

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ПРОДУКТИВНОСТИ ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ТРИТИКАЛЕ В ЛЕСОСТЕПИ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

В.Г. Каплин¹, Е.Ф. Чичкова², Д.А. Грядунов³, Д.А. Кочин⁴

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, лаборатория фитосанитарной диагностики и прогнозов, проф., д-р биол. наук, вед. науч. сотр.; e-mail: stenolepisma@mail.ru*

² *Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), ЦКУ «КосмоИнформЦентр», канд. геогр. наук, директор; e-mail: efchichkova@yandex.ru*

³ *ООО «ПТЕРО», руководитель научно-технического отдела; e-mail: d_gryadunov@ptero.ru*

⁴ *Государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), Институт вычислительных систем и программирования, кафедра компьютерных технологий и программной инженерии, ассистент; e-mail: dimakohin@yandex.ru*

Применение дистанционных методов мониторинга засоренности, обеспеченности листьев азотом и продуктивности озимой тритикале включает предшествующее аэрофотосъемке проведение наземных учетов состояния и засоренности посевов с установкой маркеров и определением их координат; мультиспектральную аэрофотосъемку посева с беспилотного летательного аппарата (БПЛА); обработку полученных аэрофотоснимков с применением индексов NDRE и NDVI, их дешифрирование по цветовой мозаике снимка и наземным маркерам с выявлением границ микрогруппировок по состоянию культуры и засоренности посева, составление координатной картосхемы их распределения; внесение азотных удобрений и гербицидов в период вегетации культуры на основе полученных картосхем методами точного земледелия. Для распознавания засоренности посевов и содержания азота в листьях наилучшие результаты дают аэрофотоснимки с применением индекса NDRE, где микрогруппировки посева с нормальным содержанием хлорофилла и азота в листьях имеют значения NDRE 0,45–0,60; с умеренным недостатком азота и пониженной концентрацией хлорофилла в листьях – 0,35–0,45; с повышенным недостатком азота – 0,25–0,35; с высокой численностью сорняков – 0,075–0,25. Измерения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) отраженного излучения листьев культуры и сорняков полевым спектрорадиометром PSR-1100 в диапазоне 320–1100 нм показали, что ее изменения в зависимости от длины волны у тритикале и сорняков были сходными с наименьшими значениями СПЭЯ во всех частях спектра у тритикале, более высокими у двудольных сорняков, имевших на снимке NDVI ярко-зеленую окраску. Азотные удобрения при выращивании тритикале применяют осенью при посеве (15–20% полной нормы азота) и в весенне-летний период вегетации культуры в виде подкормок: рано весной в фазу кушения (20–30%), в конце весны в начале выхода растений в трубку (до 50–60%), в первой половине лета в фазы начала колошения, налива зерна (5–10%). Перед проведением подкормок для оценки содержания азота в листьях и засоренности посевов целесообразна их аэрофотосъемка с БПЛА с применением индекса NDRE при обработке аэроснимков. Гербициды применяются после первой и второй аэрофотосъемок в фазы кушения, начала трубкования. Картосхемы засоренности посевов по результатам их третьей аэрофотосъемки используются для оценки потерь урожайности зерна от сорняков.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, аэрофотосъемка, дешифрирование аэроснимков, NDRE, доминирующие сорняки, азотные удобрения, показатели продуктивности зерна

ВВЕДЕНИЕ

Тритикале – сравнительно новая, ценная и перспективная продовольственная и фуражная, преимущественно озимая зерновая культура, гибрид пшеницы (*Triticum*) и ржи (*Secale*), высокоустойчивая к неблагоприятным условиям. Мировые площади посевов озимой тритикале составляют около 5 млн га, около половины из них – в Европе [Гончаров, Крохмаль, 2013]. По данным Росстата, посевные площади тритикале в России незначительны. В 2018–2019 гг. они составили около 150 тыс. га, в том числе в Приволжском федеральном округе – 92 тыс. га, в Самарской области – около 6 тыс. га [Горянина, 2017]. В перспективе тритикале в струк-

туре зернового клина должна занимать в южных регионах не менее 10%, в северных – до 15%. Применение дистанционных методов оценки засоренности, состояния и продуктивности тритикале практически не изучено.

Наши исследования по применению дистанционных и наземных методов при возделывании тритикале проводились в 2018 и 2019 гг. в лесостепи Самарской области на опытном поле Самарского аграрного университета (СГАУ) в окрестностях п. Угорье (рис. 1). Наземные исследования засоренности посевов, их горизонтальной структуры, оценка их продуктивности проводились В.Г. Каплиным (Всероссийский

НИИ защиты растений, РАН), дистанционные исследования по состоянию посевов аэрокосмическими методами – Е.Ф. Чичковой, Д.А. Кочиным

(Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)) и Д.А. Грядунцовым (ООО «ПТЕРО», Москва).



Рис. 1. Территория съемки с космического аппарата WorldView-3, 07.06.2019 г.

Опытные поля (NDVI): 1 – паровое поле; 2 – поле тритикале

Fig. 1. The territory of survey from the WorldView-3 spacecraft on 07.06.2019.

Experimental fields (NDVI): 1 – fallow field; 2 – triticale field

УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Почва опытного участка – чернозем обыкновенный, среднемощный, тяжелосуглинистый. Тритикале возделывалось в пятипольном полевом севообороте с чередованием культур: чистый пар – озимая тритикале – мягкая яровая пшеница – нут – ячмень. В опытах использовался гексаплоидный сорт тритикале Кроха, полученный в Самарском НИИ сельского хозяйства совместно с Краснодарским НИИСХ, включен в Госреестр селекционных достижений РФ с 2015 г. по Средневолжскому региону, предназначен для возделывания на зерно (фуражное и продовольственное) и зеленую массу. Не осыпается, не полегает. Vegetационный период 302–309 дней. Колос продуктивный, хорошо озерненный, формирует повышенную густоту продуктивного стеблестоя (477–527 ст./м²). Масса 1000 зерен 30,0–38,7 г. Высота растений 66,0–75,0 см. Флаговый лист широкий, длинный, с сильным восковым налетом. Обладает высокой и стабильной урожайностью зерна (от 3,10 до 4,60 т/га) с содержанием белка 13,1–17,7%. Отличается высокой зимостойкостью и устойчивостью к засушливым условиям Среднего Поволжья.

Основная обработка почвы – поверхностная на 10–12 см, посев тритикале проводился 15 сентября 2018 г. с нормой высева около 4,5 млн всхожих семян. Во второй половине сентября выпало около 14 мм осадков, при среднесуточной температуре воздуха 9–14°C, что способствовало получению дружных всходов тритикале. Полевые учеты всходов тритикале и сорняков были проведены 3 октября с помощью мерной ленты длиной 50 м и рамки размером 0,1 м² на четырех продольных трансектах длиной по 284 м, включавших по четыре рядка, через 8–12 м. Для всходов сорняков определялись их встречаемость, численность и проективное покрытие на 1030 площадках по 0,1 м². В фазу колошения тритикале на опытном поле наземными методами 5–6 июня 2019 г. была проведена оценка горизонтальной структуры посева по жизненному состоянию культуры по 3-балльной шкале (хорошее, удовлетворительное и неудовлетворительное) и засоренности посева с выделением микрогруппировок, указанием их размеров, численности и проективного покрытия доминирующих видов сорняков. В каждой микрогруппировке численность сорняков учитывалась с помощью рамки площадью

0,25 м² в 3–4-кратной повторности. Всего на поле были выявлены восемь доминирующих по занимаемой площади микрогруппировок, которые были отмечены на поле с помощью маркеров, установлены их координаты. Для пространственной привязки опорных точек использовался спутниковый геодезический приемник. На незасоренных и слабо засоренных участках посева по их жизненному состоянию на площадках по 1,0 м² в четырехкратной повторности проводился также учет количества продуктивных и непродуктивных стеблей тритикале, их облиственности и площади листовой поверхности для оценки показателей активности фотосинтеза. Уборка урожая проводилась селекционным комбайном в фазу полной спелости. Перед уборкой в выделенных группировках по состоянию и засоренности посевов в трехкратной

повторности с площадок по 0,5 м² брались снопы растений тритикале для определения показателей продуктивности культуры в лабораторных условиях (количество колосьев, число и масса зерен в колосе, масса 1000 зерен, биологическая урожайность зерна в г/м², ц/га). Удобрения и средства защиты растений, в частности гербициды, в опытах не применялись.

В посевах тритикале 5–6 июня 2019 г. проводились также измерения спектральной плотности энергетической яркости отраженного излучения листьев культуры и доминирующих видов сорных растений полевым спектрорадиометром PSR-1100 в диапазоне длин волн 320–1100 нм с целью получения спектральных образов этих растений для их распознавания по данным дистанционного аэрокосмического зондирования (рис. 2).

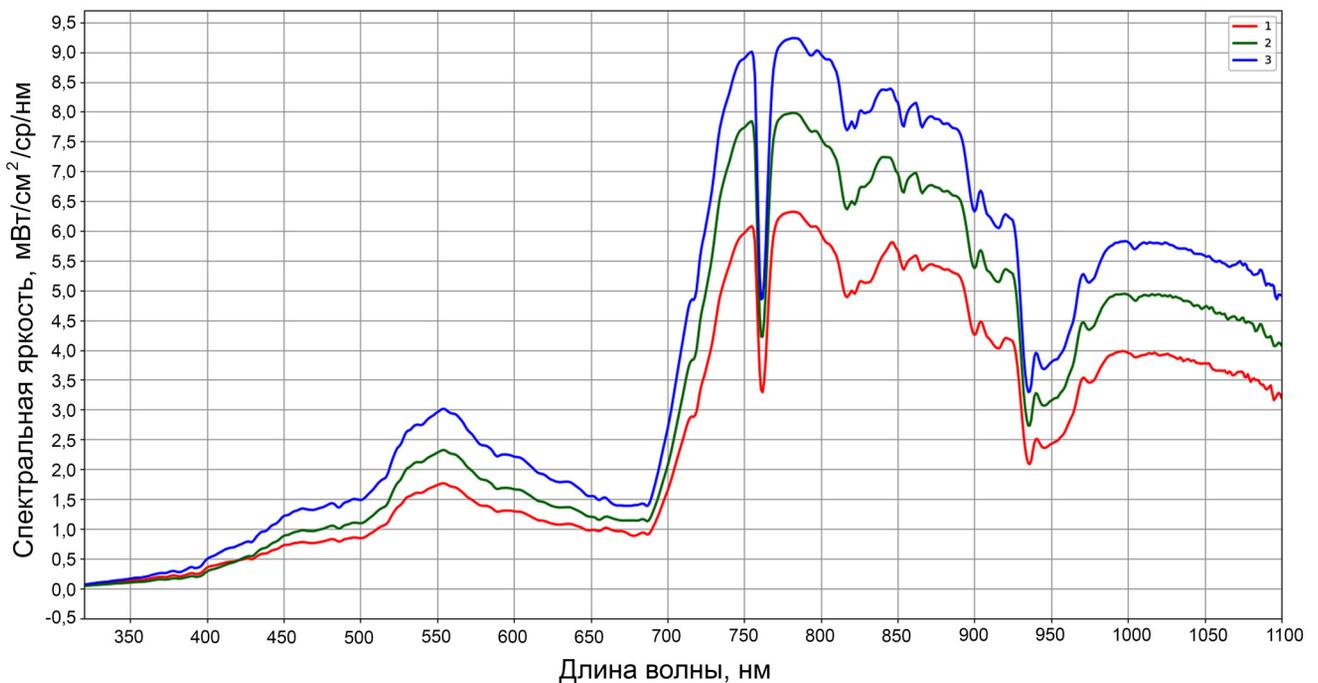


Рис. 2. Спектральные образы растений на опытном поле тритикале, 06.06.2019 г.:
1 – тритикале; 2 – смолевка карликовая; 3 – марь белая

Fig. 2. Spectral images of plants at the triticale experimental field, 07.06.2019:
1 – triticale; 2 – *Silene nana*; 3 – *Chenopodium album*

Одновременно использовались данные съемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с мультиспектральной камерой MicaSense RedEdge M, снимающей в пяти независимых спектральных каналах в диапазоне 470–860 нм (красном (RED) – 668 нм, зеленом – 560 нм, синем – 475 нм, ближнем инфракрасном (NIR) – 840 нм и крайнем красном (RE) – 717 нм по средним значениям каналов съемки) 3 октября 2018 г. и 8 июня 2019 г. Фотограмметрическая обработка данных мультиспектральной

аэросъемки по средним значениям каналов съемки выполнялась в программном обеспечении Agisoft PhotoScan Professional Edition. Камера устанавливалась на гексакоптер, собранный на основе рамы DJI F550 с автопилотом SmartAP MAX. Мультиспектральная съемка проводилась в октябре 2018 г. на высоте 25 и 100 м, в июне 2019 г. – 40 м. Мультиспектральная аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – один из эффективных методов получения данных для мониторинга

состояния полей и посевов. Высокая точность (до нескольких см на пиксель) и хорошее качество изображений дополняют космическую съемку для получения более детальных изображений отдельных объектов и территорий [Гольдяпин и др., 2020].

По полученным данным аэрофотосъемки были рассчитаны нормализованный разностный RedEdge индекс (Normalized Difference Red Edge Index) $NDRE = (NIR - RedEdge)/(NIR + RedEdge)$ и нормализованный разностный вегетационный индекс $NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red)$, где NIR – отражение в ближней инфракрасной (750–1000 нм), Red – красной (550–750 нм), RedEdge – в крайней красной (680–730 нм) областях спектра. Индекс NDVI дает наилучшие результаты при определении надземной массы растительности [Гребень, Красовская, 2012]. Чем интенсивнее зеленая окраска изображения по предлагаемой палитре цвета, тем она выше. Однако если густота растительного покрова меньше 30% и более 80%, то этот индекс применять не рекомендуется [Kriegler et al., 1969; Rouse et al., 1973]. Значения NDVI показывают наличие фотосинтетически активной биомассы неточно после того, как растения накапливают максимальное количество хлорофилла. NDRE используется для оценки состояния растительности практически в течение всего сезона выращивания растений и является лучшим показателем их здоровья, чем NDVI. Это связано с тем, что яркость излучения в крайне красном диапазоне (RedEdge), используемом для расчета NDRE, используемый в NDRE, может проходить через листья гораздо глубже, чем в красном диапазоне (Red), применяемом в NDVI. NDRE – хороший индикатор концентрации азота в листьях, ответственного за накопление урожая. Чем выше содержание азота в листьях растений, тем лучше их состояние, тем больше значения индекса NDRE. Этот индекс применяется при составлении карт засоренности посевов, внесения удобрений. Значения NDRE для почвы – низкие, для нездоровых растений – промежуточные, для здоровых растений – высокие. При анализе изображений NDRE цветовая палитра обычно меняется от красного до зеленого, где красный – голая почва, от бледно-желтого до бледно-зеленого – нездоровые растения или растительность на ранней стадии своего созревания, зеленый – наиболее здоровые растения [Barnes et al., 2000; Voiarskii, Hasedawa, 2019]. На основе аэрофотоснимка поля с БПЛА, обработанного с применением индекса NDRE, была составлена картосхема горизонтальной структуры опытного посева тритикале (рис. 3, 4).

Распознавание сорняков и их микрогруппировок на аэрофотоснимках проводилось с помощью сопряженного анализа наземных данных по гори-

зонтальной структуре агрофитоценозов тритикале с установкой маркеров и определением координат микрогруппировок сорняков перед проведением аэрофотосъемки с БПЛА и цветных изображений посевов, полученных на основе расчета индекса NDRE, которые передают в контрасте цвета (и числовых значений индексов) пространственные различия в состоянии культуры, обеспечении посевов азотом, составе и распределении сорняков (см. рис. 3, 4). Неоднородность горизонтальной структуры – один из важнейших признаков всех естественных растительных сообществ и агроценозов, обусловленный неоднородностью микрорельефа, почвенного покрова, условий увлажнения, развития растений и биологическими особенностями функционирования фитоценозов и биогеоценозов [Каплин, 2010].

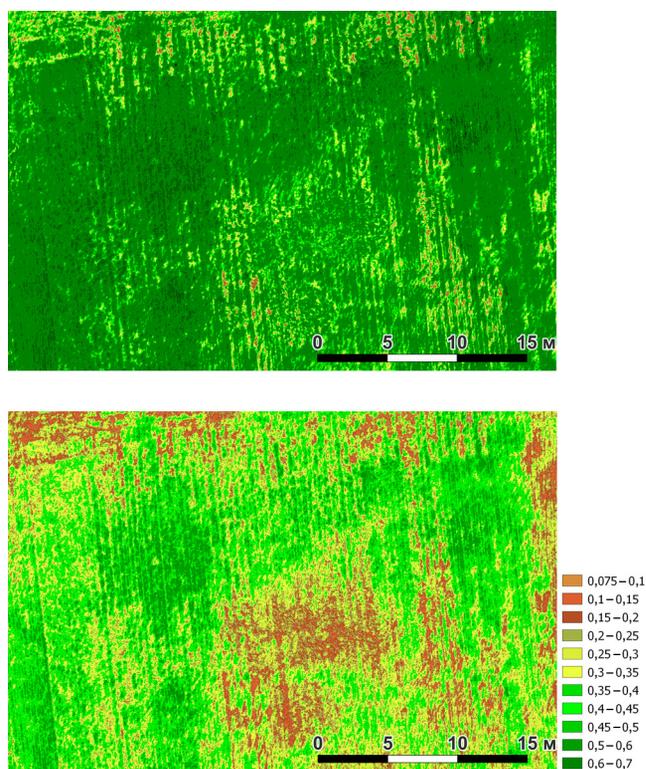


Рис. 3. Индексы вегетации NDVI (вверху) и NDRE (внизу) модельного участка посева тритикале, полученные по итогам съемки БПЛА мультиспектральной камерой MicaSense RedEdge M, 08.06.2019 г.

Fig. 3. Vegetation indexes NDVI (top) and NDRE (bottom) for the model triticale plot, obtained by the UAV survey with the MicaSense RedEdge M multispectral camera on 08.06.2019

Распознавание недостатка азота в листьях растений основано на его влиянии на содержание в них хлорофилла, ответственного за синтез органических веществ посредством его участия в фото-

синтезе, и придающего хлоропластам растений зеленый цвет [Clevers, Kooistra, 2012]. В состав молекул хлорофилла *a* и *b*, кроме углерода, водорода и кислорода, входят по одному атому магния и по четыре атома азота, что и определяет зависимость концентрации хлорофилла в листьях от обеспеченности растений азотным питанием. Уровень концентрации хлорофилла в листьях определяет интенсивность его флуоресценции, от которой зависит светопроницаемость листовых пластинок, способствующей проникновению света в более глубокие слои паренхимы листьев. Азот является также главным компонентом аминокислот и белков, определяющих качество продукции растениеводства [Ju et al., 2009; Vigneau et al., 2011]. Участки посева с нормальным содержанием хлорофилла и азота в листьях на аэрофотоснимках, обработанных с применением индекса NDRE, имеют хорошо выраженную зеленую окраску. На участках, с недостатком азота и пониженной концентрацией хлорофилла в листьях, их окраска бледно-зеленая, желтовато-зеленая или желтая.

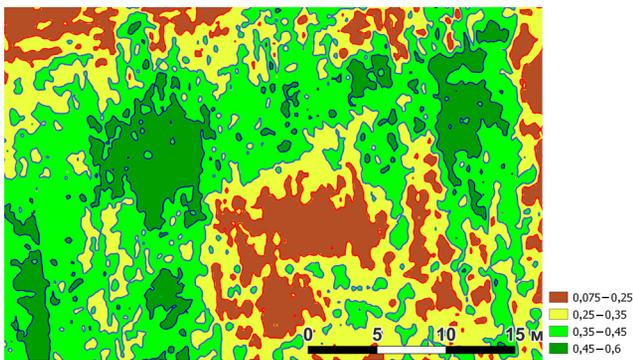


Рис. 4. Горизонтальная структура типичного участка опытного поля тритикале в зависимости от состояния культуры, ее обеспеченности азотом, по данным аэрофотосъемки с БПЛА и индекса NDRE 08.06.2019 г.

Fig. 4. Horizontal structure of a typical plot of the triticale experimental field depending on the state of the crop and its nitrogen supply according to UAV aerophotography and the NDRE index, 08.06.2019

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Засоренность посевов. В начале октября 2018 г. всходы тритикале были сравнительно хорошо развиты. При глубине заделки семян при посеве (5–6 см) и наличии необходимого запаса влаги в верхнем слое всходы появляются через 8–10 дней. На несколько дней позже появления всходов тритикале начинается отрастание двулетних и многолетних сорняков, учеты которых были проведены 3 октября. Это показало, что посевы тритикале сравнительно равномерно были засорены смолев-

кой карликовой (*Silene nana*) и вьюнком полевым (*Convolvulus arvensis*). Ввиду малых размеров на снимке БПЛА они практически не просматривались. Их распределение на поле тритикале в начале октября 2018 г. было мозаичным, где они образовывали пять микрогруппировок (табл. 1). Площадь незасоренных участков посева составляла около 8%, засоренных вьюнком – 11, смолевкой – 2, вьюнком и смолевкой – 46, вьюнком, смолевкой и латуком – 33%. На засоренных участках численность всходов вьюнка составляла 13–16 шт./м², смолевки – 10–25, латука – 10–75, а сорняков в целом – 16–110 шт./м², что значительно превышало их пороги вредоносности в посевах зерновых злаковых культур, составляющие 14–26 шт./м² [Туликов, 2002].

В первой декаде июня в посевах тритикале в фазу колошения были выявлены восемь типов микрогруппировок с высокой засоренностью, где общая численность сорняков составляла 35–204 экз./м², а их проективное покрытие 11–67%, или в среднем соответственно 147 экз./м² и 38% (табл. 2). Среди них в шести микроассоциациях в состав доминантов входила смолевка карликовая, в двух из них – также латук татарский и по одной – щирица жминдовидная (*Amaranthus blitoides*); латук и марь белая (*Chenopodium album*). В одной микроассоциации доминировали вьюнок полевой и марь белая и также в одной – вьюнок полевой и щирица жминдовидная. По данным наземных исследований и аэрофотосъемки, общая площадь посева с численностью сорняков, превышающей их экономические пороги вредоносности, составляла около 16%. На засоренных участках посева наблюдалось уменьшение количества продуктивных стеблей культуры на 89%, общей площади ее листовой поверхности и урожайности зерна на 93%, по сравнению с незасоренными участками с оптимальным содержанием азота в листьях. Биологическая урожайность зерна на сильно засоренных участках составляла в среднем 2,3 ц/га (табл. 3).

На картосхеме горизонтальной структуры растительности посева с применением индекса NDRE его незасоренные участки с оптимальным обеспечением азотом имеют зеленый и темно-зеленый цвета, а засоренные – коричневый (с разреженной растительностью) и коричнево-оливковый цвета. Подобные картосхемы горизонтальной структуры посевов полевых культур на основе аэрофотоснимков с БПЛА, обработанных с применением индекса NDRE, создают основу для применения средств защиты растений и удобрений в точном земледелии с учетом горизонтальной неоднородности посева с помощью ГИС-навигаторов и программного обеспечения [Якушев, 2002]. В период вегетации полевых культур гербициды против сор-

няков рекомендуется применять в фазу кушения и начала трубкования согласно ежегодно обновляемому «Государственному каталогу пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации». В связи с тем что в севообороте тритикале идет вторым полем после пара, более эффективна борьба с сорняками

на паровом поле. Микрогруппировки на снимках со спутника WorldView-3 и БПЛА, обработанных с применением индексов NDRE и NDVI, на паровом поле в весенне-раннелетний период видны более отчетливо, чем в посевах культур, благодаря контрасту открытой поверхности почвы и участков, занятых сорняками (см. рис. 1).

Таблица 1

Распространенность, численность и проективное покрытие всходов сорняков в посевах тритикале в фазу всходов (данные учетов 3 октября 2018 г. на 1030 площадках по 0,1 м²)

Микрогруппировки сорняков	Занимаемая площадь, %	Доминирующие виды	Встречаемость на площадках по 0,1 м ² (%)	Численность, экз./0,1 м ²	Проективное покрытие, %
<i>Convolvulus arvensis</i>	10,8	<i>C. arvensis</i>	33,3 ± 8,0	1,6 ± 0,2	3,8 ± 0,7
<i>Silene nana</i>	2,3	<i>S. nana</i>	57,4 ± 4,9	2,5 ± 0,5	2,7 ± 0,9
<i>C. arvensis</i> – <i>S. nana</i>	8,0	<i>C. arvensis</i>	29,6 ± 4,6	1,4 ± 0,2	3,7 ± 0,4
		<i>S. nana</i>	5,0 ± 0,8	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1
<i>S. nana</i> – <i>C. arvensis</i>	37,8	<i>S. nana</i>	47,0 ± 3,5	2,2 ± 0,2	2,2 ± 0,2
		<i>C. arvensis</i>	11,4 ± 2,5	1,3 ± 0,1	2,6 ± 0,3
<i>C. arvensis</i> – <i>S. nana</i> – <i>Lactuca tatarica</i>	15,8	<i>C. arvensis</i>	41,7 ± 9,2	1,6 ± 0,2	3,0 ± 0,3
		<i>S. nana</i>	3,5 ± 1,2	1,0 ± 0,1	0,5 ± 0,1
		<i>L. tatarica</i>	0,3 ± 0,1	1,0 ± 0,1	4,5 ± 0,3
<i>S. nana</i> – <i>C. arvensis</i> – <i>L. tatarica</i>	17,0	<i>S. nana</i>	47,8 ± 4,1	2,2 ± 0,2	2,0 ± 0,3
		<i>C. arvensis</i>	11,4 ± 2,3	1,3 ± 0,1	2,9 ± 0,2
<i>L. tatarica</i>			0,6 ± 0,2	7,5 ± 1,0	12,2 ± 0,5
Сорняки не обнаружены	8,2				
Итого	100				

Измерения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) отраженного излучения листьев культуры и доминирующих видов сорных растений полевым спектро радиометром PSR-1100 в диапазоне длин волн 320–1100 нм показали, что ее изменения в зависимости от длины волны у тритикале и сорняков были сходными. В видимой части спектра (400–700 нм) они имели выраженный максимум в его зеленой части (550–560 нм), а в ближней инфракрасной (NIR) (750–1000 нм) – три значительных максимума (755, 780, 840–845 нм) и один средний (около 1000 нм). При этом во всех частях спектров СПЭЯ была наименьшей у тритикале, более высокой – у двудольных сорняков, имевших на снимке NDVI ярко-зеленую окраску (см. рис. 2). Распознавание сорняков на аэрофотоснимках с применением данных измерений их СПЭЯ полевыми спектро радиометрами не получило широкого распространения, но считается перспективным при обработке аэрофотоснимков с применением специальных индексов [Григорьев, Рыжиков, 2018].

Содержание азота в листьях. Незасоренные и слабо засоренные участки посева тритикале с уме-

ренно и существенно пониженной концентрацией хлорофилла и содержания азота в листьях тритикале на аэрофотоснимке, обработанном с применением индекса NDRE, имели в основном бледно-зеленую и желто-зеленую или желтую окраску, соответственно, и занимали 34,2 и 35,7% площади посева. Урожайность зерна тритикале на них составила, соответственно, 24,5 и 18,3 ц/га, что было ниже на 21,2 и 58,8% по сравнению с незасоренными участками зеленого цвета с нормальными показателями концентрации хлорофилла и содержания азота в листьях (31,1 ц/га) (см. табл. 3). Недостаток азота оценивался на основании сравнения урожайности зерна на этих участках. Как известно, в лесостепной зоне на черноземе для увеличения урожайности зерна тритикале на 1 ц необходимо дополнительное внесение около 2,9 кг азота. На участках с умеренно пониженным содержанием азота в листьях снижение урожайности зерна составило 6,6 ц/га, а с существенно пониженным – 12,8 ц/га, что соответствовало недостатку в листьях азота (соответственно, 19,1 и 37,1 кг/га). Коэффициент использования азота удобрений в посевах озимых зерновых культур

Таблица 2

Засоренность посевов тритикале в фазу колошения (данные учетов 5–6 июня 2019 г.)

Видовой состав	Микроассоциации																Среднее	
	1		2		3		4		5		6		7		8		1	2
	1*	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Тритикале	6,7	8,3	28,0	9,3	9,3	4,3	20,0	12,0	13,3	8,0	33,3	13,3	50,7	16,7	52,0	19,3	26,7	11,4
Сорняки	182,8	66,6	175,9	58,0	34,7	10,6	164,1	52,7	169,9	57,1	90,0	27,3	154,7	15,7	204,0	14,4	147,0	37,8
<i>Корнеотпрысковые многолетние травы:</i> Вьюнок полевой (<i>Convolvulus arvensis</i>)	0	0	1,3	0,7	4,0**	5,0	0	0	1,3	1,0	2,7	3,0	4,0	0,7	4,0	1,7	2,2	1,5
Латук татарский (<i>Lactuca tatarica</i>)	1,3	1,0	8,0	4,0	0	0	6,7	12,0	7,3	6,0	2,0	1,7	0	0	0	0	3,2	3,1
<i>Травянистые двулетники или многолетники:</i> Смолевка карликовая (<i>Silene papa</i>)	168,0	60,0	156,0	48,3	0	0	70,7	28,0	149,3	46,7	70,7	20,0	94,7	13,3	0	0	88,7	27,0
<i>Травянистые однолетники, реже двулетники:</i> Незабудка полевая (<i>Myosotis arvensis</i>)	1,3	0,3	0	0	2,7	1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,2
<i>Поздние яровые однолетние травы:</i> Щирца жминдовидная (<i>Amaranthus blitoides</i>) (всх.)	4,0	1,0	2,7	0,7	22,7	2,3	0	0	0	0	1,3	0,3	56	1,7	0	0	10,8	0,8
<i>Ранние яровые однолетники:</i> Марь белая (<i>Chenopodium album</i>)	5,3	0,7	5,3	0,7	0	0	72,0	7,7	6,7	1,7	6,7	0,7	0	0	200,0	12,7	37,0	3,0
Гречишка вьюнковая (<i>Fallopia convolvulus</i>)	1,3	1,7	1,3	0,3	1,3	0,3	2,7	0,7	5,3	1,7	0	0	0	0	0	0	1,5	0,6
<i>Зимующие однолетники:</i> Ромашка непахучая (<i>Tripleurospermum inodorum</i>)	0	0	0	0	2,7	0,3	8,0	1,3	0	0	4,0	1,0	0	0	0	0	1,8	0,3
Ярутка полевая (<i>Thlaspi arvense</i>)	1,3	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	1,3	0,3	0	0	0	0	0,3	0,1
Резушка (<i>Arabis arvensis</i> sp.)	0,3	1,7	1,3	3,3	1,3	1,7	4,0	3,0	0	0	1,3	0,3	0	0	0	0	1,0	1,3
Размер описанных микроассоциаций, м ²	5,9		9,4		39,3		33,0		19,6		37,7		12,6		11,0		168,5	

Примечания. * 1 – численность, экз./м², 2 – проективное покрытие, %.

** Жирным шрифтом выделены показатели численности и проективного покрытия доминирующих видов сорняков.

составляет около 65%. В связи с этим недостаток азота для растений, вносимого с удобрениями, составит на этих участках 29,4 и 57,1 кг/га, или в пересчете на аммиачную селитру (NH_4NO_3) – 84,0 и

163,1 кг/га. В пересчете на посев в целом при внесении удобрений методами точного земледелия на основании аэрофотоснимка с применением индекса NDRE их расход составит около 87 кг/га.

Таблица 3

Показатели продуктивности тритикале в зависимости от обеспеченности азотом, облиственности растений и засоренности посевов по данным фотосъемки с БПЛА в фазе колошения (NDRE) и анализа структуры продуктивности в фазе полной спелости зерна

Показатели	Микрогруппировки			
	0,45–0,60	0,35–0,45	0,25–0,35	0,075–0,25
Цвет	Темно-зеленый	Зеленый	Желтый	Коричневый
Состояние культуры	Отличное	Сравнительно хорошее	Удовлетворительное	Неудовлетворительное
Занимаемая площадь, %	14,3	34,2	35,7	15,8
Общее количество стеблей, шт./м ²	344,4	308,7	290,3	38,9
Продуктивных стеблей, шт./м ²	287,8	243,5	199,3	27,8
Количество листьев, шт./стебель (колошение)	4,8	4,2	3,7	3,0
Площадь листьев, см ² /стебель	34,4	26,2	22,0	20,0
Площадь листовой поверхности, тыс. м ² /га	11,7	8,1	6,4	0,8
Количество зерен в колосе, шт.	28,8	27,4	25,6	24,2
Масса зерен в колосе, г	1,08	1,01	0,92	0,82
Масса 1000 зерен, г	37,5	36,9	36,1	34,1
Биологическая урожайность зерна, ц/га	31,1	24,5	18,3	2,3
Основные факторы	Обеспечение азотом			Засоренность
	Нормальное или слабо избыточное, норма	Недостаток по сравнению с нормой, в скобках их внесение в фазе колошения – молочная спелость		Высокая
		$N_{30(10)}$	$N_{58(19)}$	

Озимые злаковые культуры к началу стеблевания потребляют около 25%, в фазу кущения – 20, выхода в трубку – 50, начала восковой спелости – около 5% необходимого азота [Филин, Беяков, 2006; Неволина, 2013; Крючкова, 2015; Мурыгин, 2018]. К критическим периодам необходимости азота для нормального роста и развития растений относятся начало роста и налив зерна. Если фосфорные и калийные удобрения вносят один раз при основной обработке почвы перед посевом, то азотные удобрения применяют в несколько этапов. Осенью под основную обработку вносят небольшую их часть (15–20% полной нормы азота), что способствует укоренению, повышению кустистости и зимостойкости растений. Остальные азотные удобрения применяют в виде весенне-летних подкормок. Первая ранневесенняя подкормка (20–30%) ускоряет процесс кущения, повышает густоту стеблестоя [Куперман, 1984]; вторая

(до 50–60%) проводится в начале выхода растений в трубку. Третья подкормка (5–10% полной нормы азота) применяется в фазы начала колошения, налива зерна; она способствует увеличению продолжительности развития верхних листьев, их фотосинтеза, массы 1000 зерен, урожайности и качества зерна. Перед проведением всех подкормок с целью пространственной оценки обеспеченности листьев растений азотом и засоренности посевов целесообразна аэрофотосъемка посевов с БПЛА. Ей предшествуют наземные учеты засоренности посевов, с указанием доминирующих видов сорняков, установкой маркеров и измерением координат наиболее засоренных участков. Обработка аэрофотоснимков проводится с применением индекса NDRE и составлением координатной картосхемы обеспеченности растений азотом, а также засоренности посевов. Она служит основой для оценки содержания азота в листьях

растений, засоренности посевов в зависимости от неоднородности их горизонтальной структуры, состава доминирующих видов сорняков, расчета норм расхода удобрений и средств защиты растений и их внесения методами точного земледелия [Матвеевко, 2012; Генин, Клебанович, 2016]. При необходимости гербициды применяют после первой и второй аэрофотосъемок в фазы кушения и начала трубкования. Картограммы засоренности посевов по результатам их третьей аэрофотосъемки в фазы колошения и налива зерна используют для оценки потерь урожайности зерна от сорняков.

ВЫВОДЫ

Применение дистанционных методов мониторинга засоренности, обеспеченности листьев азотом и продуктивности озимой тритикале включает следующие сопряженные этапы:

– предшествующее аэрофотосъемке проведение наземных учетов состояния культурных растений; состава, численности и распределения доминирующих сорняков, выявление их микрогруппировок и особенностей горизонтальной структуры посева с установкой маркеров и определением их координат;

– мультиспектральная аэрофотосъемка посева с беспилотного летательного аппарата (БПЛА); обработка полученных аэрофотоснимков с применением индексов NDRE и NDVI и их дешифрирование по цветовой гамме снимка и наземным маркерам с выявлением границ микрогруппировок по состоянию культуры и засоренности посева, составление координатной картограммы их распределения;

– внесение азотных удобрений в виде подкормок и применение необходимых гербицидов в период вегетации культуры на основе полученных картограмм методами точного земледелия.

В целях распознавания засоренности посевов и содержания азота в листьях растений наилучшие результаты дают аэрофотоснимки, обработанные с применением индекса NDRE, где микрогруппировки посева с нормальным содержанием хлорофилла и азота в листьях имеют значения NDRE 0,45–0,60; с умеренным недостатком азота и пониженной концентрацией хлорофилла в листьях – 0,35–0,45; с повышенным недостатком азота – 0,25–0,35; с высокой численностью сорняков – 0,075–0,25.

Измерения СПЭЯ отраженного излучения листьев культуры и доминирующих видов сорных растений полевым спектро радиометром PSR-1100 в диапазоне длин волн 320–1100 нм показали, что ее изменения в зависимости от длины волны у тритикале и сорняков были сходными с наименьшими значениями СПЭЯ во всех частях спектров у тритикале, более высокими у двудольных сорняков, имевших на снимке NDVI ярко-зеленую окраску.

Азотные удобрения в посевах тритикале применяют осенью под основную обработку (15–20% полной нормы азота) и в весенне-летний период вегетации культуры в виде трех подкормок: рано весной в фазу кушения (20–30%), в конце весны в начале выхода растений в трубку (до 50–60%) и в первой половине лета в фазы начала колошения и налива зерна (5–10%). Перед проведением всех подкормок с целью пространственной оценки обеспеченности листьев растений азотом и засоренности посевов целесообразна аэрофотосъемка посевов с БПЛА с применением индекса NDRE при обработке аэрофотоснимков. При необходимости гербициды применяются после первой и второй аэрофотосъемок в фазы кушения и начала трубкования. Картограммы засоренности посевов по результатам их третьей аэрофотосъемки в фазы колошения и налива зерна используются для оценки потерь урожайности зерна от сорняков.

Благодарности и финансирование. Выражаем искреннюю благодарность Самарскому аграрному университету за разрешение и содействие в проведении научных исследований на опытном поле университета; Т.В. Корнилову за помощь в измерении спектральной плотности энергетической яркости отраженного излучения листьев культуры и доминирующих видов сорных растений полевым спектро радиометром; рецензентам за ценные замечания при доработке статьи. Исследования проведены в рамках государственного задания по теме 0665-2019-0014 Лаборатории фитосанитарной диагностики и прогнозов Всероссийского НИИ защиты растений «Инвентаризация, мониторинг и картирование биологического разнообразия в агроландшафтах и агроэкосистемах с учетом меняющихся условий», № АААА-А16-116080510098-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Генин В.А., Клебанович Н.В. Опыт использования мультиспектральных космических снимков для дифференцированного внесения удобрений // Геоматика. 2016. № 2. С. 26–31.

Гольятин В.Я., Мишуков Н.П., Федоренко В.Ф., Голубев И.Г., Балабанов В.И., Петухов Д.А. Цифровые технологии для обследования состояния земель сельскохозяйственного назначения беспилотными ле-

- тательными аппаратами: аналитический обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 88 с.
- Гончаров С.В., Крохмаль А.В. Селекционные программы по тритикале // *Зерновое хозяйство России*. 2013. № 4. С. 22–27.
- Горянина Т.А. Анализ площадей посева, валового сбора и урожайности озимого тритикале по Самарской области // *Молодой ученый*. 2017. № 13. С. 186–189.
- Гребень А.С., Красовская И.Г. Анализ основных методик прогнозирования урожайности с помощью данных космического мониторинга применительно к зерновым культурам степной зоны Украины // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. 2012. № 2. С. 170–180.
- Григорьев А.Н., Рыжиков Д.М. Общая методика и результаты спектрорадиометрического исследования отражательных свойств борщевика Сосновского в диапазоне 320–1100 нм в интересах дистанционного зондирования Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 1. С. 183–192.
- Каплин В.Г. Структурно-функциональная организация и динамика растительных сообществ (на примере Восточных Каракумов). Самара: РИЦ СГСХА, 2010. 220 с.
- Крючкова Т.В. Продуктивность и качественные характеристики зерна сортов озимой тритикале в зависимости от норм высева в подзоне светло-каштановых почв Волгоградской области: дис. ... канд. с.-х. наук. Волгоград, 2015. 241 с.
- Куперман Ф.М. Морфология растений. М.: Высшая школа, 1984. 240 с.
- Матвеев Д.А. Дифференцированное внесение азотных удобрений на основе оценки оптических характеристик посевов яровой пшеницы: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2012. 21 с.
- Мурыгин В.П. Влияние приемов весенней подкормки азотным удобрением на урожайность и качество зерна озимых зерновых культур в Среднем Предуралье: дис. ... канд. с.-х. наук. Пермь, 2018. 154 с.
- Неволина К.Н. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество зерна озимых зерновых культур в Предуралье // *Достижения науки и техники АПК*. 2013. № 5. С. 27–29.
- Туликов А.М. Вредоносность сорных растений в посевах полевых культур // *Изв. ТСХА*. 2002. Вып. 1. С. 92–107.
- Филин В.И., Беляков А.М. Озимая пшеница в Нижнем Поволжье. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2006. 258 с.
- Якушев В.П. На пути к точному земледелию. СПб.: Изд-во Петербургского ин-та ядерной физики РАН, 2002. 458 с.
- Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E., Colaizzi P.D., Haberland J., Kostrzewski M., Waller P., Choi C., Riley E., Thompson T., Lascano R.J., Li H., Moran M.S. Coincident Detection of Crop Water Stress, Nitrogen Status, and Canopy Density Using Ground-Based Multispectral Data, 5th International Conference on Precision Agriculture (Bloomington, 16–19 July 2000), 2000, p. 1–15.
- Boiarskii B., Hasegawa H. Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content, International Conference on Applied Science and Engineering, *Journal Mech. Cont. & Math. Sci.*, Special Issue, 2019, vol. 4, p. 20–29.
- Clevers J.G.P.W., Kooistra L. Using Hyperspectral Remote Sensing Data for Retrieving Canopy Chlorophyll and Nitrogen Content, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*, 2012, vol. 5, no. 2, p. 574–583.
- Ju X.-T., Xing G.-X., Chen X.-P., Zhang S.-L., Zhang L.-J., Liu X.-J., Cui Z.-L., Bin Y., Christie P., Zhu Z.-L., Zhang F.-U. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, vol. 106, p. 3041–3046.
- Kriegler F., Malila W., Nalepka R., Richardson W. Preprocessing transformations and their effect on multispectral recognition, *Proceedings of the 6th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, MI, University of Michigan, 1969, p. 97–131.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 (Washington DC, 10–14 December 1973), 1973, p. 309–317.
- Vigneau N., Ecartot M., Rabatel G., Roumet P. Potential of field hyperspectral imaging as a non destructive method to assess leaf nitrogen content in Wheat, *Field Crops Research*, 2011, vol. 122, no. 1, p. 25–31.

Поступила в редакцию 09.12.2020

После доработки 16.05.2021

Принята к публикации 27.09.2021

REMOTE SENSING METHODS FOR MONITORING THE PRODUCTIVITY OF WINTER TRITICALE IN FOREST-STEPPE OF THE MIDDLE VOLGA RIVER REGION

V.G. Kaplin¹, E.F. Chichkova², D.A. Gryadunov³, D.A. Kochin⁴

¹ All-Russian Research Institute of Plant Protection, Laboratory of Phytosanitary Diagnostics and Forecasts, Professor, D.Sc. in Biology, Leading Scientific Researcher; e-mail: ctenolepisma@mail.ru

² Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Space Services Center (SSC) "CosmoInform Center", Ph.D. in Geography, Director; e-mail: efchichkova@yandex.ru

³ PTERO Limited Liability Company (LLC), Head of the Scientific-Technical Department; e-mail: d_gryadunov@ptero.ru

⁴ State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Institute of Computing Systems and Programming, Department of Computer Technologies and Software Engineering, Assistant; e-mail: dimakohin@yandex.ru

Application of remote sensing to monitor the density of weed populations, the nitrogen concentration in leaves and the productivity of winter triticale includes prior ground-based observations of the crops state and their weed infestation with the installation of markers and the determination of their coordinates; multispectral aerial photography of crops from an unmanned aerial vehicle (UAV); processing of obtained aerial photographs using the NDRE and NDVI indices and their interpretation by the color mosaic of images and ground markers with the identification of the boundaries of plant communities depending on the state of the crop and the distribution of weeds; drawing up a coordinate map of their distribution; application of nitrogen fertilizers and necessary herbicides during the growing season by precision farming methods on the basis of compiled maps. For weed recognition in triticale crops and the nitrogen content in plant leaves, the best results are obtained from aerial photographs processed using the NDRE index, where plant communities with normal chlorophyll and nitrogen content in the leaves have NDRE values 0,45–0,60; with moderate nitrogen deficiency and a reduced concentration of chlorophyll in the leaves – 0,35–0,45; with an increased lack of nitrogen – 0,25–0,35; with a high number of weeds – 0,075–0,25. The spectral density of energy brightness (SDEB) of the radiation reflected by leaves of the crop and weeds was measured with the PSR-1100 field spectroradiometer in the wavelength range of 320–1100 nm. It was demonstrated that its changes depending on the wavelength were similar for both triticale and weeds, with the lowest values of SDEB in all parts of the spectra for triticale, and higher values for dicotyledonous weeds, which were bright green on the NDVI image. Nitrogen fertilizers in triticale crops are used in autumn when cultivating the soil before sowing (15–20% of the total nitrogen norm), as well as in spring-summer growing season – early in the spring during the tillering stage (20–30%), in late spring at the beginning of booting (up to 50–60%) and in the first half of summer during the stages of heading and filling (5–10%). Before additional fertilizing during the growing season it is advisable to take aerial photographs of crops from UAV and apply the NDRE index when processing aerial images for the purpose of spatial assessment of the nitrogen content in plant leaves and the density of weeds in crops. If necessary, herbicides are used after the first and second aerial surveys during the stages of tillering and beginning of booting. Schematic maps of weed infestation of crops based on the results of the third aerial survey during the stages of heading and filling are used to assess the loss of grain yield caused by weeds.

Keywords: unmanned aerial vehicles; aerial photography; aerial image interpretation; NDRE, dominant weeds; nitrogen fertilizers; grain productivity indicators

Acknowledgements and funding. We express our sincere gratitude to the Samara State Agrarian University for permission and assistance in conducting research on the experimental field of the University; to T.V. Kornilov for help in measuring the spectral density of energy brightness of the reflected radiation from the leaves of the crop and weeds with a field spectroradiometer; to the reviewers for their valuable comments for finalizing the article. The studies were carried out as part of the state assignment on the theme 0665-2019-0014 by the Laboratory of Phytosanitary Diagnostics and Forecasts of the All-Russian Research Institute of Plant Protection “Inventory, Monitoring, and Mapping of Biological Diversity in Agrolandscapes and Agroecosystems Taking into Account Changing Conditions” (state registration no. AAAA-A16-116080510098-1).

REFERENCES

- Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E., Colaizzi P.D., Haberland J., Kostrzewski M., Waller P., Choi C., Riley E., Thompson T., Lascano R.J., Li H., Moran M.S. Coincident Detection of Crop Water Stress, Nitrogen Status, and Canopy Density Using Ground-Based Multispectral Data, *5th International Conference on Precision Agriculture* (Bloomington, 16–19 July 2000), 2000, p. 1–15.
- Boiarskii B., Hasegawa H. Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content, *International Conference on Applied Science and Engineering, Journal Mech. Cont. & Math. Sci., Special Issue*, 2019, vol. 4, p. 20–29.
- Clevers J.G.P.W., Kooistra L. Using Hyperspectral Remote Sensing Data for Retrieving Canopy Chlorophyll and Nitrogen Content, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*, 2012, vol. 5, no. 2, p. 574–583.
- Filin V.I., Belyakov A.M. *Ozimaya pshenitsa v Nizhnem Povolzh'ye* [Winter wheat in the Lower Volga River region], Volgograd, VolGU Publ., 2006, 258 p. (In Russian)
- Genin V.A., Klebanovich N.V. Opyt ispol'zovaniya mul'tispektral'nykh kosmicheskikh snimkov dlya differentsirovannogo vneseniya udobreniy [Experience in using multispectral satellite images for differentiated fertilization], *Geomatika*, 2016, no. 2, p. 26–31. (In Russian)
- Gol'tyapin V.Ya., Mishurov N.P., Fedorenko V.F., Golubev I.G., Balabanov V.I., Petukhov D.A. *Tsifrovye tekhnologii dlya obsledovaniya sostoyaniya zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya bespilotnymi letatel'nyimi apparatami: analit. obzor* [Digital technologies for the survey of the state of agricultural land by unmanned aerial vehicles: analit. review], Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 2020, 88 p. (In Russian)
- Goncharov S.V., Krokhal' A.V. Selektionnyye programmy po tritikale [Triticale breeding programs], *Zernovoe khozyaystvo Rossii*, 2013, no. 4, p. 22–27. (In Russian)
- Goryanina T.A. Analiz ploshchadey poseva, valovogo sbora i urozhaynosti ozimogo tritikale po Samarskoy oblasti [Analysis of the area, gross harvest and yield of winter triticale in the Samara region], *Molodoy uchenyy*, 2017, no. 13, p. 186–189. (In Russian)
- Greben' A.S., Krasovskaya I.G. Analiz osnovnykh metodik prognozirovaniya urozhaynosti s pomoshch'yu dannykh kosmicheskogo monitoringa, primenitel'no k zernovym kul'turam stepnoy zony Ukrainy [Analysis of main

- methods of crop yield forecasting using space monitoring data for grain crops in the steppe zone of Ukraine], *Radioelektronni i kompyuterni sistemi*, 2012, no. 2, p. 170–180. (In Russian)
- Grigor'yev A.N., Ryzhikov D.M. Obshchaya metodika i rezul'taty spektrometriy zemskego issledovaniya otrazhatel'nykh svoystv borshchevika Sosnovskogo v diapazone 320–1100 nm v interesakh distantsionnogo zondirovaniya Zemli [General methodology and results of spectroradiometric study of reflective properties of the *Heracleum sosnowskyi* in the range 320–1100 nm for the Earth remote sensing], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 1, p. 183–192. (In Russian)
- Ju X.-T., Xing G.-X., Chen X.-P., Zhang S.-L., Zhang L.-J., Liu X.-J., Cui Z.-L., Bin Y., Christie P., Zhu Z.-L., Zhang F.-U. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, vol. 106, p. 3041–3046.
- Kaplin V.G. *Strukturno-funktional'naya organizatsiya i dinamika rastitel'nykh soobshchestv (na primere Vostochnykh Karakumov)* [Structural and functional organization and dynamics of plant communities (case study of the Eastern Kara-Kum)], Samara, Samara State Agricultural Academy Publ., 2010, 220 p. (In Russian)
- Kriegler F., Malila W., Nalepka R., Richardson W. Preprocessing transformations and their effect on multispectral recognition, *Proceedings of the 6th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, MI, University of Michigan, 1969, p. 97–131.
- Kryuchkova T.V. *Produktivnost' i kachestvennye kharakteristiki zerna sortov ozimoy tritikale v zavisimosti ot norm vyseva p podzone svetlo-kashtanovykh pochv Volgogradskoy oblasti* [Grain yield and quality of winter triticale varieties within the subzone of light chestnut soils of the Volgograd oblast depending on the seeding rate], Ph.D. Thesis in Agriculture, Volgograd, 2015, 241 p. (In Russian)
- Kuperman F.M. *Morfologiya rasteniy* [Morphology of plants], Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984, 240 p. (In Russian)
- Matveenko D.A. *Differentsirovannoe vnesenie azotnykh udobreniy na osnove otsenki opticheskikh kharakteristik posevov yarovoy pshenitsy* [Differentiated application of nitrogen fertilizers based on the assessment of optical characteristics of spring wheat crops], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Agriculture, St. Petersburg, Agrophysical Research Institute of the Russian Agricultural Academy Publ., 2012, 21 p. (In Russian)
- Murygin V.P. *Vliyanie priemov vesenney podkormki azotnym udobreniem na urozhaynost' i kachestvo zerna ozimyykh zernovykh kul'tur v Srednem Predural'ye* [Effect of spring nitrogen fertilizing on the grain yield and quality of winter grain crops in the Pre-Urals region], Ph.D. Thesis in Agriculture, Perm, 2018, 154 p. (In Russian)
- Nevolina K.N. *Vliyanie mineral'nykh udobreniy na urozhaynost' i kachestvo zerna ozimyykh zernovykh kul'tur v Predural'ye* [Influence of mineral fertilizers on the yield and grain quality of winter grain crops in the Pre-Urals region], *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2013, no. 5, p. 27–29. (In Russian)
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, *3rd ERTS Symposium, NASA SP-351* (Washington DC, 10–14 December 1973), 1973, p. 309–317.
- Tulikov A.M. *Vredonosnost' sornykh rasteniy v posevakh polevykh kul'tur* [The harmfulness of weeds in field crops], *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2002, no. 1, p. 92–107. (In Russian)
- Vigneau N., Ecartot M., Rabatel G., Roumet P. Potential of field hyperspectral imaging as a non destructive method to assess leaf nitrogen content in Wheat, *Field Crops Research*, 2011, vol. 122, no. 1, p. 25–31.
- Yakushev V.P. *Na puti k tochnomu zemledeliyu* [On the road to precision farming], St. Petersburg, Petersburg Nuclear Physics Institute RAN Publ., 2002, 458 p. (In Russian)

Received 09.12.2020

Revised 16.05.2021

Accepted 27.09.2021