Новые возможности автоматизации процесса обнаружения внутриполевой неоднородности по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям

В. П. Якушев, Е. В. Канаш, В. В. Якушев, Д. А. Матвеенко, Д. В. Русаков, С. Ю. Блохина, А. Ф. Петрушин, Е. П. Митрофанов

Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mails: vyakushev@agrophys.ru, ykanash@yandex.ru, sblokhina@agrophys.ru

Точное земледелие (ТЗ) — мировой тренд адаптации агротехнологий к внутриполевой изменчивости условий формирования урожая. От возможности оценки степени неоднородности сельскохозяйственного поля зависит экономическая и экологическая эффективность применения ТЗ в производстве растениеводческой продукции. Очевидно, что с точки зрения такой зависимости первостепенное значение приобретает разработка методов обнаружения внутриполевой неоднородности и выделения границ её изменчивости на том или ином поле. В работе предложен соответствующий базовый алгоритм и приведена блок-схема его реализации. Обнаружение и выделение границ внутриполевой неоднородности основано на использовании гиперспектральных снимков, полученных в результате дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и оптических критериев (индексов отражения), характеризующих специфические и неспецифические особенности спектральных показателей посева при воздействии различных стрессоров. Для демонстрации реализуемости алгоритма было изучено изменение оптических характеристик растений и получен конкретный перечень индексов отражения и набор количественных показателей по каждому критерию для оценки физиологического состояния яровой пшеницы при оптимальных условиях и дефиците азота и воды. Исследования проводились в контролируемых условиях с целью исключения воздействия на растения других неблагоприятных факторов среды. Существенные различия оптических характеристик растений, испытывающих дефицит азота и воды, являются надёжным обоснованием реализуемости предложенного алгоритма. Полученные результаты открывают новые возможности для автоматизации процесса дешифрирования спутниковых данных ДЗЗ, используемых в прецизионном сельскохозяйственном производстве, а также инициируют проведение научных исследований по поиску оптических критериев, позволяющих выявлять действие других стрессоров, угнетающих растения, и фиксировать границы их негативного влияния на заданном поле. Программная реализация алгоритма и использование информационного ресурса центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг», позволяющего осуществлять обработку и анализ данных ДЗЗ, в ближайшей перспективе будут способствовать существенному расширению возможностей применения нового метода для решения научных и практических задач точного земледелия.

Ключевые слова: точное земледелие, дистанционное зондирование, оптические характеристики растений, дефицит азота, водный дефицит, алгоритм выделения границ внутриполевой неоднородности

Одобрена к печати: 20.03.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32

В основе прецизионного сельскохозяйственного производства лежит представление о возможности значительного повышения урожайности, существенной экономии ресурсов и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду путём дифференциации норм технологического воздействия на посев и среду его обитания в соответствии с пространственной и временной изменчивостью почвенных и иных факторов продуктивности в пределах отдельного сельскохозяйственного поля. В связи с этим точное земледелие (ТЗ) по праву считается мировым трендом адаптации агротехнологий к внутриполевой изменчивости условий формирования урожая. Целесообразность более широкого применения ТЗ в производстве растениеводческой продукции в настоящее время не вызывает сомнений. Однако эффективность перехода от традиционной агрономии к информационным технологиям ТЗ в каждом конкретном случае может быть различной и должна быть оценена заранее. Принципиальное

значение здесь имеет следующее обстоятельство. Применение традиционных приёмов обычно предусматривает дифференциацию норм технологического воздействия от поля к полю, т. е. пространственная вариабельность условий формирования урожая учитывается только в пределах достаточно большой сельскохозяйственной территории, превышающей размеры отдельных полей. В ТЗ технологические воздействия дифференцируются в масштабах отдельных полей. Отсюда следует, что переход к ТЗ на конкретном поле может быть оправдан лишь в тех случаях, когда внутриполевое варьирование условий формирования урожая оказывает существенное влияние на неоднородность урожайности на рассматриваемой сельскохозяйственной территории. Внутриполевая изменчивость наблюдается практически на любом сельскохозяйственном поле, однако в настоящее время не существует единой методологической платформы для её определения. На практике широко используется метод выделения границ внутриполевой неоднородности, основанный на отборе почвенных или растительных образцов в поле, последующих лабораторных исследованиях, анализе и интерпретации полученных данных. Как правило, это связано с существенными временными и финансовыми затратами. При этом также возникает множество вопросов: сколько образцов следует отбирать, с какой площади, с каким шагом, в какой степени пространственное варьирование будет учтено при выбранной схеме отбора образцов и определении показателей в лаборатории и т. д. (Якушев, Якушев, 2007).

Перспективы использования спутниковых данных ДЗЗ при выявлении внутриполевой неоднородности

Использование спутникового дистанционного зондирования может существенно снизить стоимость и повысить качество и масштабы информационного обеспечения ТЗ. Анализ мирового и отечественного опыта разработок в области ТЗ показывает, что наиболее перспективным и подходящим для обнаружения и последующего выделения границ внутриполевой неоднородности считается подход, базирующийся на сопряжённой обработке спутниковых ДДЗ и наземной опорной информации. Опорная информация используется для оценки продуктивности и состояния посевов на тестовых полигонах, а также для валидации и калибровки спутниковых данных ДЗЗ. Наряду с этим весьма перспективными для использования при принятии решений по оптимизации продукционного процесса представляются методы, основанные на регистрации спектральных характеристик отражённой от посевов радиации. Так, например, выявление основных признаков азотного голодания растений — хлороза и торможения роста — лежит в основе разрабатываемых дистанционных методов мониторинга посевов в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Анализ спектральных характеристик отражённой от поверхности листьев радиации позволяет выявить признаки дефицита азота на самых ранних этапах, когда внешние симптомы азотного голодания ещё отсутствуют. На ранних стадиях развития стресса, когда концентрация хлорофилла не меняется или меняется незначительно, угнетение растений можно определить по увеличению индексов отражения (например, антоцианов, флавонолов и/или каротиноидов), которое свидетельствует о снижении эффективности использования фотосинтетически активной радиации. При выраженном дефиците азота, сильно лимитирующем рост, ухудшение физиологического состояния растений может быть установлено по уменьшению величины индекса отражения хлорофилла (Kanash, Osipov, 2009; Yakushev et al., 2017).

В настоящее время проблема одновременного определения различных индексов отражения, вычисляемых по тем или иным формулам в разных спектральных диапазонах, применительно к конкретному полю (посеву) решается посредством использования гиперспектральных изображений. Гиперспектральное изображение отличается от мультиспектрального непрерывностью, диапазоном и спектральным разрешением, что позволяет исследовать оптические характеристики почв и растительности в узких спектральных полосах (шириной 10 нм и менее), в то время как мультиспектральные изображения обычно содержат спектральную информацию в значительно более широких полосах (шириной более 40 нм). Теоретически гиперспектральное зондирование является более подходящим для использования

при определении с помощью различных индексов отражения характеристик посева и среды его обитания, включая состояние влаги, содержание органического вещества, питательных веществ, хлорофилла, каротиноидов, целлюлозы, биомассы и т. д. (Блохина, 2018). С учётом данного обстоятельства был разработан базовый алгоритм по обнаружению и выделению границ внутриполевой неоднородности по гиперспектральным спутниковым снимкам и оптическим критериям, краткое описание которого представлено ниже.

Базовый алгоритм и доказательства его реализуемости

На *рисунке* представлена укрупнённая функциональная блок-схема базового алгоритма по обнаружению и выделению границ внутриполевой неоднородности по гиперспектральным спутниковым снимкам и оптическим критериям. В правой части *рисунка* (режим «1») отражён процесс формирования проблемно-ориентированной базы знаний (БЗ) оптических критериев. В БЗ накапливаются формализованные сведения о формулах расчёта различных оптических показателей (индексов отражения) по тем или иным спектральным диапазонам, а также систематизируются и сохраняются значения соответствующих величин, характеризующих физиологическое состояние посевов сельскохозяйственных культур в оптимальных и стрессовых условиях. Источником знаний являются результаты проведённых в Национальном исследовательском университете «Высшая школа экономики» исследований и литературные данные. Статистика изменений оптических показателей по ряду критериев, характеризующих оптимальные и стрессовые условия азотного и водного режимов формирования урожая яровой пшеницы, приведена ниже (см. с. 27).

В левой части *рисунка* (режим «2») представлена поэтапная последовательность заполнения базы данных (БД) спутниковой гиперспектральной информацией для расчёта оптических показателей посевов по критериям, содержащимся в БЗ. Для этого целесообразно применять новые разработки Института космических исследований РАН, связанные с созданием методов, подходов и технологий работы с распределёнными архивами данных (Лупян и др., 2018). В частности, предполагается использовать уникальную научную установку ВЕГА-Science (http://sci-vega.ru/), входящую в состав Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг», которая обеспечивает пользователям доступ к необходимой предварительно обработанной информации из постоянно пополняющихся архивов спутниковых данных. При наличии у заказчика опорной информации появляется возможность за счёт дальнейшей верификации и калибровки повысить репрезентативность данных космической съёмки, предназначенных для расчётов оптических критериев на заданной территории.

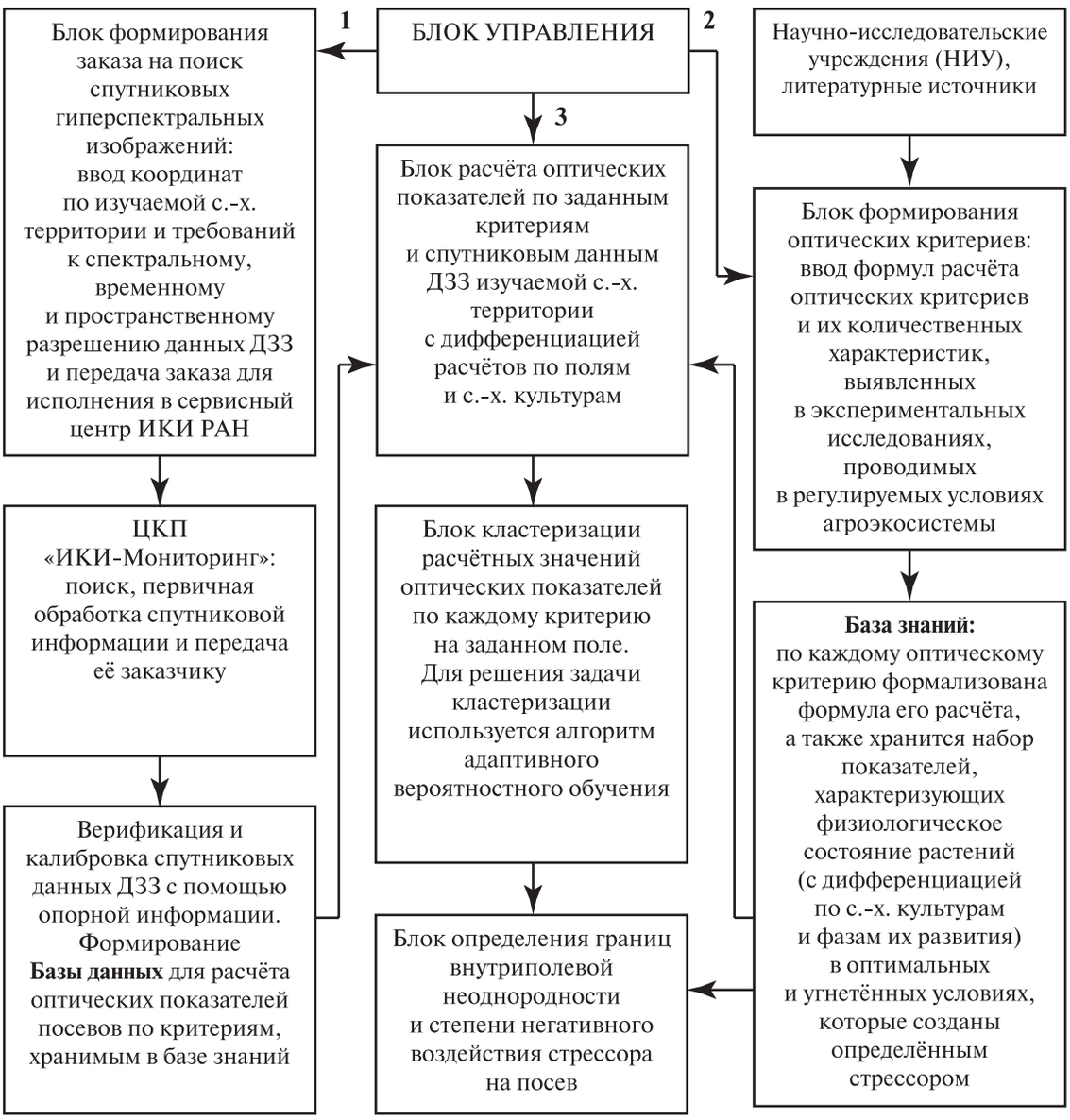
Центральным звеном базового алгоритма (режим «3») являются блоки расчёта оптических показателей по заданным критериям, их кластеризации на сельскохозяйственных полях по каждому критерию и выделения границ внутриполевой неоднородности и степени стрессового воздействия на посев. Наиболее сложной задачей в данном сегменте является кластеризация значений оптического показателя, вычисленных по заданному критерию на конкретном поле. Для решения данной задачи (выделение зон однородности) предлагается использовать подход, основанный на разделении смеси вероятностных распределений, при котором каждые компоненты смеси моделируются нормальными распределениями с различными параметрами. При этом математическое ожидание соответствует среднему значению оптического показателя внутри одной зоны, а дисперсия характеризует разброс внутри зоны однородности.

Общая математическая модель смеси распределений, характеризующая изменение значений оптического показателя на поле, имеет вид:

$$f(x) = \sum_{j=1}^{k} p_j \cdot f(x, \Theta_j),$$

где k — число кластеров (зон однородности); $f(x, \Theta_j)$ — плотность нормального распределения (описывает закон распределения значений оптического показателя x внутри зоны однородности

с номером *j*); $\Theta_j = \left(a_j, \delta_j^2\right)$ — неизвестные параметры (математическое ожидание и дисперсия) распределения компоненты с номером *j*; p_j — доля зоны однородности (относительная доля наблюдений из данной зоны по отношению к общему числу наблюдений).



Укрупнённая функциональная блок-схема базового алгоритма обнаружения и выделения внутриполевой неоднородности

В статистической литературе представлены разнообразные подходы и методы решения задачи разделения смеси распределений, но в любом случае процесс решения является довольно трудоёмким, поскольку он связан с организацией сложных вычислительных процедур. Ранее авторами были разработаны алгоритм адаптивного вероятностного обучения и его программная реализация для выделения однородных зон на поле по электронным картам урожайности (Буре и др., 2008; Якушев и др., 2007). Такие карты формируются автоматически при уборке зерновых культур с помощью комбайнов, оборудованных мониторами, приёмниками GPS/ГЛОНАСС, а также датчиками массы и влажности зерна, с привязкой показателей урожайности к глобальной системе координат. Электронная карта урожайности состоит из большого числа участков размером в несколько квадратных метров, причём для каждого

элементарного участка известна величина урожайности с точной привязкой к координатам её получения на поле. Электронная карта вычисленных значений оптического показателя на заданном поле также состоит из большого числа пикселей (его размер — пространственное разрешение исходных космических снимков). Каждый пиксель является конкретным значением оптического показателя с точными координатами на сельскохозяйственном поле. Сходная структурная организация и идентичность математических моделей смеси распределений исходных данных позволяют предложить использовать разработку авторов (Буре, 2007) для решения задач кластеризации значений заданного оптического показателя на конкретном поле и последующего выделения соответствующих границ внутриполевой неоднородности.

Для определения степени негативного воздействия стресса на посев следует воспользоваться результатами кластеризации. Кластеризация позволяет получить значения математического ожидания и дисперсии оптического показателя для каждой выделенной зоны однородности (квазиоднородности) на конкретном поле. Решение задачи осуществляется путём сравнительного анализа данных величин с содержащимися в БЗ диапазонами значений оптимального и угнетённого состояния растений, вызванного конкретным стрессором.

Далее следует кратко остановиться на выполненных в Агрофизическом научно-исследовательском институте экспериментальных исследованиях по получению новых знаний с целью совершенствования технологий использования спутниковых данных в сельском хозяйстве. Результаты этих исследований позволили разработать рассмотренный выше базовый алгоритм. Также они убедительно свидетельствуют о реализуемости предложенного подхода.

Известно, что дефицит воды и её неравномерное распределение по полю могут значительно исказить результаты дистанционной оценки потребности растений в удобрении. В связи с этим целью экспериментальных исследований было изучение изменений оптических характеристик растений при дефиците азота и воды. Растения яровой пшеницы выращивались в контролируемых условиях с целью исключения воздействия на них других неблагоприятных факторов среды. Посредством внесения удобрений перед посевом, а также в период кущения и по завершении трубкования создавался оптимальный и дефицитный уровень азотного питания. Влажность почвы в контроле до стадии трубкования составляла 80 % от полной полевой влагоёмкости (ППВ). Продолжительность почвенной засухи в период от завершения трубкования до начала колошения составляла 7 дней. Влажность почвы при создании засухи поддерживалась равной 30 и 50 % от ППВ, в контроле — 80 % от ППВ. Спектры отражённой от листьев радиации регистрировались по окончании почвенной засухи *in situ* с помощью миниатюрной оптоволоконной спектрорадиометрической системы фирмы Ocean Optics (США), которая обеспечивает оптическое разрешение 0,065 нм в диапазоне от 300 до 1000 нм с шагом 0,3 нм, и программного обеспечения SpectraSuite. После записи спектров отражения рассчитывались индексы отражения, позволяющие оценить содержание пигментов и активность фотосинтетического аппарата (*таблица*). Статистическая обработка результатов выполнялась с помощью программ MS Excel 2010 и Statistica 8. Сила факторного эффекта η^2 (азотное питание и кратковременная почвенная засуха) определена в процентах как отношение соответствующей суммы квадратов отклонений изучаемых оптических и биометрических показателей от их средних значений к общей сумме квадратов.

Почвенная засуха и дефицит азота привели к увеличению отражающей способности листьев во всём спектральном диапазоне измерения, в особенности в ближней инфракрасной области (под действием засухи). Изменение индексов отражения, характеризующих интенсивность и эффективность работы фотосинтетического аппарата (SIPI, PRI, ARI, FRI), также свидетельствует о том, что низкий уровень азотного питания и кратковременная почвенная засуха вызвали стресс растений, что привело к изменению биохимического состава листьев. Сравнение индексов отражения показало, что при дефиците азота и кратковременной засухе спектральные характеристики листьев изменяются по-разному. Основным симптомом азотного голодания растений является хлороз листьев (в первую очередь — листьев нижних ярусов), обусловленный потерей хлорофилла. В *таблице* приведены значения силы факторного влияния дефицита азота и низкой влажности почвы (30 и 50 % от ППВ) на *Chl*RI и другие индексы отражения. *Chl*RI является единственным из изученных индексов, на который

умеренная (50 % от ППВ, потеря воды листьями достигла 32 %) почвенная засуха оказала незначительное воздействие ($\eta^2 = 4$ %). К выводу об относительной устойчивости к обезвоживанию пигментного аппарата пшеницы и стабильном функционировании электрон-транспортной цепи фотосинтеза в условиях умеренной почвенной засухи пришли и другие авторы (Drozdova et al., 2004; Nikolaeva et al., 2010).

Сила влияния дефицита азота и кратковременной почвенной засухи на индексы отражения листьев пшеницы

Измеряемый показатель	Расчётная формула	Влияние азота		Влияние засухи	
		η^2	p	η^2	p
Почвенная засуха, 50 % от полной полевой влагоёмкости					
Содержание хлорофилла (*Chl*RI)	$(R_{750} - R_{705})/(R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$	20	$1{,}4\cdot10^{-7}$	4	0,0147
Отношение каротиноидов к хлорофиллу (SIPI)	$(R_{800} - R_{445})/(R_{800} - R_{680})$	2	0,0714	14	$7{,}6\cdot10^{-6}$
Мера рассеяния света листом (R_{800})	R_{800}	3	0,0452	28	$4{,}2\cdot10^{-11}$
Фотохимическая активность фотосинтетического аппарата (PRI)	$0{,}7 - [(R_{570} - R_{531})/(R_{570} + R_{531})]$	15	$1{,}4\cdot10^{-7}$	30	$9{,}1\cdot10^{-14}$
Содержание антоцианов (ARI)	$0{,}7 - [R_{750}(1/R_{550} - 1/R_{700})]$	1	0,8893	9	0,0007
Содержание флавонолов (FRI)	$0{,}7 - [((1/R_{410}) - (1/R_{460}))R_{800}]$	12	$4{,}4\cdot10^{-6}$	20	$1{,}2\cdot10^{-8}$
Содержание воды в листе (WRI)	$(R_{920} - R_{970})/(R_{920} + R_{970})$	2	0,0297	55	$1{,}8\cdot10^{-24}$
Почвенная засуха, 30 % от полной полевой влагоёмкости					
Содержание хлорофилла (*Chl*RI)	$(R_{750} - R_{705})/(R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$	10	0,0001	17	$9{,}7\cdot10^{-8}$
Отношение каротиноидов к хлорофиллу (SIPI)	$(R_{800} - R_{445})/(R_{800} - R_{680})$	1	0,3567	22	0,0004
Мера рассеяния света листом (R_{800})	R_{800}	2	0,020	67	$5{,}9\cdot10^{-37}$
Фотохимическая активность фотосинтетического аппарата (PRI)	$0{,}7 - [(R_{570} - R_{531})/(R_{570} + R_{531})]$	1	0,573	24	$2{,}3\cdot10^{-9}$
Содержание антоцианов (ARI)	$0{,}7 - [R_{750}(1/R_{550} - 1/R_{700})]$	24	$0{,}7\cdot10^{-4}$	5	0,006
Содержание флавонолов (FRI)	$0{,}7 - [((1/R_{410}) - (1/R_{460}))R_{800}]$	1	0,098	22	$3{,}7\cdot10^{-9}$
Содержание воды в листе (WRI)	$(R_{920} - R_{970})/(R_{920} + R_{970})$	4	$7{,}9\cdot10^{-20}$	4	0,283

Примечание: η^2 — сила факторного эффекта (в %); p — уровень достоверности влияния фактора; R — отражение листа; цифры — длина волны отражённой радиации.

Различия в реакции растений на недостаток азота и почвенной влаги могут быть также установлены при сравнении значений SIPI, R_{800}, ARI, WRI и оценке силы факторного эффекта, который оказывают на данные индексы изучаемые стрессоры. Выявлено, что сила влияния умеренной почвенной засухи на перечисленные индексы (WRI (55 %), R_{800} (28 %), SIPI (14 %) и ARI (9 %)) существенно превышает силу влияния дефицита азота. При умеренной почвенной засухе в условиях описываемого эксперимента влияние дефицита азота на SIPI и ARI оказалось недостоверным, а сила факторного эффекта на R_{800} и WRI была невысока (3 и 2 % соответственно). Наиболее сильное влияние умеренная почвенная засуха оказала на показатель рассеяния R_{800} и в особенности на индекс водной полосы WRI. Оба стрессора (почвенная засуха и дефицит азотного питания) привели к усилению тепловой диссипации (увеличению PRI) и способствовали накоплению флавонолов (увеличению FRI). При сильной почвенной засухе (30 % от ППВ, потеря воды листьями 60 %) установлено достоверное уменьшение содержания хлорофилла не только при пониженном уровне азотного питания, но и дефиците воды в почве. Наиболее существенное влияние сильная засуха (30 %

от ППВ) оказала на показатель рассеяния света R_{800} ($\eta^2 = 67$ %). Однако в условиях значительного обезвоживания листьев при сильной почвенной засухе достоверных изменений WRI не выявлено.

В результате сравнения η^2 азотного дефицита и почвенной засухи можно прийти к выводу, что семидневная почвенная засуха оказала более сильное влияние на изучаемые индексы, чем пониженный уровень азотного питания. На фоне умеренной почвенной засухи дефицит азота оказал наиболее существенное влияние на *Chl*RI, почвенная засуха — на SIPI, R_{800}, ARI и WRI. При более сильной почвенной засухе достоверно изменилась величина всех изучаемых индексов отражения (за исключением WRI). Следовательно, в условиях умеренной почвенной засухи WRI может служить критерием для оценки водного статуса растений, однако если растения испытывают значительный водный дефицит и листья теряют большую часть запасов воды, то данный показатель, в отличие от R_{800}, изменяется незначительно.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения оптических методов для исследования ответной реакции растений на действие почвенной засухи и недостатка азота с целью совершенствования методов диагностики их физиологического состояния. В результате проведённых исследований предложены конкретный перечень оптических критериев (индексов отражения) и набор количественных характеристик по каждому критерию для оценки физиологического состояния яровой пшеницы при оптимальных условиях и дефиците азота и воды (Канаш и др., 2017). Для повышения надёжности оценки потребности растений в удобрении следует использовать несколько критериев, позволяющих оценить неспецифические и специфические изменения оптических характеристик растений, возникающие при дефиците азота и воды. Результаты проведённых исследований были представлены на XI Европейской конференции по точному земледелию (Эдинбург, 16–20 июля 2017 г.) (Yakushev et al., 2017).

Существенные различия оптических характеристик растений, испытывающих дефицит азота и воды, являются надёжным обоснованием реализуемости базового алгоритма по выявлению внутриполевой неоднородности. Полученные результаты инициируют проведение научных исследований по поиску оптических критериев, позволяющих выявлять действие других стрессоров, а также фиксировать границы их негативного влияния на конкретном поле. Накопление подобных знаний открывает значительные перспективы для автоматизации процесса дешифрирования спутниковых гиперспектральных снимков. Программная реализация и организационно-методическая апробация технологий формирования БЗ и БД базового алгоритма позволят не только обнаруживать участки посева с угнетёнными растениями, но и выявлять стрессор, действие которого стало причиной угнетения.

Литература

1. *Блохина С. Ю.* Применение дистанционного зондирования в точном земледелии // Вестн. российской с.-х. науки. 2018. № 5. С. 10–16.
2. *Буре В. М.* Методологические аспекты статистического анализа в точном земледелии // Докл. российской академии с.-х. наук. 2007. № 6. С. 54–56.
3. *Буре В. М.*, *Петрушин А. Ф.*, *Якушев В. В.* Автоматизированная система стохастического выделения однородных технологических зон на сельскохозяйственном поле по данным урожайности: св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 20008614663. Рег. 29.09.2008.
4. *Канаш Е. В.*, *Якушев В. П.*, *Русаков Д. В.*, *Блохина С. Ю.*, *Кравцова А. В.* Оптические характеристики листьев яровой пшеницы при дефиците азота и воды // Вестн. российской с.-х. науки. 2017. № 4. С. 9–12.
5. *Лупян Е. А.*, *Бурцев М. А.*, *Прошин А. А.*, *Кобец Д. А.* Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
6. *Якушев В. П.*, *Якушев В. В.* Информационное обеспечение точного земледелия. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2007. 384 с.
7. *Якушев В. П.*, *Буре В. М.*, *Якушев В. В.* Выделение однородных зон на поле по урожайности отдельных участков // Докл. Российской академии с.-х. наук. 2007. № 3. С. 33–37.

8. *Drozdova I. S.*, *Pustovoitova T. N.*, *Dzhibladze T. G.*, *Barabanshchikova N. S.*, *Zhdanova N. E.*, *Maevskaya S. N.*, *Bukhov N. G.* Endogenous control of photosynthetic activity during progressive drought: influence of final products of photosynthesis // Russian J. Plant Physiology. 2004. No. 51. P. 668–675.
9. *Kanash E. V.*, *Osipov Y. A.* Optical signals of oxidative stress in crops physiological state diagnostics // Proc. 7th European Conf. Precision Agriculture (ECPA). Wageningen, Netherlands, 2009. P. 81–89. DOI: 10.3920/978-90-8686-664-9.
10. *Nikolaeva M. K.*, *Maevskaya S. N.*, *Shugaev A. G.*, *Bukhov N. G.* Effect of drought on chlorophyll content and antioxidant enzyme activities in leaves of three wheat cultivars varying in productivity // Russian J. Plant Physiology. 2010. No. 57. P. 87–95.
11. *Yakushev V.*, *Kanash E.*, *Rusakov D.*, *Blokhina S.* Specific and non-specific changes in optical characteristics of spring wheat leaves under nitrogen and water deficiency // Advances in Animal Biosciences: Papers presented at the 11th European Conf. Precision Agriculture (ECPA). Edinburgh, UK, 16–20 July 2017. The Animal Consortium, 2017. V. 8. Special Iss. 2. P. 229–232. DOI: 10.1017/S204047001700053X.

Advanced features of automated detection of within-field variability based on hyperspectral images and optical criteria

V. P. Yakushev, E. V. Kanash, V. V. Yakushev, D. A. Matveenko, D. V. Rusakov, S. Yu. Blokhina, A. F. Petrushin, E. P. Mitrofanov

Agrophysical Research Institute, *Saint Petersburg 195220*, *Russia*
E-mails: office@agrophys.ru, *ykanash@yandex.ru*, *sblokhina@agrophys.ru*

Precision agriculture (PA) is the trend in modern agriculture where agricultural technologies are being adapted to the within-field spatial variability of the crop development and yield formation factors. Economic and environmental benefits of PA implementation in crop production depend on the possibility to evaluate the degree of within-field variability of those environmental parameters, which are important for crop development. In this context, the development of identification methods allowing to find the within-field variability of different parameters and to mark the borders between differently managed areas within each agricultural field is of great significance. Relevant basic algorithm for such a method and its implementation diagram are presented in the paper. The within-field variability detection and border marking is based on hyperspectral images and optical criteria (reflection indexes), characterizing specific and non-specific features of crop canopy spectral characteristics under the impact of various stress factors. To confirm the feasibility of the algorithm the changes of plant optical characteristics have been studied. A list of reflection indexes and a set of quantity indicators for each criterion have been obtained for spring wheat physiological condition under optimum environmental parameters and in the conditions of nitrogen and water deficiency. The experiment was conducted under controlled conditions to eliminate possible impacts of other environmental factors on the plants. Significant differences in optical characteristics of the plants affected by nitrogen and water deficiency compared to those with no stress confirmed the reliability of the offered algorithm. The obtained results open new possibilities to automate the process of satellite data interpretation for precision agriculture, initiate research projects where optical criteria for other environmental stress factors might be found. The algorithm realization and the information resource of the IKI-Monitoring center in the nearest future will significantly widen the application of the new method into practice of precision agriculture.

Keywords: precision agriculture, remote sensing, optical criteria of plants, nitrogen and water deficiency, the algorithm of within-field variability delineation

Accepted: 20.03.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32

References

1. Blokhina S. Yu., Primenenie distantsionnogo zondirovaniya v tochnom zemledelii (Remote sensing application in precision agriculture), *Vestnik Rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2018, No. 5, pp. 10–16.
2. Bure V. M., Metodologicheskie aspekty statisticheskogo analiza v tochnom zemledelii (Methodological aspects of statistical analysis in precision agriculture), *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*, 2007, No. 6, pp. 54–56.
3. Bure V. M., Petrushin A. F., Yakushev V. V., *Avtomatizirovannaya sistema stokhasticheskogo vydeleniya odnorodnykh tekhnologicheskikh zon na sel'skokhozyaistvennom pole po dannym urozhainosti* (Automated system for stochastic separation of homogeneous technological zones on an agricultural field according to yield data), Certificate of state registration of software No. 20008614663 (RU), Reg. 29.09.2008.
4. Kanash E. V., Yakushev V. P., Osipov Yu. A., Rusakov D. V., Blokhina S. Yu., Kravtsova A. V., Opticheskie kharakteristiki list'ev yarovoi pshenitsy pri defitsite azota i vody (Optical characteristics of the spring wheat leaves under the nitrogen and water deficiency conditions), *Vestnik rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2017, No. 4, pp. 9–12.
5. Loupian E. A., Burtsev M. A., Proshin A. A., Kobets D. A., Razvitie podkhodov k postroeniyu informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Evolution of remote monitoring information systems development concepts), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 53–66, DOI:.10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
6. Yakushev V. P., Yakushev V. V., *Informatsionnoe obespechenie tochnogo zemledeliya* (Information support for precision farming), Saint Petersburg: Izd. PIYaF RAN, 2007, 384 p.
7. Yakushev V. P., Bure V. M., Yakushev V. V., Vydelenie odnorodnykh zon na pole po urozhainosti otdel'nykh uchastkov (Selection of homogeneous zones on the field according to the yield of individual sections), *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*, 2007, No. 3, pp. 33–37.
8. Drozdova I. S., Pustovoitova T. N., Dzhibladze T. G., Barabanshchikova N. S., Zhdanova N. E., Maevskaya S. N., Bukhov N. G., Endogenous control of photosynthetic activity during progressive drought: influence of final products of photosynthesis, *Russian J. Plant Physiology*, 2004, No. 51, pp. 668–675.
9. Kanash E. V., Osipov Y. A., Optical signals of oxidative stress in crops physiological state diagnostics, *Proc. 7th European Conf. Precision Agriculture* (*ECPA*), Wageningen, Netherlands, 2009, pp. 81–89, DOI: 10.3920/978-90-8686-664-9.
10. Nikolaeva M. K., Maevskaya S. N., Shugaev A. G., Bukhov N. G., Effect of drought on chlorophyll content and antioxidant enzyme activities in leaves of three wheat cultivars varying in productivity, *Russian J. Plant Physiology*, 2010, No. 57, pp. 87–95.
11. Yakushev V., Kanash E., Rusakov D., Blokhina S., Specific and non-specific changes in optical characteristics of spring wheat leaves under nitrogen and water deficiency, *Advances in Animal Biosciences: Papers presented at the 11th European Conf. Precision Agriculture* (*ECPA*), Edinburgh, UK, 16–20 July, 2017, The Animal Consortium, 2017, Vol. 8, Special Issue 2, pp. 229–232, DOI: 10.1017/S204047001700053X.