

А.М. Шпанев, доктор биологических наук
В.В. Воробаев, кандидат сельскохозяйственных наук
 Агрофизический научно-исследовательский институт
 РФ, 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14

П.В. Лекомцев, доктор биологических наук
 Российский государственный гидрометеорологический университет
 РФ, 192007, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79
 E-mail: ashpanev@mail.ru

УДК 631.5:633.11

DOI:10.30850/vrsn/2021/3/34-36

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОСЕВОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЯХ АГРОТЕХНИКИ

Прецизионное управление продукционным процессом полевых культур, реализуемое в системе точного земледелия, подразумевает пространственно-дифференцированное, на основе спектральных измерений, выполнение агротехнических мероприятий. Оптические свойства посевов яровой пшеницы в изменяющихся условиях агротехники изучали в многофакторном микрополевым опыте на Меньковском филиале Агрофизического научно-исследовательского института (Ленинградская область, Гатчинский район). Схема опыта включала изучение влияния норм высева (5 и 6 млн всх. семян/га), доз азотных удобрений (0, 60 и 120 кг д.в./га) и засоренности опытных делянок (естественный фон, применение гербицида). По результатам исследований выявлено, что оптические свойства посевов яровой пшеницы в значительной степени определяются типом засоренности (8,5–48,1 %), в меньшей – внесением азотных удобрений (2,7–21,6 %). Влияние нормы высева на спектральные характеристики посева незначительно (0,1–0,8 %). Под воздействием гербицидной обработки и из-за освобождения значительной части поверхности почвы от сорной растительности отмечается снижение индекса NDVI (на 0,07–0,34), а при внесении азотных удобрений его увеличение (на 0,07–0,08 и 0,13–0,14 при N_{60} и N_{120} соответственно) вследствие нарастания надземной массы культурных и сорных растений. На фоне гербицидной обработки возможна корректировка питательного режима с внесением азотных подкормок и достаточно точного прогноза урожайности яровой пшеницы, основанных на значениях NDVI для фазы выхода в трубку и колошения соответственно. Полученные экспериментальные данные послужат основой для совершенствования теоретических и практических основ использования современных возможностей мониторинга в обосновании путей повышения эффективности управления состоянием почвенно-растительных систем и продукционным процессом зерновых культур на северо-западе РФ.

Ключевые слова: яровая пшеница, сорные растения, азотные удобрения, норма высева, спектральная характеристика, вегетационный индекс NDVI, динамика NDVI, северо-запад РФ.

A.M. Shpanev, Grand PhD in Biological sciences
V.V. Voropaev, PhD in Agricultural sciences
 Agrophysical Research Institute
 RF, 196600, g. Sankt-Peterburg, Grazhdanskiy pr., 14
P.V. Lekomtsev, Grand PhD in Biological sciences
 Russian State Hydrometeorological University
 RF, 192007, g. Sankt-Peterburg, ul. Voronezhskaya, 79
 E-mail: ashpanev@mail.ru

OPTICAL PROPERTIES OF A SPRING WHEAT SOWINGS IN CHANGING ARGOTHECNICS CONDITIONS

Accurate control of the production process of field crops, performed in the system of precision agriculture, means a spatially differentiated implementation of agrotechnical measures based on spectral measurements. The study of the optical properties of spring wheat crops under changing conditions of agricultural technology was carried out in a multifactorial microfield experiment at the Menkovsky branch of the Agrophysical Research Institute (Leningrad Region, Gatchinsky District). The experimental scheme included the study of the effect of sowing rates (5 and 6 million seeds per ha), doses of nitrogen fertilizers (0, 60 and 120 kg a.s. per ha) and weed infestation of experimental plots (natural background, application of herbicide). According to the research results, it was revealed that the optical properties of spring wheat crops are largely determined by the degree and type of weed infestation (8,5–48,1 %), to a lesser extent – by the introduction of nitrogen fertilizers (2,7–21,6 %). The influence of the sowing rate on the spectral characteristics of crop is insignificant (0,1–0,8 %). Under the influence of herbicidal treatment and disposal of a significant part of the soil surface from weeds, a decrease in the NDVI index is noted (by 0,07–0,34); the introduction of nitrogen fertilizers influences the increase in the NDVI index (by 0,07–0,08 and 0,13–0,14 at N_{60} and N_{120} respectively), due to the growth of the aboveground mass of cultivated and weed plants. Against the background of herbicidal treatment, it is possible to correct the nutritional regime using nitrogen fertilizing and a sufficient forecast of the yield of spring wheat, based on the NDVI values for the stemming and earing phases, respectively. The obtained experimental data will become a framework for improving the theoretical and practical basis for using modern monitoring opportunities to substantiate ways to improve the efficiency of managing the state of soil-plant systems and the production process of grain crops in the North-West of the Russian Federation.

Key words: spring wheat, weeds, nitrogen fertilizers, seeding rate, spectral characteristics, vegetation index NDVI, dynamics NDVI, North-West of the Russian Federation.

Одна из главных особенностей точного земледелия – максимальная реализация принципа дифференциации агротехнических воздействий на почвенно-растительный комплекс, базирующихся на применении геоинформационных систем оценки его состояния. [8, 9]

В последние годы изучение оптических свойств посевов как наземными, так и дистанционными средствами вышло на новый уровень. В многочисленных публикациях приводятся результаты для совершенствования методов мониторинга и управления производственным процессом почвенно-растительных систем. [1, 5, 6]

В спектральной оценке состояния посевов сельскохозяйственных культур широкое применение получил индекс NDVI, который служит надежным показателем сформированной массы фотосинтезирующей растительности. [10] По величине индекса возможно достаточно точно прогнозировать продуктивность посева (количественный показатель меры емкости фотосинтетической системы) и достоверно диагностировать условия минерального питания растений на протяжении всего периода летней вегетации зерновых культур. [2, 4, 7, 11] Успешные попытки в оценке фитосанитарного состояния агроценозов с помощью индекса NDVI связаны со случаями сильного проявления деятельности вредных организмов на культурные растения. [3]

Цель исследований – оценить влияние предпосевного внесения азотных удобрений, гербицидной обработки и нормы высева на оптические свойства посева яровой пшеницы в условиях северо-запада РФ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оптические свойства посева яровой пшеницы изучали в 2017–2018 годах на биополигоне Меньковского филиала АФИ, расположенном в Гатчинском районе Ленинградской области. Схема опыта включала разные нормы высева (5 и 6 млн всх. семян/га), дозы азотных удобрений (0,60 и 120 кг д.в./га) и применение гербицида (с обработкой и без). Размер делянок – 0,25 м², ежегодное их количество при шестикратной повторности – 72. Посев и предпосевное внесение аммиачной селитры выполняли вручную. Гербицидом Линтур, ВДГ (0,135 кг/га) обрабатывали яровую пшеницу в фазе кушения с помощью ранцевого опрыскивателя «Solo 473P». Объект исследования – сорт яровой пшеницы *Дарья*, имеющий допуск к возделыванию на территории Северо-Западного региона РФ. Предшественник – картофель.

В период вегетации яровой пшеницы наблюдали за динамикой нарастания сухой надземной биомассы и величиной NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) с помощью портативного полевого прибора GreenSeeker. Засоренность опытных делянок оценивали в фазе кушения перед гербицидной обработкой. Определяли общее проективное покрытие и численность в отдельности для каждого вида сорных растений.

Погодные условия за годы исследований значительно различались. Наиболее благоприятным для роста и развития пшеницы оказался 2017 год, в котором значения ГТК на протяжении всего пери-

ода вегетации культуры варьировали от 1,23 до 2,26. В начале развития яровой пшеницы наблюдался пониженный температурный фон, а в 2018 году – крайне недостаточное увлажнение и высокие температуры (ГТК = 0,46). Избыточное количество выпавших осадков приходилось на межфазный период колошения-цветение (ГТК = 3,46).

Статистическую обработку данных проводили в программе Statistica 6 – дисперсионный и корреляционный анализы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Стартовые значения индекса NDVI, определяемые в фазе кушения яровой пшеницы, указывают на прямую зависимость данного показателя от степени и характера засоренности опытных делянок. В 2017 году на единице площади насчитывали 681 экз./м², 54 % составляло проективное покрытие, отмечен сложный тип засоренности с преобладанием малолетних видов сорных растений (77,9 %). В 2018 году на опытных делянках была зафиксирована очень сильная степень засоренности – 830 экз./м² и 83,3 % проективного покрытия с доминированием сорных растений, характеризующихся многолетним циклом развития (74,3 %). Индекс NDVI – 0,53 и 0,75 соответственно в 2017 и 2018 годах. Выявленные отличия в начальной засоренности делянок с яровой пшеницей определили различия в динамике индекса NDVI, обусловленные и разной густотой стеблестоя культурных растений (542 и 294 стеблей/м²).

При нормальной густоте стеблестоя яровой пшеницы и сильной засоренности с преобладанием малолетних видов, как это было в 2017 году, вегетационный индекс постепенно увеличивался независимо от гербицидной обработки (табл. 1). В фазе колошения значения NDVI составили 0,68 и 0,73, а значит, по сравнению с фазой кушения, увеличились на одну и ту же величину – 0,18.

В изреженных делянках опыта 2018 года, вследствие продолжительного засушливого периода, пришедшегося на начальное развитие яровой пшеницы, а также очень сильной засоренности с преобладанием многолетников, динамика в вариантах с применением гербицида была иной, чем без обработки. Если мероприятий, направленных на снижение засоренности не проводили, то индекс NDVI в течение первой половины вегетации яровой пшеницы оставался без изменений (0,76 и 0,73 в фазах кушения и цветения). В результате гербицидной обработки и освобождения значительной части поверхности почвы от вегетирующей растительности индекс снижался с 0,73 в фазе кушения до 0,39 выходе в трубку. Последующее повышение индекса фиксировали в межфазный период (колошение – цветение), что было связано с увеличением вегетативной массы растений (табл. 2).

С возрастанием доз азотных удобрений отмечается тенденция к увеличению NDVI во все фазы вегетации независимо от засоренности посева, так как активно потребляют азот как культурные, так и сорные растения. Различия начинают проявляться с фазы кушения пшеницы, а максимальных значений индекс достигает в середине вегетации культуры. В 2017 году в фазе колошения без азотных удобрений величина индекса оказалась равной 0,64, при внесе-

Таблица 1.
Динамика индекса NDVI по фазам вегетации яровой пшеницы в вариантах с разной нормой высева, дозами азотных удобрений и применения гербицида (2017)

Вариант			NDVI			
доза азотных удобрений, кг д.в./га	норма высева, млн всх. семян/га	гербицид, кг/га	кущение	выход в трубку	колошение	цветение
0			0,53	0,65	0,68	0,64
60	5		0,55	0,67	0,77	0,71
120		0	0,60	0,70	0,82	0,80
0			0,51	0,65	0,65	0,61
60	6		0,54	0,65	0,71	0,71
120			0,54	0,65	0,77	0,79
	Среднее		0,55	0,66	0,73	0,71
0			0,47	0,54	0,60	0,57
60	5		0,50	0,58	0,69	0,64
120		0,135	0,50	0,62	0,74	0,71
0			0,46	0,56	0,61	0,60
60	6		0,53	0,57	0,67	0,66
120			0,55	0,65	0,77	0,81
	Среднее		0,50	0,59	0,68	0,66

Таблица 2.
Динамика индекса NDVI по фазам вегетации яровой пшеницы в вариантах с разной нормой высева, дозами азотных удобрений и применения гербицида (2018)

Вариант			NDVI			
доза азотных удобрений, кг д.в./га	норма высева, млн всх. семян/га	гербицид, кг/га	кущение	выход в трубку	колошение	цветение
0			0,72	0,73	0,63	0,69
60	5		0,75	0,79	0,64	0,70
120		0	0,79	0,78	0,71	0,72
0			0,73	0,71	0,67	0,72
60	6		0,79	0,74	0,77	0,73
120			0,79	0,76	0,77	0,79
	Среднее		0,76	0,75	0,70	0,73
0			0,74	0,38	0,29	0,56
60	5		0,70	0,35	0,36	0,53
120		0,135	0,71	0,43	0,46	0,58
0			0,76	0,37	0,32	0,54
60	6		0,74	0,37	0,45	0,62
120			0,73	0,41	0,48	0,63
	Среднее		0,73	0,39	0,39	0,58

нии 60 и 120 кг д.в./га – 0,71 и 0,78, а в 2018 году – 0,48, 0,56 и 0,61 соответственно.

Для управления питательным режимом яровой пшеницы практическое значение имеют данные индекса, полученные на фоне гербицидной обработки, не испытывающие на себе влияние сорной растительности. На их основе принимаются решения о своевременном проведении подкормки к фазе выхода в трубку. Значения NDVI этого периода

развития пшеницы в неудобренном варианте, имеющем дефицит азота, составляли 0,55 и 0,38 соответственно в условиях нормального и изреженного по густоте стеблестоя культурных растений посева.

Нормой высева определяется густота посева, оказывающая влияние на индекс вегетирующей растительности NDVI. Следует отметить, что отличия норм высева 5 и 6 млн всх. семян/га, по значению NDVI оказались минимальными и недостоверными на протяжении всего периода его замеров. На фоне применения гербицида небольшое преимущество просматривалось при большей норме высева.

Определяющее влияние засоренности на индекс NDVI и его динамику нашло подтверждение при статистической обработке данных. По результатам дисперсионного анализа на долю этого фактора приходилось 8,5...48,1 %, азотных удобрений – 2,7...21,6 %, нормы высева – 0,1...0,8 %.

Корреляционный анализ показал наличие тесных и статистически значимых прямых зависимостей урожая зерна от показаний прибора GreenSeeker в более поздние фазы развития культуры. Согласно полученным за годы исследований коэффициентам корреляции (0,84 и 0,80, при $P \leq 0,95$), достоверный прогноз урожайности осуществим в фазе колошения, но только с применением гербицида. В дополнение к этому, фактические значения сухой надземной массы культуры, полученные в течение периода вегетации яровой пшеницы, объясняют динамику индекса NDVI в варианте с гербицидной обработкой. Они связаны между собой существенными положительными коэффициентами корреляции как по данным 2017 (0,42, 0,68 и 0,73), так и 2018 года (0,77, 0,60 и 0,48 соответственно в фазы выхода в трубку, колошения и цветения).

Выводы. Оптические свойства посевов яровой пшеницы определяются степенью и типом засоренности, а также внесением азотных удобрений. Влияние нормы высева на спектральные характеристики посева незначительно. При гербицидной обработке и освобождении значительной части поверхности почвы от сорной растительности индекс NDVI снижается, а при внесении азотных удобрений увеличивается, вследствие нарастания надземной массы культурных и сорных растений. На фоне гербицидной обработки можно корректировать питательный режим, используя азотные подкормки и достаточно точно прогнозировать урожайность яровой пшеницы, с учетом значений NDVI в фазах выхода в трубку и колошения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Буховец, А.Г. Моделирование динамики вегетационного индекса NDVI озимой пшеницы в условиях ЦФО / А.Г. Буховец, Е.А. Семин, Е.И. Костенко и др. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2018. – Т. 11. – № 2. – С. 186–199.
2. Панеш, А.Х. Прогнозирование урожайности озимой пшеницы на основе сервисов геоинформационных систем / А.Х. Панеш, Г.В. Цалов // Вестник АГУ. – 2017. – № 4. – С. 175–180.
3. Смук, В.В. Дистанционный мониторинг засоренности посадок картофеля в периоды до и после появления всходов / В.В. Смук, А.М. Шпанев // Агрофизика. – 2019. – № 4. – С. 46–53.

4. Степанов, А.С. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе данных дистанционного зондирования Земли (на примере сои) / А.С. Степанов // Вычислительные технологии. – 2019. – Т. 24. – № 6. – С. 125–133.
5. Сторчак, И.Г. Связь урожайности посевов озимой пшеницы с NDVI для отдельных полей / И.Г. Сторчак, Е.О. Шестакова, Ф.В. Ерошенко // Аграрный вестник Урала. – 2018. – № 6. – С. 64–68.
6. Терехин, Э.А. Сезонная динамика проективного покрытия растительности агроэкосистем на основе спектральной спутниковой информации / Э.А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 4. – С. 111–123.
7. Фесенко, М.А. Фотометрическая экспресс-диагностика минерального питания и фитосанитарного состояния посевов зерновых культур / М.А. Фесенко, А.М. Шпанев // Агрофизика. – 2019. – № 2. – С. 54–63.
8. Шпаар, Д. Точное сельское хозяйство / Д. Шпаар, В.А. Захаренко, В.П. Якушев и др. – С-Пб: Санкт-Петербургское социально-реабилитационное предприятие «Павел», 2009. – 397 с.
9. Якушев, В.П. Информационное обеспечение точного земледелия / В.П. Якушев, В.В. Якушев. – С-Пб.: ПИЯФ, 2007. – 384 с.
10. Verhulst, N. The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeekerTM handheld sensor / N. Verhulst, B. Govaerts // Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies. – Mexico, 2010. – 14 p.
11. Voropaev, V. Remote means and methods of definition of homogeneous technological areas for precision management of mineral nutrition and phytosanitary condition of agrocenosis / V. Voropaev, A. Shpanev, P. Lekomtsev et al. // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – 2019. – Т. 19. – № 2–2. – С. 605–615.
2. Panesh, A.H. Prognozirovanie urozhajnosti ozimoy pshenicy na osnove servisov geoinformacionnyh sistem / A.H. Panesh, G.V. Calov // Vestnik AGU. – 2017. – № 4. – С. 175–180.
3. Smuk, V.V. Distancionnyj monitoring zasorennosti posadok kartofelya v periody do i posle poyavleniya vskhodov / V.V. Smuk, A.M. Shpanev // Agrofizika. – 2019. – № 4. – С. 46–53.
4. Stepanov, A.S. Prognozirovanie urozhajnosti sel'skohozyajstvennyh kul'tur na osnove dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli (na primere soi) / A.S. Stepanov // Vychislitel'nye tekhnologii. – 2019. – Т. 24. – № 6. – С. 125–133.
5. Storchak, I.G. Svyaz' urozhajnosti posevov ozimoy pshenicy s NDVI dlya otdel'nyh polej / I.G. Storchak, E.O. Shestakova, F.V. Eroshenko // Agrarnyj vestnik Urala. – 2018. – № 6. – С. 64–68.
6. Terekhin, E.A. Sezonnaya dinamika proektivnogo pokrytiya rastitel'nosti agroekosistem na osnove spektral'noj sputnikovoj informacii / E.A. Terekhin // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2019. – Т. 16. – № 4. – С. 111–123.
7. Fesenko, M.A. Fotometricheskaya ekspress-diagnostika mineral'nogo pitaniya i fitosanitarnogo sostoyaniya posevov zernovyh kul'tur / M.A. Fesenko, A.M. Shpanev // Agrofizika. – 2019. – № 2. – С. 54–63.
8. Shpaar, D. Tochnoe sel'skoe hozyajstvo / D. Shpaar, V.A. Zaharenko, V.P. Yakushev i dr. – S-Pb: Sankt-Peterburgskoe social'no-reabilitacionnoe predpriyatие «Pavel», 2009. – 397 s.
9. Yakushev, V.P. Informacionnoe obespechenie tochnogo zemledeliya / V.P. Yakushev, V.V. Yakushev. – S-Pb.: PI-YAF, 2007. – 384 s.
10. Verhulst, N. The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeekerTM handheld sensor / N. Verhulst, B. Govaerts // Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies. – Mexico, 2010. – 14 p.
11. Voropaev, V. Remote means and methods of definition of homogeneous technological areas for precision management of mineral nutrition and phytosanitary condition of agrocenosis / V. Voropaev, A. Shpanev, P. Lekomtsev et al. // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – 2019. – Т. 19. – № 2–2. – С. 605–615.

LIST OF SOURCES

1. Buhovec, A.G. Modelirovanie dinamiki vegetacionnogo indeksa NDVI ozimoy pshenicy v usloviyah CFO / A.G. Buhovec, E.A. Semin, E.I. Kostenko i dr. // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – Т. 11. – № 2. – С. 186–199.