

DOI:

**БАЗОВЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ И ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ
ВНУТРИПОЛЕВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ
СНИМКАМ И ОПТИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ**

А. Ф. Петрушин, Е. П. Митрофанов, Д. А. Матвеев, В. В. Якушев,
В. П. Якушев

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»

Целесообразность более широкого применения точного земледелия (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 заранее оценена. Принципиальное значение в данном вопросе имеет следующее обстоятельство. Традиционные приемы обычно предусматривают дифференциацию норм технологического воздействия от поля к полю, т. е. пространственная вариабельность условий формирования урожая учитывается только в пределах достаточной 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 целесообразен лишь в тех случаях, когда внутриполевое варьирование условий формирования урожая оказывает существенное влияние на общую картину неоднородности рассматриваемой сельскохозяйственной территории по тем же факторам урожайности. Внутриполевую изменчивость можно наблюдать практически на любом сельскохозяйственном поле, однако её агрономическая значимость не всегда очевидна. В связи с этим до настоящего времени остаются открытыми вопросы о том, какие преимущества представляет переход от управления по пространственно осредненным показателям по полю в целом (обычные технологии) к дифференцированной технологии воздействия по его отдельным квазиоднородным участкам (точное земледелие) и какие потери теоретически могут возникнуть по причине игнорирования пространственной

вариабельности агрохимических и агрофизических условий формирования урожая и физиологического состояния посева в пределах поля. Следовательно, объективно существующая вариабельность физиологического состояния посевов, окружающей среды, наличие латентных факторов, невозможность точного предсказания метеорологических условий, а также трудности учета других факторов, оказывающих значимое воздействие на агроценоз, приводят к необходимости разработки новых количественных подходов и методов обнаружения внутриполевой изменчивости условий формирования урожая [5].

Для применения ТЗ в производстве растениеводческой продукции после выявления существенного (агрономически значимого) внутриполевого варьирования условий формирования урожая необходимо выделить границы обнаруженной неоднородности. В результате выполнения данной процедуры происходит разделение заданного сельскохозяйственного поля на однородные (квазиоднородные) участки, в пределах которых варьируется норма технологического воздействия. В настоящее время не существует единой методологической платформы для решения указанной задачи. В настоящее время широко используется метод ТЗ для выделения границ внутриполевой неоднородности, основанный на отборе почвенных или растительных образцов в поле, последующих лабораторных исследованиях, анализе и интерпретации полученных данных. Как правило, это требует существенных временных и финансовых затрат. При этом возникает также множество вопросов: сколько образцов следует отбирать, с какой площади, с каким шагом, в какой степени пространственное варьирование будет учтено при выбранной схеме пробоотбора и определении показателей в лаборатории и т. д. [4].

Создание новых инструментов выделения границ внутриполевой неоднородности базируется на расширении возможностей использования спутниковых данных дистанционного зондирования (ДДЗ). Спутниковое дистанционное зондирование 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 признанным для обнаружения и последующего выделения границ внутриполевой неоднородности считается подход, базирующийся на сопряженной 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 ДДЗ. Опорная информация, получаемая с помощью беспилотников, имеет очень высокое пространственное разрешение и может быть получена в любое время на заданном сельскохозяйственном поле с тестовыми площадками, что позволяет наблюдать динамику физиологического состояния посева от всходов до уборки. ДДЗ, получаемые при помощи беспилотников, также целесообразно использовать для калибровки и валидации гиперспектральных спутниковых снимков [6].

Спутниковому дистанционному зондированию уделяется существенное внимание во всем мире. Его применение наиболее подходит для мониторинга больших территорий, используемых в сельском хозяйстве. Получаемая информация в основном предназначена для органов государственной власти, однако из-за сложностей в дешифрировании она практически не используется при управлении производством растениеводческой продукции в масштабе отдельных хозяйств и полей, что существенно ограничивает возможности применения технологии ТЗ.

Дефицит воды и ее неравномерное распределение по полю может значительно исказить результаты дистанционной оценки потребности растений в удобрениях. В связи с этим учеными АФИ было изучено изменение оптических характеристик растений при дефиците азота и воды. Исследования проводились в контролируемых условиях (руководитель работ доктор биол. наук. Е. В. Канаш) с целью исключения воздействия на растения других неблагоприятных факторов среды [2].

Таблица.

Измеряемый показатель	Индекс отражения	Расчетная формула	Влияние азота		Влияние засухи	
			η^2	ρ	η^2	ρ
Почвенная засуха 50% полной полевой влагоемкости						
Содержание хлорофилла	ChlRI	$\frac{(R_{750} - R_{705})}{(R_{750} + R_{705} - 2R_{445})}$	20	$1,4 \cdot 10^{-7}$	4	0,0147
Отношение между общим содержанием каротиноидов и общим содержанием хлорофилла	SIPI	$\frac{(R_{800} - R_{445})}{(R_{800} - R_{680})}$	2	0,0714	14	$7,6 \cdot 10^{-6}$
Показатель рассеяния света, который зависит от внутренней структуры листа	R_{800}	R_{800}	2	0,0452	28	$4,2 \cdot 10^{-11}$
Фотохимическая активность фотосинтетического аппарата. Позволяет оценить интенсивность тепловой диссипации.	PRI _{mod}	$0,3 - \left[\frac{(R_{570} - R_{531})}{(R_{570} + R_{531})} \right]$	15	$1,4 \cdot 10^{-7}$	30	$9,1 \cdot 10^{-14}$
Содержание антоцианов	ARI		1	0,8893	9	0,0007
	30% полной полевой влагоемкости					
Содержание хлорофилла	ChlRI	$\frac{(R_{750} - R_{705})}{(R_{750} + R_{705} - 2R_{445})}$	10	0,0001	17	$9,7 \cdot 10^{-8}$
Отношение между общим содержанием каротиноидов и общим содержанием хлорофилла	SIPI	$\frac{(R_{800} - R_{445})}{(R_{800} - R_{680})}$	1	0,3567	22	0,0004
Показатель рассеяния света, который зависит от внутренней структуры листа	R_{800}	R_{800}	2	0,020	67	$5,9 \cdot 10^{-37}$
Фотохимическая активность фотосинтетического аппарата. Позволяет оценить интенсивность тепловой диссипации	PRI _{mod}	$0,3 - \left[\frac{(R_{570} - R_{531})}{(R_{570} + R_{531})} \right]$	1	0,573	24	$2,3 \cdot 10^{-9}$
Содержание антоцианов	ARI		24	$0,7 \cdot 10^{-4}$	5	0,006
где: η^2 – сила факторного эффекта, ρ – уровень достоверности влияния фактора						

В результате проведенных исследований предложен 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. Результаты исследования были представлены на XI Европейской конференции

по точному земледелию (Эдинбург, 16–20 июля 2017 г.), и опубликованы в сборнике материалов конференции [1], а также в журнале «Вестник российской сельскохозяйственной науки» [3].

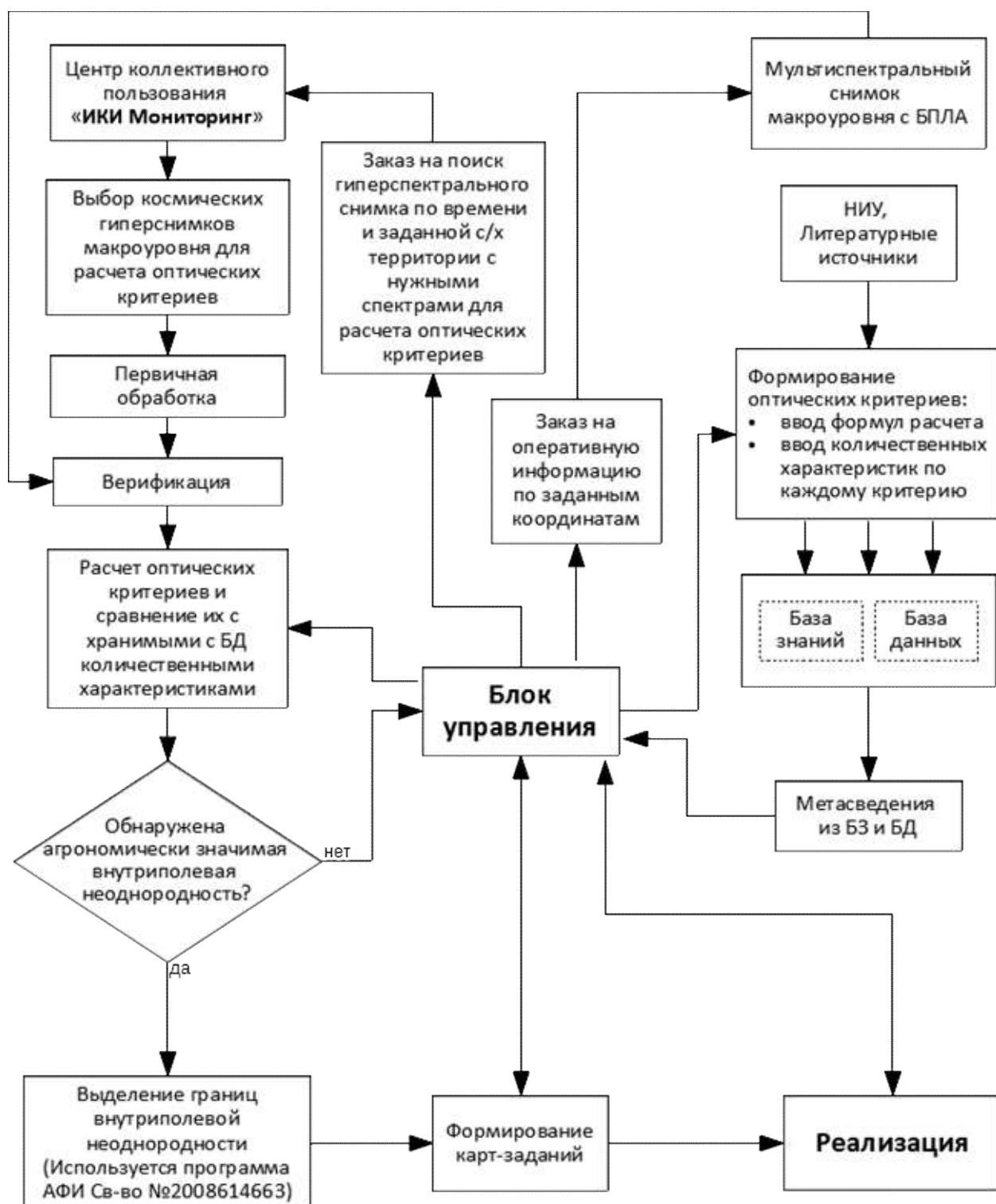


Рис. Укрупнённая блок-схема базового алгоритма по обнаружению и выделению границ внутриполевой изменчивости по спутниковым снимкам и оптическим критериям

Таким образом, предложен новый подход, свидетельствующий о перспективности применения оптических критериев для исследования ответной реакции растений на действие различных стрессоров и их комбинаций. Существенные различия оптических характеристик растений (таблица 1), испытывающих дефицит азота и воды, являются надежным обоснованием реализуемости алгоритма интерпретации (дешифрирования) спутниковых ДДЗ. Наличие подобной информации открывает широкие перспективы для автоматизации процесса дешифрирования спутниковых ДДЗ с целью обнаружения и выделения границ внутриполевой неоднородности в рамках технологий ТЗ. Реализация соответствующего алгоритма позволит не только обнаружить участок посева с угнетенными растениями, но и выявить стрессор, действие которого стало причиной угнетения.

На рисунке представлена укрупненная блок-схема базового алгоритма обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по гиперспектральным спутниковым снимкам и оптическим критериям.

Список литературы

1. 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*, 2017, 8(2), 229–232 (doi: 10.1017/S204047001700053X)
2. Канаш Е. В., Русаков Д. В., Осипов Ю. А., Кравцова А. В. Специфические и неспецифические изменения оптических характеристик листьев яровой пшеницы при дефиците азота и умеренной почвенной засухе // В книге: Экспериментальная биология растений: фундаментальные и прикладные аспекты Научная конференция и школа молодых ученых. Ответственный редактор В. В. Кузнецов. 2017. С. 186.
3. Канаш Е. В., Якушев В. П., Осипов Ю. А., Русаков Д. В., Блохина С. Ю., Кравцова А. В. Оптические характеристики листьев яровой пшеницы при дефиците азота и воды // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 4. С. 9–12.
4. Матвеев Д. А. Методические подходы для реализации дифференцированного внесения азотных удобрений в посевах яровой пшеницы // Агрофизика. 2012. № 2. С. 16–23.
5. Якушев В. В. Точное земледелие: теория и практика. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. 364 с.
6. Якушев В. П., Лекомцев П. В., Матвеев Д. А., Петрушин А. Ф., Якушев В. В. Применение дистанционного зондирования в системе точного земледелия // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2015. № 1. С. 23–25