

Сергей Александрович Родимцев^{1✉}, Нинель Ефимовна Павловская²

¹Орловский государственный университет имени И.С. Турненева, Орел, Россия

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

¹rodimcew@yandex.ru

²ninel.pavlovskaya@yandex.ru

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА НОВЫХ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ ДАННЫХ NDVI

Цель исследования – оценка эффективности применения нового биопестицида и разработка прогностической модели урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования Земли. Задачи – получение, обработка и анализ ретроспективных данных и текущих сезонных значений NDVI по яровому ячменю и озимой пшенице; сравнительная оценка действия нового биологического средства защиты растений (СЗР) защитно-стимулирующего действия «Нигор++»; численная оценка многолетнего корреляционного отношения максимальных значений NDVI и урожайности культур и вывод о возможности использования вегетационного индекса как показателя урожайности культур с разработкой адекватного уравнения регрессии в условиях опытно-производственного хозяйства Орловского ГАУ. Полевые исследования сезона 2021 г. выполнялись на опытно-производственных участках Орловского ГАУ. Тип почвы – серая лесная. Культуры – озимая пшеница Московская 39 (площадь посевов 48,1 га), яровой ячмень Раушан (площадь посевов – 17,4 га). Посев озимой пшеницы провели 10.09.2020, ярового ячменя – 07.05.2021 обработанными фунгицидным протравителем «Скарлет» семенами. Динамика изменения индекса NDVI для культур, обработанных новым биопрепаратом, опережает контроль на 10–15 дней, вплоть до фазы колошения, а максимальные значения вегетационного индекса опытных посевов на 5–6 % выше контрольных участков. Среднемноголетние коэффициенты корреляции между урожайностью и пиковыми значениями NDVI составляют 0,79 для пшеницы озимой и 0,75 – для ярового ячменя, что подтверждает надежность использования максимальных сезонных значений индекса вегетации как управляемой переменной прогностической модели урожайности. Погрешность оценки урожайности культур, выполненной с применением предложенных прогностических моделей, относительно фактических значений урожайности не превышает 6,7 %. Это дает право рекомендовать полученные модели для планирования производственно-экономических задач в опытно-производственном хозяйстве университета.

Ключевые слова: урожайность, индекс NDVI, прогностическая модель, зерновые культуры, биостимулирующий препарат

Для цитирования: Родимцев С.А., Павловская Н.Е. Сравнительная оценка новых систем защиты и прогнозирования урожайности зерновых культур на основе данных NDVI // Вестник КрасГАУ. 2023. № 1. С. 69–79. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-1-69-79.

Благодарности: 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 г.).

Sergei Alexandrovich Rodimtsev^{1✉}, Ninel Efimovna Pavlovskaya²

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

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

¹rodimcew@yandex.ru

²ninel.pavlovskaya@yandex.ru

COMPARATIVE EVALUATION OF NEW SYSTEMS TO PROTECT AND FORECAST CROP YIELDS BASED ON NDVI DATA

The purpose of the study is to evaluate the effectiveness of the use of a new biopesticide and develop a predictive model for crop yields based on Earth remote sensing data. Tasks – acquisition, processing and analysis of retrospective data and current seasonal NDVI values for spring barley and winter wheat; comparative evaluation of the action of a new biological plant protection product (PPP) of the protective and stimulating action "Nigor ++"; numerical assessment of the long-term correlation relationship between the maximum values of NDVI and crop yields and the conclusion about the possibility of using the vegetation index as an indicator of crop yields with the development of an adequate regression equation under the conditions of the experimental production farm of the Orel State Agrarian University. Field studies for the 2021 season were carried out at the pilot production sites of the Orel State Agrarian University. Soil type is gray forest. Crops are winter wheat Moskovskaya 39 (crop area 48.1 ha), spring barley Raushan (crop area – 17.4 ha). Sowing of winter wheat was carried out on 09/10/2020, spring barley – on 05/07/2021 with seeds treated with the Scarlet fungicide. The dynamics of changes in the NDVI index for crops treated with a new biological product is 10–15 days ahead of the control, up to the heading phase, and the maximum values of the vegetation index of the experimental crops are 5–6 % higher than the control plots. The average long-term correlation coefficients between yield and peak NDVI values are 0.79 for winter wheat and 0.75 for spring barley, which confirms the reliability of using the maximum seasonal values of the vegetation index as a controlled variable in the predictive yield model. The error in assessing the yield of crops, made using the proposed predictive models, relative to the actual yield values does not exceed 6.7 %. This gives the right to recommend the obtained models for planning production and economic tasks in the experimental production facility of the university.

Keywords: yield, NDVI index, predictive model, crops, biostimulant drug

For citation: Rodimtsev S.A., Pavlovskaya N.E. Comparative evaluation of new systems to protect and forecast crop yields based on NDVI data // Bulliten KrasSAU. 2023;(1): 69–79. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2023-1-69-79.

Acknowledgments: the work has been carried out within the framework of the thematic plan-task for the implementation of the FSBEI HE Orel State Agrarian Research Institute by order of the Ministry of Agriculture of Russia at the expense of the federal budget in 2021 (registration number NIOKTR No. 121091400023-3 dated September 14, 2021).

Введение. Инструментарий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет увеличить объемы поступающей информации и повысить оперативность ее обработки [1–3]. Для оценки состояния, динамики развития сельскохозяйственных культур и прогнозирования их продуктивности все чаще используют методы удаленного мониторинга и контроля. Один из таких показателей представляет собой нормализованный разностный вегетационный индекс (normalized difference vegetation index, NDVI) [4–6].

При анализе сезонной динамики NDVI, проведенном рядом авторов [7, 8], выявлены более высокие значения данного показателя в летние месяцы, что объясняется увеличением биомассы и количественного состава хлорофилла в вегетирующих растениях. При этом понижается яркость растений в красной зоне и возрастает в инфракрасной области спектра [9], увеличивая расчетное значение NDVI.

Высокая степень взаимосвязи вегетационного индекса и количества накопленного хлорофилла в вегетирующих растениях подтверждается результатами исследований [10–12]. Особо подчеркивается наличие корреляционной зависимости между интегрированными максимальными значениями NDVI и их продуктивностью [13–17]. Изучением динамики изменения вегетационного индекса на посевах озимой пшеницы, возделываемой по интенсивной технологии, удалось показать, что наибольшие значения NDVI соответствуют моменту начала фазы колошения, достигая пика при 0,80–0,88 [18].

В то же время характер изменения сезонных значений вегетационного индекса и его отражение агробиологических показателей растений существенно зависят от внешних воздействий, особенностей возделываемых культур, региональных условий и т. д. [7, 19, 20]. Это не дает возможности предложить единый подход к

оценке условий развития культуры и применению единой прогностической модели.

Кроме того, наращивание разработки новых средств защиты и стимулирования растений предполагает соответствующие решения в части оценки их эффективности на основе применения инновационных технологий, в т. ч. средствами ДЗЗ.

Таким образом, предлагаемая работа, направленная на моделирование во времени урожайности сельскохозяйственных культур под воздействием новых систем защиты (препарат «Нигор++») с применением данных NDVI является актуальной и современной.

Теоретическая значимость исследования состоит в определении роли динамики изменения показателей вегетативного индекса NDVI при оценке эффективности новых систем защиты сельскохозяйственных культур, а также получении прогностических моделей урожайности культур на основе полиномиальных (второй степени) функций.

Практическая ценность работы заключается в получении корреляционных зависимостей между урожайностью и пиковыми значениями вегетативного индекса по данным многолетних наблюдений, необходимых для формализации прогноза урожайности; использовании полученных математических моделей при достоверном планировании производственно-экономических задач конкретного хозяйства.

В опытно-производственном хозяйстве Орловского ГАУ в течение ряда лет проводится последовательная работа по внедрению информационно-цифровых технологий в производство [21–23]. В 2021 г. университетом выполнялась комплексная НИР [24], одна из содержательных частей которой заключалась в получении экспериментальных данных результатов исследования эффективности нового биологически активного средства «Нигор++».

Цель исследования – оценка эффективности применения нового биопестицида и разработка прогностической модели урожайности зерновых культур на основе данных ДЗЗ.

Задачи: получение, обработка и анализ ретроспективных данных и текущих сезонных значений NDVI по яровому ячменю и озимой пшенице; сравнительная оценка действия нового биологического средства защиты растений (СЗР) защитно-стимулирующего действия «Нигор++»; численная оценка многолетнего корреляционного отношения максимальных значений NDVI и урожайности культур и вывод о возможности ис-

пользования вегетационного индекса как показателя урожайности культур с разработкой адекватного уравнения регрессии в условиях опытно-производственного хозяйства Орловского ГАУ.

Объекты и методы. Полевые исследования сезона 2021 г. выполнялись на опытно-производственных участках Орловского ГАУ. Тип почвы: серая лесная почва. Культуры – озимая пшеница Московская 39 (площадь посевов 48,1 га), яровой ячмень Раушан (площадь посевов – 17,4 га). Посев озимой пшеницы провели 10.09.2020, ярового ячменя – 07.05.2021 обработанными фунгицидным протравителем «Скарлет» семенами.

Ранее проведенными исследованиями показано [25–27], что биологический препарат «Нигор++» (Патент РФ № 2463759) увеличивает ассимиляционную поверхность, общую биомассу, корневую емкость, накопление зеленых пигментов, устойчивость к болезням, урожайность зерна за счет увеличения сохранности растений на делянке, размера колоса, массы семян, а также значительно улучшает качество зерна (количество протеина, клейковины и седиментации).

На опытных посевах озимой пшеницы препарат «Нигор++» вносили 25 мая 2021 г. в фазу «начала выхода в трубку» и повторно 16 июня 2021 г. в фазу «колошения» по флаговому листу. Посевы ярового ячменя обрабатывались 10 июня и 28 июня 2021 г.

Ретроспектива данных NDVI обеспечивалась архивными спутниковыми снимками за 2016–2020 гг. Для получения многолетних статистических данных по динамике изменения вегетационного индекса NDVI использовали архивы геопортала «КосмосАгро» [28]. Приложение ScanEx Geomixer [29] обеспечивало оперативную аналитическую обработку поступающей информации.

В течение всего вегетативного сезона 2021 г. выполнялась аэрофотосъемка и расчет индексов NDVI опытных участков; строилась сезонная динамика вегетационного индекса. Для получения текущих данных использовался беспилотный летательный аппарат (БПЛА) «Агрофлай Квадро».

Индекс вегетации NDVI определяли по формуле от первоисточника [4]; оценку точности моделей – показателем средней абсолютной ошибки MAPE (Mean Absolute Percentage Error) [30].

Результаты и их обсуждение. Исследованиями в полевых условиях сезона 2021 г. установлены следующие условия, влияющие на сроки развития растений и активность бактерий биостимулирующего препарата (яровой ячмень/озимая пшеница):

➤ Фаза «3 лист/кущение». Сумма осадков за период – 14/35 мм; средняя температура воздуха – 20,2/10,5; 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; 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; 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; 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; средний уровень ультрафиолета – 13,7/28,8 Вт · м².

В условиях Орловской области оптимальное снабжение яровых зерновых влагой считается, 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), притом, что по многолетним данным всходы появляются на восьмой-девятый 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 выпадение осадков зафиксировано суммарно 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.

В целом температурный режим и солнечная активность сезона 2021 г. мало отличались от среднеемноголетних показателей по Орловской области и не оказали аномального влияния на процесс развития растений и активность бактерий биостимулирующего препарата.

Сезонная изменчивость индекса NDVI по данным многолетних наблюдений демонстрирует

следующее. Циклический тренд значений временных рядов культур аналогичен и в большей степени соответствует закону нормального распределения. Меньшие значения индекса вегетации, не зависимо от культуры, характеризуют зимний период. Конец весны – середина лета обусловлены максимальными значениями NDVI. Наибольшие среднеемноголетние значения индекса вегетации отмечены в июне. Для озимой пшеницы максимальные значения NDVI приходятся на июнь и составляют 0,72; для ярового ячменя – 0,56 [23].

С помощью сезонных снимков с БПЛА получены временные ряды значений индекса NDVI для опытных участков озимой пшеницы и ярового ячменя, обработанных новым биопрепаратом, и контроля. Тренд изменения значений вегетационного индекса по фазам развития растений приведен на примере озимой пшеницы урожая 2021 г. (рис. 1). Как видно, 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.

Установлено, что развитие вегетации растений опытного участка с озимой пшеницей на 10–15 дней опережает контроль в период с 15.04 вплоть до начала фазы колошения (13–15.06). Пиковые значения вегетационного индекса NDVI для опытного и контрольного участков приходятся на 18.06. При этом максимальное значение NDVI для участка, обработанного новым биопрепаратом, составляет 0,83, что превышает пиковое значение контрольного участка (0,78) на 5–6 % (рис. 2). Аналогичные сравнительные данные были получены для посевов ярового ячменя.

Для решения об использовании пиковых значений вегетационного индекса NDVI в качестве управляемой переменной x функции $Y = f(x)$ выполнен анализ статистических данных урожайности обеих культур и соответствующих им пиковых значений NDVI в ретроспективе с 2016 по 2020 г. (табл. 1).

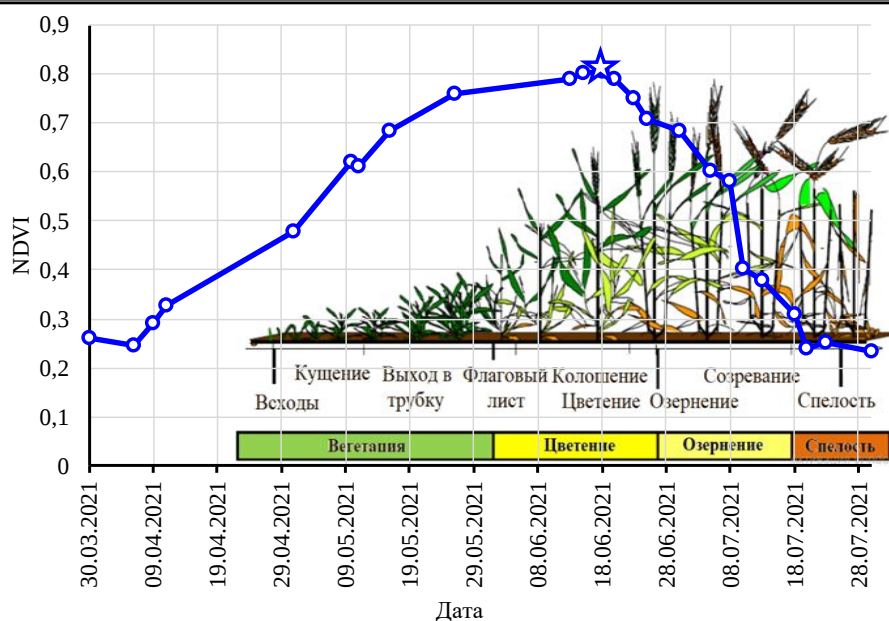


Рис. 1. Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI по фазам развития озимой пшеницы (2021 г.) (использованы материалы [8])

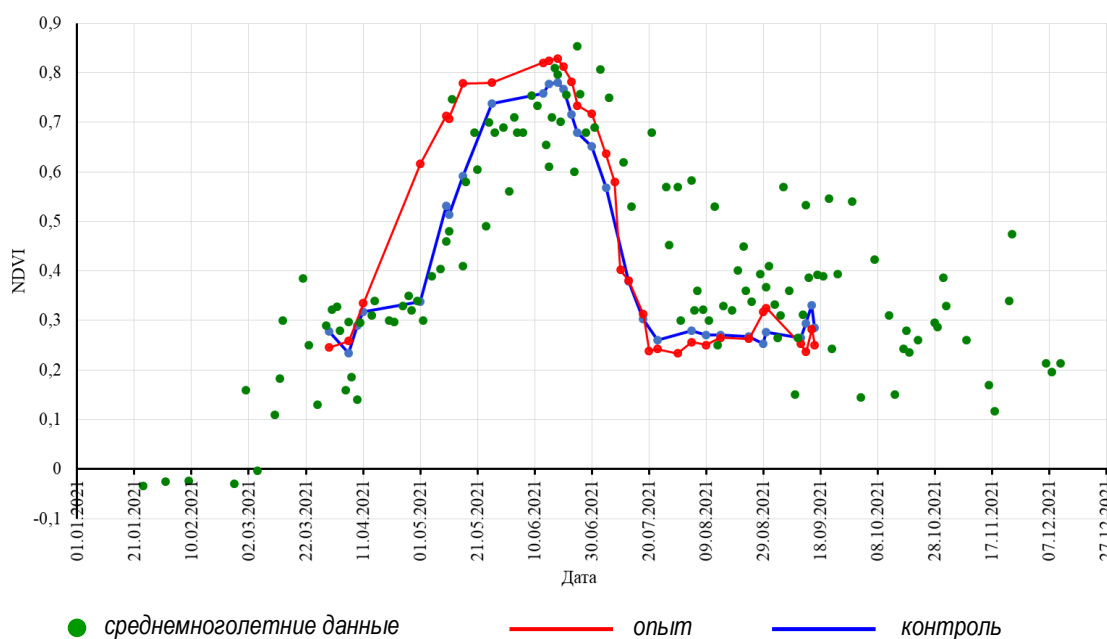


Рис. 2. Сравнительная оценка значений и сезонной динамики NDVI озимой пшеницы по результатам использования нового биопрепарата

Коэффициентами корреляции по данным признакам 0,79 и 0,75 – для пшеницы озимой и ярового ячменя, соответственно, с высокой степенью надежности подтверждается возможность прогноза урожайности культур на основе данных их пиковых значений NDVI.

Используя данные таблицы 1 получены следующие прогностические уравнения урожайности культур:

– для пшеницы озимой

$$Y = 104,09 - 297,13x + 264,91x^2; \quad (1)$$

– для ячменя ярового

$$Y = 38,9 - 80,39x + 71,22x^2, \quad (2)$$

где x – максимальное значение NDVI в текущем сезоне; Y – ожидаемая урожайность культуры, ц·га⁻¹.

Таблица 1

Численные значения урожайности и максимумов индекса NDVI культур с расчетом коэффициента корреляции по данным отдельных производственных участков в 2016–2020 гг.

Год наблюдений	Производственный участок	NDVI	Урожайность, ц·га ⁻¹
Пшеница озимая			
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	
Ячмень яровой			
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
	29	0,71	18,27
		k = 0,75	

Коэффициент детерминации R^2 и MAPE составили соответственно 0,74 и 10,3 – для модели урожайности пшеницы озимой; 0,66 и 8,4 – для модели ячменя ярового.

С целью оценки степени достоверности прогнозических моделей урожайности, полученных в ходе настоящего исследования, в них произведена подстановка пиковых значений NDVI сезона 2021 г. Важно отметить, что указанные расчеты выполнялись непосредственно в ходе формирования графика динамики изменения NDVI текущего сезона, т. е. до уборки урожая.

Подстановка в уравнения (1) и (2) значений NDVI, полученных на сравниваемых участках опытных культур, показала следующее. Расчетная продуктивность озимой пшеницы на участке, обработанном препаратом «Нигор++», составила 40,0 ц · га⁻¹. Прогноз урожайности контрольного

участка находился на уровне 33,5 ц · га⁻¹, что на 16,2 % меньше. Для ярового ячменя спрогнозирована урожайность 28,9 и 28,4 ц · га⁻¹ – соответственно для участков опыта и контроля.

Позднее были получены значения фактической урожайности культур, принимавших участие в эксперименте. Так, продуктивность опытных участков озимой пшеницы и ярового ячменя находилась на уровне 41,3 и 31,3 ц · га⁻¹, тогда как урожайность по контролю составила для этих культур 36,1 и 28,7 ц · га⁻¹ соответственно.

Полученные расчетные и фактические значения урожайности культур для различных вариантов эксперимента представлены в таблице 2. Как видно, погрешность выполненной на основе предложенных регрессионных моделей прогнозной оценки урожайности культур не превышает 6,7 %. Это позволяет рекомендовать предложен-

ные математические модели для прогноза урожайности культур в условиях опытно-производственного хозяйства Орловского ГАУ. Такой прогноз позволит определять возможные объемы реализации растениеводческой продукции и

рынки сбыта в «удачном» году, а также планировать превентивные мероприятия для минимизации ущерба, например, при неблагоприятно складывающихся погодных условиях.

Таблица 2

**Расчетные и фактические значения урожайности культур
в различных вариантах полевого эксперимента**

Сравниваемые участки	Пиковое значение NDVI	Расчетная урожайность, ц · га ⁻¹	Фактическая урожайность, ц · га ⁻¹	Погрешность оценки, %
Озимая пшеница				
Опыт	0,83	40,0	41,3	3,2
Контроль	0,78	33,5	36,1	6,2
Яровой ячмень				
Опыт	0,76	28,9	31,3	6,7
Контроль	0,74	28,4	28,7	1,04

Заключение

1. Сравнением временных рядов NDVI, полученных по среднемноголетним и текущим данным сезона 2021 г., обнаружено опережение динамики вегетативного развития культур в 2021 г. на 7–10 дней и незначительное снижение максимального (пикового) значения вегетационного индекса.

2. Установлено, что, независимо от культуры, развитие вегетации растений, обработанных новым биологическим СЗР защитно-стимулирующего действия «Нигор++», опережает контроль вплоть до начала фазы колошения. Характеризующее наибольший объем вегетативной массы максимальное значение индекса NDVI для культур, обработанных новым биопрепаратом, составляет 0,83, что превышает пиковое значение контрольного участка на 5–6 %.

3. Коэффициенты корреляции между максимальными сезонными значениями индексов NDVI и продуктивностью культур составили 0,79 и 0,75 для пшеницы озимой и ярового ячменя соответственно. Это подтверждает надежность прогноза урожайности культур, выполняемого на основе данных их пиковых сезонных значений нормализованного разностного вегетационного индекса.

4. Получены прогностические модели урожайности культур на основе полиномиальных (второй степени) функций. Коэффициенты детерминации и средние абсолютные ошибки моделей составляют 0,74 и 10,3; 0,6 и 8,4 соответ-

ственно для озимой пшеницы и ярового ячменя, что подтверждает достоверность предложенных регрессионных моделей и возможность их применения для планирования производственно-экономических задач в опытно-производственном хозяйстве университета.

5. Сравнение прогнозных и фактических значений урожайности культур в полевом сезоне 2021 г. выявило погрешность модельной оценки, не превышающую 6,7 %.

6. Теоретический подход к использованию показателей сезонной динамики индекса NDVI для сравнительного анализа эффективности новых систем защиты может применяться в научных и производственных организациях, реализующих принципы цифрового сельского хозяйства.

Список источников

1. Особенности обработки аэрокосмических снимков для оптимизации геостатистических исследований внутриполевой изменчивости в задачах точного земледелия / В.П. Якушев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. № 18 (4). С. 128–139. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-128-139.
2. Houborg R., McCabe M. High-Resolution NDVI from Planet's Constellation of Earth Observing Nano-Satellites // A New Data Source for Precision Agriculture. Remote Sens. 2016. № 8. P. 768. DOI: 10.3390/rs8090768.

3. NDVI: Vegetation change detection using remote sensing and GIS – A case study of Vellore District / G.G. Meera [et al.] // *Procedia Computer Science*. 2015. № 57. P. 1199–1210. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.415.
4. 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. № 49. P. 224–234. DOI: 10.1080/01431160110107806.
5. Vannoppen A., Gobin A. Estimating Yield from NDVI, Weather Data, and Soil Water Depletion for Sugar Beet and Potato in Northern Belgium // *Water*. 2022. № 14. P. 1188. DOI: 10.3390/w14081188.
6. Wilton M. Crop Yield Estimation Using NDVI: A Comparison of Various NDVI Metrics. A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies of The University of Manitoba in partial fulfillment of the requirements of the degree of master of science. 2021. Winnipeg Manitoba. 201 p.
7. Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного природного заповедника «Нургуш» / Т.А. Адамович [и др.] // *Теоретическая и прикладная экология*. 2018. № 1. С. 18–24.
8. Methodology for dense high-resolution EO time series, gap filled / G. D'Urso [et al.] // *European Commission. Horizon European Union funding for Research & Innovation*. 2020. P. 28.
9. Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra / H.E. Epstein [et al.] // *Abstract GC31A-0697*, presented at AGU Fall Meeting, San Francisco, CA. 2009. V. 90. P. 14–18. DOI: 10.1029/2007JG000555.
10. Комаров А.А., Комаров А.А. Оценка состояния травостоя с помощью вегетационного индекса NDVI // *Известия СПбГАУ*. 2018. № 2 (51). С. 124–129.
11. Многолетняя динамика NDVI-растительности различных классов тундры в зависимости от температуры и осадков / А.Г. Дегерменджи [и др.] // *Доклады Российской академии наук. Науки о земле*. 2020. Т. 493, № 2. С. 103–106. DOI: 10.31857/S2686739720080046.
12. Волкова Л.В., Шешегова Т.К. Урожайность и содержание фотосинтетических пигментов в листьях яровой пшеницы при поражении септориозом // *Вестник НГАУ*. 2019. № 3 (52). С. 17–25. DOI: 10.31677/2072-6724-2019-52-3-17-25.
13. 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. № 01 (192). С. 10–19. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-192-1-10-19.
14. Письменная Е.В., Азарова М.Ю. Прогноз урожайности озимой пшеницы в засушливой зоне Ставрополья на основе данных NDVI // *Наука и образование*. 2020. Т. 3, № 4. С. 20–25.
15. Письменная Е.В., Азарова М.Ю. Зависимость продуктивности озимой пшеницы от показателей NDVI в засушливой зоне Ставропольского края // *Агропромышленные технологии Центральной России*. 2021. № 19 (1). С. 39–45. DOI: 10.24888/2541-7835-2021-19-39-45.
16. 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.
17. Коротков А.А., Астанов А.Ю. Вегетационный индекс NDVI для мониторинга растительности // *Наука и образование*. 2020. Т. 3, № 3. С. 131–140.
18. Пришуттов К.А., Астанов А.Ю., Рязанова Ю.А. Применение БПЛА для оценки качества растительности // *Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: сб. мат-лов Междунар. науч.-практ. конф. Мичуринск, 2018*. С. 212–217.
19. Trend Change Detection in NDVI Time Series: Effects of Inter-Annual Variability and Methodology / M. Forkel [et al.] // *Remote Sens.* 2013. № 5. P. 2113–2144. DOI: 10.3390/rs5052113.
20. USA Crop Yield Estimation with MODIS NDVI: Are Remotely Sensed Models Better than Simple Trend Analyses? / D.M. Johnson [et al.] // *Remote Sens.* 2021. № 13. P. 4227. DOI: 10.3390/rs13214227.

21. Создание и развитие экспериментального цифрового опытного хозяйства аграрного вуза / С.А. Родимцев [и др.]. Орел, 2020. 370 с.
22. Развитие опытно-производственного хозяйства аграрного вуза на основе реализации цифровых платформенных решений / С.А. Родимцев [и др.]. Орел, 2021. 206 с.
23. Моделирование условий вегетации с использованием отклонений текущих значений NDVI от среднесезонных показателей / С.А. Родимцев [и др.] // Сельскохозяйственная биология. 2022. № 3 (57). 2022. С. 591–603. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.3.591rus.
24. Исследование и практическое применение новых систем защиты сельскохозяйственных культур на основе прогнозирования урожайности с использованием спектральных характеристик аэрофотосъемок и данных автоматической метеостанции: отчет о НИР (регистрационный номер НИОКТР № 121091400023-3 от 14.09.2021 г.). / Н.Е. Павловская [и др.]; Орловский ГАУ. Орел, 2021.
25. Павловская Н.Е., Гнеушева И.А., Агеева Н.Ю. Эффективность применения биоудобрения и нового биостимулятора на яровом ячмене *hordeum vulgare* // Вестник аграрной науки. 2021. № 1 (88). С. 48–55. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2021.1.48.
26. Павловская Н.Е., Костромичева Е.В., Боева О.П. Влияние компонентов биопрепаратов на развитие и антиоксидантную активность зернобобовых культур // Вестник ИРГСХА. 2021. № 103. С. 21–31. DOI: 10.51215/1999-765-2021-103-21-31.
27. Антиоксидантная активность пшеницы озимой при обработке биопрепаратом «Нигор++» / Н.Е. Павловская [и др.] // АгроЭкоИнфо. 2021. № 6. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/6/st_633.pdf.
28. Геопортал ГК «СканЭкс». М., 1997–2022. URL: <http://www.scanex.ru/cloud/kosmosagro> (дата обращения: 18.05.2022).
29. ScanEx Geomixer. 2001–2022. URL: <http://geomixer.ru/> (дата обращения: 20.05.2022).
30. Bioprocess Control: Current Progress and Future Perspectives / A. Rathore [et al.] // Life. 2021. № 11. P. 557. DOI: 10.3390/life11060557.

References

1. Osobennosti obrabotki a'erokosmicheskikh snimkov dlya optimizatsii geostatisticheskikh issledovaniy vnutripolevoj izmenchivosti v zadachah tochnogo zemledeliya / V.P. Yakushev [i dr.] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. № 18 (4). S. 128–139. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-128-139.
2. Houborg R., McCabe M. High-Resolution NDVI from Planet's Constellation of Earth Observing Nano-Satellites // A New Data Source for Precision Agriculture. Remote Sens. 2016. № 8. P. 768. DOI: 10.3390/rs8090768.
3. NDVI: Vegetation change detection using remote sensing and GIS - A case study of Vellore District / G.G. Meera [et al.] // Procedia Computer Science. 2015. № 57. P. 1199–1210. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.415.
4. 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. № 49. P. 224–234. DOI: 10.1080/01431160110107806.
5. Vannoppen A., Gobin A. Estimating Yield from NDVI, Weather Data, and Soil Water Depletion for Sugar Beet and Potato in Northern Belgium // Water. 2022. № 14. P. 1188. DOI: 10.3390/w14081188.
6. Wilton M. Crop Yield Estimation Using NDVI: A Comparison of Various NDVI Metrics. A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies of The University of Manitoba in partial fulfillment of the requirements of the degree of master of science. 2021. Winnipeg Manitoba. 201 p.
7. Analiz sezonnoj i mnogoletnej dinamiki vegetacionnogo indeksa NDVI na territorii gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Nurgush» / T.A. Adamovich [i dr.] // Teoreticheskaya i prikladnaya `ekologiya. 2018. № 1. S. 18–24.
8. Methodology for dense high-resolution EO time series, gap filled / G. D'Urso [et al.] // European Commission. Horizon European Union funding for Research & Innovation. 2020. P. 28.
9. Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra / H.E. Epstein [et al.] // Abstract GC31A-0697, presented at

- AGU Fall Meeting, San Francisco, CA. 2009. V. 90. P. 14–18. DOI: 10.1029/2007JG000555.
10. Komarov A.A., Komarov A.A. Ocenka sostoyaniya travostoya c pomosh'yu vegetacionnogo indeksa NDVI // Izvestiya SPbGAU. 2018. № 2 (51). S. 124–129.
11. Mnogoletnyaya dinamika NDVI-rastitel'nosti razlichnykh klassov tundry v zavisimosti ot temperatury i osadkov / A.G. Degermendzhi [i dr.] // Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o zemle. 2020. T. 493, № 2. S. 103–106. DOI: 10.31857/S26867397 20080046.
12. Volkova L.V., Sheshhegova T.K. Urozhajnost' i sodержanie fotosinteticheskikh pigmentov v list'yah yarovoj pshenicy pri porazhenii septoriozom // Vestnik NGAU. 2019. № 3 (52). S. 17–25. DOI: 10.31677/2072-6724-2019-52-3-17-25.
13. Stepanov A.S., Aseeva T.A., Dubrovin K.N. Vliyanie klimaticheskikh harakteristik i znachenij vegetacionnogo indeksa NDVI na urozhajnost' soi (na primere rajonov Primorskogo kraja) // Agrarnyj vestnik Urala. 2020. № 01 (192). S. 10–19. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-192-1-10-19.
14. Pis'mennaya E.V., Azarova M.Yu. Prognoz urozhajnosti ozimoy pshenicy v zasushlivoj zone Stavropol'ya na osnove dannyh NDVI // Nauka i obrazovanie. 2020. T. 3, № 4. S. 20–25.
15. Pis'mennaya E.V., Azarova M.Yu. Zavisimost' produktivnosti ozimoy pshenicy ot pokazatelej NDVI v zasushlivoj zone Stavropol'skogo kraja // Agropromyshlennye tehnologii Central'noj Rossii. 2021. № 19 (1). S. 39–45. DOI: 10.24888/2541-7835-2021-19-39-45.
16. Storchak I.G., Shestakova E.O., Eroshenko F.V. Svyaz' urozhajnosti posevov ozimoy pshenicy s NDVI dlya otidel'nyh polej // Agrarnyj vestnik Urala. 2018. № 6 (173). S. 64–68.
17. Korotkov A.A., Astapov A.Yu. Vegetacionnyj indeks NDVI dlya monitoringa rastitel'nosti // Nauka i obrazovanie. 2020. T. 3, № 3. S. 131–140.
18. Prishutov K.A., Astapov A.Yu., Ryazanova Yu.A. Primenenie BPLA dlya ocenki kachestva rastitel'nosti // Inzhenernoe obespechenie innovacionnyh tehnologij v APK: sb. mat-lov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Michurinsk, 2018. S. 212–217.
19. Trend Change Detection in NDVI Time Series: Effects of Inter-Annual Variability and Methodology / M. Forkel [et al.] // Remote Sens. 2013. № 5. P. 2113–2144. DOI: 10.3390/rs5052113.
20. USA Crop Yield Estimation with MODIS NDVI: Are Remotely Sensed Models Better than Simple Trend Analyses? / D.M. Johnson [et al.] // Remote Sens. 2021. № 13. P. 4227. DOI: 10.3390/rs13214227.
21. Sozdanie i razvitie 'eksperimental'nogo cifrovogo opytnogo hozyajstva agrarnogo vuza / S.A. Rodimcev [i dr.]. Orel, 2020. 370 s.
22. Razvitie opytno-proizvodstvennogo hozyajstva agrarnogo vuza na osnove realizacii cifrovych platformennyh reshenij / S.A. Rodimcev [i dr.]. Orel, 2021. 206 s.
23. Modelirovanie uslovij vegetacii s ispol'zovaniem otklonenij tekuschih znachenij NDVI ot srednemnogoletnih pokazatelej / S.A. Rodimcev [i dr.] // Sel'skohozyajstvennaya biologiya. 2022. № 3 (57). 2022. S. 591–603. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.3.591rus.
24. Issledovanie i prakticheskoe primenenie novyh sistem zaschity sel'skohozyajstvennyh kul'tur na osnove prognozirovaniya urozhajnosti s ispol'zovaniem spektral'nyh harakteristik a'ero-fotos'emok i dannyh avtomaticheskoy meteorostancii: otchet o NIR (registracionnyj nomer NIOKTR № 121091400023-3 ot 14.09.2021 g.). / N.E. Pavlovskaya [i dr.]; Orlovskij GAU. Orel, 2021.
25. Pavlovskaya N.E., Gneusheva I.A., Ageeva N.Yu. 'Effektivnost' primeneniya bioudobreniya i novogo biostimulyatora na yarovom yachmene hordeum vulgare // Vestnik agrarnoj nauki. 2021. № 1 (88). S. 48–55. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2021.1.48.
26. Pavlovskaya N.E., Kostromicheva E.V., Boeva O.P. Vliyanie komponentov biopreparatov na razvitie i antioksidantnuyu aktivnost' zernobovyh kul'tur // Vestnik IrGSHA. 2021. № 103. S. 21–31. DOI: 10.51215/ 1999-765-2021-103-21-31.
27. Antioksidantnaya aktivnost' pshenicy ozimoy pri obrabotke biopreparatom «Nigor++» / N.E. Pavlovskaya [i dr.] // Agro'EkolInfo. 2021. № 6. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/6/st_633.pdf.

28. Geoportal GK «Skan`Eks». М., 1997–2022. URL: <http://www.scanex.ru/cloud/kosmosagro> (data obrascheniya: 18.05.2022).
29. ScanEx Geomixer. 2001–2022. URL: <http://geomixer.ru/> (data obrascheniya: 20.05.2022).
30. Bioprocess Control: Current Progress and Future Perspectives / A. Rathore [et al.] // Life. 2021. № 11. P. 557. DOI: 10.3390/life11060557.

Статья принята к публикации 25.10.2022 / The article accepted for publication 25.10.2022.

Информация об авторах:

Сергей Александрович Родимцев¹, профессор кафедры сервиса и ремонта машин, доктор технических наук, доцент

Нинель Ефимовна Павловская², заведующая кафедрой биотехнологии, доктор биологических наук, профессор

Information about the authors:

Sergei Alexandrovich Rodimtsev¹, Professor at the Department of Service and Repair of Machines, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Ninel Efimovna Pavlovskaya², Head of the Department of Biotechnology, Doctor of Biological Sciences, Professor

