

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕГЕТАТИВНОГО ИНДЕКСА NDVI ДЛЯ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

¹С.А. Родимцев, доктор технических наук, доцент

²Н.Е. Павловская, доктор биологических наук, профессор

²С.В. Вершинин, доцент

²И.В. Горькова, доктор технических наук, доцент

²И.Н. Гагарина, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

¹Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел, Россия

²Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, Орел, Россия

E-mail: rodimcew@yandex.ru

Ключевые слова: урожайность, вегетативный индекс, временные ряды NDVI, зерновые культуры, фазы вегетации, БПЛА, математическая обработка данных, прогностическая модель.

Реферат. Одна из ключевых проблем раннего прогнозирования урожайности сельхозкультур с использованием спутникового мониторинга заключается в отсутствии единых подходов к определению фенофазы достоверного показателя вегетативного индекса. Рядом работ отечественных и зарубежных исследователей формулируются различные оценки корреляционной зависимости между показателями NDVI и урожайностью. Цель настоящего исследования состояла в получении прогностических моделей урожайности пшеницы озимой и ячменя ярового с использованием показателей наиболее адекватного для формализации задач прогноза участка тренда вегетативного индекса NDVI посевов в пределах опытного хозяйства Орловского ГАУ. На основе анализа динамики изменения вегетационного индекса NDVI, по данным многолетних исследований, определены максимальные среднееголетние значения вегетативного индекса, составляющие 0,72 для озимой пшеницы и 0,56 для ярового ячменя. Максимальные значения NDVI сезона 2021 г. для этих культур – 0,78 и 0,58. Установлено, что пики значений NDVI соответствуют фазе колошения культур при возможном варьировании от 1 до 13 дней. Коэффициенты корреляции между максимальными значениями NDVI и продуктивностью культур составили 0,79 и 0,75 для пшеницы озимой и ярового ячменя соответственно, что дает основание утверждать о возможности достоверного прогноза урожайности культур на основе данных их пиковых значений NDVI. Получены прогностические модели урожайности культур на основе полиномиальных (второй степени) функций. Достоверный прогноз урожайности расширяет область возможностей обоснованных оценок и реализации планов, направленных на поступательное развитие отдельного хозяйства, и способствует повышению продовольственной безопасности России в целом.

THE USE OF THE VEGETATIVE INDEX NDVI TO PREDICT GRAIN CROP YIELDS

¹S.A. Rodimtsev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

²N.E. Pavlovskaya, Doctor of Biological Sciences, Professor

²S.V. Vershinin, Associate Professor

²I.V. Gorkova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

²I.N. Gagarina, Ph.D. in Agricultural Science, Associate Professor

¹Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

²Orel State Agrarian University named after N.N. Parakhin, Orel

E-mail: rodimcew@yandex.ru

Keywords: yield, vegetative index, NDVI time series, grain crops, vegetation phases, UAV, mathematical data treatment, predictive model.

Abstract. The need for unified approaches to determining the phenological phase of a reliable indicator of the vegetative index is one of the critical problems of early forecasting of crop yields using satellite monitoring. Several works of domestic and foreign researchers formulate different estimates of the correlation relationship between NDVI and yield. This study aimed to obtain predictive models for the product of winter wheat and spring barley using indicators that are adequate for formalizing the tasks of predicting the trend section of the vegetative index NDVI of crops within the experimental farm of the Oryol State Agrarian University. Based on the analysis of

the dynamics of the vegetation index NDVI, based on multi-year studies, the maximum mean annual values of the vegetation index, 0.72 for winter wheat and 0.56 for spring barley, were determined. The maximum NDVI values of the 2021 season for these crops are 0.78 and 0.58. It was found that the peaks of NDVI values correspond to the earing phase of crops with possible variation from 1 to 13 days. The correlation coefficients between the maximum values of NDVI and productivity of crops were 0.79 and 0.75 for winter wheat and spring barley, respectively, which suggests the possibility of reliable prediction of crop yield based on the data of their peak NDVI values. The authors obtained predictive crop yield models based on polynomial (second-degree) functions. A reliable yield forecast expands the scope of reasonable estimates and the implementation of plans aimed at the progressive development of the individual farm. Furthermore, it contributes to the food security of Russia as a whole.

В применение к задачам прогнозирования, многими исследователями отмечается высокая корреляция показателей урожайности культуры и значений ее вегетативного индекса [1–5]. Наиболее популярным и часто применяемым является нормализованный относительный вегетационный индекс NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) [6].

Так, анализом сезонной динамики NDVI выявлены более высокие значения данного показателя в летние месяцы [10, 11]. По мнению авторов работы, это объясняется увеличением биомассы и количества хлорофилла в зеленых листьях растений [10]. При этом понижается яркость растений в видимой части спектра и возрастает в инфракрасной [12], что увеличивает расчётное значение NDVI. В противоположность последнему, за счет разрушения хлорофилла в конце вегетационного периода (осенние месяцы) отражательная способность в красной зоне спектра возрастает, а в ближней инфракрасной – уменьшается. Соответственно снижается значение вегетативного индекса.

Высокая степень взаимосвязи вегетативного индекса и количества накопленного хлорофилла в вегетирующих растениях подтверждается результатами ряда исследований [1, 13, 14]. Кроме того, отмечается значение индекса NDVI как меры фотосинтезирующей биомассы [13].

Для использования данного показателя в качестве оценки ожидаемого урожая важен выбор той фазы вегетации, NDVI которой имеет наиболее высокую степень корреляции с численным значением урожайности культуры. Следует отметить, что некоторыми авторами отмечается наличие корреляционной зависимости между интегрированными максимальными значениями NDVI и их урожайностью [2–5, 15].

Так, на основе изучения корреляционной связи между вегетационным индексом NDVI посевов озимой пшеницы всех вариантов и урожайностью культуры в различные фазы роста и развития продемонстрирована наи-

более тесная взаимосвязь в начале фазы колошения. Коэффициент корреляции здесь составил 0,62 в среднем по всем годам исследований [5].

А.А. Коротков, А.Ю. Астапов [15] утверждают, что наиболее точный прогноз урожайности посевов по индексу NDVI следует ожидать в момент прохождения пика значения NDVI. Отмечается, что для посевов озимой пшеницы при возделывании по интенсивной технологии наибольшее значение NDVI достигает 0,80–0,88. При этом пик NDVI приходится на момент начала фазы колошения [16].

В наших исследованиях ставилась цель получить прогностические модели урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя на основе использования показателей наиболее адекватного для формализации задач прогноза участка тренда вегетационного индекса NDVI посевов в пределах опытного хозяйства Орловского ГАУ.

Задачами исследований являлись:

- получение, обработка и анализ ретроспективы данных NDVI по яровому ячменю и озимой пшенице;
- определение фенологических фаз развития культур, соответствующих пиковым (максимальным) значениям NDVI;
- численная оценка многолетнего корреляционного отношения максимальных значений NDVI и урожайности культур и вывод о возможности использования вегетационного индекса NDVI как показателя урожайности культур;
- выбор уравнения регрессии, отражающего зависимость урожайности культуры от значения NDVI.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Базой для проведения исследований стали поля НОПЦ «Интеграция» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.

Статистика NDVI-снимков за 5-летнюю ретроспективу (2016–2020 гг.) обеспечива-

лась спутниковыми данными, полученными с использованием геопортала «КосмосАгро». Применялись свободные от облачности (не более 10%) разновременные архивные данные ДЗЗ со съемочной системы Sentinel-2. Для аналитической обработки применялась утилита ScanEx Geomixer.

Для получения текущих данных NDVI сезона вегетации культур 2021 г. был задействован БПЛА «Агрофлай Квадро 4/17» с мультиспектральной камерой для построения вегетативных индексов.

Уравнение расчета вегетативного индекса NDVI подразумевает использование значений двух наиболее стабильных, не зависящих от прочих факторов участков кривой спектральной отражательной способности растений: видимой красной зоны спектра (0,62–0,75 мкм) и ближней инфракрасной зоны (0,75–1,3 мкм). При этом, если участок 0,62–0,75 мкм – зона максимального поглощения солнечной радиации хлорофиллом, то на участке 0,75–1,3 мкм происходит наибольшее отражение солнечной энергии клеточной структурой листовой поверхности растений [7–9]. Именно отношение этих двух показателей позволяет не только идентифицировать те или иные объекты по принадлежности их к растительному покрову, но и характеризовать стадию вегетативного процесса.

Соответственно, нормализованный разностный вегетационный индекс рассчитывали по формуле [6]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где NIR, RED – отражение растительного покрова соответственно в ближней инфракрасной и красной областях электромагнитного спектра.

Обработку результатов биометрических расчетов по показателю «урожайность, ц/га», а также значениям NDVI проводили в программной среде Microsoft Excel. При определении среднегодовых и среднемноголетних показателей урожайности и вегетативного индекса, оценке степени корреляционной зависимости (коэффициента корреляции k), рассчитывались среднеарифметические и среднеквадратические отклонения, коэффициенты вариации и дисперсии по выборкам, выполнялся поиск и исключение артефактов, изучались параметры распределения вариационных рядов, погрешность расчетных значений не превышала 5%.

Анализ наступления фенофаз проводили визуальным методом и путем подсчета на учитываемой площади в пределах учетной рамки размером 0,25 м² (50×50 см) и разбор проб отобранных растений.

Повторность отбора образцов при оценке урожайности составляла не менее 3.

Величина достоверности аппроксимации определялась вычислением коэффициента детерминации по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2}, \quad (2)$$

где σ^2 , σ_y^2 – дисперсии ошибки модели и случайной величины.

Кроме того, производилась оценка точности модели с использованием показателя средней абсолютной ошибки MAPE (Mean Absolute Percentage Error). Ошибка прогнозирования определялась сравнением фактического показателя урожайности $y_{\text{факт}}$, с ее теоретическими значениями $y_{\text{теор}}$, найденными для каждого вида функции, по формуле

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_{\text{теор}} - y_{\text{факт}}|}{y_{\text{факт}}} \cdot 100, \quad (3)$$

где n – количество сравниваемых пар значений:

$y_{\text{теор}}$; $y_{\text{факт}}$ – значения показателей критерия оптимизации математической модели и фактические показатели признака, полученные в ходе эксперимента, соответственно.

Для определения метеорологических и почвенно-климатических параметров в период полевого сезона 2021 г., использовалась автоматическая метеостанция «Сокол-М» с выносным почвенным модулем БМВД.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонная динамика изменения индекса NDVI, по многолетним данным, иллюстрируется табл. 1. Как видно, характер изменения значений временных рядов культур аналогичен и более соответствует закону нормального распределения. Независимо от культуры, меньшие значения вегетативного индекса соответствуют зимним месяцам. В период с мая по июнь наблюдаются наиболее высокие значения NDVI. Максимальные среднемноголетние значения вегетативного индекса приходятся на июнь и составляют 0,72 для озимой пшеницы и 0,56 для ярового ячменя.

Динамика изменения вегетационного индекса NDVI по данным многолетних исследований
Dynamics of changes in the vegetation index NDVI according to long-term studies

Год наблюдений	Месяц											
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
<i>Пшеница озимая</i>												
2016	-	-0,02	0,30	0,26	0,55	0,71	0,44	0,39	0,36	0,28	0,26	-
2017	-0,03	-0,03	0,19	0,32	0,43	0,74	0,73	0,54	0,55	0,46	0,48	0,20
2018	-	-0,03	0,35	0,16	0,53	0,70	0,36	0,40	0,39	0,29	0,17	-
2019	-0,04	-	0,26	0,29	0,58	0,65	0,39	0,26	0,23	0,20	0,34	-
2020	-	-	0,42	0,42	0,76	0,79	0,39	0,32	0,38	0,35	0,19	0,21
2021	-	-	0,28	0,28	0,54	0,73	0,38	0,27	0,29	-	-	-
Средне­мно­го­лет­ние значения	-0,04	-0,03	0,33	0,29	0,57	0,72	0,45	0,36	0,37	0,27	0,28	0,21
<i>Ячмень яровой</i>												
2016	-0,04	-	0,18	0,19	0,36	0,55	0,53	0,42	0,32	0,22	0,2	-
2017	-0,04	-0,03	0,30	0,33	0,50	0,56	0,80	0,54	0,49	0,48	0,23	0,03
2018	-	-0,04	-	0,20	0,27	0,48	0,47	0,39	0,33	0,26	0,19	-
2019	-0,03	-	0,14	0,14	0,37	0,56	0,52	0,32	0,19	0,19	0,30	-
2020	-0,01	-	0,17	0,19	0,27	0,54	0,41	0,37	0,33	0,21	0,13	0,13
2021	-	-	-	0,15	0,27	0,69	0,49	0,30	-	-	-	-
Средне­мно­го­лет­ние значения	-0,04	-0,03	0,19	0,20	0,34	0,56	0,54	0,39	0,33	0,24	0,22	0,11

Табл. 2 и 3 иллюстрируют взаимосвязь наступления фенофаз культур, значений индекса NDVI, погодных и почвенно-климатических условий.

Исследованиями в полевых условиях сезона 2021 г. установлены следующие сроки и условия наступления типичных фаз развития посевов ярового ячменя/озимой пшеницы:

– фаза «3-й лист–кущение»: сумма осадков за период – 14/35 мм; средняя температура воздуха – 20,2/10,5 °С; средний уровень ультрафиолета – 16,7/10,1 Вт/м²;

– фаза «выход в трубку» (продолжительность – 13/31 дней): сумма осадков за период – 0/0,45 мм; средняя температура воздуха – 31,9/22,3 °С; средний уровень ультрафиолета – 27,0/25,2 Вт/м²;

– фаза «колошение» (продолжительность – 9/11 дней): сумма осадков за период – 3,9/0 мм; средняя температура воздуха – 26,6/25,4 °С; средний уровень ультрафиолета – 19,2/28,9 Вт/м².

– фаза «цветение» (продолжительность – 15/11 дней): сумма осадков за период – 0,5/2,1 мм; средняя температура воздуха – 35,1/28,7 °С; средний уровень ультрафиолета – 28,2/26,8 Вт/м²;

– фаза «созревание» (продолжительность – 23/11 дней): сумма осадков за период – 0,6/5,5 мм; средняя температура воздуха – 27,6/31,3 °С; средний уровень ультрафиолета – 13,7/28,8 Вт/м²;

В условиях Орловской области снабжение яровых зерновых влагой считается оптимальным, когда в период «посев – всходы» выпадает 30–45 мм осадков. Результаты полевых наблюдений показали, что в период с 7 по 23 мая выпало около 25 мм осадков. Это повлекло некоторое увеличение срока всходов (11–12 дней), тогда как по многолетним данным всходы появляются на 8–9-й день.

В период «всходы – цветение» выпало 95 мм осадков, что является достаточным водоснабжением для обеспечения нормального развития посевов яровых и озимых.

В фазы развития «цветение–созревание» зерновых метеостанцией «Сокол-М» выпадение осадков зафиксировано на уровне всего 0,6 и 5,5 мм для ярового ячменя и озимой пшеницы соответственно. Тем не менее показатели запасов почвенной влаги в корнеобитаемом слое составили 67–73 мм, что является оптимальным для обеспечения формирования урожая зерновых культур.

Температурный режим и солнечная активность сезона 2021 г. в целом мало отличались от среднемноголетних показателей по Орловской области и не оказывали аномального влияния на вегетативный процесс.

В табл. 4 и 5 продемонстрированы корреляционные зависимости показателей NDVI,

метеорологических и почвенно-климатических параметров вегетативного сезона 2021 г. Из представленных данных следует, что наибольшее влияние на динамику изменения вегетативного индекса оказывают уровень ультрафиолетового излучения, суммарное количество осадков, а также влажность почвы.

Таблица 2

Численные значения индекса NDVI и почвенно-климатических показателей по периодам наступления фенофаз при формировании урожая ярового ячменя сезона 2021 г.

Numerical values of the NDVI index and soil-climatic indicators by the periods of the onset of the phenological phase during the formation of the spring barley crop of the 2021 season

Показатели	Дата														
	01.06	04.06	07.06	10.06	16.06	21.06	23.06	28.06	02.07	09.07	14.07	17.07	30.07	10.08	11.08
Фенофаза развития культуры	Фаза 3-го листа				Выход в трубку			Колошение		Цветение			Созревание		
NDVI	0,47	0,51	0,55	0,55	0,74	0,72	0,69	0,68	0,67	0,61	0,55	0,49	0,36	0,26	0,22
Температура почвы, °С	19	21	22	19	29	36	22	22	25	29	29	27	25	27	28
Влажность почвы, %	35	35	29	50	42	31	53	54	57	55	53	55	59	62	62
Температура воздуха, °С	14,10	21,23	22,00	23,56	29,60	30,85	35,20	22,30	30,80	33,70	35,70	35,80	28,80	29,00	25,00
Относительная влажность, %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	41	100	100	100	100
Количество осадков, мм	0	0	0	0	0	0	0	1,70	2,20	0,50	0	0	0,40	0,15	0,15
Мощность ультрафиолетового излучения, Вт/м ²	5,99	22,60	8,25	30,05	30,80	23,90	26,30	6,70	31,80	29,80	27,40	27,40	25,50	5,40	10,20
Влажность листа, %	0	1	0	3	0	1	1	5	4	1	2	3	4	2	1

Таблица 3

Численные значения индекса NDVI и почвенно-климатических показателей по периодам наступления фенофаз при формировании урожая озимой пшеницы сезона 2021 г.

Numerical values of the NDVI index and soil-climatic indicators, by the periods of the onset of phenological phases, during the formation of the winter wheat crop of the 2021 season.

Показатели	Дата														
	04.05	10.05	17.05	25.05	01.06	06.06	11.06	17.06	20.06	23.06	28.06	02.07	05.07	09.07	12.07
Фенофаза развития культуры	Кушение	Выход в трубку					Колошение		Цветение			Созревание			
NDVI	0,45	0,58	0,71	0,73	0,75	0,76	0,76	0,80	0,76	0,73	0,66	0,63	0,60	0,49	0,38
Температура почвы, °С	16	19	17	19	19	31	21	29	28	27	22	24	24	25	24
Влажность почвы, %	40	32	35	40	35	48	50	42	55	48	54	58	57	53	45
Температура воздуха, °С	9,50	16,80	29,80	24,10	20,40	20,30	23,60	27,30	32,10	35,10	22,30	31,40	27,20	33,80	32,90
Относительная влажность, %	100	49,7	40	49	100	100	100	83	100	100	100	100	100	87	97
Количество осадков, мм	0,33	0,25	0,20	0	0	0	0	0	0,10	0,30	1,70	1,50	2,10	1,80	0,10
Мощность ультрафиолетового излучения, Вт/м ²	9,00	18,63	22,63	27,10	29,20	28,40	30,20	27,60	27,20	26,30	27,20	27,20	31,00	29,50	27,50
Влажность листа, %	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0

Таблица 4

Корреляционная матрица влияющих условий вегетации ярового ячменя сезона 2021 г.
Correlation matrix of influencing growing conditions of spring barley for the 2021 season

Показатели	Температура почвы	Влажность почвы	Температура воздуха	Относительная влажность	Количество осадков	Уровень ультрафиолета	Влажность листа
NDVI	0,1	-0,42	0,22	-0,06	0,27	0,48	-0,02
Температура почвы	1,00	0,08	0,61	-0,28	-0,09	0,27	-0,13
Влажность почвы	0,08	1,00	0,46	-0,15	0,35	0,11	0,59
Температура воздуха	0,61	0,46	1,00	-0,42	0	0,64	0,17
Относительная влажность	-0,28	-0,15	-0,42	1	0,11	-0,25	0,03
Количество осадков	-0,09	0,35	0	0,11	1,00	0,03	0,68
Уровень ультрафиолета	0,27	0,11	0,64	-0,25	0,03	1,00	0,13
Влажность листа	-0,13	0,59	0,17	0,03	0,68	0,13	1,00

Таблица 5

Корреляционная матрица влияющих условий вегетации озимой пшеницы сезона 2021 г.
Correlation matrix of influencing growing conditions for winter wheat season 2021

Показатели	Температура почвы	Влажность почвы	Температура воздуха	Относительная влажность	Количество осадков	Уровень ультрафиолета	Влажность листа
NDVI	0,29	-0,03	0,07	-0,08	-0,35	0,40	-0,06
Температура почвы	1,00	0,55	0,50	0,46	0,06	0,55	-0,15
Влажность почвы	0,55	1,00	0,47	0,65	0,65	0,5	0,14
Температура воздуха	0,50	0,47	1,00	0,07	0,22	0,62	-0,27
Относительная влажность	0,46	0,65	0,07	1,00	0,25	0,25	0,09
Количество осадков	0,06	0,65	0,22	0,25	1,00	0,22	0,38
Уровень ультрафиолета	0,55	0,5	0,62	0,25	0,22	1,00	-0,09
Влажность листа	-0,15	0,14	-0,27	0,09	0,38	-0,09	1,00

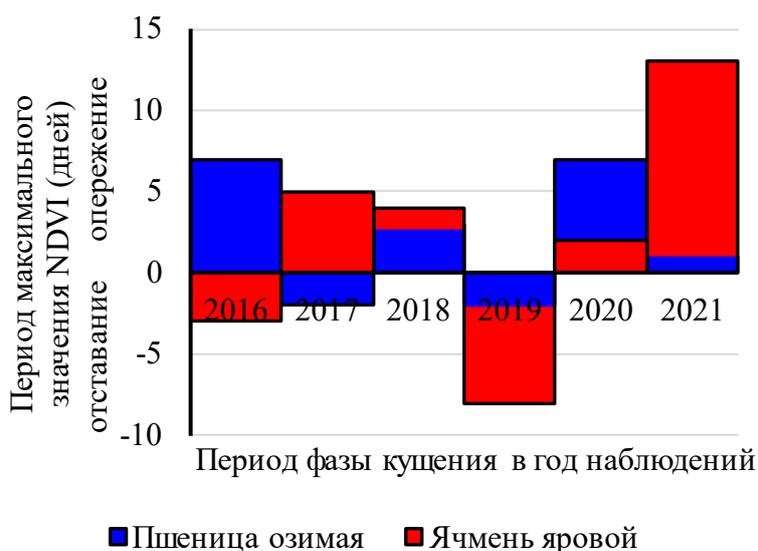


Рис. 1. Отклонения срока пиковых значений NDVI от наступления фазы начала колошения культур по годам наблюдений

Fig. 1. Deviations of the period of peak NDVI values from the onset of the phase of the beginning of heading of crops by years of observation.

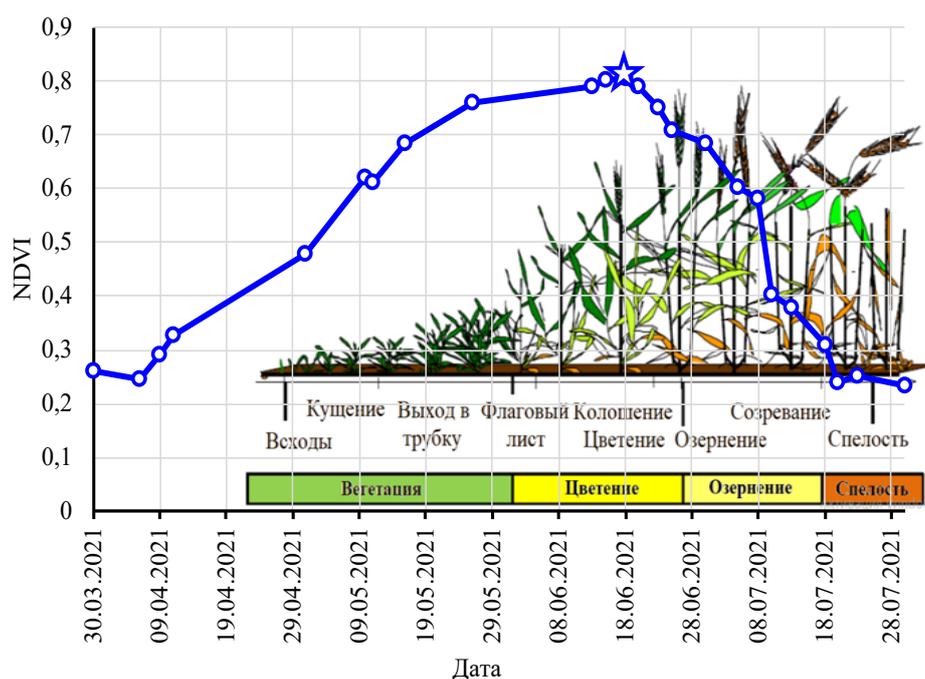


Рис. 2. Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI по фазам развития озимой пшеницы (2021 г.) (использованы материалы [11])

Fig. 2. Seasonal dynamics of the vegetation index NDVI by phases of development of winter wheat (2021) (using materials [11])

Тренд изменения значений вегетационного индекса по фазам развития растений приведен на примере озимой пшеницы урожая 2021 г. (рис. 1). Аналогично результатам ранее выполненных исследований, значения NDVI возрастают от ранних сроков вегетации культуры к фазам колошения и цветения. Максимальное значение NDVI, равное 0,78, отмечено 18 июня, что соответствует фазе начала колошения, зафиксированной 17 июня. Данный характер динамики изменения вегетационного индекса по отношению к зафиксированным в исследованиях срокам фенофаз растений можно считать типовым для обеих культур.

Учитывая особую важность задачи оценки соответствия фазам вегетации пиковых значений NDVI, выполнен анализ их расхождений в течение всего срока наблюдений. Гистограмма, приведенная на рис. 2, дает представление о средних временных промежутках между отмеченными максимальными значениями вегетационного индекса и наступлением фазы колошения озимой пшеницы и ярового ячменя в ретроспективе 2016–2021 гг.

Как видно из рисунка, расхождения изучаемых характеристик варьируют в пределах от 1 до 13 дней. В среднем этот показатель равен 4 и 6 дням по озимой пшенице и яровому ячменю соответственно. Какой-либо законо-

мерности отклонений в сторону опережения или отставания обнаружено не было.

Здесь все же следует отметить, что несмотря на стремление получить наиболее достоверный уровень соответствия значений вегетационного индекса наступлению сроков отдельных фенофаз, погрешность данного результата неизбежна. Она обусловлена, с одной стороны, субъективной оценкой сроков наступления очередной фазы развития растений, с другой – метеоусловиями и временным разрешением съемки, предоставляемым источником данных дистанционного зондирования Земли.

В табл. 6 сведены максимальные значения NDVI по каждому году наблюдений и соответствующие им урожайные данные.

Отмечается схожая отзывчивость на благоприятные внешние факторы одной и другой культуры. Так, максимальная урожайность озимой пшеницы по всем опытным участкам зафиксирована в 2017 г. и составила в среднем 45,58 ц/га. При этом среднее пиковое значение NDVI равнялось 0,85. В этот же период отмечена максимальная урожайность (23,21 ц/га) ярового ячменя, при максимальном значении вегетационного индекса 0,87.

Худшие условия перезимовки озимых привели к снижению урожайности пшеницы в 2019 г. (24,0–26,7 ц/га) при рекордно низких

показателях NDVI (0,66–0,77) за весь период наблюдений. Данный фактор не повлиял на формирование урожая ярового ячменя.

Однако предыдущий 2018 г., не являлся урожайным уже для обеих сравниваемых культур.

Таблица 6

Численные значения урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя и максимумов индекса NDVI с расчетом коэффициента корреляции по данным отдельных производственных участков в 2016–2021 гг.
Numerical values of the yield of winter wheat and spring barley and NDVI index maxima with the calculation of the correlation coefficient according to the data of individual production sites in 2016–2021

Год наблюдений	Номер участка	NDVI	Урожайность, ц/га
<i>Пшеница озимая</i>			
2016	25	0,79	27,46
2017	23	0,82	45,50
	26	0,89	46,32
	31	0,85	44,91
2018	36	0,73	30,76
2019	22	0,66	24,00
	33	0,77	26,71
2020	23	0,81	40,47
	24	0,80	31,53
	26	0,80	44,97
2021	38	0,78	32,10
			k = 0,79
<i>Ячмень яровой</i>			
2016	27	0,84	21,22
	30	0,81	20,50
2017	54	0,87	23,21
2018	37	0,54	19,73
	38	0,50	14,02
	39	0,61	15,20
2019	27	0,57	18,16
	34	0,57	18,01
2020	13	0,63	14,26
2021	29	0,74	19,09
			k = 0,75

По результатам корреляционного анализа обнаружена высокая степень взаимосвязи значений урожайности и максимальных значений NDVI. Коэффициенты корреляции по данным признакам составили 0,79 и 0,75 для пшеницы озимой и ярового ячменя соответственно. Последним, с достаточно высокой степенью надежности, подтверждается возможность прогноза урожайности культур на основе данных их пиковых значений NDVI, полученных в период начала фазы колошения.

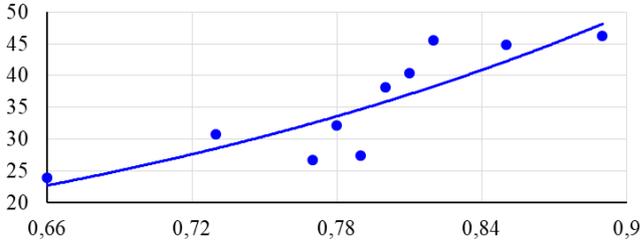
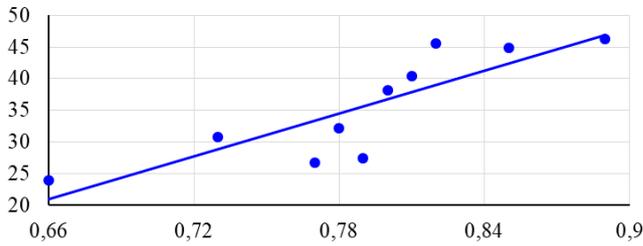
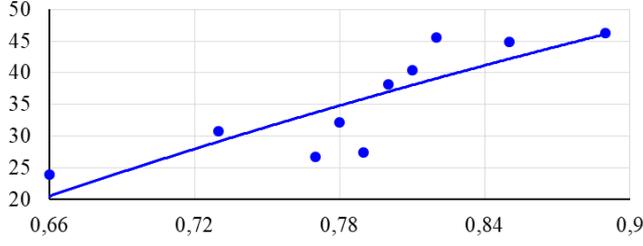
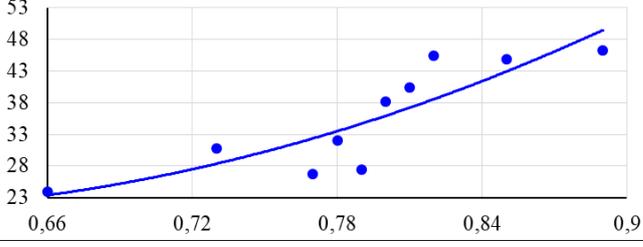
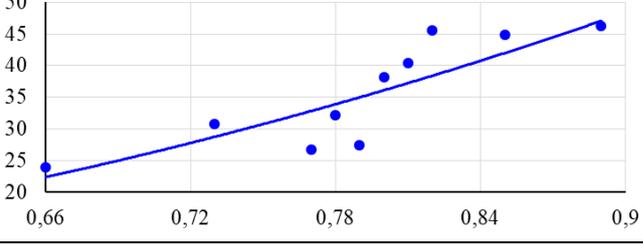
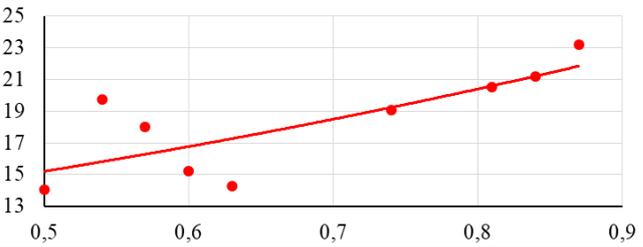
Используя данные табл. 6, получены наиболее распространенные типовые уравнения регрессии и соответствующие им графики

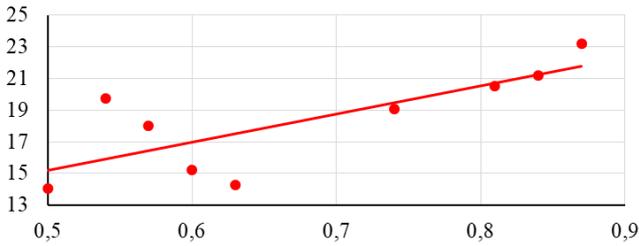
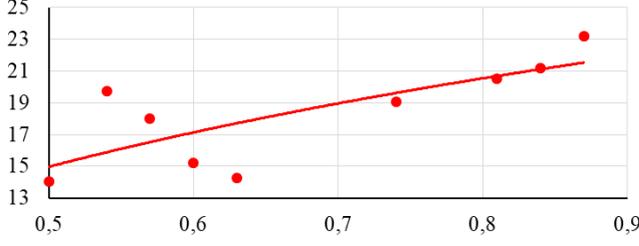
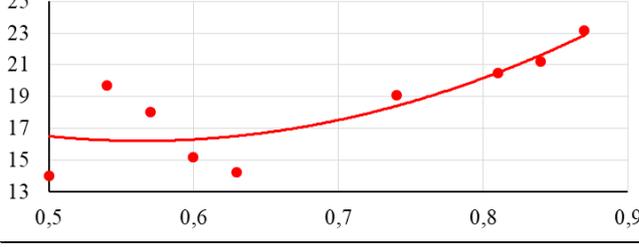
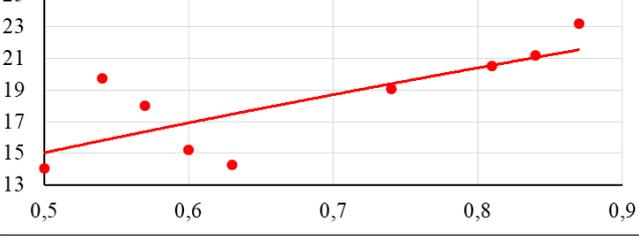
зависимостей урожайных данных от максимальных значений NDVI культур (табл. 7).

Как видно, выражаемая коэффициентом детерминации дисперсия случайной ошибки имеет меньшие значения (наибольший коэффициент R^2) для уравнений, описываемых полиномиальными функциями. Те же модели описывают фактические ряды с меньшими средними абсолютными ошибками.

Исходя из результатов анализа достоверности сравниваемых математических моделей, искомые прогностические зависимости для изучаемых культур в условиях НОПЦ «Интеграция» Орловского ГАУ описываются следующими уравнениями:

Результаты оценки параметров регрессионных моделей
Results of estimation of parameters of regression models

Вид функции и уравнение регрессии	График регрессии	Коэффициент детерминации, R ²	Средняя абсолютная ошибка модели (MAPE)
<i>Пшеница озимая</i>			
1	2	3	4
Экспоненциальная $y=2,62e^{3,27x}$		0,72	10,60
Линейная $y=-53,49+112,82x$		0,71	11,30
Логарифмическая $y=56,07+85,59\ln(x)$		0,69	11,50
Полиномиальная (второй степени) $y=104,09-297,13x+264,91x^2$		0,74	10,30
Степенная $y=62,9x^{2,49}$		0,71	10,70
<i>Ячмень яровой</i>			
Экспоненциальная $y=9,31e^{0,98x}$		0,56	8,50

1	2	3	4
<p>Линейная $y=6,2+17,93x$</p>		0,59	8,90
<p>Логарифмическая $y=23,19+11,85\ln(x)$</p>		0,56	9,20
<p>Полиномиальная (второй степени) $y=38,9-80,39x+71,22x^2$</p>		0,66	8,40
<p>Степенная $y=23,58x^{0,65}$</p>		0,54	8,90

- для пшеницы озимой:
 $y=104,09-297,13x+264,91x^2$; (4)
 - для ячменя ярового:
 $y=38,9-80,39x+71,22x^2$, (5)
- где x – максимальное значение NDVI;
 y – ожидаемая урожайность ц/га.

ВЫВОДЫ

1. Наиболее точный прогноз урожайности посевов по индексу NDVI следует ожидать в момент прохождения пика значения NDVI, в момент начала фазы колошения.
2. Корреляционным анализом установлено, что наибольшее влияние на динамику изменения вегетативного индекса NDVI оказывают такие метеорологические параметры, как уровень ультрафиолетового излучения (0,4–0,48), суммарное количество осадков (0,27–0,35), а также влажность почвы (0,42).
3. Максимальные среднемноголетние значения вегетативного индекса составляют 0,72

и 0,56 для озимой пшеницы и ярового ячменя соответственно.

4. Изучением сезонной динамики вегетационного индекса NDVI по фазам развития культур отмечены пики значений NDVI в фазу колошения культур. Отклонения срока пиковых значений NDVI от наступления фазы начала колошения культур варьируют в пределах от 1 до 13 дней.

5. Неизбежная погрешность определения соответствия значений вегетативного индекса культуры наступлению сроков отдельных фенофаз обусловлена субъективной оценкой сроков наступления очередной фазы развития растений, а также метеоусловиями и временным разрешением съемки.

6. Коэффициенты корреляции между максимальными сезонными значениями индексов NDVI и продуктивностью составили 0,79 и 0,75 для пшеницы озимой и ярового ячменя соответственно. Этим подтверждается возможность достоверного прогноза урожай-

ности культур на основе данных их пиковых значений NDVI.

7. Получены прогностические модели урожайности культур на основе полиномиальных (второй степени) функций. Коэффициенты детерминации и средние абсолютные ошибки моделей (МАРЕ) составляют 0,74 и 10,30;

0,60 и 8,40 для озимой пшеницы и ярового ячменя соответственно.

Работа выполнена в рамках тематического плана-задания на выполнение ФГБОУ ВО Орловским ГАУ НИР по заказу Минсельхоза России за счет средств федерального бюджета в 2021 г. (регистрационный номер НИОКТР № 121091400023-3 от 14.09.2021.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комаров А.А., Комаров А.А. Оценка состояния травостоя с помощью вегетационного индекса NDVI // Известия СПбГАУ. – 2018. – №2 (51). – С. 124–129.
2. Степанов А.С., Асеева Т.А., Дубровин К.Н. Влияние климатических характеристик и значений вегетационного индекса NDVI на урожайность сои (на примере районов Приморского края) // Аграрный вестник Урала. – 2020. – № 1 (192). – С. 10–19.
3. Письменная Е.В., Азарова М.Ю. Прогноз урожайности озимой пшеницы в засушливой зоне Ставрополя на основе данных NDVI // Наука и образование. – 2020. – Т. 3, №4. – С. 20–25.
4. Письменная Е.В., Азарова М.Ю. Зависимость продуктивности озимой пшеницы от показателей NDVI в засушливой зоне Ставропольского края // Агропромышленные технологии Центральной России. – 2021. – Вып. 1, № 19. – С. 39–45.
5. Сторчак И.Г., Шестакова Е.О., Ерошенко Ф.В. Связь урожайности посевов озимой пшеницы с NDVI для отдельных полей // Аграрный вестник Урала. – 2018. – № 6 (173). – С. 64–68.
6. Huete A., Justice C., Liu H. Vegetation and soil lines in visible spectral space: A concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. Remote Sens Environ. – 1994. – Vol. 49. – P. 224–234.
7. Tuddenham W.G., Le Marshall J.F. The interpretation of NDVI data and the potential use of a differential technique for monitoring time sequential changes in vegetation cover // In Proceedings of the 2nd Australian Conference on Agricultural Meteorology. – Brisbane, Australia, 1996. – P. 57–61.
8. Cridland S., Burnside D., Smith R. The NDVI – use in rangeland management // In Proceeding of the 5th International Rangelands Congress. – Salt Lake City, Utah. – 1995. – P. 105–106.
9. Kogan F.N. Vegetation index for areal analysis of crop conditions // Preprints, Proc. 18th conf. of Agricultural and Forest Meteorology, West Lafayette, IN, Amer. Meteor. Soc. – 1987. – P. 103–107.
10. Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного природного заповедника «Нургуш» / Т.А. Адамович, Г.Я. Кантор., Т.Я. Ашихмина, В.П. Савиных // Теоретическая и прикладная экология. – 2018. – №1. – С. 18–24.
11. Methodology for dense high-resolution EO time series, gap filled. European Commission. Horizon 2020. / G. D.'Urso, C. DeMichele, F. Vuolo, J. Garrido // European Union funding for Research & Innovation. – 2020.
12. Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra / H.E. Epstein, D.A. Walker, M.K. Raynolds [et al.]. // Abstract GC31A–0697, presented at AGU Fall Meeting. – San Francisco, CA, 2009. – Vol. 90. – P. GC31A–0697.
13. Многолетняя динамика NDVI-растительности различных классов тундры в зависимости от температуры и осадков / А.Г. Дегерменджи, Г.С. Высоцкая, Л.А. Сомова, Т.И. Письменная, А.П. Шевырнов // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. – 2020. – Т. 493, № 2. – С. 103–106.
14. Волкова Л.В., Шешегова Т.К. Урожайность и содержание фотосинтетических пигментов в листьях яровой пшеницы при поражении септориозом // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2019. – № 3 (52). – С. 17–25.

15. Коротков А.А., Астапов А.Ю. Вегетационный индекс NDVI для мониторинга растительности // Наука и образование. – 2020. – Т. 3, № 3. – С. 131–140.
16. Пришуттов К.А., Астапов А.Ю., Рязанова Ю.А. Применение БПЛА для оценки качества растительности // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. – Мичуринск: Мичуринский ГАУ, 2018. – С. 212–217.

REFERENCES

1. Komarov A.A., Komarov A.A., *Izvestija SPbGAU*, 2018, No. 2 (51), pp. 124–129. (In Russ.)
2. Stepanov A.S., Aseeva T.A., Dubrovin K.N., *Agrarnyj vestnik Urala*, 2020, No. 01 (192), pp. 10–19. (In Russ.)
3. Pis'mennaja E.V., Azarova M.Ju., *Nauka i obrazovanie*, 2020, T. 3, No. 4, pp. 20–25. (In Russ.)
4. Pis'mennaja E.V., Azarova M.Ju., *Agropromyshlennye tehnologii Central'noj Rossii*, 2021, T. 1, No. 19, pp. 39–45. (In Russ.)
5. Storchak I.G., Shestakova E.O., Eroshenko F.V., *Agrarnyj vestnik Urala*, 2018, No. 6 (173), pp. 64–68. (In Russ.)
6. Huete A., Justice C., Liu H., Vegetation and soil lines in visible spectral space: A concept and technique for remote estimation of vegetation fraction, *Remote Sens Environ*, 1994, Vol. 49, pp. 224–234.
7. Tuddenham W.G., Le Marshall J.F., The interpretation of NDVI data and the potential use of a differential technique for monitoring time sequential changes in vegetation cover, *In Proceedings of the 2nd Australian Conference on Agricultural Meteorology*, Brisbane, Australia, 1996, pp. 57–61.
8. Cridland S., Burnside D., Smith R., The NDVI – use in rangeland management, *In Proceeding of the 5th International Rangelands Congress*, Salt Lake City, Utah, 1995, pp. 105–106.
9. Kogan F.N., Vegetation index for areal analysis of crop conditions, *Preprints, Proc. 18th conf. of Agricultural and Forest Meteorology, West Lafayette, IN, Amer. Meteor. Soc.*, 1987, pp. 103–107.
10. Adamovich T.A., Kantor G.Ja., Ashihmina T.Ja., Savinyh V.P., *Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija*, 2018, No. 1, pp. 18–24.
11. D'Urso G., DeMichele C., Vuolo F., Garrido J., Methodology for dense high-resolution EO time series, gap filled, *European Commission. Horizon 2020. European Union funding for Research & Innovation*, 2020.
12. Epstein H.E., Walker D.A., Raynolds M.K., Kelley A.M., Jia G.J., Ping C.L., Michaelson G.J., Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra, *Abstract GC31A–0697, presented at AGU Fall Meeting, San Francisco, CA.*, 2009, Vol. 90, pp. GC31A–0697.
13. Degermendzhi A.G., Vysockaja G.S., Somova L.A., Pis'mennaja T.I., Shevyrnogov A.P., *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o zemle*, 2020, T. 493, No. 2, pp. 103–106. (In Russ.)
14. Volkova L.V., Sheshegova T.K., *Vestnik NGAU (Novosibirskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet)*, 2019, No. 3 (52), pp. 17–25. (In Russ.)
15. Korotkov A.A., Astapov A.Ju., *Nauka i obrazovanie*, 2020, T. 3, No. 3, pp. 131–140. (In Russ.)
16. Prishutov K.A., Astapov A.Ju., Rjazanova Ju.A., *Inzhenernoe obespechenie innovacionnyh tehnologij v APK* (Engineering support of innovative technologies in the agro-industrial complex), *Proceedings of the Conference Title*, Michurinsk: Michurinskij GAU, 2018, pp. 212–217. (In Russ.)