмма. Исследование проводилось в 2023-2025 гг., предшественником выступала люцерна.

Гиперспектральную съемку проводили наземно камерой Cubert Ultris 20X в диапазоне длин волны от 350 до 1002 нм с шагом 4 нм - 164 полосы, разрешение 410x410 пикселей.

В ПО Cubert Utils Touch проводилась первичная обработка фото: на изображении выделялась зона, из которой извлекалась интенсивность отражения всего спектрального диапазона. Полученные спектры отражения экспортировались в МО Excel для последующего расчета

значений вегетационных индексов и статистической обработки. В литературе было найдено 125 узкополосных вегетационных индексов, которые использовались в данном исследовании (табл. 2).

В качестве контрольной технологии фиксировались значения индекса NDVI с помощью ручного сенсора Greenseeker. Объем выборки зависел от вегетационного индекса: для широкополосного NDVI – 18 наблюдений, для узкополосных вегетационных индексов – 36 наблюдений (указано в таблицах  $n = 18$  или  $n = 36$ ).

Таблица 2 - Формулы расчета узкополосных вегетационных индексов

№	Название	Формула расчета	Расшифровка названия	Ссылка
1	675/700	$R_{675}/R_{700}$	Simple Ratio 675/700	[9]
2	BGI2	$R_{450}/R_{550}$	Blue/Green Index	[30]
3	BRI2	$R_{450}/R_{690}$	Blue/Red Index	[31]
4	CRI700	$\frac{1/R_{515}}{1/R_{700}}$	Carotenoid Ratio Index	[14]
5	CTR	$R_{695}/R_{420}$	Carter	[8]
6	CTR5	$R_{695}/R_{670}$	Carter 5	[8]
7	GVI	$\frac{R_{682} - R_{553}}{R_{682} + R_{553}}$	Greenness Vegetation Index	[13]
8	LRDSI2	$4.2 * (R_{695}/R_{455}) - 0.38$	Leaf Rust Disease Severity Index 2	[7]
9	MCARI	$[(R_{700}-R_{670}) - 0.2(R_{700}-R_{550})] * \frac{R_{700}}{R_{670}}$	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index	[10]
10	mSR705	$\frac{(R_{750} - R_{445})}{(R_{705} - R_{445})}$	modified Simple Ratio 750	[24]
11	MPRI	$\frac{R_{515} - R_{530}}{R_{515} + R_{530}}$	Modified Photochemical Reflectance Index	[16]
12	NDVI	$\frac{(Nir - Red)}{(Nir + Red)}$	Normalized Difference Vegetation Index	[25]
13	mNDVI	$\frac{R_{924} - R_{703} + 2 * R_{423}}{R_{924} + R_{703} - 2 * R_{423}}$	modified Normalized Difference Vegetation Index	[27]
14	ONLI	$\frac{1.05 * (0.6 * R_{798}^2 - R_{728})}{0.6 * R_{798}^2 + R_{728} + 0.05}$	Optimized non-linear vegetation index	[12]
15	OSAVI	$\frac{(1 + 0.16)(R_{800} - R_{670})}{(R_{800} + R_{670} + 0.61)}$	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	[23]

№	Название	Формула расчета	Расшифровка названия	Ссылка
16	SR3	$R750/R550$	Simple Ratio 3	[15]

## Результаты

Урожайность озимой пшеницы весьма сильно варьировала в разные годы исследований (рис. 1).

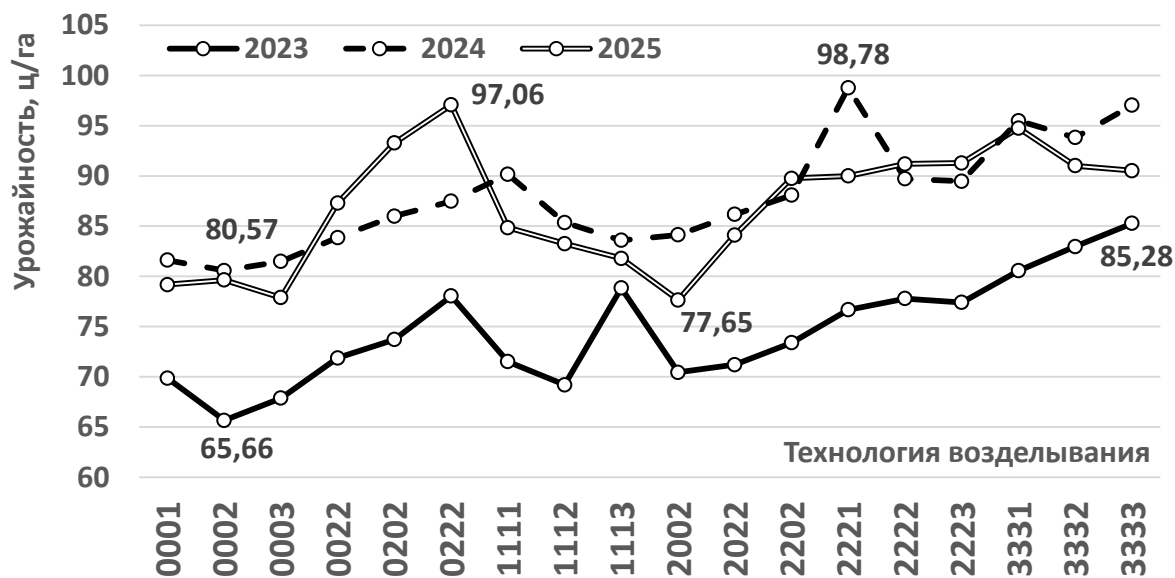


Рисунок 1 - Урожайность озимой пшеницы сорта Эмма при интенсификации технологии возделывания

В 2023 г. разброс по урожайности составил от 65,66 ц/га при технологии 0002 до 85,28 ц/га на технологии 3333. В 2024 г. урожайность была заметно выше: минимальное значение было также получено при технологии возделывания 0002 и составило 80,57 ц/га, а наибольшее значение урожайности было получено при технологии 2221 - 98,78 ц/га. В 2025 г. разброс составил от 77,65 ц/га при технологии 2002 до 97,06 ц/га при 0222.

Вегетационный индекс NDVI, полученный ручным сенсором Greenseeker, также показал варьирование в разные годы исследований (рис. 2). В 2023 и 2025 гг. варьирование индекса в фазу трубкования было в диапазоне 0,81-0,83 и 0,82-0,85 соответственно. В 2024 г. NDVI показал

больший контраст в зависимости от технологии возделывания: минимальное значение индекса было получено на комбинации агроприемов 2022 и составило 0,61, максимальное - 0,73 на комбинации 2221.

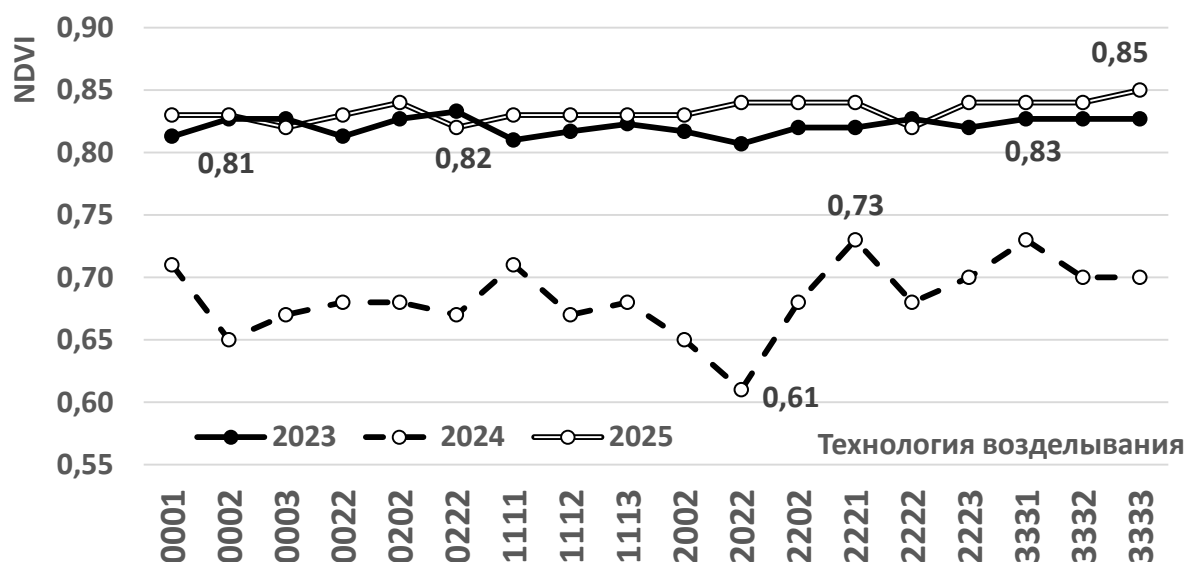


Рисунок 2 - Показания индекса NDVI в фазу трубкования при интенсификации технологии возделывания

Для установления связей между показаниями урожайности озимой пшеницы и значениями вегетационного индекса NDVI был проведен корреляционный анализ (табл. 3).

Было выявлено, что во все даты съемки связь была положительной, и, что проявление наибольшей силы связи NDVI с урожайностью варьировало: в 2023 и 2024 гг. в фазу трубкования с достоверным коэффициентом корреляции  $r = 0,62$  в 2024 г., и в фазу колошения в 2025 г. –  $r = 0,66$ .

Таблица 3 - Коэффициенты корреляции (r) между показаниями урожайности и значениями индекса NDVI (n=18)

Год исследования	Фаза		
	трубкования	колошения	налива зерна
2023	0,45	0,35	0,06

2024	0,62*	0,16	0,18
2025	0,53*	0,66*	0,47*

Примечание: \* - достоверно на 5-% уровне значимости

По показаниям гиперспектральной камеры было рассчитано 125 узкополосных вегетационных индекса, из которых в каждую фазу было отобрано по одному индексу с пиковым положительным и отрицательным коэффициентом корреляции (табл. 4).

Таблица 4 - Пиковые коэффициенты корреляции между урожайностью и значениями узкополосных вегетационных индексов (УВИ) (n = 36)

Год	Фаза вегетации	Характер связи			
		положительный		отрицательный	
		г	индекс	г	индекс
2023	колошение	0,35*	MPRI	-0,25	MCARI2
	налив зерна	0,52*	BGI2	-0,46*	CTR
2024	трубкование	0,42*	CTR	-0,39*	SR3
	колошение	0,75*	CTR	-0,75*	OSAVI
	налив зерна	0,58*	BGI2	-0,43*	CRI700
2025	трубкование	0,64*	ONLI	-0,57*	CTR
	колошение	0,58*	mNDVI (924, 703 и 423)	-0,50*	MCARI2
	налив зерна	0,48*		-0,25	CTR

Примечание: \* - достоверно на 5-% уровне значимости

В каждый год исследования индексы с пиковыми коэффициентами корреляции варьировали: в 2023 г. наибольший коэффициент был у индекса BGI2 (формула 2) в фазу налива зерна, в 2024 г. - CTR (5) и OSAVI (15) в фазу колошения, в 2025 г. - ONLI (14) в фазу трубкования.

Если разложить данные узкополосные индексы на их спектральные каналы, то индекс BGI2 рассчитывается как простое отношение 450 нм к 550 нм, то есть отношение интенсивности отражения синей спектральной области к зеленой (2); CTR - простое отношение 695 и 420 нм, состоит из

красной и синей спектральных областей (5); ONLI рассчитывается по более сложной формуле, однако в его состав входят показания интенсивности отражения в инфракрасной (798 нм) и крайней красной (728 нм) областей спектров света (14). Индекс NDVI (12), который рассчитывается как нормализованная разница инфракрасного и красного спектров света, показал наибольшую силу связи в фазу колошения ( $r = 0,66$  у NDVI против  $r = 0,64$  у ONLI в фазу трубкования).

Если проследить динамику коэффициентов корреляции трех, наиболее тесно связанных с урожайностью индексов, видно, что ни один из представленных индексов не дает стабильных межгодовых результатов (табл. 5).

Таблица 5 - Динамика коэффициентов корреляции узкополосных вегетационных индексов в разные годы исследований (n = 36)

Индекс (год исследования)		Фаза		
		трубкования	колошения	налива зерна
BGI2	2023	-	0,20	0,52*
	2024	0,35*	0,25	0,58*
	2025	0,57*	0,48*	0,29
CTR	2023	-	-0,14	-0,46*
	2024	0,42*	0,75*	0,07
	2025	-0,57*	-0,49*	-0,25
ONLI	2023	-	0,09	0,13
	2024	-0,18	-0,65*	0,00
	2025	0,64*	0,56*	0,38*

Примечание: \* - достоверно на 5-% уровне значимости

Индекс BGI2 (2) показал среднюю силу связи с урожайностью в фазу колошения, в остальные фазы идет расхождение: в 2023 и 2024 гг. достоверная средняя сила связи была отмечена в фазу налива зерна, в 2025 г. - в фазу колошения. Индекс CTR (5) в фазу трубкования продемонстрировал разную направленность силы связи с урожайностью: в 2024 г. положительный характер, а в 2025 г. - отрицательный. В

последующие фазы вегетации характер связи также варьировал. Показания индекса ONLI (14) в 2023 г. с урожайностью не коррелировали вовсе, в 2024 г. средняя отрицательная сила связи была обнаружена в фазу колошения, а в 2025 г. связь была положительная во все исследуемые фазы вегетации.

Полученные линейные модели прогнозирования урожайности на основе показаний УВИ демонстрировали существенное варьирование по детерминации и разбросу точек. Индекс CTR, полученный в фазу налива зерна в 2024 г. показал коэффициент детерминации  $R^2 = 0,56$ , таким образом полученная линейная модель описывала дисперсию урожайности на уровне 56 % (рис. 3, формула 5).

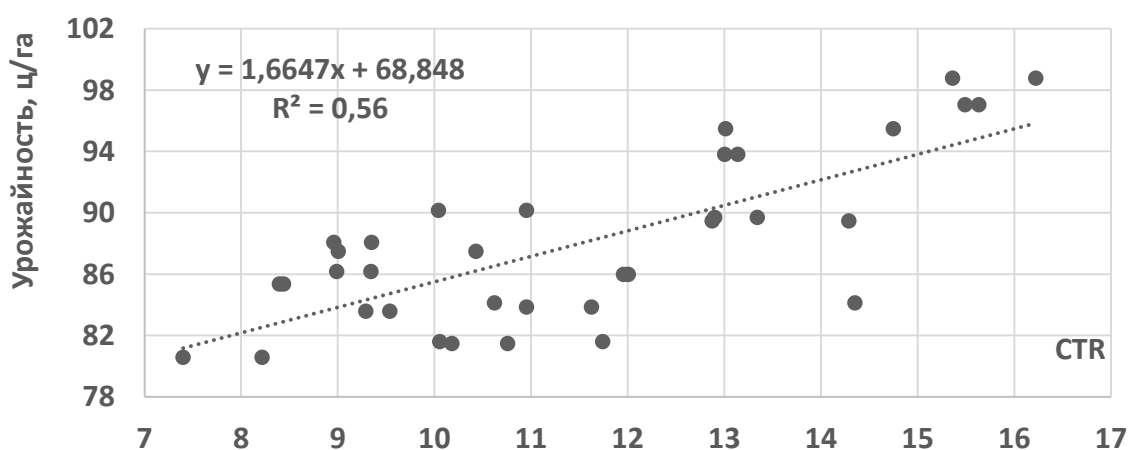


Рисунок 3 - Точечная диаграмма зависимости между показаниями индекса CTR (фаза налива зерна) и урожайностью, 2024 (n = 36)

Из проанализированных 125 были отобраны 7 вегетационных индексов, которые демонстрировали стабильную межгодовую силу связи с урожайностью в фазу колошения (табл. 6). Из представленных УВИ стоит отметить индексы 675/700, CRI700, SR3 и наиболее точный индекс в данном исследовании - модифицированный NDVI, рассчитанный по принципу модифицированной нормализованной разницы на основе показаний ИК, крайней красной и синей спектральных областей - 924, 703 и 423 нм соответственно (формулы 1, 4, 16 и 12 соответственно).

Стоит также отметить индексы CTR и GVI, которые в данном исследовании демонстрировали достоверную силу связи в течении трех лет, однако в 2024 г. демонстрировали противоположный характер связи в сравнении с 2023 и 2025 гг. (формулы 5 и 7 соответственно).

Таблица 6 - Коэффициенты корреляции между УВИ (фаза колошения) и урожайностью озимой пшеницы (n = 36)

Вегетационный индекс	Год исследования		
	2023	2024	2025
	r	r	r
675/700	0,45*	0,39*	0,50*
CRI700	-0,45*	-0,55*	-0,43*
BRI2	0,43*	0,5*	0,35*
mNDVI (924, 703 и 423)	0,48*	0,66*	0,58*
SR3	-0,41*	-0,52*	-0,47*
CTR	-0,46*	0,75*	-0,49*
LRDSI2	-0,45*	-0,45*	-0,39*
CTR5	-0,35*	-0,41*	-0,41*
GVI	0,35*	-0,42*	0,49*

Примечание: \* - достоверно на 5-% уровне значимости

### Обсуждения

Вегетационные индексы являются эмпирическими показателя, рассчитываемыми на основе чувствительных спектральных каналов к искомому агрономическому показателю. Так, индекс mNDVI, полученный в работе Ванга с соавторами [27] показал высокие коэффициенты детерминации с содержанием азота в листьях пшеницы ( $R^2 = 0,883$ ) и риса ( $R^2 = 0,866$ ). В ходе обзора литературы не удалось выявить корреляционный анализ индекса  $\frac{R_{924} - R_{703} + 2 \cdot R_{423}}{R_{924} + R_{703} - 2 \cdot R_{423}}$ , рассчитываемого по принципу модифицированной нормализованной разницы  $\left(\frac{R_x - R_y + 2 \cdot R_z}{R_x + R_y - 2 \cdot R_z}\right)$  с

урожаемостью с.-х. культур. Авторы не дали название данному индексам, поэтому к названию mNDVI стоит относиться с условностью.

Широкополосный индекс NDVI в разные годы исследования демонстрировал коэффициент корреляции в диапазоне  $r = 0,45-0,62$  в фазе трубкования. Линейные модели прогнозирования урожайности на основе показаний NDVI демонстрируют детерминацию на уровне 20-38 %, что недостаточно для прогноза урожайности озимой пшеницы. В работе Сторчака [4] пиковый коэффициент корреляции был отмечен на уровне  $r = 0,62$  в фазу колошения, а работе Родимцева  $r = 0,79$  в момент пикового значения NDVI – в фазу колошение-цветения [3].

В рамках данной работы, несмотря на заложенные различия в технологии возделывания, в частности, уровня азотного питания растений, различия по показаниям NDVI были минимальны (рис. 2). Это свидетельствует о серьёзном ограничении индекса NDVI, как источнике информации (рис. 4).

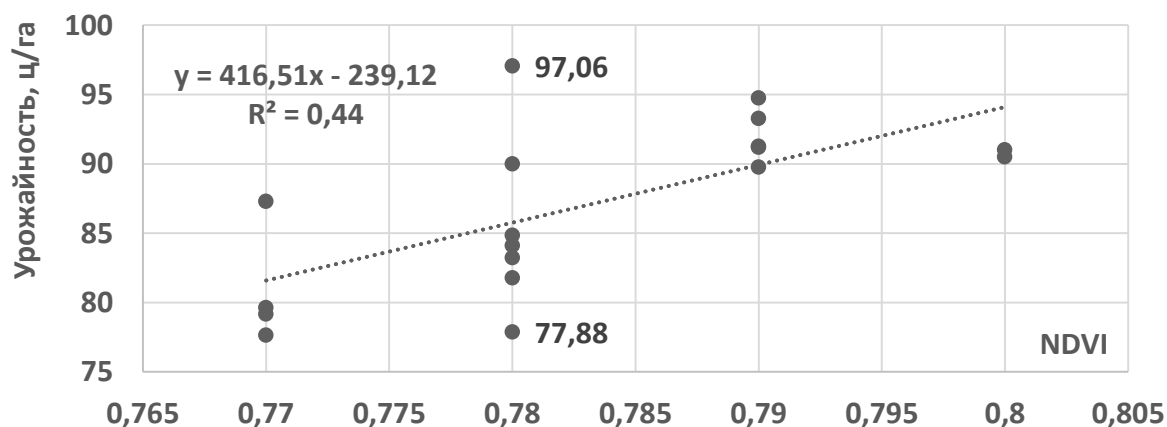


Рисунок 4 – Точечная диаграмма зависимости между индексом NDVI и урожайностью озимой пшеницы сорта Эмма (фаза колошения, 2025)

При NDVI = 0,78 разброс по урожайности составил 19,18 ц/га – от 77,88 до 97,06 ц/га, что существенно понижает коэффициент детерминации уравнения.

Узкополосные вегетационные индексы также используются для прогнозирования урожайности озимой пшеницы. В исследовании Ву [28] наибольший коэффициент корреляции  $r = 0,7$  между урожайностью и УВИ был получен для индекса NDWI, а относительно известный индекс PRI –  $r = 0,53$ . Однако пересечения в индексах между работой Ву и данным исследованием, показавших высокую корреляцию с урожайностью, отсутствовали. В других исследованиях [11, 20] поднималось использование узкополосных индексов для прогноза урожайности пшеницы, однако в обозреваемых работах использовались классические индексы, такие как NDVI, EVI и GNDVI, полученные с использованием узких спектральных полос. В данной работе использованные индексы не демонстрировали высоких коэффициентов корреляции с урожайностью озимой пшеницы сорта Эмма.

В отечественной литературе использование узкополосных вегетационных индексов ограничено в силу новизны технологии (исключение составляет Агрофизический институт – работы Якушева [5, 6]), а в иностранной – постепенно переходят к использованию машинного обучения и/или более сложных моделей прогноза [19].

Важным ограничивающим фактором в данном исследовании выступила предшествующая культура в севообороте – люцерна, поскольку является отличным предшественником для озимой пшеницы, накапливая азот за счет клубеньковых бактерий и нивелируя различия в азотном питании между технологиями возделывания.

Также важно отметить, что индекс NDVI, получаемый с помощью ручного сенсора либо БВС-съемки, имеет алгоритм калибровки значений к уровню освещенности. Сенсор Greenseeker в момент съемки излучает свет и фиксирует отраженный от растений свет, что приводит к минимальному влиянию уровня освещенности при съемке. Камеры, в том числе и гиперспектральные, фиксируют интенсивность естественного (солнечного)

отражения, то есть привязаны к уровню освещенности. Несмотря на то, что показания камеры калибруются к эталону («белое» тело), интенсивность освещения в момент съемки может является важным параметром, определяющим значения и прогностическую способность узкополосных вегетационных индексов.

Гиперспектральные вегетационные индексы, на данный момент, не обладают четкой классификацией в силу их большого объема и относительной новизной данной предметной области, что усложняет процесс накопления научной информации. Только по показаниям применяемой камеры потенциально можно рассчитать более 13 тысяч вегетационных индексов по принципу нормализованной разницы.

Однако ключевым в данном исследовании является наличие 4 вегетационных индексов, несмотря на среднюю силу связи, обладающих трехлетним стабильным характером – 675/700, CRI700, SR3 и mNDVI (924, 703 и 423). Индекс 675/700 (1) является отношением красной и крайней красной области спектров света – по данным Хорлера, [17] крайняя красная область спектра является важным источником информации о концентрации хлорофилла; индексы CRI700 (4) и SR3 (16) рассчитываются как отношение зеленой и крайней красной области света, также привязываются к концентрации хлорофилла; mNDVI (13) считается по модифицированной нормализованной разнице, содержит в себе интенсивность отражения синей, крайней красной и ИК областей, привязываясь как к структурным (в ИК области), так и к биохимическим особенностям посева (видимой области) [29] (рис. 5).

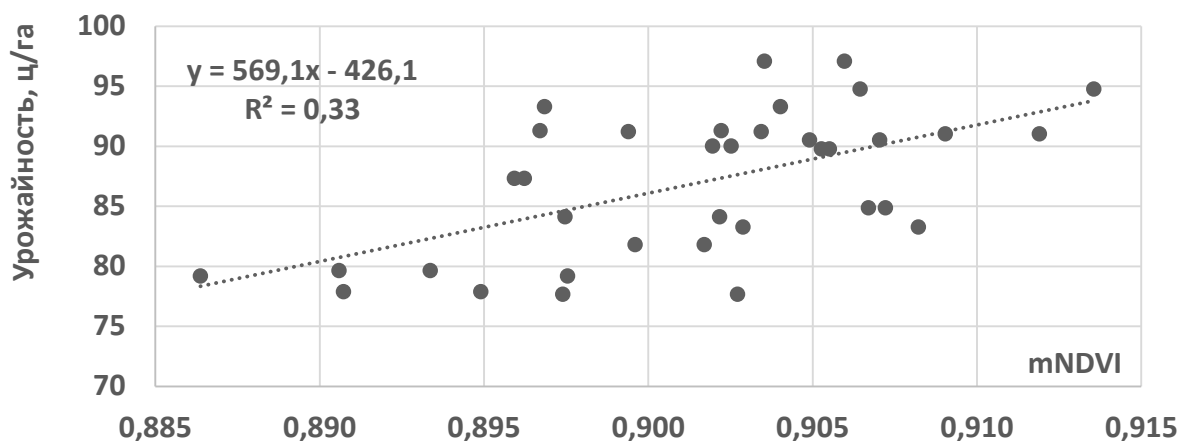


Рисунок 5 – Точечная диаграмма зависимости между индексом NDVI и урожайностью озимой пшеницы сорта Эмма (фаза колошения, 2025)

Сравнивая модели уравнений NDVI и mNDVI в фазу колошения видно, что в один момент съемки классический NDVI показал большую детерминацию – 43,5 % против 33 % с mNDVI в 2025 г., однако в 2023 и 2024 гг. детерминация составила 12 и 3 % против 23 и 43,5 % соответственно.

Вероятно, ограничения вегетационных индексов, как NDVI, так и остальных индексов связано с тремя аспектами.

1. Насыщаемость ВИ – индекс NDVI теряет чувствительность при индексе листовой поверхности свыше  $2-3 \text{ м}^2/\text{м}^2$  [26]. Однако чувствительность удалось повысить за счет изменения структурной формулы NDVI – так появился двухканальный EVI.

2. Влияние структурных особенностей посева на показания различных спектральных каналов. Спектральные характеристики базируются на интенсивности отраженного от посева света. Структура посева и урожайность – интегральные характеристики, их реализация связана с комплексом факторов, что существенно усложняет прогноз урожайности на основе спектральных характеристик – данный вопрос требует углубленного изучения.

3. Момент съемки может выступать более важной характеристикой, чем выбор вегетационного индекса – данный вопрос требует проработки. Время съемки может оказывать влияние как на особенности уровня освещенности в момент фиксации данных, так и на особенности морфофизиологических характеристик посевов.

Дополнительного изучения требуются индексы, показавшие высокие коэффициенты корреляции с урожайностью единой культуры, такие как BGI2, CTR, OSAVI и ONLI.

### **Заключение**

Показания узкополосных вегетационных индексов обладают большей прогностической силой в отдельные моменты вегетации, чем показания широкополосного NDVI – более высокую силу связи с урожайностью показали индексы BGI2, CTR, OSAVI и ONLI.

Стабильный трехлетний характер связи с урожайностью демонстрировали индексы 675/700, CRI700, SR3 и mNDVI (924, 703 и 423).

Изменение характера связи индексов CTR и GVI с урожайностью требует дополнительного изучения, поскольку объяснить данный факт в рамках данного исследования не удалось.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение проблематики дистанционного зондирования в звене:

Агротехнология → Морфофизиология → Урожайность

### **Список литературы**

1. Малюга, Н. Г. Программа и методика проведения опыта / Н. Г. Малюга, А. М. Кравцов, А. В. Загорулько [и др.] // Агроэкологический мониторинг в земледелии Краснодарского края / под ред. И. Т. Трубилина, Н. Г. Малюги. – Краснодар, 2008. – Вып. 431 (459). – С. 6-13. – (Труды Кубанского государственного аграрного университета).

2. Родимцев, С. А. Использование вегетативного индекса NDVI для прогноза урожайности зерновых культур / С. А. Родимцев, А. П. Дедов, Н. П. Криволапов [и др.] // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2023. – № 4. – С. 56-67.
3. Родимцев, С. А. Сравнительная оценка новых систем защиты и прогнозирования урожайности зерновых культур на основе данных NDVI / С. А. Родимцев, Н. Е. Павловская // Вестник КрасГАУ. – 2023. – № 1 (190). – С. 69-79.
4. Сторчак, И. Г. Связь урожайности посевов озимой пшеницы с NDVI для отдельных полей / И. Г. Сторчак, Е. О. Шестакова, Ф. В. Ерошенко // Аграрный вестник Урала. – 2018. – № 6 (173). – С. 64-68.
5. Якушев, В. П. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева / В. П. Якушев, Н. В. Матвеев, П. А. Феклистов, А. Ф. Петров // Сельскохозяйственная биология. – 2022. – Т. 57, № 1. – С. 98-112.
6. Якушев, В. П. Перспективы использования гиперспектральной информации в задачах управления азотным режимом посевов зерновых культур / В. П. Якушев, Н. В. Матвеев, А. Ф. Петров, Д. А. Матвеев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 3. – С. 188-203.
7. Ashourloo, D. Developing two spectral disease indices for detection of wheat leaf rust (*Puccinia striiformis*) / D. Ashourloo, M. R. Mobasher, A. Huete // Remote Sensing. – 2014. – Vol. 6, № 6. – P. 4723-4740.
8. Carter, G. A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress / G. A. Carter // International Journal of Remote Sensing. – 1994. – Vol. 15, № 3. – P. 697-703.
9. Chappelle, E. W. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves / E. W. Chappelle, M. S. Kim, J. E. McMurtrey, III // Remote Sensing of Environment. – 1992. – Vol. 39. – P. 239-247.
10. Daughtry, C. S. T. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance / C. S. T. Daughtry, C. L. Walthall, M. S. Kim [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2000. – Vol. 74, № 2. – P. 229-239.
11. Feng, H. Comparison of winter wheat yield estimation based on near-surface hyperspectral and UAV hyperspectral remote sensing data / H. Feng, G. Yang, Y. Zhang, L. Wang, X. Zhao, J. Chen // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, № 17. – P. 4158.
12. Feng, W. An optimized non-linear vegetation index for estimating leaf area index in winter wheat / W. Feng, Y. Wu, L. He, X. Ren, Y. Wang, G. Hou // Precision Agriculture. – 2019. – Vol. 20. – P. 1157-1176.
13. Gandia, S. Retrieval of vegetation biophysical variables from CHRIS/PROBA data in the SPARC campaign / S. Gandia, G. Fernández, J. García, J. Moreno // ESA SP. – 2004. – Vol. 578. – P. 40-48.
14. Gitelson, A. A. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves / A. A. Gitelson, G. P. Keydan, M. N. Merzlyak // Geophysical Research Letters. – 2006. – Vol. 33, № 11. – Art. L11402.
15. Gitelson, A. A. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves / A. A. Gitelson, M. N. Merzlyak // International Journal of Remote Sensing. – 1997. – Vol. 18, № 12. – P. 2691-2697.
16. Hernández-Clemente, R. Assessing structural effects on PRI for stress detection in conifer forests / R. Hernández-Clemente, R. M. Navarro-Cerrillo, F. J. Zarco-Tejada [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2011. – Vol. 115, № 9. – P. 2360-2375.

17. Horler, D. N. H. The red edge of plant leaf reflectance / D. N. H. Horler, M. Dockray, J. Barber // *International Journal of Remote Sensing*. – 1983. – Vol. 4, № 2. – P. 273-288.
18. Kouadio, L. Assessing the performance of MODIS NDVI and EVI for seasonal crop yield forecasting at the ecodistrict scale / L. Kouadio, N. K. Newlands, A. Davidson [et al.] // *Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 6, № 10. – P. 10193-10214.
19. Li, Z. UAV-based hyperspectral and ensemble machine learning for predicting yield in winter wheat / Z. Li, Y. Chen, J. Zhang, X. Wang // *Agronomy*. – 2022. – Vol. 12, № 1. – P. 202.
20. Liu, S. Predicting grain yield and protein content of winter wheat at different growth stages by hyperspectral data integrated with growth monitor index / S. Liu, R. Wang, Y. Chen, L. Zhang, J. Li // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2022. – Vol. 200. – P. 107235.
21. Mashaba, Z. Forecasting winter wheat yields using MODIS NDVI data for the Central Free State region / Z. Mashaba, G. Chirima, J. G. Munghezulu [et al.] // *South African Journal of Science*. – 2017. – Vol. 113, № 11-12. – P. 1-6.
22. Ren, J. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China / J. Ren, Z. Chen, Q. Zhou, H. Tang // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2008. – Vol. 10, № 4. – P. 403-413.
23. Rondeaux, G. Optimization of soil-adjusted vegetation indices / G. Rondeaux, M. Steven, F. Baret // *Remote Sensing of Environment*. – 1996. – Vol. 55, № 2. – P. 95-107. – DOI 10.1016/0034-4257(95)00186-7.
24. Sims, D. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages / D. A. Sims, J. A. Gamon // *Remote Sensing of Environment*. – 2002. – Vol. 81, № 2-3. – P. 337-354.
25. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C. J. Tucker // *Remote Sensing of Environment*. – 1979. – Vol. 8, № 2. – P. 127-150.
26. Viña, A. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops / A. Viña, A. A. Gitelson, A. L. Nguy-Robertson, Y. Peng // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – Vol. 115, № 12. – P. 3468-3478.
27. Wang, W. Estimating leaf nitrogen concentration with three-band vegetation indices in rice and wheat / W. Wang, X. Yao, Y. Zhu, Y. C. Tian, W. X. Cao // *Field Crops Research*. – 2012. – Vol. 129. – P. 90-98.
28. Wu, R. Wheat yield estimation study using hyperspectral vegetation indices / R. Wu, F. Li, Y. Song, H. Wang, J. Zhang // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, № 10. – P. 4245.
29. Xing, N. A transformed triangular vegetation index for estimating winter wheat leaf area index / N. Xing, W. Huang, Q. Xie, Y. Shi, H. Ye, Y. Dong // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 12, № 1. – P. 16.
30. Zarco-Tejada, P. J. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy / P. J. Zarco-Tejada, A. Berjón, R. López-Lozano [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – Vol. 99, № 3. – P. 271-287.
31. Zarco-Tejada, P. J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera / P. J. Zarco-Tejada, V. González-Dugo, J. A. J. Berni // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – Vol. 117. – P. 322-337.

## Referenses

1. Malyuga, N. G. Programma i metodika provedeniya opyta / N. G. Malyuga, A. M. Kravtsov, A. V. Zagorul'ko [i dr.] // Agroekologicheskiy monitoring v zemledelii Krasnodarskogo kraya / pod red. I. T. Trubilina, N. G. Malyugi. – Krasnodar, 2008. – Vyp. 431 (459). – S. 6-13. – (Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta).
2. Rodimtsev, S. A. Ispol'zovanie vegetativnogo indeksa NDVI dlya prognoza urozhaynosti zernovykh kul'tur / S. A. Rodimtsev, A. P. Dedov, N. P. Krivolapov [i dr.] // Vestnik NGAU (Novosibirskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet). – 2023. – № 4. – S. 56-67.
3. Rodimtsev, S. A. Sravnitel'naya otsenka novykh sistem zashchity i prognozirovaniya urozhaynosti zernovykh kul'tur na osnove dannykh NDVI / S. A. Rodimtsev, N. E. Pavlovskaya // Vestnik KrasGAU. – 2023. – № 1 (190). – S. 69-79.
4. Storchak, I. G. Svyaz' urozhaynosti posevov ozimoy pshenitsy s NDVI dlya otidel'nykh poley / I. G. Storchak, E. O. Shestakova, F. V. Eroshenko // Agrarnyy vestnik Urala. – 2018. – № 6 (173). – S. 64-68.
5. Yakushev, V. P. Korrelyatsionnye zavisimosti mezhdru vegetatsionnymi indeksami, urozhayem zerna i opticheskimi kharakteristikami list'ev pshenitsy pri raznom sodержanii v pochve azota i gustote poseva / V. P. Yakushev, N. V. Matveenko, P. A. Feklistov, A. F. Petrov // Sel'skokhozyaystvennaya biologiya. – 2022. – T. 57, № 1. – S. 98-112.
6. Yakushev, V. P. Perspektivy ispol'zovaniya giperpektral'noy informatsii v zadachakh upravleniya azotnym rezhimom posevov zernovykh kul'tur / V. P. Yakushev, N. V. Matveenko, A. F. Petrov, D. A. Matveenko // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2024. – T. 21, № 3. – S. 188-203.
7. Ashourloo, D. Developing two spectral disease indices for detection of wheat leaf rust (*Puccinia triticina*) / D. Ashourloo, M. R. Mobasheri, A. Huete // Remote Sensing. – 2014. – Vol. 6, № 6. – P. 4723-4740.
8. Carter, G. A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress / G. A. Carter // International Journal of Remote Sensing. – 1994. – Vol. 15, № 3. – P. 697-703.
9. Chappelle, E. W. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves / E. W. Chappelle, M. S. Kim, J. E. McMurtrey, III // Remote Sensing of Environment. – 1992. – Vol. 39. – P. 239-247.
10. Daughtry, C. S. T. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance / C. S. T. Daughtry, C. L. Walthall, M. S. Kim [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2000. – Vol. 74, № 2. – P. 229-239.
11. Feng, H. Comparison of winter wheat yield estimation based on near-surface hyperspectral and UAV hyperspectral remote sensing data / H. Feng, G. Yang, Y. Zhang, L. Wang, X. Zhao, J. Chen // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, № 17. – P. 4158.
12. Feng, W. An optimized non-linear vegetation index for estimating leaf area index in winter wheat / W. Feng, Y. Wu, L. He, X. Ren, Y. Wang, G. Hou // Precision Agriculture. – 2019. – Vol. 20. – P. 1157-1176.
13. Gandia, S. Retrieval of vegetation biophysical variables from CHRIS/PROBA data in the SPARC campaign / S. Gandia, G. Fernández, J. García, J. Moreno // ESA SP. – 2004. – Vol. 578. – P. 40-48.
14. Gitelson, A. A. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves / A. A. Gitelson, G. P. Keydan, M. N. Merzlyak // Geophysical Research Letters. – 2006. – Vol. 33, № 11. – Art. L11402.

15. Gitelson, A. A. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves / A. A. Gitelson, M. N. Merzlyak // *International Journal of Remote Sensing*. – 1997. – Vol. 18, № 12. – P. 2691-2697.
16. Hernández-Clemente, R. Assessing structural effects on PRI for stress detection in conifer forests / R. Hernández-Clemente, R. M. Navarro-Cerrillo, F. J. Zarco-Tejada [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – Vol. 115, № 9. – P. 2360-2375.
17. Horler, D. N. H. The red edge of plant leaf reflectance / D. N. H. Horler, M. Dockray, J. Barber // *International Journal of Remote Sensing*. – 1983. – Vol. 4, № 2. – P. 273-288.
18. Kouadio, L. Assessing the performance of MODIS NDVI and EVI for seasonal crop yield forecasting at the ecodistrict scale / L. Kouadio, N. K. Newlands, A. Davidson [et al.] // *Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 6, № 10. – P. 10193-10214.
19. Li, Z. UAV-based hyperspectral and ensemble machine learning for predicting yield in winter wheat / Z. Li, Y. Chen, J. Zhang, X. Wang // *Agronomy*. – 2022. – Vol. 12, № 1. – P. 202.
20. Liu, S. Predicting grain yield and protein content of winter wheat at different growth stages by hyperspectral data integrated with growth monitor index / S. Liu, R. Wang, Y. Chen, L. Zhang, J. Li // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2022. – Vol. 200. – P. 107235.
21. Mashaba, Z. Forecasting winter wheat yields using MODIS NDVI data for the Central Free State region / Z. Mashaba, G. Chirima, J. G. Munghemzulu [et al.] // *South African Journal of Science*. – 2017. – Vol. 113, № 11-12. – P. 1-6.
22. Ren, J. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China / J. Ren, Z. Chen, Q. Zhou, H. Tang // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2008. – Vol. 10, № 4. – P. 403-413.
23. Rondeaux, G. Optimization of soil-adjusted vegetation indices / G. Rondeaux, M. Steven, F. Baret // *Remote Sensing of Environment*. – 1996. – Vol. 55, № 2. – P. 95-107. – DOI 10.1016/0034-4257(95)00186-7.
24. Sims, D. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages / D. A. Sims, J. A. Gamon // *Remote Sensing of Environment*. – 2002. – Vol. 81, № 2-3. – P. 337-354.
25. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C. J. Tucker // *Remote Sensing of Environment*. – 1979. – Vol. 8, № 2. – P. 127-150.
26. Viña, A. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops / A. Viña, A. A. Gitelson, A. L. Nguy-Robertson, Y. Peng // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – Vol. 115, № 12. – P. 3468-3478.
27. Wang, W. Estimating leaf nitrogen concentration with three-band vegetation indices in rice and wheat / W. Wang, X. Yao, Y. Zhu, Y. C. Tian, W. X. Cao // *Field Crops Research*. – 2012. – Vol. 129. – P. 90-98.
28. Wu, R. Wheat yield estimation study using hyperspectral vegetation indices / R. Wu, F. Li, Y. Song, H. Wang, J. Zhang // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, № 10. – P. 4245.
29. Xing, N. A transformed triangular vegetation index for estimating winter wheat leaf area index / N. Xing, W. Huang, Q. Xie, Y. Shi, H. Ye, Y. Dong // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 12, № 1. – P. 16.
30. Zarco-Tejada, P. J. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy / P. J.

Zarco-Tejada, A. Berjón, R. López-Lozano [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2005. – Vol. 99, № 3. – P. 271-287.

31. Zarco-Tejada, P. J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera / P. J. Zarco-Tejada, V. González-Dugo, J. A. J. Berni // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 117. – P. 322-337.