

В.П. Якушев, академик РАН
Д.А. Матвеев, кандидат сельскохозяйственных наук
А.Ф. Петрушин, кандидат технических наук
С.Ю. Блохина, кандидат биологических наук
Е.В. Канаш, доктор биологических наук
В.В. Якушев, член-корреспондент РАН
 Агрофизический научно-исследовательский институт
 РФ, 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14
 E-mail: vyakushev@agrophys.ru

УДК 631.58:551:5

DOI: 10.30850/vrsn/2020/2/4-10

НОВЫЙ МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ВНУТРИПОЛЕВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПО ОПТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПОСЕВОВ ДЛЯ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ*

Научно-технологический прорыв в сельском хозяйстве базируется на внедрении цифровых технологий «умного сельского хозяйства» и его ключевого сегмента – точного земледелия. Точное земледелие – мировой тренд адаптации агротехнологий производства растениеводческой продукции к внутриполевой изменчивости условий формирования урожая. Необходимо количественно оценивать степень неоднородности указанных условий и определять границы их изменчивости на заданном сельскохозяйственном поле. В работе на основе анализа существующих типовых подходов к оценке внутриполевой изменчивости обосновывается целесообразность поиска новых, более точных и недорогих методов решения данной задачи. В информационном обеспечении точного земледелия нет альтернативы технологиям дистанционного зондирования Земли. Предлагаемый новый метод обнаружения внутриполевой неоднородности основан на использовании оптических критериев (индексы отражения), характеризующих особенности спектральных показателей посева при воздействии различных стрессоров. В регулируемых условиях с помощью специального спектрометра был получен конкретный перечень индексов отражения и набор количественных показателей по каждому критерию для оценки физиологического состояния пшеницы при оптимальных условиях и дефиците азота и воды. Полученные результаты открывают новые возможности для автоматизации процесса интерпретации гиперспектральных космических снимков с целью идентификации и выявления границ негативного воздействия стрессоров, сдерживающих рост и развитие посевов. Рассмотрена соответствующая алгоритмическая схема реализации предложенного метода.

Ключевые слова: «умное сельское хозяйство», точное земледелие, мобильный измерительный комплекс, ГИС-инструменты, дистанционное зондирование, оптические характеристики растений, дефицит азота, водный дефицит, алгоритм выявления внутриполевой изменчивости.

V.P. Yakushev, Academician of RAS
D.A. Matveenko, PhD in Agricultural sciences
A.F. Petrushin, PhD in Engineering sciences
S.Yu. Blokhina, PhD in Biological sciences
E.V. Kanash, Grand PhD in Biological sciences
V.V. Yakushev, Corresponding member of RAS
 Agrophysical Research Institute
 RF, 195220, g. Sankt-Peterburg, Grazhdanskij pr., 14
 E-mail: office@agrophys.ru

NEW METHOD OF QUANTITY ESTIMATION OF INTRA FIELD VARIABILITY BY OPTICAL CHARACTERISTICS OF SOWINGS FOR PRECISION FARMING

The scientific and technological progress in the agricultural production is based on the application of digital technologies of «smart agriculture» and precision farming, which is its key segment. Precision farming is a global trend of the adaptation of agricultural technologies for crop production to within-field spatial variability of crop formation conditions. It is necessary to quantify the degree of heterogeneity of these conditions and determine the boundaries of their variability in a given agricultural field. Based on the analysis of the available approaches to the within-field variability assessment, the paper substantiates the expediency of searching for new, more precise and inexpensive methods for solving this problem. Due to the large area of Russia, there is no alternative to the technology of remote sensing of the Earth in the information support of precision farming. The proposed new method of within-field heterogeneity detection is based on the use of optical criteria (reflection indexes), characterizing specific and non-specific features of spectral characteristics of crop canopy under the impact of various stress factors. Under controlled conditions, using a special spectrometer, a specific list of reflection indices and a set of quantitative indicators for each criterion was obtained to assess the physiological state of wheat under optimal conditions and nitrogen and water deficiency. The obtained results provide new possibilities for automating the process of interpretation of hyperspectral satellite images in order to identify and reveal the boundaries of the negative effects of stressors that inhibit the growth and development of crops. The relevant algorithmic scheme of the method implementation is considered in the paper.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-05184/ The study was supported by the grant of Russian Foundation of Basic Research № 19-29-05184.

Key words: «*smart agriculture*», *precision agriculture*, *mobile measuring system*, *GIS tools*, *remote sensing*, *optical criteria of plants*, *nitrogen and water deficiency*, *algorithm for detecting within-field heterogeneity*.

Точное земледелие (ТЗ) — мировой тренд адаптации агротехнологий к внутриполевой изменчивости условий формирования урожая. Целесообразность перехода к новым цифровым технологиям ТЗ основана на многочисленных результатах, полученных в процессе производства растениеводческой продукции в нашей стране и за рубежом. Они убедительно свидетельствуют о возможностях значительного повышения урожая, существенной экономии ресурсов и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду посредством дифференциации норм технологического воздействия на посев в соответствии с пространственной и временной изменчивостью почвенных и иных факторов продуктивности в пределах отдельного сельскохозяйственного поля. Научно-производственные опыты АФИ показали, что в результате только дифференцированного внесения азотных удобрений по технологии ТЗ урожайность зерновых увеличилась на 29 % в среднем за годы исследований, а экономия удобрений составила около 26 %. В результате применения учеными АФИ технологий ТЗ при использовании агрохимических средств антропогенная нагрузка на окружающую среду снизилась на 35...60 % и возросла окупаемость удобрений и средств защиты растений в 1,5...1,7 раза на фоне существенного повышения качества зерновых культур. [5, 7, 11–13]

Выполнение агроприемов в производстве растениеводческой продукции основывается, как правило, на одинаковой норме технологического воздействия относительно всего земельного участка и всей таксономической единицы поля. Применение агротехнологий без учета пространственной вариабельности характеристик посева и среды обитания растений повсеместно приводит к нарушению равновесия и снижению продуктивности агроэкосистем. В ТЗ в зависимости от степени внутриполевой пространственно-временной неоднородности выбирают и определяют очередность выполнения приемов производства растениеводческой продукции, управляют нормированным внесением ресурсов. Очевидно, что, с точки зрения такого подхода, первостепенное значение приобретают более тщательное изучение самой пространственной неоднородности сельскохозяйственных угодий, а также разработка методов ее обнаружения, количественного описания и выделения границ изменчивости на том или ином поле. От степени выявленной неоднородности зависит экологическая и экономическая эффективность применения ТЗ. Если основные параметры почвенного плодородия и показатели, характеризующие продуктивность посевов в пределах одного поля, существенно различаются, то затраты на применение технологий ТЗ окупятся с большой вероятностью. Подобные данные позволяют определить целесообразность применения информационных технологий ТЗ в масштабах отдельных хозяйств и полей.

Типовой подход, используемый в практике точного земледелия для количественной оценки внутриполевой изменчивости

Практическая реализация технологий ТЗ базируется на возможностях современных мобильных информационно-измерительных систем, оснащенных навигационным оборудованием и специализированным программным обеспечением, позволяющим выделять границы варьирования агрохимических и агрофизических параметров почв на конкретных сельскохозяйственных полях. Для определения рассматриваемых физико-химических индексов плодородия (гранулометрический состав, кислотность, подвижные формы фосфора и калия, органического вещества, плотность и влагообеспеченность почвы и др.) проводятся регулярные обследования. До применения технологий ТЗ подобные почвенные обследования проводили вручную и без точной привязки к местности. Такой подход, как правило, не мог обеспечить повторного отбора проб в тех же точках предыдущего обследования. Очевидно, что информация, полученная таким способом, скорее всего не отражает реальную динамику изменения почвенных показателей на поле, что в свою очередь приводит к неверным результатам расчета доз удобрений. [13]

В АФИ разработан мобильный автоматизированный комплекс, позволяющий проводить полевое обследование почв на современном уровне. В качестве движителя используется автомобиль «Нива», как наиболее подходящий по критериям проходимости и возможности монтажа навесного оборудования для автоматического отбора почвенных проб. Автоматический почвенный пробоотборник, смонтированный на задней части автомобиля, управляется при помощи пульта, установленного в кабине. GPS-приемник на крыше автомобиля обеспечивает субметровый уровень точности в дифференцированном режиме. В качестве бортового компьютера используется установленный в кабине автомобиля ударопрочный влагозащищенный ноутбук.

Основное преимущество рассматриваемого мобильного комплекса заключается в точной привязке координат изучаемых полей и точек отбора почвенных проб на них, а также в удобном техническом информационном интерфейсе процесса почвенного обследования в целом. Соответствующая автоматизированная методика включает в себя следующие этапы [8]:

- создание электронных карт полей и контуров рабочих участков, на которых необходимо провести почвенное обследование, с координатной привязкой границ объектов;
- разбиение созданных контуров на элементарные участки, его размеры зависят от рельефа, типа почв и геоморфологии местности;
- определение сроков, периодичности и глубины отбора почвенных образцов на элементарных участках;

– отбор объединенных проб с элементарных участков при помощи автоматического пробоотборника;

– агрохимический анализ образцов в сертифицированной лаборатории;

– интерпретацию полученных результатов с помощью геоинформационного модуля ГИС-АФИ [10, 14], включающую формирование электронных пространственно-ориентированных картограмм распределения агрофизических и агрохимических показателей почвенного плодородия, а также электронных карт-заданий для реализации агроприемов ТЗ в полевых условиях.

Геоинформационная интерпретация осуществляется с помощью геостатистических методов интерполяции каждого из показателей, поддерживаемых функционалом модуля ГИС-АФИ. Цель интерполяции – переход от точечного представления информации к сплошному распределению по полю определенных в лаборатории показателей плодородия с учетом фактического постепенного пространственного перехода от высоких значений к низким и наоборот. На точность интерполяции влияют схема отбора проб и плотность взятия образцов. Создаваемая геоинформационная база необходима для расчета доз внесения удобрений, средств защиты растений и других агрохимикатов, а также для создания электронных карт-заданий (см. 1-ю стр. обл.) на дифференцированное выполнение агротехнических операций в системе ТЗ с помощью роботизированных сельскохозяйственных агрегатов, оснащенных бортовыми компьютерами и GPS/ГЛОНАСС-приемниками.

Вместе с тем, кратко рассмотренный выше подход к количественной оценке внутриполевой изменчивости и выделению границ обнаруженной неоднородности, основанный на отборе почвенных (а также растительных) образцов в поле, их последующих лабораторных исследованиях, анализе и интерпретации полученных данных, неудобен для применения – требуются существенные временные и финансовые затраты. У производителей растениеводческой продукции возникают вопросы: сколько образцов следует отбирать, с какой площади, с каким шагом, в какой степени пространственное варьирование будет учтено при выбранной схеме пробоотбора и определении в лаборатории показателей почвенного плодородия и продуктивности посевов.

Создание новых перспективных инструментов выделения границ внутриполевой изменчивости для ТЗ базируется на расширении возможностей использования спутниковых данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), что может снизить стоимость, повысить качество и увеличить масштабы информационного обеспечения прецизионного производства растениеводческой продукции. Однако в связи с отсутствием надежных методов интерпретации спутниковых данных ДЗЗ их практически не используют при управлении производственным процессом сельскохозяйственных культур, а лишь частично применяют государственные структуры при мониторинге крупных природных объектов и явлений (земельные кадастры, леса, водоемы, пожары, наводнения). Это ограничивает внедрение инновационных технологий ТЗ в отдельных хозяйствах.

Научно-методическое и инструментальное обеспечение количественной оценки внутриполевой изменчивости по оптическим характеристикам растений

Из известных способов сбора данных наиболее перспективные для ТЗ – спутниковые технологии. Спутниковые данные ДЗЗ потенциально позволяют оценивать состояние земель и посевов на значительных территориях, используемых в сельском хозяйстве. Например, с помощью вариограммного анализа возможно описать пространственную структуру управляемых показателей, влияющих на формирование урожая, определить тренды их изменений, а также установить статистическую связность значений варьирующихся характеристик, отражающих состояние агрономических объектов. [9, 15] Свойства таких объектов настолько сложно и непредсказуемо изменяются в пространстве, что практически не могут быть описаны никакими детерминированными зависимостями. В практической работе выводы обычно делают на основе значений изучаемого варьирующегося показателя, полученных в результате дискретного отбора образцов на заданной территории. В то же время ДЗЗ обеспечивает непрерывный сплошной (площадный) сбор данных. С помощью оптических, радиометрических и других сенсоров регистрируют отражательные и излучаемые земной поверхностью электромагнитные волны в различных спектральных диапазонах.

Измерение собственного или отраженного излучения агрономического объекта и понимание того, как оно проходит через земную атмосферу, позволяют определить важные свойства растений, посевов, почв и агроэкосистем в целом. Дешифрирование дистанционных изображений зависит от адекватного понимания принципов распространения электромагнитного излучения и его взаимодействия с поверхностью и атмосферой Земли. Поведение электромагнитного излучения в видимом диапазоне – информативный показатель, оценивающий состояние агрономических объектов. Однако большая часть электромагнитного спектра лежит вне видимого диапазона, что обуславливает необходимость применения специальных методов обработки информации, поскольку поведение излучений в невидимом диапазоне может существенно отличаться от видимого.

В связи с этим, особый интерес для решения задач точного земледелия представляют гиперспектральная съемочная аппаратура и методы анализа и интерпретации материалов гиперспектрального дистанционного зондирования поверхности Земли, широкого спектра электромагнитного излучения, включая видимый и инфракрасный диапазоны одновременно. Гиперспектральное изображение отличается от мультиспектрального непрерывностью, диапазоном и разрешением, что дает возможность исследовать оптические характеристики почв и растительности в узких спектральных полосах (шириной 10 нм и менее). Мультиспектральные изображения обычно содержат спектральную информацию в значительно более широких полосах (шириной более 40 нм).

Теоретически гиперспектральное зондирование более подходит для определения 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. [3]

Указанная особенность гиперспектральных изображений обеспечивает одновременное определение значений вегетационных индексов отражения, вычисляемых по тем или иным формулам в разных спектральных диапазонах. На основе анализа спектральных характеристик отраженной от поверхности листьев радиации возможно выявить признаки дефицита азота на самых ранних этапах при отсутствии внешних симптомов азотного голодания. Когда концентрация хлорофилла не меняется или меняется незначительно, угнетение растений можно определить по увеличению индексов отражения, например антоцианов, флавонолов и (или) каротиноидов, эффективность использования фотосинтетически активной радиации снижается. При выраженном дефиците азота, сильно лимитирующем рост растений, ухудшение физиологического состояния растений может быть установлено по уменьшению величины индекса отражения хлорофилла. [17] Но дефицит воды и ее неравномерное распределение по полю могут значительно исказить результаты дистанционной оценки потребности растений в азоте.

В АФИ для более детального изучения изменений оптических характеристик сельскохозяйственных растений при дефиците азота и воды были проведены специальные эксперименты [4, 18] в контролируемых условиях, чтобы исключить воздействие других неблагоприятных факторов среды. Растения пшеницы выращивали в сосудах емкостью 3 л, наполненных дерново-подзолистой почвой. Удобрения вносили перед посевом для создания оптимального уровня азотного питания и дефицита азота. Влажность почвы при создании дефицита воды поддерживалась равной 30 и 50 % полной полевой влагоемкости (ППВ), в контроле – 80 % ППВ. Спектральные характеристики отраженной от поверхности листьев радиации регистрировали с помощью миниатюрного оптоволоконного спектрометра HR2000 фирмы Ocean Optics (США), с оптическим разрешением 0,065 нм в диапазоне от 300 до 1000 нм, с шагом 0,3 нм и автоматической обработкой измерительной информации специализированным программным наполнением SpectraSuite (рис. 1, 2-я стр. обл.). На первом этапе экспериментальных исследований моделировали различные стрессовые условия, а затем определяли спектральные диапазоны оптических характеристик растений, где выявлена наибольшая корреляционная зависимость между значениями отражательной способности R_λ и длиной волны λ . Так, корреляционная зависимость r между содержанием воды в листьях после засухи и их отражающей способностью была наиболее высокой в диапазоне 380...400 и 760...1000 нм, а между дефицитом азота в почве (уровень азотного питания) и отражающей способностью растений пшеницы — в диапазоне радиации 405...445, 510...645 и

695...730 нм (рис. 2, 2-я стр. обл.). Для раннего выявления водного дефицита изучали спектральные характеристики радиации, отраженной от поверхности листьев пшеницы, при оптимальном поливе и после почвенной засухи. Наиболее информативными определены следующие спектральные диапазоны: ультрафиолетовый (324...370 нм) и красный (705...720 нм), для которых r между R_λ и λ отрицателен и превышает 0,9; синий (400...450 нм) — r положителен и превышает 0,9; желто-оранжевый (570...600 нм) — r положителен и превышает 0,7 (рис. 3, 2-я стр. обл.).

На следующем этапе рассчитывали индексы отражения, определяли содержание пигментов и активность фотосинтетического аппарата. Статистическую обработку результатов выполняли с помощью программ MS Excel 2010 и Statistica 8. Сила факторного эффекта η^2 (азотное питание и кратковременная почвенная засуха) выражена в процентах как отношение соответствующей суммы квадратов отклонений изучаемых оптических и биометрических показателей от их средних значений к общей сумме квадратов. Изменение индексов отражения, характеризующих интенсивность и эффективность работы фотосинтетического аппарата (SIPI, PRI, ARI, FRI), свидетельствует о том, что низкий уровень азотного питания и кратковременная почвенная засуха вызвали стресс растений и изменение биохимического состава листьев. Сравнение индексов отражения показало, что при дефиците азота и кратковременной засухе спектральные характеристики листьев изменяются по-разному. Основным симптом азотного голодания растений — хлороз листьев (в первую очередь — нижних ярусов), обусловленный потерей хлорофилла. В таблице приведены значения силы факторного влияния дефицита азота и низкой влажности почвы (30 и 50 % ППВ) на ChlRI и другие индексы отражения. ChlRI — единственный из изученных индексов, на который умеренная (50 % ППВ, потеря воды листьями составила 32 %) почвенная засуха оказала незначительное влияние ($\eta^2 = 4$ %). К выводу об относительной устойчивости к обезвоживанию пигментного аппарата пшеницы и стабильном функционировании электрон-транспортной цепи фотосинтеза в условиях умеренной почвенной засухи ранее пришли другие авторы (Drozdova et al., 2004; Nikolaeva et al., 2010).

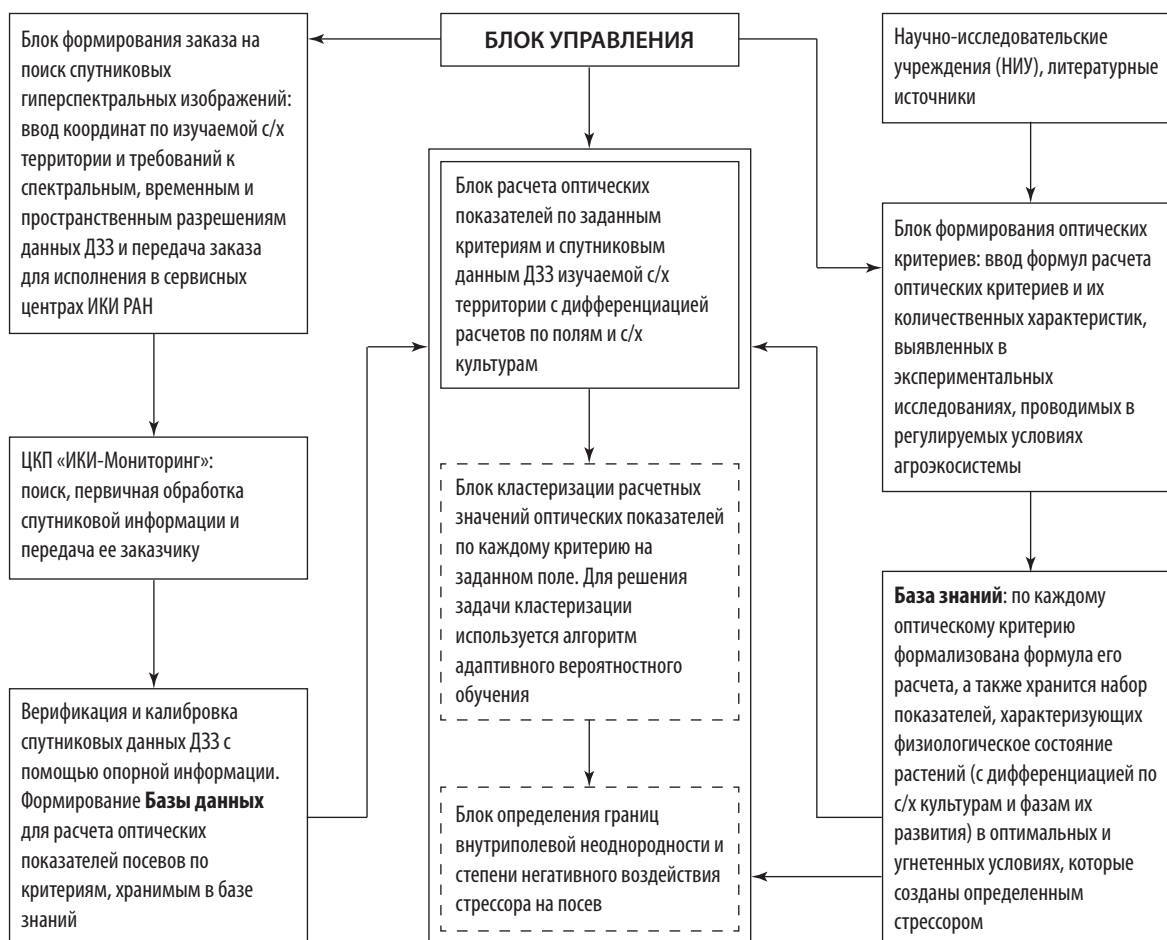
Полученные результаты служат научным обоснованием реализуемости нового метода, выявляющего внутривидовую изменчивость физиологического состояния пшеницы по оптическим характеристикам растений в условиях дефицита азота и воды. Наличие подобных знаний и их накопление открывают значительные перспективы для автоматизации процесса интерпретации спутниковых гиперспектральных снимков.

Представляем укрупненную алгоритмическую блок-схему обнаружения и выделения границ внутривидовой изменчивости по оптическим критериям (индексы отражения) и гиперспектральным снимкам (см. рисунок). В правой части блока отражен процесс формирования проблемно-ориентированной базы знаний (БЗ) оптических критериев. В БЗ накапливаются сведения о формулах

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

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

Примечание. η^2 – сила факторного эффекта %; ρ – уровень достоверности влияния фактора; R – отражение листа; цифры – длина волны отраженной радиации.



Укрупненная алгоритмическая блок-схема обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям

расчета различных оптических показателей 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. В левой части представлена поэтапная последовательность заполнения базы данных (БД) спутниковой гиперспектральной информацией для расчета оптических показателей посевов по критериям, содержащимся в БЗ. Для этого целесообразно применять новые разработки Института космических исследований, связанные с созданием методов, подходов и технологий работы с распределенными архивами данных. [6, 18] В частности, предполагается использовать уникальную научную установку VEGA-Science (<http://sci-vega.ru/>), входящую в состав Центра коллективного пользования (ЦКП «ИКИ-Мониторинг»), которая обеспечивает доступ к предварительно обработанной необходимой информации из постоянно пополняющихся архивов спутниковых данных.

Следующий шаг реализации рассматриваемой алгоритмической схемы — блок расчета оптических показателей по заданным критериям, их кластеризации на сельскохозяйственных полях по каждому критерию и выделения границ внутривидовой неоднородности и степени стрессового воздействия на посев. Наиболее сложная задача в данном сегменте — кластеризация значений оптического показателя, вычисленных по заданному критерию на конкретном поле. Для ее решения (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. Данный подход был реализован авторами, а соответствующее программное обеспечение апробировано при выделении зон однородностей по электронным картам урожайности. [1, 2] Для определения степени негативного воздействия стресса на посев следует использовать результаты кластеризации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Буре, В.М. Методологические аспекты статистического анализа в точном земледелии/В.М. Буре // Доклады РАСХН. — 2007. — № 6. — С. 54–56.
2. Буре, В.М., А.Ф. Петрушин, В.В. Якушев. 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.
3. Блохина, С.Ю. Применение дистанционного зондирования в точном земледелии/С.Ю. Блохина // Вестник российской сельскохозяйственной науки. — 2018. — № 5. — С. 10–16.
4. Канаш, Е.В. Оптические характеристики листьев яровой пшеницы при дефиците азота и воды/Е.В. Канаш, В.П. Якушев, Д.В. Русаков, С.Ю. Блохина, А.В. Кравцова // Вестник российской сельскохозяйственной науки. — 2017. — № 4. — С. 9–12.
5. Лекомцев, П.В. Научно-методическое обеспечение управления производственным процессом яровой пшеницы в системе точного земледелия: автореф. дисс.... д-ра биол. наук. /П.В. Лекомцев. — СПб. — АФИ. — 2015.
6. Лупян, Е.А. Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга/Е.А. Лупян, М.А. Бурцев, А.А. Прошин, Д.А. Кобец // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2018. — Т. 15. № 3. — С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
7. Матвеевко, Д.А. Дифференцированное внесение азотных удобрений на основе оценки оптических характеристик посевов яровой пшеницы: автореф. дисс.... канд. с.-х. наук//Д.А. Матвеевко. — СПб. — АФИ. — 2012.
8. Методика отбора почвенных проб по элементарным участкам поля в целях дифференцированного применения удобрений. М.: ВНИИА, 2007. — 36 с.
9. Сидорова, В.А. Почвенно-географическая интерпретация пространственной вариативности химических и физических свойств поверхностных горизонтов почв степной зоны/ В.А. Сидорова, П.В. Красильников // Почвоведение. — 2007. — № 4. — С. 1–11.
10. Часовских, С.В. Специализированное программное обеспечение по реализации систем точного земледелия/ С.В. Часовских, Б.А. Телал, В.В. Якушев // Материалы научной сессии Агрофизического НИИ. — 2013. — С. 16–32.
11. Якушев, В.В. Информационно-технологические основы прецизионного производства растениеводческой продукции: автореф. дисс.... д-ра с.-х. наук. /В.В. Якушев. — СПб. — АФИ. — 2013.
12. Якушев, В.П. Дифференцированное применение средств химизации при выращивании яровой пшеницы/ В.П. Якушев, П.В. Лекомцев, В.В. Воропаев // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. — 2017. — № 4. — С. 13–17.
13. Якушев, В.П. Перспективы «умного сельского хозяйства» в России/ В.П. Якушев, В.В. Якушев // Вестник РАН. — 2018. — № 9. Т. 88. — С. 773–784.
14. Якушев, В.П. О совершенствовании реализации агротехнологических решений в точном земледелии/ В.П. Якушев, В.В. Якушев, А.В. Конев и др. // Вестник российской сельскохозяйственной науки. — 2018. — № 1. — С. 13–17.
15. Якушев, В.П. Вариограммный анализ для обоснования технологий точного земледелия/ В.П. Якушев, Е.Е. Жуковский, В.В. Якушев // Вестник РАСХН. — 2009. — № 3. — С. 16–20.
16. Якушев, В.П. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства/ В.П. Якушев, Н.Н. Дубенок, Е.А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16. № 3. — С. 11–23. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
17. Kanash E.V., Osipov Y.A. Optical signals of oxidative stress in crops physiological state diagnostics // Precision agriculture. Wageningen, Netherlands. 2009. pp. 81–89.
18. 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: Precision Agriculture (ECPA 2017). 2017. 8:2. pp. 229–232.

LIST OF SOURCES

1. Bure, V.M. Metodologicheskie aspekty` statisticheskogo analiza v tochnom zemledelii/V.M. Bure // Doklady` RASXN. – 2007. – № 6. – S. 54–56.
2. Bure, V.M., A.F. Petrushin, V.V. Yakushev Avtomatizirovannaya sistema stoxasticheskogo vy`deleniya odnorodny`x texnologicheskix zon na sel'skoxozyajstvennom pole po danny`m urozhajnosti: sv-vo o gos. registracii programmy` dlya E`VM № 20008614663. Reg. 29.09.2008.
3. Bloxina, S.Yu. Primenenie distancionnogo zondirovaniya v tochnom zemledelii/S.Yu. Bloxina // Vestnik Rossijskoj sel'skoxozyajstvennoj nauki. – 2018. – № 5. – С. 10–16.
4. Kanash, E.V. Opticheskie karakteristiki list`ev yarovoj pshenicy pri deficite azota i vody/ E.V. Kanash, V.P. Yakushev, D.V. Rusakov, S.Yu. Bloxina, A.V. Kravczova // Vestnik Rossijskoj sel'skoxozyajstvennoj nauki. – 2017. – № 4. – S. 9–12.
5. Lekomcev, P.V. Nauchno-metodicheskoe obespechenie upravleniya produkcionny`m processom yarovoj pshenicy v sisteme tochnogo zemledeliya: avtoref. diss.... d-ra biol. nauk. /P.V. Lekomcev. – SPb. – AFI. – 2015.
6. Lupyan, E.A. Razvitie podxodov k postroeniyu informacionny`x sistem distancionnogo monitoringa/ E.A. Lupyan, M.A. Burcev, A.A. Proshin, D.A. Kobecz // Sovremenny`e problemy` distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2018. – T. 15. № 3. – S. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
7. Matveenko, D.A. Differencirovannoe vnesenie azotny`x udobrenij na osnove ocenki opticheskix karakteristk posevov yarovoj pshenicy: avtoref. diss.... kand. s.-x. nauk// D.A. Matveenko. – SPb. – AFI. – 2012.
8. Metodika otbora pochvenny`x prob po e`lementarny`m uchastkam polya v celyax differencirovannogo primeneniya udobrenij. M.: VNIIA, 2007. – 36 s.
9. Sidorova, V.A. Pochvenno-geograficheskaya interpretaciya prostranstvennoj variabel`nosti ximicheskix i fizicheskix svojstv poverxnostny`x gorizontov pochv stepnoj zony/ V.A. Sidorova, P.V. Krasil`nikov // Pochvovedenie. – 2007. – № 4. – S. 1–11.
10. Chasovskix, S.V. Specializirovannoe programmnoe obespechenie po realizacii sistem tochnogo zemledeliya/ S.V. Chasovskix, B.A. Telal, V.V. Yakushev // Materialy` nauchnoj sessii Agrofizicheskogo NII. – 2013. – S. 16–32.
11. Yakushev, V.V. Informacionno-texnologicheskie osnovy` precizionnogo proizvodstva rastenievodcheskoj produkcii: avtoref. diss.... d-ra s.-x. nauk. /V.V. Yakushev. – SPb. – AFI. – 2013.
12. Yakushev, V.P. Differencirovannoe primenenie sredstv ximizacii pri vy`rashhivanii yarovoj pshenicy/ V.P. Yakushev, P.V. Lekomcev, V.V. Voropaev // Vestnik Rossijskoj sel'skoxozyajstvennoj nauki. – 2017. – № 4. – S. 13–17.
13. Yakushev, V.P. Perspektivy` «umnogo sel'skogo xozyajstva» v Rossii/ V.P. Yakushev, V.V. Yakushev // Vestnik RAN. – 2018. – № 9. T. 88. – S. 773–784.
14. Yakushev, V.P. O sovershenstvovanii realizacii agrotexnologicheskix reshenij v tochnom zemledelii/ V.P. Yakushev, V.V. Yakushev, A.V. Konev i dr. // Vestnik Rossijskoj sel'skoxozyajstvennoj nauki. – 2018. – № 1. – S. 13–17.
15. Yakushev, V.P. Variogrammnny`j analiz dlya obosnovaniya texnologij tochnogo zemledeliya/ V.P. Yakushev, E.E. Zhukovskij, V.V. Yakushev // Vestnik RASXN. – 2009. – № 3. – S. 16–20.
16. Yakushev, V.P. Opy`t primeneniya i perspektivy` razvitiya texnologij distancionnogo zondirovaniya Zemli dlya sel'skogo xozyajstva/ V.P. Yakushev, N.N. Dubenok, E.A. Lupyan // Sovremenny`e problemy` distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2019. – T. 16. № 3. – S. 11–23. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
17. Kanash E.V., Osipov Y.A. Optical signals of oxidative stress in crops physiological state diagnostics // Precision agriculture. Wageningen, Netherlands. 2009. pp. 81–89.
18. 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: Precision Agriculture (ECPA 2017). 2017. 8:2. pp. 229–232.