УДК 633.11 : 631.58 : 528.8

4.1.1 Общее земледелие и растениеводство

ВКЛАД МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПОКАЗАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

Савинский Алексей Олегович
Старший преподаватель
РИНЦ SPIN-код: 8663-108
AuthorID: 1115586
email: savinskiy.aleksey@yandex.ru

Нещадим Николай Николаевич
Доктор с.-х. наук, профессор
РИНЦ SPIN-код: 8727-0250
AuthorID: 395160

Загорулько Александр Васильевич
Доктор с.-х. наук, профессор
РИНЦ SPIN-код: 3626-7996
AuthorID: 685613
Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Россия, Краснодар 350044, Калинина 13

Исследование посвящено тематике дистанционного зондирования посевов, а именно выявлению зависимостей между морфофизиологическими параметрами и спектральными характеристиками посевов. Цель работы − выявить долю вклада морфофизиологических параметров посевов и их стабильность в показания широкополосного NDVI и узкополосных вегетационных индексов. Впервые установлена нестабильность вклада морфофизиологических параметров в дисперсию вегетационных индексов по годам и фазам развития, а также выявлена вариабельность чувствительных спектральных каналов в зависимости от условий вегетации. Рассчитанные уравнения регрессии между морфофизиологическими параметрами и показаниями широкополосного NDVI преимущественно имели низкие коэффициенты корреляции − R^2 = 0,22-0,33 за исключением фазы колошения 2025 г. с R^2 = 0,87. Узкополосные вегетационные индексы (УВИ) демонстрировали коэффициенты детерминации в диапазоне R^2 = 0,53-0,68, однако для каждой съемки варьировали чувствительные спектральные диапазоны − в 2023 и 2025 гг. нормализованные разницы рассчитывались по показаниями ИК спектров, в 2024 г. − по показаниям видимых спектральных каналов. Наибольшую долю вклада в дисперсию NDVI и УВИ, зачастую, вносил индекс листовой поверхности, однако доля морфофизиологических факторов существенно

UDC 633.11 : 631.58 : 528.8

4.1.1 General agriculture and crop production

CONTRIBUTION OF MORPHOPHYSIOLOGICAL PARAMETERS TO THE SPECTRAL CHARACTERISTICS INDICES OF WINTER WHEAT CROPS

Savinsky Alexey Olegovich
Senior Lecturer
RSCI SPIN code: 8663-1083
AuthorID: 1115586
email: savinskiy.aleksey@yandex.ru

Neshchadim Nikolay Nikolayevich
Doctor of Agricultural Sciences, Professor
RSCI SPIN code: 8727-0250
AuthorID: 395160

Zagorulko Alexander Vasilyevich
Doctor of Agricultural Sciences, Professor
RSCI SPIN code: 3626-7996
AuthorID: 685613
Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar 350044, Kalinina 13, Russia

The study focuses on the remote sensing of crops, specifically aiming to identify relationships between morpho-physiological parameters and the spectral characteristics of crops. The objective of this work was to determine the contribution share of crop morpho-physiological parameters and their stability to the values of broadband NDVI and narrow-band vegetation indices. For the first time, the instability of the contribution of morphophysiological parameters to the dispersion of vegetation indices across years and developmental phases has been established, and the variability of sensitive spectral channels depending on vegetation conditions has been revealed. The calculated regression equations between morpho-physiological parameters and broadband NDVI readings predominantly exhibited low coefficients of determination R^2 = 0,22-0,33, with the exception of the heading stage in 2025, which showed an R^2 = 0,87. Narrow-band vegetation indices (NVIs) demonstrated coefficients of determination in the range of R^2 = 0,53-0,68; however, the sensitive spectral ranges varied for each measurement campaign − in 2023 and 2025, normalized differences were calculated using readings from the infrared spectra, while in 2024, they were based on readings from visible spectral channels. The leaf area index (LAI) most frequently made the largest contribution to the variance of NDVI and NVIs, although the contribution share of morpho-physiological factors varied significantly

варьировала

Ключевые слова: ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ, ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ СЪЕМКА, NDVI, ОЗИМАЯ ПШЕНИЦА, ИЛП, ГУСТОТА СТОЯНИЯ РАСТЕНИЙ, КОНЦЕНТРАЦИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ

Keywords: VEGETATION INDICES, HYPERSPECTRAL IMAGING, NDVI, WINTER WHEAT, LAI, PLANT STAND DENSITY, CONCENTRATION OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS

http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-222-023

Введение

Дистанционный мониторинг состояния с.-х. культур до сих пор является вызовом для агронаук. Наиболее изученным и популярным критерием оценки является вегетационный индекс NDVI, показания которого используются для прогнозирования урожайности с.-х. культур [6], определения полевых неоднородностей и дифференцированного внесения азотных удобрений [1, 4]. Однако NDVI и других спектральные параметры, представленные чаще всего вегетационными индексами, являются интегральными характеристиками − их значения определяются комплексом морфофизиологических факторов, таких как площадь листовой поверхности и концентрация фотосинтетических пигментов, которые, в свою очередь, определяются технологией возделывания [9].

Индекс NDVI представляет собой нормализованную разницу интенсивностей отражения инфракрасной (ИК) и красной областей спектральной кривой. Поглощение и отражение в красной области связано с концентрацией хлорофиллов, а отражение в ИК области привязано к структуре растительных тканей [14]. Помимо NDVI, который рассчитывается по показаниям двух широких спектральных полос, существуют еще узкополосные вегетационные индексы, привязанные к интенсивности отражения узких спектров света [17].

Цель работы заключается в выявлении вклада морфофизиологических параметров посевов и их стабильность в показания широкополосного NDVI и узкополосных вегетационных индексов.

В задачи исследования входило:

1. Определить вклад морфофизиологических параметров посевов и оценить стабильность силы вклада в дисперсию показаний NDVI в разные годы исследования.

2. Выявить нормализованные разницы, дисперсия которых наиболее точно описывается варьирование морфофизиологических параметров посевов и определить долю вклада каждого параметра в разные годы исследования.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на базе стационарного многолетнего многофакторного опыта учебно-опытного хозяйства «Кубань» [2]. В нем изучается 4 фактора − уровень плодородия почвы (дозы органического удобрения), система минерального питания, система защиты растений и система основной обработки почвы (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	–	Безотвальная	Рекомендуемая	Отвальная с периодически глубоким рыхлением

Форма записи схемы имеет две формы: полная − $А_0В_0С_0Д_2$, 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.

В рамках данной схемы опыта, различия в технологии возделывания создавали варьирование как морфофизиологических параметров, 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 410х410 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 MO Excel для последующего расчета значений вегетационных индексов и статистической обработки.

На языке программирования Python был написан алгоритм расчета вегетационных индексов по принципу нормализованной разницы (NR).

$$NR2\ (x, y) = \frac{x - y}{x + y}$$

$$NR3\ (x, y, z) = \frac{x - y + 2z}{x + y - 2z}$$

где x, y, z - показания интенсивности отражения соответствующих длин волны от 350 до 1002 нм.

Полученный массив NR2 (свыше 12 тысяч комбинаций) и NR3 (свыше 708 тысяч комбинаций) подвергался регрессионному анализу, где показания NDVI или интенсивности отражения нормализованной разницы (NR) выступали функцией регрессии (Y); морфофизиологические

параметры посевов были представлены индексом листовой поверхности (ИЛП), густотой стояния растений и концентрацией хлорофиллов (Хл.) − предикторы функции (X). Доля вклада фактора определялась по методу относительного вклада на основе стандартизированных коэффициентов регрессии.

Индекс листовой поверхности определяли по методике А. А. Ничипоровича [5], густоту стояния растений определяли по методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [3], концентрацию фотосинтетических пигментов определяли спектрофотометрически по методике Лихтенталера [16].

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 нормализованных разниц − 36 наблюдений (указано n = 18 или n = 36).

Результаты и обсуждения

Морфофизиологические параметры посевов озимой пшеницы варьировали в зависимости от года исследований и технологии возделывания (табл. 2).

Таблица 2 − Сводные данные по морфофизиологическим параметрам посевов озимой пшеницы сорта Эмма

Параметр		Фаза трубкования			Фаза колошения		
		2023	2024	2025	2023	2024	2025
ИЛП, $м^2/м^2$	среднее	5,7	4,14	4,98	7,25	5,22	5,73
	разброс	4,3-6,9	3,4-4,9	3,8-6,5	5-8,9	4,5-6,4	4,2-7,9
	CV, %	15,08	15,25	10,44	12,01	18,46	19,55
Густота стояния растений, $шт/м^2$	среднее	256	185	223	244	169	185
	разброс	217-287	168-201	180-291	198-276	161-182	156-228
	CV, %	9,76	12,67	4,12	5,28	9,00	10,58
Хл, $мг/дм^2$	среднее	5,60	6,09	6,23	6,35	5,95	6,32
	разброс	4,6-7,0	5,0-6,8	5,5-7,2	5,6-7,3	5,3-6,6	5,6-6,9
	CV, %	10,04	7,73	6,87	7,72	6,49	8,17

Индекс листовой поверхности показал среднюю силу варьирования − коэффициент вариации демонстрировал значения от 10,44 до 19,55 %. Густота стояния растений и концентрация хлорофилла преимущественно демонстрировали низкое варьирование признаков − для густоты стояния пиковый коэффициент вариации составил 12,67 %, для концентрации хлорофилла − 10,04 %

Показания индекса NDVI в фазу трубкования и колошения показали минимальное варьирование: в 2023 − 0,81-0,83 и 0,78-0,80 в фазы трубкования и колошения; в 2025 г. и 0,81-0,83 и 0,77-0,80 соответственно; в 2024 г. разброс больше − от 0,61 до 0,73 в фазу трубкования и от 0,65 до 0,70 в фазу колошения (рис. 1).

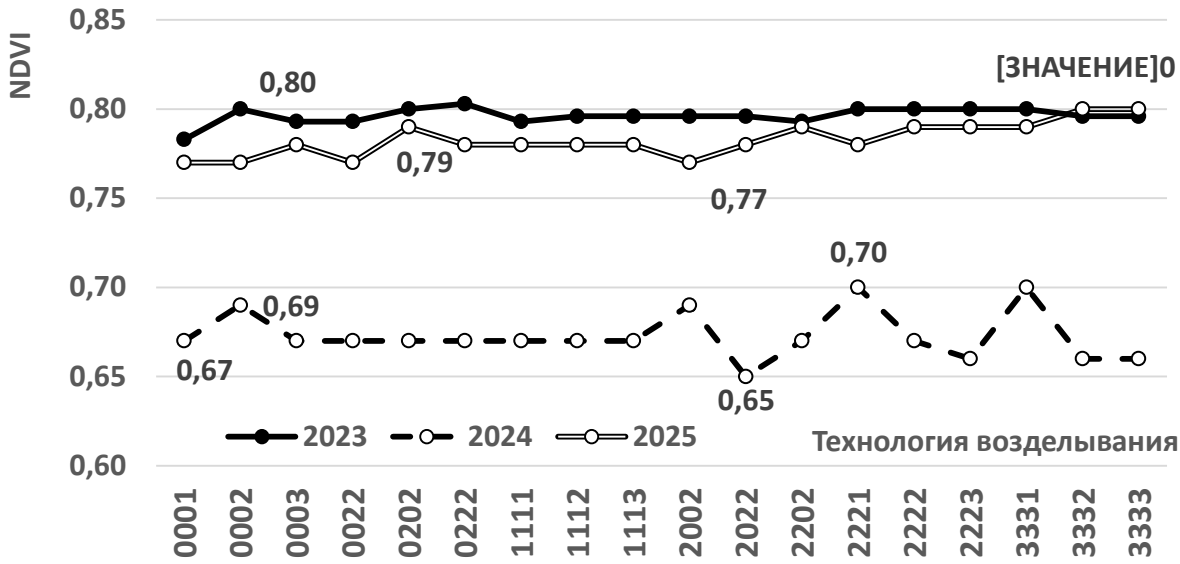


Рисунок 1 − Показания индекса NDVI в зависимости от технологии возделывания в фазу колошения

На основе морфофизиологических параметров и показаний широкополосного NDVI были рассчитаны уравнения регрессии и доля вклада фактора в дисперсию функции (табл. 3).

Наибольшую долю вклада в дисперсию NDVI преимущественно вносил индекс листовой поверхности, за исключением фазы трубкования 2025 г. и фазы колошения 2024 г., где наибольший вклад вносила густота стояния растений.

Таблица 3 − Доля вклада морфофизиологических параметров в показания широкополосного NDVI (n = 18)

Предиктор	Фаза трубкования			Фаза колошения		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025
ИЛП, $м^2/м^2$	**83,92**	**77,06**	15,13	**81,29***	27,51	**98,40***
Густота стояния растений, $шт/м^2$	12,35	22,73	**63,04**	18,25	**39,67**	0,94
Хлорофилл, $мг/дм^2$	3,73	0,21	21,83	0,47	32,82	0,67
Коэффициент детерминации R^2	**0,22**	**0,26**	**0,30**	**0,33**	**0,28**	**0,87**

* − достоверные предиктор на 5-% уровне значимости

В фазу трубкования 2025 г. коэффициент детерминации между NDVI и густотой стояния растений составил $R^2 = 0,12$ (рис. 2). При этом наблюдался серьёзный размах данных при NDVI = 0,82: минимальная густота стояния составила 180 шт/м^2, а максимальная − 291 шт/м^2.

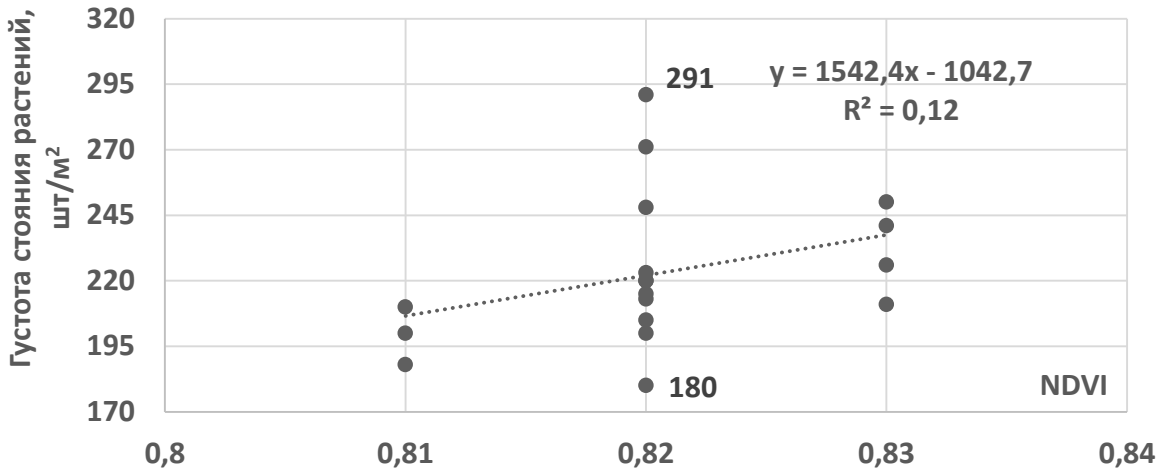


Рисунок 2 − Точечная диаграмма зависимости между показаниями NDVI и густотой стояния растений (фаза трубкования, 2025)

Уравнения, полученных на основе морфофизиологических параметров, в 5 из 6 случаев демонстрировали коэффициент детерминации в диапазоне R^2 = 0,22-0,33, а в фазу колошения 2025 г. было получено более точное уравнение с $R^2 = 0,87$. В данном уравнении доля ИЛП составила свыше 98 % вклада в дисперсию NDVI.

Коэффициент детерминации между показаниями NDVI и ИЛП в фазу колошения 2025 г. $R^2 = 0,86$ (рис. 3).

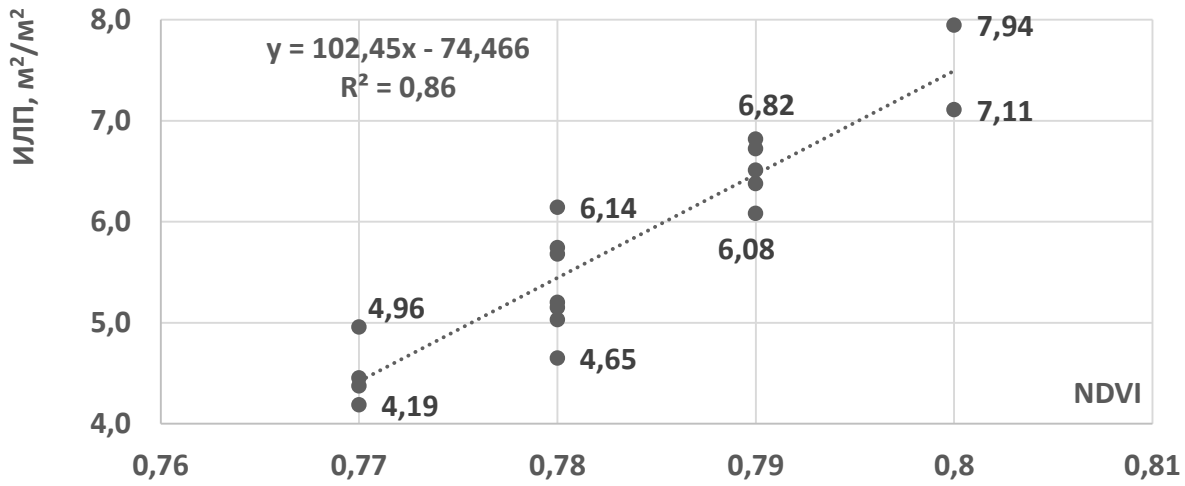


Рисунок 3 − Точечная диаграмма зависимости между показаниями NDVI и ИЛП (фаза колошения, 2025)

Коэффициент детерминации между NDVI и урожайностью в фазу колошения 2025 г. показал R^2 =0,435 против R^2 = 0,86 между NDVI и ИЛП (рис. 4).

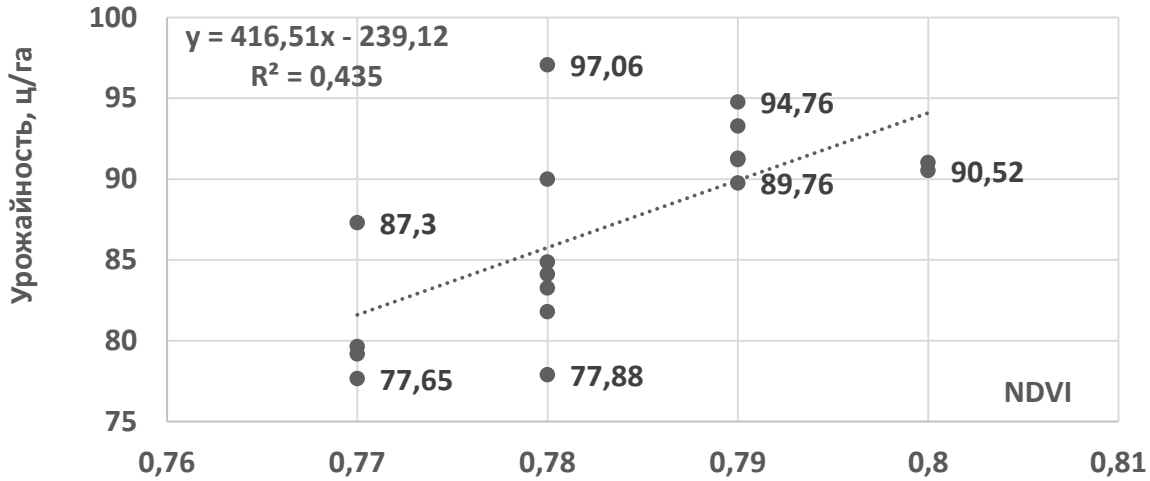


Рисунок 4 − Точечная диаграмма зависимости между показаниями NDVI и урожайностью (фаза колошения, 2025)

Таким образом, снижение чувствительности NDVI к урожайности в сравнении с ИЛП на 42,5 %.

Уравнения регрессии, описывающие дисперсию урожайности на основе морфофизиологических параметров, показали существенное варьирование коэффициентов детерминации − R^2 = 0,13-0,78 (табл. 4).

Таблица 4 – Доля вклада морфофизиологических параметров в урожайность озимой пшеницы сорта Эмма, % (n = 18)

Предиктор	Фаза трубкования			Фаза колошения		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025
ИЛП, $м^2/м^2$	**90,60***	**99,80***	**98,18***	**89,23***	18,2	**99,77***
Густота стояния растений, $шт/м^2$	2,41	0,23	1,42	0,02	9,58	0,01
Хлорофилл, $мг/дм^2$	6,99	0,01	0,40	10,76	**72,24***	0,22
Коэффициент детерминации R^2	**0,78**	**0,72**	**0,50**	**0,74**	**0,13**	**0,53**

* – достоверные предиктор на 5-% уровне значимости

В 5 из 6 уравнений основную вклад в дисперсию урожайности вносил ИЛП, за исключением фазы колошения 2024 г., где был получен наименьший коэффициент детерминации – R^2 = 0,13. Также стоит отметить, что именно в 2025 г. были получены наименьшие коэффициенты детерминация, за исключением фазы колошения 2024 г., – R^2 = 0,50 для фазы трубкования и R^2 = 0,53 для фазы колошения. В остальные годы коэффициенты детерминации были выше R^2 = 0,78 и R^2 = 0,74 для фазы трубкования в 2023 и 2024 гг. соответственно. Вероятно, неописанная часть дисперсии урожайности может быть связана с биохимическими особенностями формирования урожая пшеницы.

На основе морфофизиологических параметров и показаний mNDVI (924, 703, 423) [19] были рассчитаны уравнения регрессии (табл. 5). Данный индекс был выбран для расчёта, поскольку демонстрировал трехлетнюю стабильную среднюю силу связи с урожайностью в предыдущей работе [7].

Таблица 5 − Доля вклада морфофизиологических параметров в показания mNDVI (924, 703, 423), % (n = 36)

Предиктор	Фаза трубкования		Фаза колошения		
	2024	2025	2023	2024	2025
ИЛП, $м^2/м^2$	**77,95***	1,36	27,16	**85,28***	**65,62***
Густота стояния растений, $шт/м^2$	2,37	**73,99***	37,86	6,50	0,40
Хлорофилл, $мг/дм^2$	**19,67***	24,66	34,98	8,21	**33,98***
Коэффициент детерминации R^2	**0,66**	**0,23**	**0,05**	**0,41**	**0,52**

* − достоверные предиктор на 5-% уровне значимости

Коэффициенты детерминации для индекса mNDVI демонстрировали серьезное варьирование: в фазу колошения 2023 г. R^2 = 0,05, то есть варьирование морфофизиологических параметров описывала дисперсию mNDVI всего на 5 % − связь отсутствовала. Наилучшая же модель была получена в фазу трубкования 2024 г., где R^2 = 0,66, то есть описывала 2/3 варьирования индекса. В фазу колошения 2025 г., где широкополосный NDVI демонстрировал коэффициент детерминации R^2 = 0,86, mNDVI − R^2 = 0,52.

На основе исходных 164 спектральных каналов были рассчитаны УВИ по принципу нормализованной двухканальной разницы и нормализованной трехканальной разницы, которые затем подвергались регрессионному анализу с морфофизиологическими параметрами посевов в фазу колошения (табл. 6).

Наилучшие уравнения, описывающие дисперсию двухканальных нормализованных разниц в фазу колошения показали коэффициенты детерминации R^2 = 0,53-0,58, однако в каждый год отличались спектральные каналы: в 2023 г. нормализованная разница была получена на основе 962 и 986 нм, то есть на показаниях двух ИК каналов, в 2024 г. −

на показаниях 522 и 618 нм, то есть зеленый и оранжевый канал, в 2025 г. – 742 и 994 нм, то есть на показаниях крайней красной и ИК областей.

Таблица 6 – Доля вклада морфофизиологических параметров в показания нормализованных разниц, % (фаза колошения) (n = 36)

Предиктор уравнения	Год исследования					
	2023		2024		2025	
	962, 986[1]	950, 986, 998[2]	522, 618	542, 662, 738	742, 994	746, 946, 974
ИЛП, м^2/м^2	26,57*	**68,12***	**94,5***	**81,46***	**63,68***	**92,53***
Густота стояния растений, шт/м^2	**66,67***	19,56*	5,38	3,55	14,54	0,93
Хлорофилл, мг/дм^2	6,75	12,31	0,12	14,99*	21,78*	6,53*
Коэффициент детерминации R^2	**0,53**	**0,53**	**0,58**	**0,59**	**0,56**	**0,68**

* – достоверные предиктор на 5-% уровне значимости

1 – $NR2\ (x, y) = \frac{x - y}{x + y}$

2 – $NR3\ (x, y, z) = \frac{x - y + 2z}{x + y - 2z}$

Трехканальные нормализованные разницы демонстрировали близкую детерминацию к двухканальным, однако в 2025 г. был получен более высокий коэффициент детерминации – $R^2 = 0,68$, построенной на основе крайнего красного и двух ИК спектров – 746, 946 и 974 нм против $R^2 = 0,56$ для двухканальной нормализованной разницы 742 и 994 нм.

Обсуждения

Вероятная причина столь высокой детерминации NDVI с ИЛП в фазу колошения 2025 г. связана с положением листа в момент съемки. Вероятно, в случае колошения 2025 г. листья находились в положении, приближенном к вертикальному, что повышало влияние среднего и нижнего яруса листьев на показания NDVI. В остальные фазы коэффициенты детерминации были низкими, что связано с быстрой

насыщаемостью индекса NDVI – при ИЛП свыше 2-3 $м^2/м^2$ данный индекс теряет чувствительность [18].

Ряд авторов утверждают, что NDVI является не лучшим спектральным параметром для оценки ИЛП: Яо [20] показал индекс MTVI2, который оставался чувствительным к ИЛП в диапазоне 2-7 $м^2/м^2$; Гительсон использовал индексы, содержащие крайнюю красную область спектров света для большей отзывчивость индексов к ИЛП – NDVI (810, 680) демонстрировал R^2 = 0,55, а индекс NDRE – R^2 = 0,67 [12]. Гоэль отмечал, что отражательная способность посева зависит от комплекса факторов, и эти факторы взаимодействуют друг на друга, причем делают это нелинейно [13]. А Гао отмечал, что сложная структура посева из-за беспорядочного распределения листьев пшеницы приводит к взаимным теням и перекрытиям листьев пшеницы, что приводит к неоднородному распределению света [11]. Также стоит отметить варьирование концентрации фотосинтетических пигментов в зависимости от места извлечения пигментов [15] и динамику концентрации пигментов в зависимости от яруса листьев.

Снижение детерминации между уравнениями «NDVI - ИЛП» (R^2 = 0,86) и «NDVI - урожайность» (R^2 = 0,435) на 42,5 %, вероятно, связано с биохимическим аспектом формирования урожайности. NDVI и другие спектральные характеристики привязаны к интенсивности отражения света от поверхности посевов, то есть к комбинации фотосинтетических пигментов и площади проективного покрытия.

Концентрация пигментов и ИЛП – это потенциальные параметры реализации эффективного фотосинтеза, однако лимитировать продуктивность могут биохимические параметры. Например, серьезным ограничением формирования высоких урожаев может выступать процесс фотодыхания или влияние затенения на активность фотосинтеза в нижнем и среднем ярусах листьев.

Данная гипотеза строится на том, что предшествующей культурой в данном исследовании выступала люцерна − отличный предшественник для озимой пшеницы, снижающий разброс по азотному питанию в схеме опыта, поскольку за 3 года выращивания люцерна вносит около 150-250 кг азота [8]. Вероятно, доступность азота в комбинации с достаточным количеством осадков привела к нивелированию разброса питания растений, однако разница по урожайности была высокой, вероятно, из-за большего влияния биохимических параметров на урожайность в период вегетации 2025 г. При менее благоприятных предшественниках пшеницы большую долю в дисперсию урожая будет вносить именно уровень минерального питания и количество влаги. Важным ограничением технологий дистанционного зондирования выступает фиксация именно потенциальных характеристик продуктивности посевов, биохимический аспект формирования урожайности не учитывается.

Стабильность метода остается наиболее острым вопросом. NDVI и другие вегетационные индексы при фиксации среднего значения не дает стабильных и точных результатов как в прогнозировании урожайности [7], так и в связке «морфофизиология - спектральные характеристики». Вероятно, это связано с проективным покрытием листьев, которое, в зависит от доли разных яруса листьев с концентрацией пигментов, дает низкую дисперсию вегетационных индексов при варьировании ИЛП и концентрации пигментов в верхних листьях.

Серьезным ограничивающим фактором информативности вегетационных индексов является оценка «среднего значения», при этом дисперсия внутри посева не учитывается. Необходим переход к более глубоким методам анализа изображения, поскольку часть информации теряется. Поэтому переход к использованию машинного обучения для выделения информативных спектральных каналов, что и происходит в

иностранной литературе [10, 21], является новым этапом развития технологий дистанционного зондирования.

Заключение

Уравнения регрессии, описывающие дисперсию широкополосного NDVI, демонстрировали преимущественно низкие коэффициенты детерминации от R^2 = 0,22 до R^2 = 0,33, за исключением фазы колошения 2025 г. – R^2 = 0,87, что является наибольшей детерминации в данной работе. Основную долю вклада в дисперсию NDVI вносил индекс листовой поверхности.

Уравнения регрессии дисперсии mNDVI (924, 703, 423) также показал существенное варьирование коэффициентов детерминации в зависимости от фазы и года съемки: коэффициент детерминации варьировал от R^2 = 0,05 до R^2 = 0,66.

Уравнения, рассчитанные для нормализованных разниц (NR2 и NR3), показали варьирование коэффициента детерминации от R^2 = 0,53 до R^2 = 0,68, то есть описывали от половины до 2/3 дисперсии в зависимости от варьирования морфофизиологический параметров. Однако варьировали чувствительные спектральные каналы – в 2023 и 2025 гг. нормализованные разницы базировались на показаниях ИК спектральных каналов (не совпадали в разные годы), а в 2024 г. – на показаниях зеленой, оранжевой и крайней красной спектральных областей света. Основным морфофизиологическим параметров, зачастую, выступал индекс листовой поверхности с долей вклада от 63,68 до 92,53 %. Исключение составила двухканальная нормализованная разница 962 и 986 нм с коэффициентом детерминации R^2 = 0,53 и долей густоты стояния растений в 66,67 %, ИЛП вносил 26,57 %.

Доля вклада морфофизиологические параметров посевов в показания вегетационных индексов носит нестабильный характер, однако, зачастую,

основную долю вносит ИЛП. Узкополосные вегетационные индексы в отельные моменты демонстрируют большую детерминацию с морфофизиологическими параметрами, чем широкополосный NDVI, однако наибольшая разовая детерминация была отмечена между NDVI и ИЛП – R^2 = 0,86.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МПИ-25.1/6»

Список литературы

1. Богданчиков, И. Ю. Результаты мониторинга почвенных неоднородностей на основе мультиспектральных снимков полей при утилизации незерновой части урожая в качестве удобрения / И. Ю. Богданчиков, Н. В. Бышов, К. Н. Дрожжин, Д. О. Олейник, Е. В. Березовский // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2020. – № 3 (47). – С. 74-79.

2. Малюга Н. Г. Программа и методика проведения опыта / Н. Г. Малюга, А. М. Кравцов, А. В. Загорулько и др. // Трубилин И. Т., Малюга Н. Г. (ред). Агроэкологический мониторинг в земледелии Краснодарского края. Труды КубГАУ. – Краснодар, 2008. – Вып. 431 (459). – С.6-13.

3. Методика Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. – Вып. № 1. – М., 1985. – 270 с.

4. Монес, Д. Сравнительные испытания дифференцированного внесения удобрений под озимую пшеницу с использованием карт-заданий и азотных сканеров / Д. Монес, Е. В. Труфляк, Н. Курченко // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2020. – Т. 14, № 3. – С. 56-62.

5. Ничипорович, А. А. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах / А. А. Ничипорович, Л. Е. Строганова, С. Н. Чмора, М. П. Власова. – Москва : Издательство Академии наук СССР, 1961. – 211 с.

6. Родимцев, С. А. Использование вегетативного индекса NDVI для прогноза урожайности зерновых культур / С. А. Родимцев, Н. Е. Павловская, С. В. Вершинин, И. В. Горькова, И. Н. Гагарина // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2023. – № 4. – С. 56-67.

7. Савинский, А. О. Связь показаний узкополосных вегетационных индексов с урожайностью озимой пшеницы / А. О. Савинский, Ю. В. Подушин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2026. – №04(218). С. 240 – 258.

8. Степанов, А. Ф. Азотфиксирующая способность и роль бобовых трав в биологизации земледелия / А. Ф. Степанов, С. П. Чибис, В. В. Христич, С. Н. Александрова, С. Ю. Храмов // Земледелие. – 2023. – № 1. – С. 18-22.

9. Федулов, Ю. П. Влияние агротехнических факторов на содержание фотосинтетических пигментов в листьях озимой пшеницы сорта Степь / Ю. П. Федулов, А. В. Загорулько, Ю. В. Подушин, Х. Амини // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2022. – № 102. – С. 208-215. – DOI 10.21515/1999-1703-102-208-215. – EDN VJJQKQ.

10. Ali, F. Spectral intelligence: AI-driven hyperspectral imaging for agricultural and ecosystem applications / F. Ali, A. Razzaq, W. Tariq, A. Hameed, A. Rehman, K. Razzaq, S. Fahad, G. Ondrasek // Agronomy. – 2024. – Vol. 14, № 10. – P. 2260.
11. Gao, D. In-field chlorophyll estimation based on hyperspectral images segmentation and pixel-wise spectra clustering of wheat canopy / D. Gao, L. Qiao, D. Song, M. Li, H. Sun, L. An, R. Zhao, W. Tang, J. Qiao // Biosystems Engineering. – 2022. – Vol. 217. – P. 41-55.
12. Gitelson, A. A. Relationships between gross primary production, green LAI, and canopy chlorophyll content in maize: Implications for remote sensing of primary production / A. A. Gitelson, Y. Peng, T. J. Arkebauer, J. Schepers // Remote Sensing of Environment. – 2014. – Vol. 144. – P. 65-72.
13. Goel, N. S. Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and FPAR: A computer simulation / N. S. Goel, W. Qin // Remote Sensing Reviews. – 1994. – Vol. 10, № 4. – P. 309-347.
14. Huang, S. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing / S. Huang, L. Tang, J. P. Hupy, Y. Wang, G. Shao // Journal of Forestry Research. – 2021. – Vol. 32, № 1. – P. 1-6.
15. Jurjescu, A. L. Photosynthetic pigments distributions along the length of the wheat leaf; case study in Dacic cultivar / A. L. Jurjescu, F. Sala // Annals of West University of Timişoara, Series Biology. – 2023. – Vol. 26, № 2. – P. 55-68.
16. Lichtenthaler, H. K. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents / H. K. Lichtenthaler, A. R. Wellburn // Biochemical Society Transactions. – 1983. – Vol. 11, № 5. – P. 591-592.
17. Thenkabail, P. S. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics / P. S. Thenkabail, R. B. Smith, E. De Pauw // Remote Sensing of Environment. – 2000. – Vol. 71, № 2. – P. 158-182.
18. 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. – P. 3468-3478.
19. Wang, W. Estimating leaf nitrogen concentration with three-band vegetation indices in rice and wheat / W. Wang, X. Yao, X. Yao, Y. Tian, X. Liu, J. Ni, W. Cao, Y. Zhu // Field Crops Research. – 2012. – Vol. 129. – P. 90-98.
20. Yao, X. Estimation of wheat LAI at middle to high levels using unmanned aerial vehicle narrowband multispectral imagery / X. Yao, N. Wang, Y. Liu, T. Cheng, Y. Tian, Q. Chen, Y. Zhu // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, № 12. – P. 1304.
21. Yoosefzadeh-Najafabadi, M. Using hybrid artificial intelligence and evolutionary optimization algorithms for estimating soybean yield and fresh biomass using hyperspectral vegetation indices / M. Yoosefzadeh-Najafabadi, D. Tulpan, M. Eskandari // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, № 13. – P. 2555.

Reference

1. Bogdanchikov, I. Yu. Rezul'taty monitoringa pochvennykh neodnorodnostey na osnove mul'tispektral'nykh snimkov poley pri utilizatsii nezernovoy chasti urozhaya v kachestve udobreniya / I. Yu. Bogdanchikov, N. V. Byshov, K. N. Drozhzhin, D. O. Oleynik, E. V. Berezovskiy // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. – 2020. – № 3 (47). – S. 74-79.
2. Malyuga N. G. Programma i metodika provedeniya opyta / N. G. Malyuga, A. M. Kravtsov, A. V. Zagorul'ko i dr. // Trubilin I. T., Malyuga N. G. (red). Agroekologicheskiy

monitoring v zemledelii Krasnodarskogo kraya. Trudy KubGAU. – Krasnodar, 2008. – Vyp. 431 (459). – C.6-13.

3. Metodika Gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. – Vyp. № 1. – M., 1985. – 270 s.

4. Mones, D. Sravnitel'nye ispytaniya differentsirovannogo vneseniya udobreniy pod ozimuyu pshenitsu s ispol'zovaniem kart-zadaniy i azotnykh skanerov / D. Mones, E. V. Truflyak, N. Kurchenko // Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii. – 2020. – T. 14, № 3. – S. 56-62.

5. Nichiporovich, A. A. Fotosinteticheskaya deyatel'nost' rasteniy v posevakh / A. A. Nichiporovich, L. E. Stroganova, S. N. Chmora, M. P. Vlasova. – Moskva : Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1961. – 211 s.

6. Rodimtsev, S. A. Ispol'zovanie vegetativnogo indeksa NDVI dlya prognoza urozhaynosti zernovykh kul'tur / S. A. Rodimtsev, N. E. Pavlovskaya, S. V. Vershinin, I. V. Gor'kova, I. N. Gagarina // Vestnik NGAU (Novosibirskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet). – 2023. – № 4. – S. 56-67.

7. Savinskiy, A. O. Svyaz' pokazaniy uzkopolosnykh vegetatsionnykh indeksov s urozhaynost'yu ozimoy pshenitsy / A. O. Savinskiy, Yu. V. Podushin // Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2026. – №04(218). S. 240 – 258.

8. Stepanov, A. F. Azotfiksiruyushchaya sposobnost' i rol' bobovykh trav v biologizatsii zemledeliya / A. F. Stepanov, S. P. Chibis, V. V. Khristich, S. N. Aleksandrova, S. Yu. Khramov // Zemledelie. – 2023. – № 1. – S. 18-22.

9. Fedulov, Yu. P. Vliyanie agrotekhnicheskikh faktorov na soderzhanie fotosinteticheskikh pigmentov v list'yakh ozimoy pshenitsy sorta Step' / Yu. P. Fedulov, A. V. Zagorul'ko, Yu. V. Podushin, Kh. Amini // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2022. – № 102. – S. 208-215. – DOI 10.21515/1999-1703-102-208-215. – EDN VJJQKQ.

10. Ali, F. Spectral intelligence: AI-driven hyperspectral imaging for agricultural and ecosystem applications / F. Ali, A. Razzaq, W. Tariq, A. Hameed, A. Rehman, K. Razzaq, S. Fahad, G. Ondrasek // Agronomy. – 2024. – Vol. 14, № 10. – P. 2260.

11. Gao, D. In-field chlorophyll estimation based on hyperspectral images segmentation and pixel-wise spectra clustering of wheat canopy / D. Gao, L. Qiao, D. Song, M. Li, H. Sun, L. An, R. Zhao, W. Tang, J. Qiao // Biosystems Engineering. – 2022. – Vol. 217. – P. 41-55.

12. Gitelson, A. A. Relationships between gross primary production, green LAI, and canopy chlorophyll content in maize: Implications for remote sensing of primary production / A. A. Gitelson, Y. Peng, T. J. Arkebauer, J. Schepers // Remote Sensing of Environment. – 2014. – Vol. 144. – P. 65-72.

13. Goel, N. S. Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and FPAR: A computer simulation / N. S. Goel, W. Qin // Remote Sensing Reviews. – 1994. – Vol. 10, № 4. – P. 309-347.

14. Huang, S. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing / S. Huang, L. Tang, J. P. Hupy, Y. Wang, G. Shao // Journal of Forestry Research. – 2021. – Vol. 32, № 1. – P. 1-6.

15. Jurjescu, A. L. Photosynthetic pigments distributions along the length of the wheat leaf; case study in Dacic cultivar / A. L. Jurjescu, F. Sala // Annals of West University of Timişoara, Series Biology. – 2023. – Vol. 26, № 2. – P. 55-68.

16. Lichtenthaler, H. K. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents / H. K. Lichtenthaler, A. R. Wellburn // Biochemical Society Transactions. – 1983. – Vol. 11, № 5. – P. 591-592.

17. Thenkabail, P. S. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics / P. S. Thenkabail, R. B. Smith, E. De Pauw // Remote Sensing of Environment. – 2000. – Vol. 71, № 2. – P. 158-182.

18. 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. – P. 3468-3478.

19. Wang, W. Estimating leaf nitrogen concentration with three-band vegetation indices in rice and wheat / W. Wang, X. Yao, X. Yao, Y. Tian, X. Liu, J. Ni, W. Cao, Y. Zhu // Field Crops Research. – 2012. – Vol. 129. – P. 90-98.

20. Yao, X. Estimation of wheat LAI at middle to high levels using unmanned aerial vehicle narrowband multispectral imagery / X. Yao, N. Wang, Y. Liu, T. Cheng, Y. Tian, Q. Chen, Y. Zhu // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, № 12. – P. 1304.

21. Yoosefzadeh-Najafabadi, M. Using hybrid artificial intelligence and evolutionary optimization algorithms for estimating soybean yield and fresh biomass using hyperspectral vegetation indices / M. Yoosefzadeh-Najafabadi, D. Tulpan, M. Eskandari // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, № 13. – P. 2555.