

ЦИФРОВОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ АГРОТЕХНОЛОГИЙ В ЗЕМЛЕДЕЛИИ ЮЖНОГО УРАЛА

Ю. А. Гулянов, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела степеведения и природопользования, iury.gulynov@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-5883-349X

Институт степи Уральского отделения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Оренбургского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, д. 11; e-mail: orenstep@mail.ru

Исследования проведены в 2019–2024 гг. в посевах озимой и яровой пшеницы, озимой ржи, ячменя, подсолнечника, кукурузы и сои в Центральной почвенно-климатической зоне Оренбургской области с целью выявления эффективности цифровых методов в управлении продуктивностью полевых культур. Цифровой мониторинг развития биологической массы осуществляли посредством нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) на основе данных ДЗЗ и наземного сканирования ручным сенсором. Площадь ассимиляционной поверхности растений определяли весовым методом. При обработке цифрового материала использовали общепринятые методы статистического анализа. Метеорологические условия соответствовали свойственной региону засушливости климата, определяемой повышенными ресурсами тепла и ограниченным атмосферным увлажнением. При сумме активных (выше 10 °C) температур 3402 °C и 232 мм осадков в среднем за период исследований ГТК Селянинова составил 0,69 единицы. Выявлена высокая внутрипольная гетерогенность биомассы растений, сопровождающаяся пространственной вариабельностью урожайности и снижением валовых сборов. Определена приемлемость цифровых методов ее выражения в виде мозаичности NDVI. Выявлена сильная связь его величины с площадью ассимиляционной поверхности ($r = 0,86–0,89$) и урожайностью полевых культур ($r = 0,79–0,83$) по элементарным участкам поля. Обоснована перспективность формирования зональной (региональной) базы оптимальных величин NDVI, характерных для высокопродуктивных (эталонных) посевов, и практическая целесообразность их использования при реализации корректирующих агроприемов в технологиях точного (цифрового) земледелия. На черноземах южных Оренбургской области при дискретном внесении минеральных удобрений установлено повышение средней по полю яровой пшеницы величины NDVI с 0,64 до 0,79 единицы, снижение пространственной вариабельности биомассы и повышение урожайности зерна на 0,32 т/га, или 22,6 %, по сравнению с внесением всей нормы удобрений сплошным способом в один прием.

Ключевые слова: степная зона России, полевые культуры, пространственная гетерогенность биомассы, NDVI, ДЗЗ, точное (цифровое) земледелие.

Для цитирования: Гулянов, Ю. А. Цифровое сопровождение агротехнологий в земледелии Южного Урала // Зерновое хозяйство России. 2025. Т. 17, № 5. С. 90–97. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-100-5-90-97.



DIGITAL SUPPORT OF AGROTECHNOLOGIES IN THE SOUTHERN URALS' AGRICULTURE

Yu. A. Gulyanov, Doctor of Agricultural Sciences, professor, leading researcher of the department of steppe studies and nature management, iury.gulynov@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-5883-349X

The Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – a separate structural subdivision of the Orenburg Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 460000, Orenburg, Pionerskaya Str. 1; e-mail: orensteppe@mail.ru

The study was conducted among winter and spring wheat, winter rye, barley, sunflower, maize and soybean in the Central soil and climate zone of the Orenburg region in 2019–2024 to identify the efficiency of digital methods in managing the productivity of field crops. Digital monitoring of the development of biological mass was carried out using the normalized difference vegetation index (NDVI) based on remote sensing Earth data (RS) and ground scanning with a hand-held sensor. The area of the assimilation surface of plants was determined by the weight method. When processing the digital material, there were used generally accepted methods of statistical analysis. The weather conditions corresponded to the aridity of the climate typical for the region, with increased heat resources and limited air moisture. With the sum of active (above 10 °C) temperatures of 3402 °C and 232 mm of precipitation, on average, Selyaninov HHC was 0.69 units during the study period. There has been established high intra-field heterogeneity of plant biomass, accompanied by spatial variability of productivity and gross harvests' decrease. There has been determined acceptability of digital methods for expressing it in the form of NDVI mosaic. There has been identified a strong correlation between its value and the assimilation surface area ($r = 0.86–0.89$) and productivity of field crops ($r = 0.79–0.83$) according to elementary field plots. There have been substantiated prospects for forming a zonal (regional) base of optimal NDVI values characteristic of highly productive (reference) crops and the practical feasibility of their use in corrective agricultural practices in precision (digital) farming technologies. On the southern blackearth of the Orenburg region, with discrete application of mineral fertilizers, there has been found an increase from 0.64 to 0.79 units in the mean NDVI value in the spring wheat field, a decrease in the spatial variability of biomass

and an increase in grain productivity by 0.32 t/ha or 22.6 % in comparison with the application of the entire fertilizer rate in a continuous manner in one go.

Keywords: steppe part of Russia, field crops, spatial heterogeneity of biomass, NDVI, remote sensing (RS), precision (digital) agriculture.

Введение. Самообеспечение основными видами качественной сельскохозяйственной продукции в достаточных для активного и здорового образа жизни объемах является важнейшим условием обеспечения продовольственной безопасности и экспортного потенциала России, фактором сохранения ее государственности и суверенитета.

Выращивание необходимых для этого сболов растительного сырья предполагает использование обширных площадей земель с пространственно изменчивым уровнем почвенного плодородия и низкой устойчивостью к проявлению деградационных процессов (Кирюшин, 2024), что сопровождается гетерогенностью развития полевых культур, высокой внутрипольной пестротой урожайности и нестабильностью валовых урожаев.

С особой остротой обозначенная проблема проявляется в наиболее освоенных в сельскохозяйственном отношении регионах степной зоны России, где сосредоточено около 60,0 % всех посевных площадей (более 46,0 млн га) и собирается более 63,0 % валового урожая зерновых и зернобобовых культур (более 60,0 млн т).

В этом отношении выделение локальных внутрипольных областей с выраженной неоднородностью развития биологической массы и реализация мероприятий по пространственной оптимизации условий роста и развития для всех растений на поле являются актуальной задачей степного земледелия России и представляют высокий научный интерес.

Широкими возможностями в ее решении располагают интеллектуальные технологии цифрового земледелия, основанные на использовании географических информационных систем (ГИС), являющихся инструментом получения, обработки, анализа и отображения пространственных данных (Кремнева и др., 2020). Их принципиальная особенность – отношение к полю как к совокупности характеризующихся природной и антропогенной неоднородностью отдельных участков, обладающих различным урожайным потенциалом (Якушев и др., 2019).

Производственное освоение интеллектуальных технологий цифрового земледелия основывается на мониторинге биомассы посевов методами дистанционного зондирования (ДЗЗ) из космоса (Ерошенко и др., 2017) и (или) путем использования беспилотных летательных аппаратов и наземных, включая портативные, сканирующих устройств.

В качестве информационного показателя степени ее развития чаще всего используется нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Попович и Дунаева, 2024). Он рассчитывается на основе спутниковых снимков высо-

кого разрешения, имеющих каналы в красном (0,55–0,75 мкм) и инфракрасном (0,75–1,00 мкм) диапазонах (Acar and Altun, 2021).

Наиболее часто для этого используются открытые данные высокого разрешения со спутников Landsat-8 и Sentinel-2 с пространственным разрешением 30 и 10 м/пиксель и периодичностью съемки 16 и 5 дней.

Нивелирование пространственных различий в условиях роста и развития возделываемых растений на выявленных в процессе мониторинга участках поля, способствующее снижению пестроты и более полной реализации их продуктивности, в интеллектуальных технологиях цифрового земледелия достигается дискретным технологическим воздействием (Zhai et al., 2025).

Наиболее освоенным его приемом в мировой и отечественной практике в настоящее время является дискретное внесение удобрений и средств защиты растений (Зубарев и др., 2023), осваиваются устройства и для дискретного высева семян и др.

Дискретное применение агрохимикатов и средств защиты растений сопровождается еще и снижением рисков загрязнения окружающей природной среды за счет сокращения их расходов, а также ощутимой экономией денежных средств и материальных ресурсов, в том числе энергоносителей (Шпанев и Смук, 2020).

В связи с этим верификация методов цифрового сопровождения агротехнологий в ландшафтно-адаптивном земледелии степной зоны, являющейся хлебной житницей России и уникальным памятником природного разнообразия, характеризуется высокой актуальностью для стабильного производства продукции растениеводства и сохранения биологического разнообразия степной биоты.

Цель исследования – выявить эффективность цифровых методов в управлении продуктивностью полевых культур, направленном на снижение пространственной вариабельности их урожайности и повышение валовых сболов на Южном Урале.

Для выполнения этой цели поставлены следующие задачи:

- провести цифровой мониторинг биологической массы полевых культур на основе пространственного распределения индекса NDVI, исследовать связь NDVI, площади ассимиляционной поверхности растений и их урожайности статистическими методами;

- определить оптимальные размеры ассимиляционной поверхности растений в высокопродуктивных зональных посевах и соответствующие им индексы NDVI и рекомендовать их в качестве эталонных для включения в региональную базу данных;

- провести производственную верификацию дискретного внесения минеральных удо-

брений и охарактеризовать практическую значимость полученных результатов.

Материалы и методы исследований.

Работу проводили в 2019–2024 гг. в агроценозах полевых культур в Центральной почвенно-климатической зоне Оренбургской области. Мониторинговые исследования осуществляли в производственных посевах озимой пшеницы и на полигонах экологического испытания озимой и яровой пшеницы, озимой ржи, ячменя, подсолнечника, кукурузы и сои на черноземах обыкновенных, содержащих в пахотном слое до 4,4 % гумуса, 2,16 мг на 100 г почвы подвижного азота (NO_3), 12,6 мг легкогидролизуемого азота, 4,5 мг подвижного фосфора (P_2O_5), 35 мг обменного калия (K_2O) и pH 7,7. Метеорологические условия соответствовали свойственной зоне засушливости климата, определяемой повышенными ресурсами тепла и ограниченным атмосферным увлажнением. При сумме активных (выше 10 °C) температур 3402 °C и 232 мм осадков в среднем за период исследований ГТК Селянинова составил 0,69 единицы.

Полевой опыт с дискретным внесением минеральных удобрений в посевах яровой пшеницы проводили в 2022–2024 гг. на черноземах южных, содержащих в пахотном слое до 3,8 % гумуса, 1,35 мг на 100 г почвы подвижного азота (NO_3), 8,4 мг легкогидролизуемого азота, 3,25 мг подвижного фосфора (P_2O_5), 27 мг обменного калия (K_2O) и pH 7,8 (Гулянов и др., 2023). За период активных (выше 10 °C) температур в среднем за три года отмечено 278 мм осадков, сумма активных температур равнялась 3371 °C, а ГТК Селянинова составил 0,86 единицы (засушливые условия). Минеральные азотно-фосфорные удобрения общей нормой 60 кг/га д.в. NP на одном участке поля в виде аммофоса (100 кг/га) вносили сплошным способом в один прием в рядки при посеве сеялкой СКП-2,1. На другом участке эту же норму распределяли на два приема. Основную их часть (36 кг/га д.в.) также вносили в виде аммофоса (60 кг/га) сплошным способом в рядки при посеве сеялкой СКП-2,1. Оставшуюся часть (23 кг/га д.в.) вносили дифференцированно в виде некорневой подкормки водным раствором мочевины (50 кг/га) в фазу выхода в трубку навесным опрыскивателем Заря-ОН-600-18-06 только на участках со стабильно пониженным

развитием биомассы, выявленных на основе анализа данных ДЗЗ за предшествующие годы.

Площадь ассимиляционной поверхности растений определяли весовым методом с использованием электронных весов Electronic balance, Type CBL 2200H по образцам, отобранным в 4-кратной повторности с площадок 0,25 м².

Цифровой мониторинг развития биологической массы полевых культур осуществляли посредством определения NDVI экспериментальных участков по данным ДЗЗ и посредством наземного сканирования портативным устройством (ручным сенсором) Green Seeker Handheld Crop Sensor, Model HCS – 100 (Trimble, USA). В первом случае NDVI определяли на базе общедоступных космических снимков Landsat 8 и Sentinel-2, размещенных на on-line ресурсах OneSoil.ai и Sentinel-hub.com. Полученные данные наносили на картографическую основу в программном комплексе Next GIS с последующей обработкой в Arc Map.

Принцип работы ручного сенсора состоит в излучении на поверхность растений и измерении отраженных импульсов красного и инфракрасного света и отображении величин NDVI в условных единицах от 0,00 до 0,99 на дисплее прибора. Для повышения достоверности результатов наземных измерений проводили многократное сканирование посевов в границах реперных точек, закрепленных в системе координат портативным мини-навигатором Garmin GPSMAP 64 st.

При обработке цифрового материала использовали общепринятые методы статистического анализа.

Результаты и их обсуждение. Выявлена легко фиксирующаяся визуально и при наземном сканировании портативными оптическими устройствами высокая внутрипольная гетерогенность биологической массы полевых культур, отчетливо проявляющаяся и на космических снимках в виде мозаичности NDVI.

На черноземах обыкновенных Оренбургской области коэффициент вариации NDVI по элементарным участкам поля озимой пшеницы в фазу осеннего кущения составил 22,3 % с размахом изменчивости в 0,19 единицы (0,63–0,82) (рис. 1).

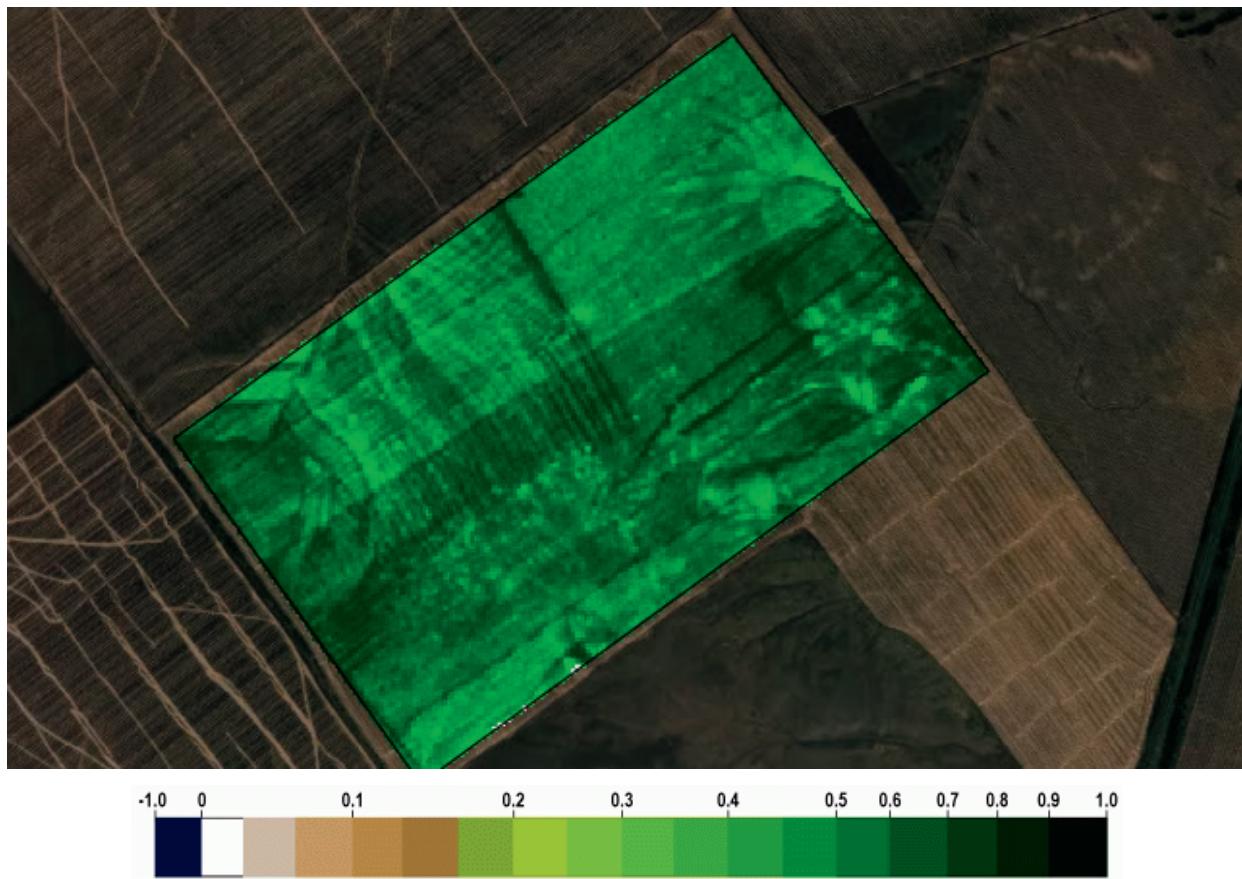


Рис. 1. Пространственная изменчивость NDVI на поле озимой пшеницы в фазу осеннего кущения на черноземах обыкновенных Оренбургской области, Октябрьский район, октябрь 2023 г.
(по результатам космической съемки)

Fig. 1. Spatial variability of NDVI in the winter wheat field during the autumn tillering phase on ordinary blackearth in the Orenburg region, Oktyabrsky district, October 2023
(based on the space photography)

За весенне-летний период вегетации в картине пространственного распределения NDVI заметного нивелирования не выявлено.

Зависимость пространственного распределения NDVI в период максимального развития биологической массы (фаза колошения–цветения) от ее однородности (или гетерогенности) в начале вегетации подтверждена результатами статистического анализа. Связь временных рядов NDVI в эти периоды сильная, с коэффициентом корреляции Пирсона (r) 0,87 при величине его стандартной ошибки (s_r) 0,058. Связь описывается уравнением регрессии

$$y = 0,563x + 0,619,$$

где x – NDVI при завершении осенней вегетации, y – NDVI в фазу колошения–цветения. Зависимость данных величин наблюдается в 75,7 % случаев ($r^2 = 0,757$) или динамика NDVI при завершении осенней вегетации на 75,7 % детерминирует вариацию NDVI в фазу колошения – цветения.

В период уборки 2024 г. отмечена изменчивость урожайности зерна по элементарным участкам поля от 1,34 до 2,15 т/га (0,81 т/га) с ко-

эффициентом вариации 26,4 %. Валовой сбор зерна в расчете на 100 га уборочной площади составил 160,7 т, что ниже сбора, ожидаемого от средней урожайности (1,74 т/га) на 13,8 т, или 8,0 %. Разница же с валовым сбором, ожидаемым от наивысшей по полю урожайности (2,15 т/га), составила 54,3 т, или 25,3 %.

В результате корреляционного анализа урожайных данных по элементарным участкам поля выявлена их сильная связь с величиной NDVI в отмеченные выше периоды вегетации и площадью ассимиляционной поверхности растений ($r = 0,79$ –0,83), в свою очередь сильно связанных между собой ($r = 0,86$ –0,89). Стандартная ошибка коэффициента корреляции (s_r) при этом составила 0,071–0,065 и 0,059–0,053 соответственно.

Исходя из этого, для оценки урожайных перспектив биологической массы полевых культур на основе NDVI представляет определенный интерес формирование базы данных его величин, характерных для высокопродуктивных (эталонных) посевов, в том числе в разрезе сортов, с учетом их индивидуальных особенностей.

Оптимальные величины площади ассимиляционной поверхности и соответствующие

им индексы NDVI отдельных полевых культур для условий Центральной почвенно-климатической зоны Оренбургской области, установленные по результатам шестилетних опре-

делений на высокопродуктивных участках экологического испытания и рекомендуемые для включения в региональную базу данных, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Рекомендуемые фитометрические параметры высокопродуктивных агроценозов полевых культур для Центральной почвенно-климатической зоны Оренбургской области, средние данные за 2019–2024 гг. (по результатам наземного сканирования посевов)
Table 1. Recommended phytometric parameters of highly productive agrocenoses of field crops for the Central soil and climatic zone of the Orenburg region, mean data for 2019–2024 (based on the ground scanning of crops)

Культура	Фаза вегетации	Площадь ассимиляционной поверхности (ПЛ), тыс. м ² /га	Вегетационный индекс (NDVI), единицы
Озимая пшеница	кущение	14,9–16,3	0,76–0,78
	выход в трубку	18,7–20,6	0,82–0,84
	колошение–цветение	23,7–25,7	0,84–0,85
Озимая рожь	кущение	18,6–19,9	0,80–0,82
	выход в трубку	24,4–26,3	0,85–0,87
	колошение–цветение	28,7–30,1	0,85–0,86
Яровая пшеница	кущение	11,4–12,8	0,55–0,58
	выход в трубку	15,1–17,3	0,62–0,63
	колошение–цветение	18,4–18,8	0,61–0,63
Ячмень	кущение	11,6–12,9	0,62–0,67
	выход в трубку	16,3–18,1	0,70–0,73
	колошение–цветение	19,9–21,2	0,71–0,72
Подсолнечник	4–5 пар настоящих листьев	15,6–17,1	0,65–0,67
	образование корзинок	8,3–20,2	0,76–0,82
	цветение	22,6–24,1	0,81–0,85
Кукуруза	выход в трубку	15,2–16,1	0,61–0,64
	9 листьев	20,8–22,3	0,74–0,78
	цветение	24,6–26,2	0,81–0,83
Соя	ветвление	17,9–22,3	0,63–0,71
	начало цветения	29,4–34,3	0,86–0,88
	образование бобов	34,9–36,7	0,85–0,87

Использование этих данных для оперативной оценки фитометрических параметров текущих посевов может иметь высокую практическую целесообразность при реализации корректирующих агротехнических приемов в технологиях точного (цифрового) земледелия.

Таким образом, зависимость валового урожая от внутрипольной вариабельности урожайности предопределяет необходимость постоянного мониторинга биологической массы полевых культур по элементарным участкам поля, начиная с ранних фаз, для сопоставления ее текущих величин с параметрами высокопродуктивных посевов.

В определенных пределах выравнивать неоднородность условий внешней среды и повышать урожайные перспективы растений на участках с низким потенциалом, как показали наши исследования, позволяет внедрение в технологический процесс приемов цифрового земледелия.

Так, в полевом опыте с дискретным внесением минеральных удобрений под яровую пшеницу на черноземах южных Центральной почвенно-климатической зоны Оренбургской области (2022–2024 гг.) отмечено снижение мозаичности биомассы и повышение средней по полю величины NDVI, составившее в фазу колошения – цветения 0,79 единицы. Это оказалось выше, чем при внесении всей нормы NP сплошным способом в один прием (0,64) на 0,15 единицы, или 23,4 %. Размах пространственной вариабельности NDVI снизился почти в четыре раза и был равен 0,08 единицы (0,76–0,84) против 0,29 (0,42–0,71) при традиционном подходе к внесению удобрений. Биологическая урожайность зерна по элементарным участкам поля изменилась от 1,63 до 1,81 т/га с коэффициентом вариации 11,9 %. Средняя урожайность по участку составила 1,73 т/га и оказалась выше, чем при внесении всей нормы NP сплошным способом в один прием на 0,32 т/га, или 22,6 % (рис. 2).

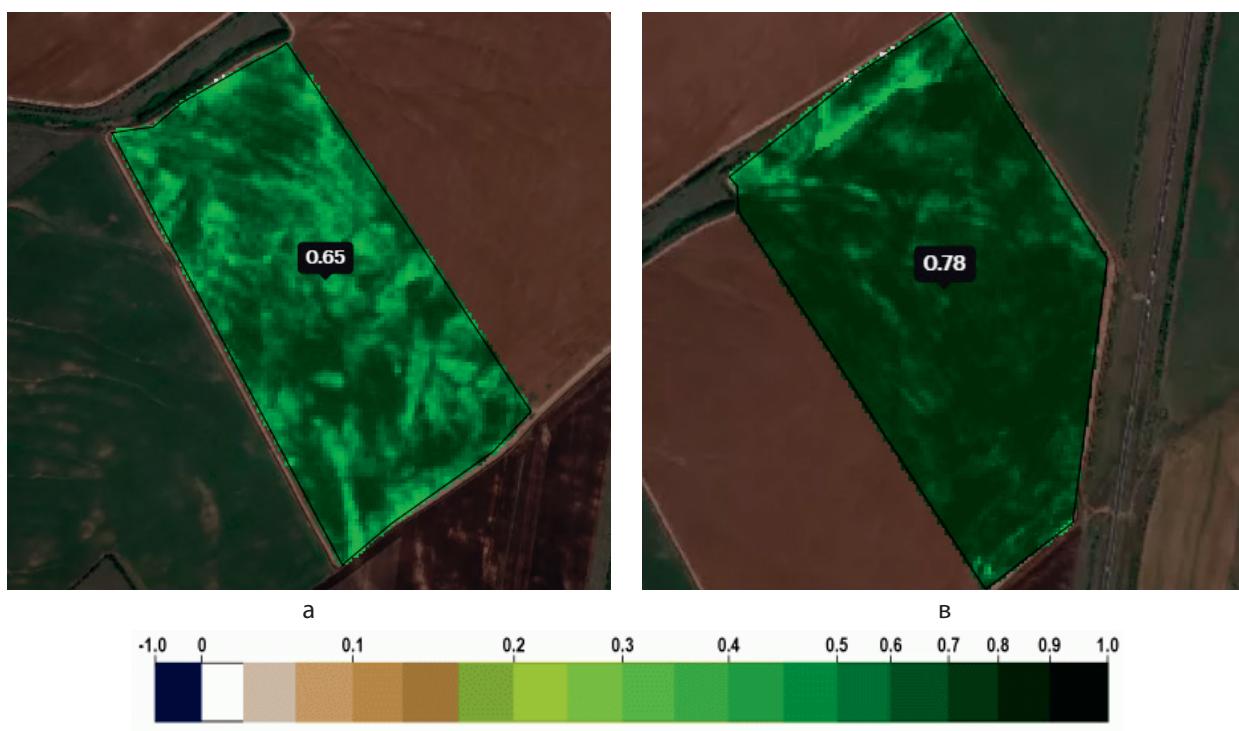


Рис. 2. Вариативность развития биологической массы яровой пшеницы при внесении всей нормы NP сплошным способом в один прием (а) и дискретном внесении в агротехнологиях с цифровым сопровождением (б) на черноземах южных Оренбургской области, Оренбургский район, 2022 г. (по результатам космической съемки)

Fig. 2. Variability of biological mass of spring wheat with application of the entire NP rate in a continuous manner in one go (a) and with discrete application in agricultural technologies with digital support (b) on the southern blackearth of the Orenburg region, Orenburg district, 2022 (based on the space photography)

В целом проведенными нами исследованиями определена перспективность цифровых методов для контроля развития биомассы полевых культур в земледелии Южного Урала в виде динамики NDVI на основе мультиспектральных космических снимков (Д33) или с помощью наземных сканирующих устройств. Полученная таким образом оперативная информация может быть использована для управления продуктивностью текущих посевов путем дискретного внесения агрохимикатов или средств защиты растений, а также применена в последующем для пространственной дифференциации норм высева семян или при корректировке подходов к построению севооборотов, обработке почвы, структуре посевных площадей, комплектованию машинно-тракторного парка и др., включая и структуру землепользования.

Практическая значимость полученных результатов заключается в перспективности их использования для мониторинга производственного процесса полевых культур, обоснования целесообразности и разработки путей реализации корректирующих управленческих и технологических решений, направленных на повышение продуктивности.

Выводы. Локальные участки полей с выраженной неоднородностью развития биологи-

ческой массы отчетливо проявляются на космических снимках в виде мозаичности индекса NDVI и легко выделяются при наземном сканировании портативными устройствами. Его величина сильно связана ($r = 0,86-0,89$) с площадью ассимиляционной поверхности растений и от его динамики в высокой степени зависит ($r = 0,79-0,83$) уровень урожайности по элементарным участкам поля.

Сильная связь этих параметров определяет актуальность формирования зональной (региональной) базы величин NDVI, характерных для высокопродуктивных (эталонных) посевов. Их использование для оперативной оценки фитометрических параметров текущих посевов имеет высокую практическую целесообразность.

Реализация в агротехнологиях элементов цифрового сопровождения способствует выравниванию неоднородности условий внешней среды, повышает урожайность растений на участках с пониженным потенциалом, приводит к повышению средней по полю урожайности и валового сбора.

На черноземах южных Центральной почвенно-климатической зоны Оренбургской области при дискретном внесении минеральных удобрений под яровую пшеницу величина NDVI в фазу колошения-цветения повысилась

до 0,79 единицы (на 0,15 единицы, или 23,4%), а размах ее вариабельности (0,08 единицы) снизился почти в четыре раза. Это сопровождалось возрастанием средней по полю урожайности зерна на 0,32 т/га, или 22,6%, по сравнению с внесением всей нормы удобрений сплошным способом в один прием.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № ГР АААА-А21-121011190016-1 «Проблемы степного природопользования в условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем».

Библиографический список

1. Гулянов Ю. А., Поляков Д. Г. Зависимость фитометрических параметров полевых агроценозов от агрофизических показателей почвы // Таврический вестник аграрной науки. 2023. № 1(33). С. 19–33. DOI: 10.5281/zenodo.7898389
2. Ерошенко Ф. В., Барталев С. А., Кулинцев В. В., Сторчак И. Г., Шестакова Е. О., Симатин Т. В. Возможности региональной оценки качества зерна озимой пшеницы на основе спутниковых данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 7. С. 153–165. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-153-165
3. Зубарев Ю. Н., Фомин Д. С., Новикова Т. В., Полякова С. С., Фомин Д. С. Применение данных дистанционного зондирования Земли с элементами точного земледелия при возделывании бобово-злаковых смесей с разным соотношением компонентов // Пермский аграрный вестник. 2023. № 1(41). С. 20–28. DOI: 10.47737/2307-2873_2023_41_20
4. Кирюшин В. И. Организация территориального и внутрихозяйственного землеустройства на ландшафтно-экологической основе // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38, № 5. С. 4–9. DOI: 10.53859/02352451_2024_38_5_4
5. Кремнева О. Ю., Костенко И. А., Пачкин А. А., Данилов Р. Ю., Пономарев А. В., Ким Ю. С. Картирование распространения и развития фитопатогенов на пшенице и ячмене с использованием NextGIS // Зерновое хозяйство России. 2020. № 3. С. 61–66. DOI: 10.31367/2079-8725-2020-69-3-61-66
6. Попович В. В., Дунаева Е. А. Мониторинг и прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур по данным ДЗЗ на уровне районов Республики Крым // Таврический вестник аграрной науки. 2024. № 2 (38). С. 140–152. DOI: 10.5281/zenodo.12200306
7. Шпанев А. М., Смук В. В. Эффективность дифференцированного применения гербицидов в посевах озимой пшеницы // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. № 4. С. 25–27. DOI: 10.31857/S2500262720040067
8. Якушев В. П., Канаш Е. В., Якушев В. В., Матвеенко Д. А., Русаков Д. В., Блохина С. Ю., Петрушин А. В., Митрофанов Е. П. Новые возможности автоматизации процесса обнаружения внутрипольной неоднородности по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 3. С. 24–32. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32
9. Acar E., Altun M. Classification of the agricultural crops using Landsat-8 NDVI parameters by support vector machine // Balkan journal of electrical and computer engineering. 2021. Vol. 9(1). P. 78–82. DOI: 10.17694/bajece.863147
10. Zhai W., Cheng Q., Duan F., Huang X., Chen Z. Remote sensing-based analysis of yield and water-fertilizer use efficiency in winter wheat management // Agricultural Water Management. 2025. Vol. 11, Article number: 109390. DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109390

References

1. Gulyanov Yu.A., Polyakov D.G. Zavisimost' fitometricheskikh parametrov polevykh agrotsenozov ot agrofizicheskikh pokazatelei pochvy [Dependence of phytometric parameters of field agrocenoses on agrophysical soil indicators] // Tavricheskii vestnik agrarnoi nauki. 2023. № 1(33). S. 19–33. DOI: 10.5281/zenodo.7898389
2. Eroshenko F. V., Bartalev S. A., Kulintsev V. V., Storchak I. G., Shestakova E. O., Simatin T. V. Vozmozhnosti regional'noi otsenki kachestva zerna ozimoi pshenitsy na osnove sputnikovykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya [Opportunities of regional estimation of winter wheat grain quality based on satellite remote sensing data] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2017. Т. 14, № 7. С. 153–165. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-153-165
3. Zubarev Yu. N., Fomin D. S., Novikova T. V., Polyakova S. S., Fomin D. S. Primenenie dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli s elementami tochnogo zemledeliya pri vozdel'yvanii bobovo-zlakovyykh smesei s raznym sootnosheniem komponentov [Application of remote sensing Earth data with elements of precision farming in the cultivation of legume-cereal mixtures with different ratios of components] // Permskii agrarnyi vestnik. 2023. № 1(41). S. 20–28. DOI: 10.47737/2307-2873_2023_41_20
4. Kiryushin V. I. Organizatsiya territorial'nogo i vnutrikhozyaistvennogo zemleustroistva na landshaftno-ekologicheskoi osnove [Organization of territorial and intra-agricultural management on a landscape-ecological basis] // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2024. Т. 38, № 5. С. 4–9. DOI: 10.53859/02352451_2024_38_5_4
5. Kremneva O. Yu., Kostenko I. A., Pachkin A. A., Danilov R. Yu., Ponomarev A. V., Kim Yu. S. Kartirovanie rasprostraneniya i razvitiya fitopatogenov na pshenitse i yachmene s ispol'zovaniem NextGIS [Mapping the spread and development of phytopathogens on wheat and barley using NextGIS] // Zernovoe khozyaistvo Rossii. 2020. № 3. S. 61–66. DOI: 10.31367/2079-8725-2020-69-3-61-66
6. Popovich V. V., Dunaeva E. A. Monitoring i prognozirovaniye urozhainosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur po dannym DZZ na urovne raionov Respubliki Krym [Monitoring and forecasting of agricultural crop productivity based on remote sensing data at the districts of the Republic of Crimea] // Tavricheskii vestnik agrarnoi nauki. 2024. № 2 (38). S. 140–152. DOI: 10.5281/zenodo.12200306

7. Shpanev A. M., Smuk V. V. Effektivnost' differentsirovannogo primeneniya gerbitsidov v posevakh ozimoi pshenitsy [Efficiency of differentiated use of herbicides in winter wheat crops] // Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka. 2020. № 4. S. 25–27. DOI: 10.31857/S2500262720040067

8. Yakushev V. P., Kanash E. V., Yakushev V. V., Matveenko D. A., Rusakov D. V., Blokhina S. Yu., Petrushin A. V., Mitrofanov E. P. Novye vozmozhnosti avtomatizatsii protsessa obnaruzheniya vnutripol'noi neodnorodnosti po giperspektral'nym snimkam i opticheskim kriteriyam [New possibilities for automating the process of detecting in-field heterogeneity using hyperspectral images and optical criteria] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. Т. 16, № 3. S. 24–32. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32

9. Acar E., Altun M. Classification of the agricultural crops using Landsat-8 NDVI parameters by support vector machine // Balkan journal of electrical and computer engineering. 2021. Vol. 9(1). P. 78–82. DOI: 10.17694/bajece.863147

10. Zhai W., Cheng Q., Duan F., Huang X., Chen Z. Remote sensing-based analysis of yield and water-fertilizer use efficiency in winter wheat management // Agricultural Water Management. 2025. Vol. 11, Article number: 109390. DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109390

Поступила: 13.05.25; доработана после рецензирования: 18.06.25; принята к публикации: 23.06.25.

Критерии авторства. Автор подтверждает, что имеет на статью все права и несет ответственность за плагиат.

Авторский вклад. Гулянов Ю. А. – концептуализация исследования, подготовка опыта, выполнение полевых опытов и сбор данных, анализ данных и их интерпретация, подготовка рукописи.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.