

Цифровая обработка фотометрических данных дистанционного зондирования полей озимой ржи

Н. И. Воробьев¹, Я. В. Пухальский^{2✉}, М. А. Астапова³, В. Г. Сурин⁴, В. Н. Пищик^{1, 4}

¹ Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия

² Ленинградский государственный университет имени А. С. Пушкина, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия

³ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

✉ E-mail: puhalskyan@gmail.com

Аннотация. Целью работы являлась возможность использования нейронных сетевых структур системы искусственного интеллекта для обработки фотометрических данных дистанционного зондирования посевов озимой ржи, выращенных в условиях Ленинградской области на поле учебно-опытного сада СПбГАУ в 2014–2015 гг. **Методология и методы исследования.** В процессе культивирования растений были применены различные виды обработок: внесение минеральных удобрений, микроэлементов и микробного биопрепарата. Для обработки фотометрических данных был применен персептрон Розенблатта, анализирующий сходство и различия фотометрических NDVI-профилей посевов озимой ржи, полученных с разных вариантов опыта. **Результаты.** По числовым показателям вегетационных индексов удалось построить фазовые портреты траектории их перемещения на координатной плоскости поля. Дальнейший кластерный анализ полученных данных, преобразованных в квадратную матрицу парных евклидовых дистанций, позволил выделить на дендрограмме группировку вариантов, связующим компонентов в которых являлось применение микробиологического инокулянта. При применении биопрепарата происходит более полное развитие растений в посевах и улучшается их выравненность в поле. Минимальный показатель коэффициента вариации при этом наблюдался для варианта без применения биопрепарата, но с совместным использованием комплекса всех минеральных удобрений (50 фосмука + 50 КС1 + 50 аммиачная селитра) и микроэлементов в дозе 250 кг/га. **Научная новизна.** По итогу проведенного анализа можно сделать вывод, что образы траекторий точек NDVI-профилей предоставляют качественную информацию, отражающую динамику фаз онтогенеза растений озимой ржи. На основании характера выбранных участков этих траекторий можно создать цифровую карту опытного поля, с помощью которой вести протокол дистанционной диагностики состояния продуктивности посевов и делать прогноз их урожайности времени уборки.

Ключевые слова: пространственный фотометрический NDVI-профиль, озимая рожь; персептрон Розенблатта

Для цитирования: Воробьев Н. И., Пухальский Я. В., Астапова М. А., Сурин В. Г., Пищик В. Н. Цифровая обработка фотометрических данных дистанционного зондирования полей озимой ржи // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 02. С. 152–162. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-02-152-162>.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0006. Авторы выражают благодарность кандидату биологических наук ВНИИСХМ В. К. Чеботарю за предоставление биопрепаратов и консультации, кандидату сельскохозяйственных наук СПбГАУ С. А. Доброхотову за организацию проведения работ на участке.

Дата поступления статьи: 25.08.23, **дата рецензирования:** 17.10.2023, **дата принятия:** 24.11.2023.

Digital processing of photometric data of remote sensing of winter rye fields

N. I. Vorobyev¹, Ya. V. Pukhalskiy^{2✉}, M. A. Astapova³, V. G. Surin⁴, V. N. Pishchik^{1,4}

¹ All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, Saint Petersburg, Pushkin, Russia

² Pushkin Leningrad State University, Saint Petersburg, Pushkin, Russia

³ Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

⁴ Agrophysical Institute of the Russian Academy of Agricultural Sciences, Saint Petersburg, Russia

✉ E-mail: pukhalskiyan@gmail.com

Abstract. Purpose. The paper considers the possibility of using neural network structures of an artificial intelligence system for processing photometric data of remote sensing of winter rye crops grown in the conditions of the Leningrad Region on the field of the educational and experimental garden of Saint Petersburg State Agrarian University in 2014–2015. **Methods.** In the process of cultivating plants, various types of treatments were applied: the application of mineral fertilizers, microelements and a microbial biological product. To process the photometric data, the Rosenblatt perceptron was used, which analyzes the similarities and differences in the photometric NDVI profiles of winter rye crops obtained from different variants of the experiment. **Results.** According to the numerical indicators of vegetation indices, it was possible to construct phase portraits of the trajectory of their movement on the coordinate plane of the field. Further cluster analysis of the data obtained, converted into a square matrix of paired Euclidean distances, made it possible to identify on the dendrogram a grouping of variants in which the connecting components were the use of a microbiological inoculant. When using a biological product, there is a more complete development of plants in crops and their evenness in the field improves. The minimum coefficient of variation was observed for the variant without the use of a biological product, but with the joint use of a complex of all mineral fertilizers (50 phosphorite flour + 50 KCl + 50 ammonium nitrate) and microelements at a dose of 250 kg/ha. Based on the results of the analysis, it can be concluded that the images of the trajectories of the points of the NDVI profiles provide qualitative information reflecting the dynamics of the ontogeny phases of winter rye plants. **Scientific novelty.** Based on the nature of the selected sections of these trajectories, it is possible to create a digital map of the experimental field, with the help of which to conduct a protocol for remote diagnostics of the state of crop productivity and make a forecast of their yield during harvesting.

Keywords: spatial photometric NDVI profile, *Secale cereale* (W) L.; Rosenblatt perceptron

For citation: Vorobyev N. I., Pukhalskiy Ya. V., Astapova M. A., Surin V. G., Pishchik V. N. Digital processing of photometric data of remote sensing of winter rye fields. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (2): 152–162. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-02-152-162>. (In Russ.)

Acknowledgements. The study was carried out within the framework of the budget topic FFZF-2022-0006. The authors express their gratitude to the candidate of biological sciences of the All-Russian Research Institute of Agricultural Medicine V. K. Chebotar for providing biological products and consultations, and the candidate of agricultural sciences of the Saint Petersburg State Agrarian University S. A. Dobrokhotov for organizing the work at the site.

Date of paper submission: 25.08.23, **date of review:** 17.10.2023, **date of acceptance:** 24.11.2023.

Постановка проблемы (Introduction)

Озимая рожь (*Secale cereale* (W) L.) является наименее требовательной к почве зерновой культурой [1], которая отличается высокими вкусовыми качествами и содержит более полноценный белок, чем белок, получаемый из пшеницы, а также биологические стимуляторы и витамины. Еще из особенностей можно выделить, что культура слабо подвержена аллелопатическому влиянию сорных растений на ингибирование своего роста [2].

В мировом земледелии озимая рожь занимает одно из ведущих мест. В структуре посевных площадей России больше всего ее возделывают в республиках Татарстан и Башкортостан, а также Кировской, Брянской, Оренбургской, Саратовской и Самарской областях. В Нечерноземной зоне РФ из-за низкого уровня плодородия почв, а также нестабильных показателей климата существует определенная трудность заблаговременно определять объемы ожидаемой урожайности данной сельско-

хозяйственной культуры. Помимо общей неоднородности агрометеорологических условий зоны геоценоза, здесь также существует и территориальная мозаичность показателей почвенного плодородия, в результате чего даже в пределах одной выбранной фации педосферы сроки прохождения фаз вегетационного развития растений в общем цикле онтогенеза могут не совпадать по времени, и растения развиваются неодинаково.

Традиционно в системе оперативного агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства для прогнозирования и корректировки размеров возможного урожая различных культур, возделываемых в пределах конкретной территории выбранного поля, ежегодно на разных периодах вегетации рекомендуют проводить полевые исследования, связанные с выявлением определенной взаимосвязи между состоянием стеблестоя (продуктивностью растений) и показателями почвенного плодородия. Полевые исследования во многих случаях играют важную роль в обеспечении аэрокосмических данных. С их помощью осуществляется непрерывный мониторинг состояния посевов при высокой пространственной детальности. Для оценки созависимости между вариабельностью всех биотических факторов внешней среды в пределах выбранного эдафотопы используют вегетационный индекс (NDVI). Он рассчитывается с помощью коэффициентов спектральной яркости посева в красной (U_r) и ближней инфракрасной (U_{ir}) областях спектра электромагнитных волн, а следовательно, может быть использован как одна из характеристик для оценки продуктивности сельскохозяйственных культур. На примере изучения различных сортовых особенностей озимой пшеницы, возделываемой на отдельных полях, была показана высокая корреляционная зависимость между получаемой урожайностью и оптико-биологическими свойствами посевов [3]. Большое влияние на данную связь оказывали такие элементы в технологии возделывания культуры, как сорт, предшественник, минеральное питание, сроки и нормы высева.

С начала 2000-х гг. с появлением ежедневно поставляемых снимков, получаемых аппаратурой MODIS, установленной на спутниках Terra и Aqua, появилась возможность регулярного анализа спектральных характеристик природных объектов. Однако спутниковые наблюдения имеют невысокое пространственное разрешение, около 0,25–1 км. Такое разрешение не позволяет в большинстве случаев проводить мониторинг посевов на конкретном поле. В полевых условиях пространственные вычисления значений NDVI-индексов ведут с помощью применения фотометрических тестеров [4], установленных на беспилотные летающие аппараты (БПЛА) [5]. В случае их отсутствия обычно

выбирается 10–20 тестовых площадок, и измерение значений индексов NDVI производят вручную на них. Использование активного зондирования с помощью оптических тестеров позволяет проводить такие работы с повышенной точностью в любое время суток независимо от погодных условий [6]. По итогу динамической фотосъемки составляется электронная карта [7] с изменениями в распределении индексов NDVI у возделываемых растений на разных участках опытного поля за вегетацию. Данные измерений могут использоваться для определения биометрических характеристик посевов, предсказания урожая в условиях стрессовых воздействий [8], которые сопровождаются процессами аккумуляции биофильных веществ в растениях. Поэтому важным является вопрос выделения на измерительной шкале NDVI «особых точек», связанных с такими межфазными переходами в развитии растений. Для корректных оценок статуса растений в посевах и проведения оптического фенотипирования предполагается также использование коэффициента вариации индекса CV-NDVI [9].

В рамках очередной начавшейся в стране волне информационно-коммуникационной революции (Индустрия 4.0) в производственный цикл получения растениеводческой продукции в сельском хозяйстве все более активно внедряются прорывные цифровые технологии (искусственного интеллекта (ИИ), интернета вещей (IoT), облачных технологий, программирования и роботоники) [10–12]. Однако даже в развитых странах этот процесс сдерживается из-за отсутствия на рынке интеллектуальных систем поддержки [13]. По факту на основе комбинированного учета данных, получаемых наземными и беспилотными методами, в системе точного земледелия (ТЗ) зерновых культур должен быть разработан прототип интеллектуальной системы принятия решений для поддержки плановых технологических операций в прецизионном производстве получения прогнозируемой районной урожайности растений [14]. В функциональный алгоритм разрабатываемой системы дистанционного зондирования посевов должны быть заложены возможные риски, связанные с математической моделью расчета лимитирующих факторов влияния климата [15; 16] и/или удобрений [17].

Цель работы состояла в описании и апробации такого алгоритма оценки продуктивности урожая озимой ржи, основанного на расчетах изменения индексов NDVI под влиянием применения разных удобрений.

Настоящая работа проводится в рамках программы совершенствования технологий выращивания полевых сельскохозяйственных культур в органическом земледелии с использованием микробиологических препаратов.

Методология и методы исследования (Methods)

Расчет был произведен по данным фотометрического тестирования посевов озимой ржи сорта Эра, полученных на поле учебно-опытного сада СПБГАУ в 2014–2015 гг., площадью 0,32 га. Почва участка дерново-подзолистая, суглинистая. Сев зерновых провели 6 сентября 2014 г. рядовым способом, с междурядьями 15 см. Норма высева семян составила 5,0 млн всхожих семян в расчете на 1 га. Схема опыта показана в таблице 1.

Микроэлементную добавку, содержащую Ca – 15 %, Mg – 6 %, S – 12 %, F – 0,5 %, B – 0,02 %, Cu – 0,02 %, Zn – 0,025 %, Mn – 0,11 %, вносили вместе с основными удобрениями при последней культивации, разбросав их по поверхности почвы и сразу заделав культиватором. По рекомендации завода-производителя микроэлементное удобрение надо применять при норме 2,0–3,0 т/га. Однако, учитывая их высокую стоимость, норму внесения уменьшили в 10 раз, до 250 кг/га, основываясь на данных агрохимического анализа почвы. Предшественником была вико-овсяная смесь, которую измельчили и заделали в почву за две недели до посева ржи. Обработка семян «Экстрасолом» проведена в день сева из расчета 1 л/т. В остальном все мероприятия по уходу за растениями были одинаковыми. В течение осеннего (2014 г.) и весенне-летнего (2015 г.) вегетационных периодов проводили тестирование посевов (16 измерений в каждом варианте опыта по двум шкалам

прибора). Одновременно определяли биометрические показатели развития культур (количество и вес зерен в колосе, кустистость, высоту, выживаемость растений). Уборку урожая и обмолот снопов проводили одновременно на всех делянках 6 августа 2015 г. в пяти пробных площадках размером 45 × 55,6 см каждая, площадью 0,25 м² (в трех смежных рядах). Снопы подсушивали, доводя влажность зерна до 14 %, обмолачивали, очищали от примесей и взвешивали с точностью до 1 г. Затем урожайность с учетной площадки пересчитывалась в ц/га.

Для каждого варианта с ноября 2014 г. по июнь 2015 г. всего было проведено по 11 измерений NDVI-профилей посевов озимой ржи с 7–10-дневным интервалом. Измерения *in situ* осуществлялись оптическим активным проксимальным тестером отечественного производства, аналогичным импортному сенсору GreenSeeker. Измерения проводились на каждой делянке, размером 10 × 1 м, с двух сторон. Итого каждый раз значения фиксировались в 12 повторностях, в разных точках, взятых равномерно. Высота тестера на вытянутых руках над растительным покровом составляла около 1,5 м. Определяемую величину NDVI рассчитывали по формуле

$$NDVI = (U_{ir} - U_r) / (U_{ir} + U_r), \quad (1)$$

где U_{ir} и U_r – коэффициенты яркости растительного полога (покрова) в красной и ближней инфракрасной областях спектра, равные 0,65 и 0,91 мкм.

Таблица 1
Варианты опыта по выращиванию озимой ржи сорта Эра

Вариант опыта	Микроэлементы, кг/га	НПК, кг д. в. / га	Применение препарата «Экстрасол»
1	250	50 фосмука + 50 KCl	нет
2	250	50 фосмука + 50 KCl + 50 аммиачная селитра	нет
3	0	50 фосмука + 50 KCl	да
4	0	50 фосмука + 50 KCl + 50 аммиачная селитра	да
5	0	50 суперфосфат + 50 KCl + 50 аммиачная селитра	да
6	0	0	да
7	0	0	нет

Примечание. Микроэлементы – микроэлементный комплексный препарат Буйского химического завода. Суперфосфат простой, фосмука – гранулированные. KCl – хлористый калий.

Table 1
Experimental options for growing winter rye variety Era

Experience variant	Microelements, kg/ha	NPK, kg of active substance per ha	The use of the biopreparation "Ekstrasol"
1	250	50 phosphorite flour + 50 KCl	No
2	250	50 phosphorite flour + 50 KCl + 50 ammonium nitrate	No
3	0	50 phosphorite flour + 50 KCl	Yes
4	0	50 phosphorite flour + 50 KCl + 50 ammonium nitrate	Yes
5	0	50 superphosphate + 50 KCl + 50 ammonium nitrate	Yes
6	0	0	Yes
7	0	0	No

Note. Trace elements is a microelement complex preparation of the Buyskiy chemical plant. Superphosphate ordinary, phosphorite flour – granular. KCl – potassium chloride.

Таблица 2
Средние значения индекса NDVI и CV-NDVI по вариантам дистанционных замеров с помощью двухканального Red/iRed-тестера

Даты замеров	Варианты опыта						
	1	2	3	4	5	6	7
Средний NDVI	0,232	0,318	0,243	0,301	0,287	0,225	0,208
Средний CV-NDVI, %	22,9	16,0	19,3	16,5	17,5	22,0	23,7

Table 2
Average values of the NDVI and CV-NDVI index by remote measurement options using a two-channel Red/iRed tester

Measurement dates	Experience variants						
	1	2	3	4	5	6	7
Average NDVI	0.232	0.318	0.243	0.301	0.287	0.225	0.208
Average CV-NDVI, %	22.9	16.0	19.3	16.5	17.5	22.0	23.7

Таблица 3
Биометрические характеристики растений озимой ржи сорта Эра по вариантам опыта

Показатели	Варианты опыта						
	1	2	3	4	5	6	7
Выживаемость растений, %	57	60	56	73	79	61	46
Высота растений, см	115,3	138,0	121,0	135,2	130,5	113,2	114,5
Продуктивная кустистость стеблей	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Коэффициент ковариации высоты растений, %	2,61	1,52	1,98	1,63	1,76	2,47	2,71
Урожайность, ц/га	40,9	53,0	39,0	45,7	44,5	36,3	26,5
Вес зерна главного колоса	1,43	1,76	1,38	1,25	1,12	1,18	1,16
Количество зерен в колосе, шт.	35,8	46,4	40,7	36,7	32,8	33,9	32,2
Вес 1000 семян, г	57,1	60,0	56,0	73,1	79,7	61,3	45,6

Table 3
Biometric characteristics of winter rye plants of the Era variety according to the experimental variants

Indicators	Experience variants						
	1	2	3	4	5	6	7
Plant survival, %	57	60	56	73	79	61	46
Plant height, cm	115.3	138.0	121.0	135.2	130.5	113.2	114.5
Productive bushiness of stems	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Coefficient of plant height covariance, %	2.61	1.52	1.98	1.63	1.76	2.47	2.71
Productivity, c/ha	40.9	53.0	39.0	45.7	44.5	36.3	26.5
Grain weight of the main ear	1.43	1.76	1.38	1.25	1.12	1.18	1.16
Number of grains in an ear, pcs	35.8	46.4	40.7	36.7	32.8	33.9	32.2
Weight of 1000 seeds, g	57.1	60.0	56.0	73.1	79.7	61.3	45.6

Тестер обеспечивал проведение измерений с высокой точностью (инструментальная погрешность в пределах 1 %) при разных погодных условиях и в любое время суток.

На основании формул (2)–(4) можно выделить три базовые характеристики – это медиана (M), доверительный интервал (CI) и коэффициент вариации (CV) NDVI-профиля.

$$M = 0,5 \cdot (NDVI_5 - NDVI_5) = 0,5 \cdot (0,177 + 0,194) = 0,186, \quad (2)$$

где $NDVI_5$, $NDVI_6$ – значения вегетационного индекса NDVI, находящиеся на пятой и шестой позициях в NDVI-профиле.

$$CI = 0,5 \cdot (NDVI_{10} + NDVI_9 + NDVI_2 + NDVI_1) = 0,5 \cdot (0,267 + 0,247 + 0,137 + 0,076) = 0,151, \quad (3)$$

где $NDVI_{10}$, $NDVI_9$, $NDVI_2$, $NDVI_1$ – значения вегетационного индекса NDVI, находящиеся в соответствующих позициях в NDVI-профиле.

$$CV = 0,5 \cdot CI/M = 0,5 \cdot 0,151/0,186 = 0,406, \quad (4)$$

где CI , M – доверительный интервал (2) и медиана (1) NDVI-профиля.

Коэффициенты корреляции между средними значениями NDVI, средним индексом вариации CV-NDVI и биометрическими характеристиками растений озимой ржи сорта Эра

Индекс	Выживаемость растений, %	Урожайность, ц/га	Высота растений, см	Коэффициент вариации высоты растений
Средние значения NDVI	0,67	0,92	0,98	-0,98
Средние значения CV-NDVI	-0,68	-0,85	-0,96	0,96

Примечание. Доверительный интервал для коэффициентов корреляции равен $\pm 0,03$.

Table 4

Correlation coefficients between mean NDVI values, mean CV-NDVI variation index, and biometric characteristics of Era winter rye plants

Index	Plant survival rate, %	Yield, c/ha	Plant height, cm	Coefficient of plant height variations
Average NDVI	0.67	0.92	0.98	-0.98
Mean CV-NDVI	-0.68	-0.85	-0.96	0.96

Note. Confidence interval for correlation coefficients is ± 0.03 .

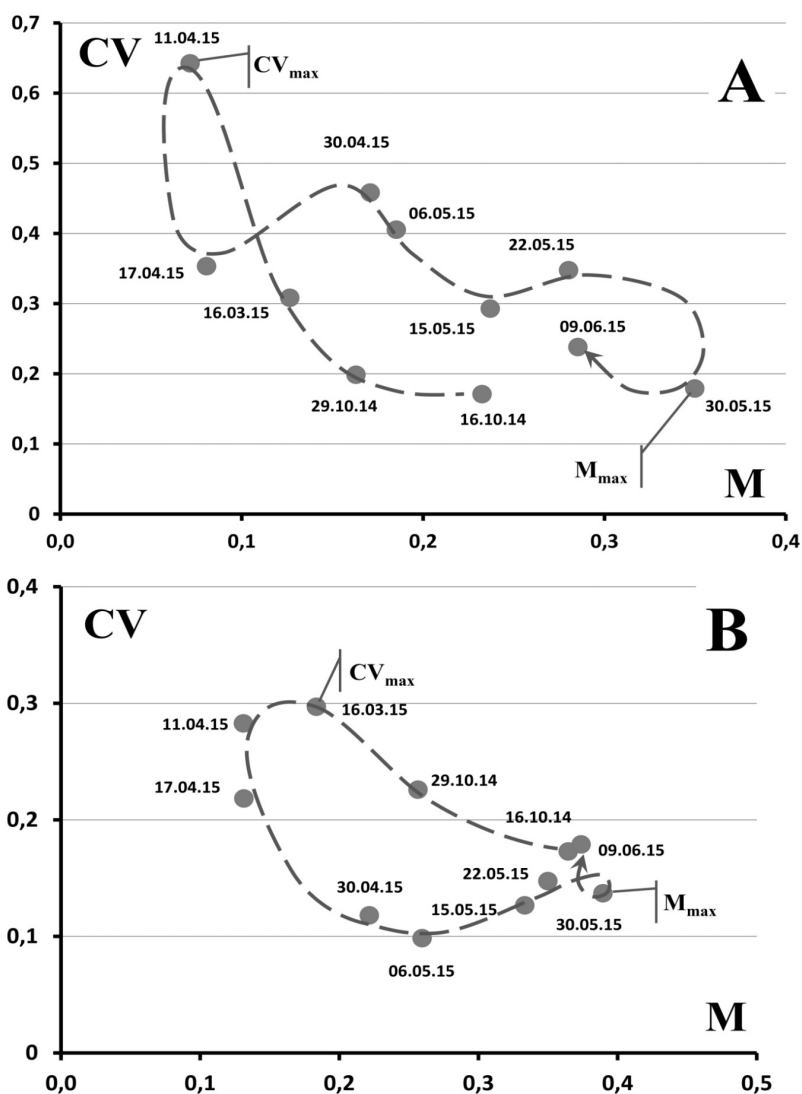


Рис. 1. Фазовые портреты траектории (пунктирная линия) точки, представляющей NDVI-профиль посева озимой ржи в вариантах опыта № 7 (А) и № 5 (В). Даты вблизи точек обозначают время измерения фотометрического NDVI-профиля

Fig. 1. Phase portraits of the trajectory (dotted line) of the point, representing the NDVI-profile of sowing winter rye in the variants of experience № 7 (A) and № 5 (B). Dates near the points indicate the time when the photometric NDVI profile was measured

Результаты (Results)

Измеренные значения индексов- NDVI по вариантам опыта представлены в таблице 2.

Биометрические характеристики выращенных растений представлены в таблице 3. Выявлено, что наибольшее влияние на урожай ($Y = 53,0$ кг/га) дает применение минерального комплекса (мк): P50, K50, N50, на варианте № 2. На втором месте с близкими показателями по урожайности (45,7 и 44,5 кг/га) варианты 4 и 5 с «Экстрасолом».

Коэффициенты корреляции между средними значениями NDVI и CV-NDVI с биометрическими характеристиками растений представлены в таблице 4. Существенные коэффициенты корреляции средних значений NDVI и CV-NDVI с биометрическими характеристиками растений за период вегетации растений создают возможность в оперативном режиме отслеживать особенности развития растений, по особым точкам динамики этих значений классифицировать стрессовые реакции растений, определять наилучшие технологии выращивания сельскохозяйственных культур, оптимальные сроки уборки и объем урожая.

В изменяющихся погодных условиях лучшим вариантом прогноза урожая может быть тот, что проводится по всему массиву усредненных данных NDVI:

$$Y_m = 173NDVI - 2,2(R_m^2 = 0,81), Y_m - Ext = 129NDVI + 8,6(R_m^2 = 0,99), \quad (5)$$

При этом лучший прогноз обеспечивается для вариантов с «Экстрасолом».

Прогноз урожая через CV-NDVI менее достоверный. Но на вариантах с «Экстрасолом» он надежнее:

$$Y_m CV = -135CV \cdot NDVI + 65(R_m^2 = 0,32), Y_m CV = -230 CV \cdot NDVI + 77(R_m^2 = 0,59), \quad (6)$$

Соотношения CV-NDVI (NDVI) являются своеобразными оптическими портретами (образами) различных технологий возделывания во временном масштабе (по фенофазам). По итогу измерений для каждого варианта опыта удалось построить фазовые портреты траектории перемещения на координатной плоскости ($X = M$; $Y = CV$) точки, представляющей NDVI-профиль. Наиболее четкими были линейные зависимости, зафиксированные на контрольном (эталонном) варианте N7, который имитирует естественный природный фон (рис. 1).

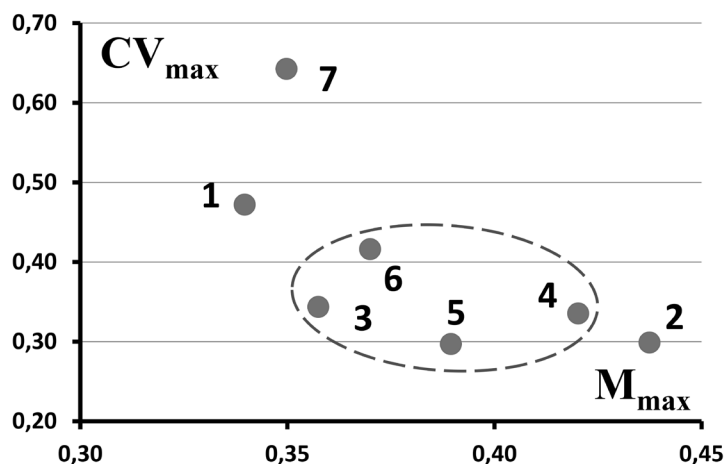


Рис. 2. Группировка вариантов опыта с применением микробиологического препарата «Экстрасол» в кластер (эллипс – пунктирная линия) поблизости значений M_{max} и CV_{max}

Fig. 2. Grouping of experimental options using the microbiological preparation “Ekstrasol” into a cluster (ellipse – dotted line) near the values of M_{max} and CV_{max}

Таблица 5
Значения особых точек фазовых траекторий по вариантам опыта

Вариант опыта	M_{max}	CV_{max}
1	0,340	0,472
2	0,437	0,299
3	0,357	0,344
4	0,420	0,335
5	0,389	0,297
6	0,370	0,416
7	0,350	0,643

Примечание. Номера вариантов опыта соответствуют номерам в таблице 1.

Table 5
Values of singular points of phase trajectories by experiment options

Experience variants	M_{max}	CV_{max}
1	0.340	0.472
2	0.437	0.299
3	0.357	0.344
4	0.420	0.335
5	0.389	0.297
6	0.370	0.416
7	0.350	0.643

Note. Numbers of experiment options correspond to the numbers in Table 1.

Особыми точками фазовых траекторий перемещения точек NDVI-профилей являются максимальные значения коэффициентов M_{max} и CV_{max} (таблица 5).

На координатной плоскости (рис. 2) представлена группировка точек, изображающих сходства вариантов в опыте.

Дальнейшая обработка фотометрических данных предполагает проведение кластерного анализа. Для этого значения преобразуются в квадратную матрицу парных евклидовых дистанций (таблица 6).

Евклидова дистанция в двумерном пространстве $\{M_{max}, CV_{max}\}$ рассчитывалась по следующей формуле.

$$D_{2,7} = 1/D_{max} \cdot \sqrt{(M_2 - M_7)^2 + (V_2 - V_7)^2} = 1/0,335 \cdot \sqrt{(0,437 - 0,350)^2 + (0,472 - 0,643)^2} = 0,335/0,335 = 1, \quad (7)$$

где M_2 и M_7 – значения M_{max} для вариантов № 2 и № 7 опыта; V_1 и V_4 – значения CV_{max} для вариантов № 2

и № 7 опыта, D_{max} – максимальная дистанция между вариантами № 2 и № 7.

Используя данные матрицы евклидовых дистанций между вариантами опыта и алгоритм кластеризации «дальний сосед», удалось построить дендрограмму группировки вариантов опыта (рис. 3).

Условием для выделения кластера на дендрограмме (рис. 4) была максимальная относительная дистанция в кластере между вариантами опыта ($D \leq 0,5$). Таким образом, в кластере оказались варианты опыта (№ 3, 4, 5, 6), в которых применялся микробиологический препарат «Экстрасол».

Логистика проделанных выше преобразований данных фотометрических NDVI-профилей посевов озимой ржи может быть реализована в рамках простой модели нейронных сетевых структур системы ИИ [18–20] – персептроном Розенблатта (рис. 4).

Таблица 6
Матрица евклидовых дистанций между вариантами опыта
Table 6
Matrix of Euclidean distances between test options

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0,561	0,365	0,447	0,513	0,179	0,482
2	0,561	0	0,258	0,114	0,135	0,382	1,000
3	0,365	0,258	0	0,178	0,159	0,207	0,843
4	0,447	0,114	0,178	0	0,139	0,268	0,889
5	0,513	0,135	0,159	0,139	0	0,340	0,981
6	0,179	0,382	0,207	0,268	0,340	0	0,641
7	0,482	1,000	0,843	0,889	0,981	0,641	0

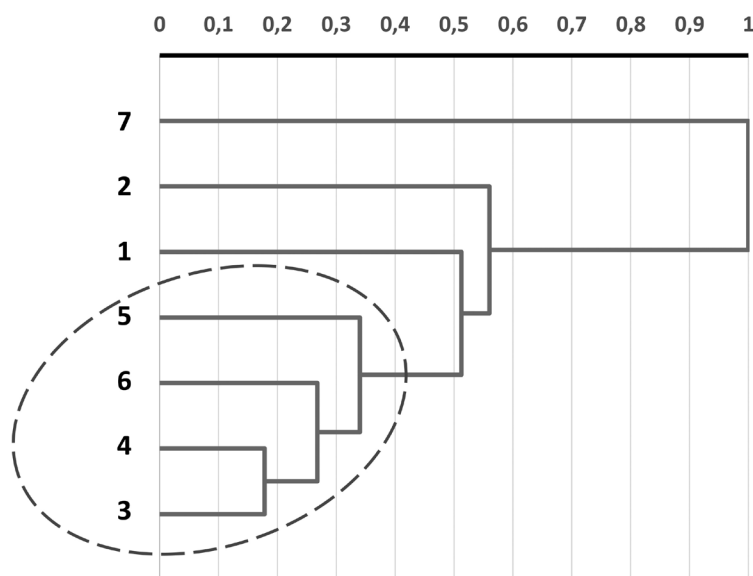


Рис. 3. Дендрограммы кластеризации вариантов опыта. Пунктиром выделены варианты опыта, объединившиеся в кластер. Цифры в основании дендрограммы обозначают номера вариантов опыта

Fig. 3. Dendrograms of experience variants clustering. The dotted line indicates the variants of the experiment, united in a cluster. The numbers at the base of the dendrogram indicate the numbers of the experiment options

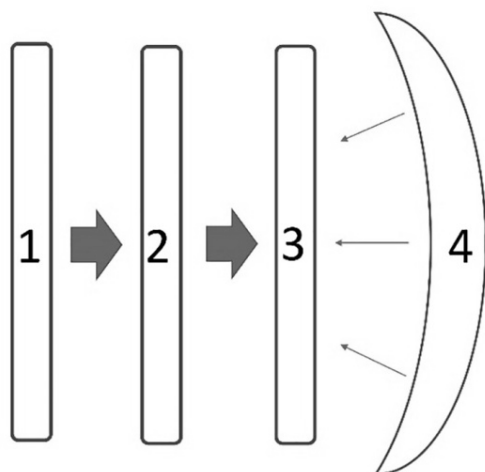


Рис. 4. Схема четырехслойного персептрона:
 1 – слой исходной информации (массив значений вегетационного индекса NDVI), 2 – слой вторичной информации (значения параметров M , CI , CV NDVI-профилей), 3 – слой третичной информации (фазовые портреты), кластеризация вариантов опыта по близости значений M_{max} и CV_{max} ,
 4 – слой ассоциативной информации, характеризующей объективные причины и условия, определившие особенности траекторий точек NDVI-профилей и кластеризацию вариантов опыта

Fig. 4. Scheme of a four-layer perceptron: 1 – layer of initial information (an array of values of the vegetation index NDVI), 2 – layer of secondary information (values of parameters M , CI , CV of NDVI profiles), 3 – layer of tertiary information (phase portraits), clustering of experiment options by the proximity of M_{max} and CV_{max} values), 4 – layer of associative information, characterizing objective causes and conditions, determined the features of the NDVI-profile point trajectories and the clustering of experiment options

Привлечение ассоциативной информации для обработки фотометрических данных (4-й слой персептрона) необходимо для выбора той агротехнологии, которая способствуют полноценному онтогенезу растений и улучшению выравненности посевов ржи, то есть снижению коэффициента CV фотометрического профиля NDVI.

Логистика персептрона позволяет сформулировать неконкретный ответ на поставленные вопросы. Получается, что с применением микробиологического препарата «Экстрасол» происходит более полное развитие растений и улучшается выравненность растений в поле ($CV_{max} < 0,42$). Однако остается необъяснимым $CV_{max} = 0,299$ в варианте опыта № 2.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Образы траекторий точек NDVI-профилей предоставляют качественную информацию, отражающую динамику фаз онтогенеза растений озимой ржи. На основании характера участков этих траекторий можно создать цифровую систему ИИ, с помощью которой можно будет дистанционно диагностировать созревание растений и определять время уборки урожая.

В дальнейшем планируется апробация предложенного метода прогноза ожидаемой урожайности озимой ржи с учетом осеннего, зимнего и ранневесеннего периодов по другим субъектам РФ, а также продолжение исследований по дальнейшему усовершенствованию и автоматизации расчетов изменения индексов NDVI, основанных на динамико-статистическом учете фазовой перехода траекторий точек на портрете изучаемого поля.

Библиографический список

1. Каргатова А. М., Степанов С. А., Ермолаева Т. Я., Нуждина Н. Н. Биологические особенности продуктивности различных селекционно-генетических форм озимой ржи // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2017. Т. 17. № 1. С. 48–52.
2. Турсумбекова Г. Ш. Аллелопатическое влияние вытяжек сорных растений на семена и проростки зерновых культур // Агропродовольственная политика России. 2014. № 4 (28). С. 38–40.
3. Сторчак И. Г., Шестакова Е. О., Ерошенко Ф. В. Связь урожайности посевов озимой пшеницы с NDVI для отдельных полей // Аграрный вестник Урала. 2018. № 6. С. 64–68. DOI: 10.25930/awm3-sw92.
4. Михайленко И. М., Воронков И. Н. Научно-методические и алгоритмические основы оценивания показателей продуктивности и фитосанитарного состояния посевов по данным дистанционного зондирования земли // Агрофизика. 2016. № 1. С. 32–42.
5. Paul K., Chatterjee S. S., Pai P., Varshney A., Juikar S., Prasad V., Dasgupta S. Viable smart sensors and their application in data driven agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 198. Article number 107096. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107096.
6. Muñoz-Huerta R. F., Guevara-Gonzalez R. G., Contreras-Medina L. M., Torres-Pacheco I. L., Prado-Olivarez J., Ocampo-Velazquez R. V. A Review of Methods for Sensing the Nitrogen Status in Plants: Advantages, Disadvantages and Recent Advances // Sensors. 2013. Vol. 13. Pp. 10823–10843. DOI: 10.3390/s130810823.
7. Абрамов Н. В., Семизоров С. А., Шерстобитов С. В., Гунгер М. В., Петухов Д. А. Использование беспилотного летательного аппарата для мониторинга за состоянием агроценозов и составления электронных карт полей // Земледелие. 2021. № 8. С. 8–12. DOI: 10.24412/0044-3913-2021-8-8-12.
8. Wang R., Cherkauer K., Bowling L. Corn Response to Climate Stress Detected with satellite based NDVI series // Remote sensing. 2016. Vol. 23. Pp. 269–287. DOI: 10.3390/rs8040269.
9. Ghanem M. E., Marrou H., Sinclair T. R. Physiological phenotyping of plants for crop improvement // Trends in Plant Science. 2015. Vol. 20. No. 3. Pp. 139–144. DOI: 10.1016/j.tplants.2014.11.006.

10. Koptilina D., Bulgakov A., Aleshina A. "Big data" and the "Internet of things", or what accelerates the development of the agro-industrial complex // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 274. No. 1. Article number 012058. DOI: 10.1088/1755-1315/274/1/012058.
11. Zolkin A. L., Burda A. G., Avdeev Y. M., Fakhertdinova D. I. The main areas of application of information and digital technologies in the agro-industrial complex // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 677. No. 3. Article number 032092. DOI: 10.1088/1755-1315/677/3/032092.
12. Стомба Е. В., Шарафутдинов А. Г., Горбунова О. С., Арасланбаев И. В., Стомба А. В., Даминева Э. Р. Роль цифровых технологий в развитии деятельности сельскохозяйственных товаропроизводителей // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2021. № 3-2. С. 225–232.
13. Якушев В. П., Якушев В. В., Матвеев Д. А. Интеллектуальные системы поддержки технологических решений в точном земледелии // Земледелие. 2020. № 1. С. 33–37. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10109.
14. Van Klompenburg T., Kassahun A., Catal C. Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 177. Article number 105709. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105709.
15. Malhi G. S., Kaur M., Kaushik P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 3. Article number 1318. DOI: 10.3390/su13031318.
16. Karimi V., Karami E., Keshavarz M. Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran // Journal of Integrative Agriculture. 2018. Vol. 17. No. 1. DOI: 10.1016/S2095-3119(17)61794-5.
17. Brühl C. A., Zaller J. G. Biodiversity decline as a consequence of an inappropriate environmental risk assessment of pesticides // Frontiers in Environmental Science. 2019. Vol. 7. Article number 177. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00177.
18. Wu Y., Feng J. Development and application of artificial neural network // Wireless Personal Communications. 2018. Vol. 102. Pp. 1645–1656. DOI: 10.1007/s11277-017-5224-x.
19. Saltykov M., Yakubailik O., Bartsev S. Identification of vegetation types and its boundaries using artificial neural networks // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. No. 6. Article number 062001. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062001.
20. Esau T. J., Hennessy P. J., MacEachern C. B. Artificial intelligence and deep learning applications for agriculture // Precision Agriculture. Academic Press, 2023. Pp. 141–167. DOI: 10.1016/B978-0-443-18953-1.00003-9.

Об авторах:

Николай Иванович Воробьев, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, (ФГБНУ ВНИИСХМ), Санкт-Петербург, Пушкин, Россия; ORCID 0000-0001-8300-2287, AuthorID 86787. E-mail: nik.ivanvorobyov@yandex.ru

Ян Викторович Пухальский, научный сотрудник, Ленинградский государственный университет имени А. С. Пушкина, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия; ORCID 0000-0001-5233-3497, AuthorID 784249. E-mail: puhalskyan@gmail.com

Марина Алексеевна Астапова, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия; ORCID 0000-0002-9121-894X, AuthorID 1102940. E-mail: marinaastapova55@gmail.com

Владимир Георгиевич Сурин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия; ORCID 0000-0002-3091-5370, AuthorID 142124

Вероника Николаевна Пищик, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, (ФГБНУ ВНИИСХМ), Санкт-Петербург, Пушкин, Россия; старший научный сотрудник, Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия; ORCID 0000-0001-6422-4837, AuthorID 107711

References

1. Kargatova A. M., Stepanov S. A., Ermolaeva T. Y., Nuzhdina N. N. Biological Characteristics of Productivity of Various Breeding and Genetic Forms Winter Rye. *Izvestiya of Saratov University. Series: Chemistry. Biology. Ecology*. 2017; 17 (1): 48–52. (In Russ.)
2. Tursumbekova G. Sh. Allelopathic effect of weed extracts on seeds and seedlings of grain crops. *Agro-Food Policy in Russia*. 2014; 4 (28): 38–40.
3. Storchak I. G., Shestakova E. O., Eroshenko F. V. Influence of elements of technology on crop productivity and NDVI of wheat sowings. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2018; 6; 64–68. DOI: 10.25930/awm3-sw92. (In Russ.)
4. Mikhaylenko I. M., Voronkov I. N. Scientific, methodical and algorithmic basics for estimating productivity indicators and phytosanitary state of crops using remote sensing data. *Agrofizika*. 2016; 1: 32–42. (In Russ.)

5. Paul K., Chatterjee S. S., Pai P., Varshney A., Juikar S., Prasad V., Dasgupta S. Viable smart sensors and their application in data driven agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022; 198: 107096. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107096.
6. Muñoz-Huerta R. F., Guevara-Gonzalez R. G., Contreras-Medina L. M., Torres-Pacheco I. L., Prado-Olivarez J., Ocampo-Velazquez R. V. A Review of Methods for Sensing the Nitrogen Status in Plants: Advantages, Disadvantages and Recent Advances. *Sensors*. 2013; 13: 10823–10843. DOI: 10.3390/s130810823.
7. Abramov N. V., Semizorov S. A., Sherstobitov S. V., Gunger M. V., Petukhov D. A. Use of unmanned aerial vehicles for monitoring the condition of agricultural lands for making electronic field maps. *Zemledelie*. 2021; 8: 8–12. DOI: 10.24412/0044-3913-2021-8-8-12. (In Russ.)
8. Wang R., Cherkauer K., Bowling L. Corn Response to Climate Stress Detected with satellite based NDVI series. *Remote sensing*. 2016; 23: 269–287. DOI: 10.3390/rs8040269.
9. Ghanem M. E., Marrou H., Sinclair T. R. Physiological phenotyping of plants for crop improvement. *Trends in Plant Science*. 2015; 20 (3): 139–144. DOI: 10.1016/j.tplants.2014.11.006.
10. Koptilina D., Bulgakov A., Aleshina A. “Big data” and the “Internet of things”, or what accelerates the development of the agro-industrial complex. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 274 (1): 012058. DOI: 10.1088/1755-1315/274/1/012058.
11. Zolkin A. L., Burda A. G., Avdeev Y. M., Fakhertdinova D. I. The main areas of application of information and digital technologies in the agro-industrial complex. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 677 (3): 032092. DOI: 10.1088/1755-1315/677/3/032092.
12. Stovba E. V., Sharafutdinov A. G., Gorbunova O. S., Araslanbaev I. V., Stovba A. V., Damineva E. R. The role of digital technologies in the development of agricultural producers' activities. *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava*. 2021; 3-2: 225–232. (In Russ.)
13. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Matveenko D. A. Intelligent systems for technology decision support in precision agriculture. *Zemledelie*. 2020; 1: 33–37. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10109. (In Russ.)
14. Van Klompenburg T., Kassahun A., Catal C. Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020; 177: 105709. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105709.
15. Malhi G. S., Kaur M., Kaushik P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability*. 2021; 13 (3): 1318. DOI: 10.3390/su13031318.
16. Karimi V., Karami E., Keshavarz M. Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*. 2018; 17 (1). DOI: 10.1016/S2095-3119(17)61794-5.
17. Brühl C. A., Zaller J. G. Biodiversity decline as a consequence of an inappropriate environmental risk assessment of pesticides. *Frontiers in Environmental Science*. 2019; 7: 177. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00177.
18. Wu Y., Feng J. Development and application of artificial neural network *Wireless Personal Communications*. 2018; 102: 1645–1656. DOI: 10.1007/s11277-017-5224-x.
19. Saltykov M., Yakubailik O., Bartsev S. Identification of vegetation types and its boundaries using artificial neural networks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 537 (6): 062001. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062001.
20. Esau T. J., Hennessy P. J., MacEachern C. B. Artificial intelligence and deep learning applications for agriculture. *Precision Agriculture*. Academic Press, 2023. Pp. 141–167. DOI: 10.1016/B978-0-443-18953-1.00003-9.

Authors' information:

Nikolay I. Vorobyev, candidate of technical sciences, leading researcher, All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, Saint Petersburg, Pushkin, Russia; ORCID 0000-0001-8300-2287, AuthorID 86787. E-mail: nik.ivanvorobyov@yandex.ru

Yan V. Pukhalskiy, researcher, Pushkin Leningrad State University, Saint Petersburg, Pushkin, Russia; ORCID 0000-0001-5233-3497, AuthorID 784249. E-mail: pukhalskiyan@gmail.com

Marina A. Astapova, junior researcher, Saint Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia; ORCID 0000-0002-9121-894X, AuthorID 1102940. E-mail: marinaastapova55@gmail.com

Vladimir G. Surin, candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher, Agrophysical Institute of the Russian Academy of Agricultural Sciences, Saint Petersburg, Russia; ORCID 0000-0002-3091-5370, AuthorID 142124

Veronika N. Pishchik, candidate of biological sciences, senior researcher, All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, Saint Petersburg, Pushkin, Russia; senior researcher, Agrophysical Institute of the Russian Academy of Agricultural Sciences, Saint Petersburg, Russia; ORCID 0000-0001-6422-4837, AuthorID 107711