DOI 10.33952/2542-0720-2019-3-19-64-76
УДК 631/635:632.08:633.1

Гулянов Ю. А.

МОНИТОРИНГ ФИТОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ СКАНИРОВАНИЯ ПОСЕВОВ

Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН) – обособленное структурное подразделение ФГБУН Оренбургского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ОФИЦ РАН)

Реферат. *Мониторинг фитометрических параметров агроценозов озимой пшеницы в современных «цифровых технологиях» необходим для оперативного управления ростом и развитием растений путем дифференциации норм технологического воздействия на различных участках поля в соответствии с их гетерогенностью. Цель исследования – выявление взаимосвязи вегетационного индекса (NDVI) с фитометрическими параметрами посредством сканирования посевов ручным сенсором Green Seeker Handheld Crop Sensor, Model HCS-100. Исследования проводили в 2018–2019 гг. на чернозёмах южных в зоне сухих степей Оренбургского Предуралья в посевах озимой мягкой пшеницы (Triticum aestivum L.) сорта Поволжская 86. Учеты и наблюдения осуществляли общепринятыми методами в соответствии с методическими указаниями Б. А. Доспехова и методикой государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Корреляционный и регрессионный анализ опытных данных проводили в Excel. Установлено, что динамика NDVI и изменение площади ассимиляционной поверхности агроценоза озимой пшеницы в течение вегетации связаны между собой. Одни и те же величины NDVI могут соответствовать как меньшей площади ассимиляционной поверхности посева в ранние фазы развития благодаря большей концентрации хлорофилла, так и большей площади в более поздние фазы, при снижении интенсивности зелёного окрашивания. Это обстоятельство необходимо учитывать при интерпретации вегетационного индекса, особенно при дешифрировании космических снимков, полученных в разновозрастных посевах. Результаты корреляционного анализа указывают на наличие между приведёнными параметрами посева в целом за вегетацию сильной прямой линейной связи (r = 0,84), описываемой уравнением регрессии y = 30266x + 1252, где y – площадь ассимиляционной поверхности, м²/га; x – вегетационный индекс. Выявленные зависимости могут быть использованы для оценки состояния посева, оперативного управления ростом и развитием растений, а также как основа более детальной интерпретации спутниковых снимков.*

Ключевые слова: *площадь ассимиляционной поверхности, сканирование посевов, ручной сенсор Green Seeker Handheld, вегетационный индекс (NDVI), Triticum aestivum L., озимая мягкая пшеница.*

Введение

Оренбургское Предуралье – аграрный регион, занимающий в РФ одно из ведущих мест по производству многих видов растениеводческой продукции. Важнейшей предпосылкой дальнейшего развития растениеводства на указанной территории является адаптация приёмов возделывания высокоурожайных сортов к современным климатическим и почвенным условиям, а также всесторонняя забота о сохранении окружающей среды и биологического разнообразия. Широкие возможности перевода регионального земледелия на путь сбалансированного и рационального природопользования, открывает разработка научных основ и

методов применения интеллектуальных «цифровых технологий». Интеграция таких технологий в ландшафтно-адаптивное земледелие может стать основой производства экологически чистой продукции, исключения экологических катастроф и сохранения уникальной степной биоты. На первоначальном этапе освоения интеллектуальных технологий особую актуальность приобретает мониторинг посевов сельскохозяйственных культур с использованием инновационных методов контроля фитометрических параметров, выделение локальных областей с выраженной неоднородностью и аномально низкой урожайностью, накопление сведений о распределении, установление причин образования и проведение мероприятий по их оптимизации щадящими нормами технологического воздействия.

При площади посева сельскохозяйственных культур в Оренбургской области порядка 4,22 млн га для более оперативного решения указанных задач перспективна реализация современных методов дистанционного зондирования полей (ДДЗ) с помощью наземных или воздушных измерительных устройств, базирующихся на спутниках или беспилотных летательных аппаратах.

Идеи использования ДДЗ-данных, полученных с помощью информационно-космических технологий, в сельскохозяйственной области впервые нашли своё применение в середине 70-х годов прошлого века. С тех пор совершенствование существующих методов позволило значительно расширить спектр решаемых задач исходя из результатов анализа систематически повторяющихся съёмок, которые обеспечивают наблюдение за динамикой роста и развития сельскохозяйственных культур в процессе вегетации и могут быть использованы для прогнозирования их урожайности или других целей [1]. Выявленные при дешифрировании снимков спектральные различия отдельных территорий могут ещё использоваться для идентификации сельскохозяйственных культур, определения площадей их возделывания, а также для определения факторов, влияющих на биопродуктивность посевов [2]. Знание динамики спектральной яркости растительности в течение вегетационного периода даёт возможность по цветовой насыщенности изображения судить об агротехническом состоянии полей, в частности об обеспеченности элементами минерального питания или о степени поражения растений патогенами. По различию в цвете здоровых и погибших растений можно оценить состояние озимых культур после перезимовки, а также определить состояние посевов в течение вегетации по степени покрытия поверхности почвы и её равномерности [3].

По свидетельству отечественных и зарубежных исследователей, современные средства зондирования Земли позволяют получать оперативную и достоверную информацию о текущем состоянии сельскохозяйственных культур. Доступными для использования остаются и многолетние ряды данных предшествующих измерений. При мониторинге посевов на больших территориях более удобно использование снимков со спутниковых систем NASA Terra и Agua (спектрорадиметр MODIS), ведущих съёмку полосы шириной в 2330 км и позволяющих получать изображение интересующей территории со средним пространственным разрешением несколько раз в сутки [4]. При работе с небольшими объектами в виде отдельных полей или для проведения исследований, требующих ещё большей детальности, более достоверные данные с высоким пространственным разрешением обеспечивают снимки спутниковых систем Landsat и Huperion. На основании полученной информации, с использованием программных комплексов ГИС, включая российские разработки, возможно построение векторных схем внутрихозяйственного землеустройства, на которых отображаются поля, населённые пункты, дороги, водоёмы, лесные колки. Осуществляется деление полей на участки и закрепление

внутри них реперных точек с «персональными» именами. Эти точки в дальнейшем используют для автоматической оценки состояния посева в динамике, в том числе наземными средствами [5].

В качестве информационного показателя мониторинга посевов по степени развития, состоянию и продуктивности, чаще других используют нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), представляющий собой количественную характеристику фотосинтетически активной растительной биомассы на отдельных участках агроценоза [6]. Этот индекс – один из самых распространённых для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова.

NDVI может быть рассчитан на основе любых снимков высокого, среднего или низкого разрешения, имеющих каналы в красном (0,55–0,75 мкм) и инфракрасном диапазоне (0,75–1,00 мкм). Алгоритм расчета NDVI встроен практически во все распространённые пакеты программного обеспечения, связанные с обработкой данных дистанционного зондирования, например, такие как Arc View Image Analysis, ERDAS Imagine, ENVI, Ermapper, Scanes MODIS Processor, Scan Viev [3].

Как показывает практика, полноценный мониторинг сельскохозяйственных культур требует регулярного сбора больших объёмов данных дистанционного зондирования земли, позволяющих достаточно объективно оценить состояние растительности или спрогнозировать урожайность. В то же время для установления связей между характеристиками космических снимков и фактическим состоянием растительности требуется проведение контрольных измерений фитометрических параметров посева на тестовых полях или их участках [5, 7].

В этом отношении высока целесообразность применения прогрессирующих в последние годы технологий использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и наземных измерительных устройств. При таком подходе спутниковые данные используют для составления общей информации о состоянии посевов и проведения мониторинга на больших территориях, а данные, полученные с БПЛА и от наземных измерительных устройств, применяют для оперативного реагирования на изменение качественного состояния посевов сельскохозяйственных культур, составления прогноза их развития и формирования урожайности. Такие данные, меньше зависящие от «капризов» погоды в виде облачности, тумана или повышенной влажности, часто затеняющих спутниковые снимки, можно получать с необходимой периодичностью, в том числе и по фазам вегетации растений, к которым приурочены многие агротехнические приёмы, например, обработка гербицидами посевов зерновых культур в фазе кущения.

Общеизвестно, что фотосинтетическая деятельность растений в посевах – биологическая основа урожая сельскохозяйственных культур. Наилучшие условия для эффективного использования солнечной энергии в фотосинтезе достигаются при быстром развитии фитометрических параметров посева [8]. Более того, классик теории фотосинтеза А. А. Ничипорович утверждает, что урожайность полевых культур находится в тесной связи с площадью ассимиляционной поверхности. Важно при этом, чтобы ассимиляционная поверхность в посевах росла, достигала оптимальной величины и долго сохранялась в активном состоянии [9].

В наших предыдущих исследованиях, проведенных в 2008–2011 гг. в учебно-опытном поле ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет» в севообороте, расположенном в типичных для степной зоны Оренбургского Предуралья условиях, установлено, что фотосинтетическая продуктивность растений напрямую связана с условиями произрастания. Так, использование

приёмов повышения и реализации биоресурсного потенциала агроценозов озимой пшеницы, таких как оптимизация сроков посева и норм высева семян, использование адаптивных сортов, приспособление режимов минерального питания растений к агроклиматическим ресурсам зоны возделывания, оказывают положительное влияние на формирование площади листьев и фотосинтетического потенциала в посевах и создают благоприятные условия для более эффективного поглощения солнечной энергии, а следовательно, и формирования урожая [10]. О влиянии условий выращивания на фотосинтетические параметры посевов, изменение их оптико-биологических свойств, свидетельствуют и другие отечественные и зарубежные учёные, указывающие на необходимость проведения исследований по изучению связи вегетационного индекса посевов (NDVI) с площадью ассимиляционной поверхности и продуктивностью озимой пшеницы [11–14].

В связи с этим, сканирование посевов наземными измерительными устройствами для оперативного мониторинга фотосинтетической продуктивности агроценозов – актуальное научное направление. Практическая значимость подобных исследований заключается и в перспективности более детальной интерпретации спутниковых снимков с помощью выявленных зависимостей вегетационного индекса (NDVI) и фитометрических параметров посевов, возможности использования ДДЗ для контроля продукционного процесса в агроценозах и принятия решений по корректировке агротехнологий путём дифференциации норм технологического воздействия.

Использование экспериментальных данных с целью усовершенствования и адаптации агротехнических приёмов, повышения фотосинтетической активности агроценозов в интеллектуальных «цифровых технологиях», может стать одним из путей увеличения продуктивности посевов в Оренбургском Предуралье при щадящей нагрузке на степные агроландшафты.

Цель исследований – выявление взаимосвязи вегетационного индекса (NDVI) как объективной характеристики оптических свойств посева с фитометрическими параметрами агроценоза озимой пшеницы в условиях сухих степей Оренбургского Предуралья, посредством наземного сканирования ручным сенсором Green Seeker Handheld Crop Sensor, Model HCS-100 (Trimble, USA).

Для выполнения цели поставлены следующие задачи:

– определить фитометрические параметры посевов озимой пшеницы (высота растений, площадь ассимиляционной поверхности, плотность и структура стеблестоя) по основным фазам развития с использованием общепринятых методов;

– определить вегетационный индекс посевов (NDVI) на закреплённых реперных участках по основным фазам развития озимой пшеницы с использованием портативного устройства (ручной сенсор) Green Seeker Handheld Crop Sensor, Model HCS - 100 (Trimble, USA);

– провести статистическую обработку полученных данных методами корреляционного и регрессионного анализа, выразить выявленные зависимости в графическом виде и в виде уравнений регрессии;

– обосновать практическую значимость полученных результатов и перспективу продолжения научных исследований.

Материалы и методы исследований

Исследования проводили в 2018–2019 гг. на чернозёмах южных центральной зоны Оренбургской области в зоне сухих степей Оренбургского Предуралья, представляющего собой наклонённую к западу, сильно расчленённую врезами и долинами рек эрозионно-денудационную равнину. Годовая сумма эффективных температур в зоне исследований составляет 2627 °С, со средней температурой

самого тёплого месяца (июль) 21,9 °С и самого холодного (январь) – –14,8 °С. Глубина промерзания почвы находится в пределах 100–120 см при высоте снежного покрова около 28 см, а индекс континентальности климата составляет 215 единиц. За год выпадает 360–370 мм осадков, из которых около 130 мм (35,4 %) приходится на тёплый период года (май–август). В целом зона исследований выделяется недостаточным и неустойчивым атмосферным увлажнением, для неё характерна продолжительная, морозная и не всегда снежная зима, короткая весна с быстрым переходом в жаркое засушливое лето и продолжительная тёплая и сухая осень. В отличие от влагообеспеченности, температурный режим указанной территории и солнечная радиация практически не лимитируют формирование урожая традиционных полевых культур.

Почва опытного участка – чернозём южный среднемощный карбонатный тяжелосуглинистый с содержанием гумуса в пахотном слое почвы – 3,8 %, подвижного азота (NO_3^-) – 1,35 г/100 г почвы, легкогидролизуемого азота – 8,4 мг, подвижного фосфора (P_2O_5) – 3,25 мг, обменного калия (K_2O) – 27,0 мг/100 г почвы.

Метеорологические условия периода исследований характеризовались, по сравнению со среднемноголетними значениями, повышенной температурой воздуха в весенне-летне-осенние месяцы и острым дефицитом влаги, особенно в предшествующий посеву и появлению всходов период, что значительно снижало дружность и полноту всходов. Так, в среднем за годы исследований за четыре тёплых месяца выпало только 78,5 мм осадков, что ниже среднемноголетнего количества на 51,5 мм и составляет только 60,4 % от нормы. Самыми засушливыми месяцами оказались июнь, когда выпало 19 мм осадков или 52,7 % от нормы, июль – 19,7 мм или 51,8 % и август – 9,8 мм или 31,6 % от нормы.

Исследования проводили в производственных посевах озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Поволжская 86, возделываемой по общепринятой в зоне технологии.

Для оперативного мониторинга агроценозов путём измерения вегетационного индекса посевов (NDVI) использовали портативное устройство (ручной сенсор) Green Seeker Handheld Crop Sensor, Model HCS – 100 (Trimble, USA).

Принцип работы указанного устройства заключается в излучении на интересующий объект импульсов красного и инфракрасного света и измерения количества отражённого света. Указанные значения измеряются в условных единицах, изменяющихся в диапазоне от 0,00 до 0,99. Интерпретация вегетационного индекса посева (NDVI) основана на общепризнанных зависимостях следующих параметров: поглощение электромагнитных волн в красной области спектра связано с содержанием в растениях зелёных пигментов; отражение электромагнитных волн в ближней инфракрасной области спектра связано с площадью фотосинтезирующей поверхности посева; площадь ассимиляционной поверхности пропорциональна общей биомассе растений.

Для получения достоверных результатов многократное сканирование биомассы озимой пшеницы проводили в границах реперных точек, закреплённых на местности в системе координат с помощью портативного мини-навигатора, располагая измерительное устройство на постоянной высоте – 60–70 см над растениями.

Площадь ассимиляционной поверхности растений определяли общепринятым весовым методом с использованием электронных весов (Electronic balance, Type CBL 2200H) с точностью измерения 0,01 г. Растительные образцы для оценки фитометрических параметров посевов отбирали в четырёхкратной повторности с площадок 0,25 м^2. Фенологические наблюдения, подсчет густоты

стояния растений и другие сопутствующие наблюдения проводили в соответствии с методикой государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [16].

Корреляционный и регрессионный анализ опытных данных проводили в Microsoft Office Excel. Для оценки тесноты (силы) связи использовали градацию Б. А. Доспехова: при значениях коэффициента корреляции (r) меньше 0,3 – зависимость между признаками считали слабой, в диапазоне от 0,3 до 0,7 – средней и больше 0,7 – сильной [15].

Результаты и их обсуждение

В предшествующих исследованиях (2017–2018 гг.) нами установлено, что в условиях засушливой степи Оренбургского Предуралья использование оптического устройства Green Seeker Handheld Crop Sensor, Model HCS –100 (Trimble, USA) позволяет оценить гетерогенность посевов и прогнозировать потенциальную урожайность озимой пшеницы по вегетационному индексу (NDVI) в фазе колошения. Отклонение фактической урожайности зерна от прогнозируемой по индексу NDVI составило 0,1–0,16 т/га или 4,4–7,2 %, что допустимо при подобном роде прогнозов.

Мониторинг фитометрических параметров производственных посевов озимой пшеницы в настоящих исследованиях (2018–2019 гг.) показал, что при естественном плодородии чернозёма южного и сложившейся гетерогенности почвенного и растительного покрова, обусловленной климатическими, почвенными, географическими, биологическими и технологическими факторами, высота растений и площадь ассимиляционной поверхности подвержены колебаниям как по фазам развития растений, так и в пределах различных элементарных участков поля. Наиболее значительные изменения приведённых параметров отмечены в фазу весеннего кущения, когда варьирование высоты растений составило около 3 см (27,2 %), а площадь ассимиляционной поверхности при средней величине 9268 тыс. м^2/га находилась в пределах от 6905 до 11800 тыс. м^2/га, с коэффициентом вариации 70,8 %. Это связано со значительной пестротой растительного покрова ввиду критической засушливости осеннего периода, вызвавшей неравномерность всходов, почвенной неоднородностью, разным качеством агротехнических мероприятий и неравномерностью перезимовки растений на различных участках поля. Вегетационный индекс посева в этой фазе по элементарным участкам поля изменялся от 0,22 до 0,46 единиц, с самым значительным коэффициентом вариации за весь период вегетации – 104,3 %.

К фазе выхода в трубку, при достаточной весенней влагообеспеченности, благодаря более высокому коэффициенту продуктивного кущения на участках поля с разреженной растительностью, варьирование площади ассимиляционной поверхности стало менее выраженным, коэффициент вариации снизился до 67,3 %, а NDVI) составил в среднем 0,46 (таблица).

Максимального развития ассимиляционная поверхность посева озимой пшеницы достигла в фазе колошения, её площадь на отдельных элементарных участках поля изменялась от 14940 до 23236 тыс. м^2/га с самым низким за вегетацию коэффициентом варьирования – 55,5 %.

В указанную дату растения достигли максимальной за вегетацию высоты, которая в среднем составила 52 см, а прирост, по сравнению с фазой выхода в трубку, составил 12 см или 30,0 %. Вегетационный индекс посева изменился меньше (0,48), то есть прибавка составила 0,02.

Таблица – Динамика вегетационного индекса (NDVI) и фитометрических показателей агроценоза озимой пшеницы на чернозёмах южных Оренбургского Предуралья (среднее за 2018–2019 гг.)

Фаза развития	Вегетационный индекс (NDVI)	Высота растений (H), см	Площадь ассимиляционной поверхности (Sл), тыс. м²/га	Коэффициент корреляции		
				r_1, (NDVI – Sл)	r_2, (NDVI – H)	r_3, (H – Sл)
Весеннее кущение	0,33	12	9268	0,81	0,61	0,65
Выход в трубку	0,46	40	14735	0,90	0,91	0,66
Колошение	0,48	52	18826	0,93	0,96	0,92
Завершение цветения	0,32	52	12000	0,86	0,82	0,92
Налив зерна	0,28	52	8528	0,69	0,65	0,88
Коэффициент корреляции r_1 (NDVI-Sл), в целом за вегетацию – 0,84						
Коэффициент корреляции r_2 (NDVI-H), в целом за вегетацию – 0,34						
Коэффициент корреляции r_3 (H-Sл), в целом за вегетацию – 0,48						

В последующие фазы вегетации, связанные с формированием генеративных органов, оттоком пластических веществ из листьев и стеблей в зерно, площадь ассимиляционной поверхности заметно снизилась. Так, к завершению цветения она составила 12000 тыс. м²/га, а в период молочно-восковой спелости зерна находилась на уровне 8528 тыс. м²/га. Вегетационный индекс посева также снизился и составил 0,32 при завершении цветения и 0,28 – в период молочно-восковой спелости зерна.

Следует отметить, что в ходе наших исследований не выявлено прямой пропорциональной зависимости между изменением площади ассимиляционной поверхности посевов озимой пшеницы в течение вегетации и вегетационным индексом.

Так, при возрастании площади ассимиляционной поверхности посева в фазе выхода в трубку с 9268 до 14735 тыс. м²/га (на 5467 тыс. м²/га или 59,0 %), по сравнению с фазой весеннего кущения, NDVI изменился на 0,13 или 39,3 %. В фазе колошения средняя площадь ассимиляционной поверхности увеличилась ещё на 4091 тыс. м²/га (27,7 %), а вегетационный индекс прибавился на 0,02 или 4,3 %. В фазы завершения цветения и налива зерна поэтапное снижение площади ассимиляционной поверхности на 6826 тыс. м²/га (36,3 %) и 3472 тыс. м²/га (29,0 %) сопровождалось снижением вегетационного индекса на 0,16 (33,3 %) и 0,04 (12,5 %) соответственно.

Установлено, что в фазе кущения озимой пшеницы каждой 0,01 единицы значения NDVI соответствует площадь ассимиляционной поверхности 280,8 м²/га. В фазу выхода в трубку увеличение вегетационного индекса на указанную величину наблюдали при увеличении площади ассимиляционной поверхности на 320,3 м²/га, а в фазе колошения – на 392,2 м²/га, что выше, чем в фазе весеннего кущения на 14,1 –39,7 % соответственно. В последующие этапы развития растений величина этого показателя несколько снижалась, но оставалась выше начальных значений на 23,2–94,2 м²/га или 8,3–33,5 %.

Указанные проявления следует связывать с изменением интенсивности зелёного окрашивания растений в процессе «взросления» и последующего «старения», поскольку максимальная концентрация хлорофилла, а, следовательно, и интенсивность зелёной окраски, отмечены в начальные фазы вегетации. Далее происходит так называемое и часто упоминаемое в научной литературе «ростовое разбавление», которое сопровождается уменьшением количества зелёных пигментов в единице биомассы и осветлением растений. Как следствие, NDVI,

определяемый сканирующим устройством по количеству зависящего от интенсивности зелёной окраски отражённого красного и инфракрасного света, при той же плотности биомассы уменьшается.

На наш взгляд, это обстоятельство необходимо учитывать при интерпретации вегетационного индекса посева, особенно при дешифрировании космических снимков разновозрастных посевов наблюдаемой культуры (сорта). Ведь одни и те же величины NDVI могут соответствовать как меньшей продуктивности фитомассы посева в ранние фазы развития из-за большей концентрации хлорофилла, так и большей продуктивности фитомассы в более поздние фазы развития при снижении интенсивности зелёного окрашивания (рисунок 1).

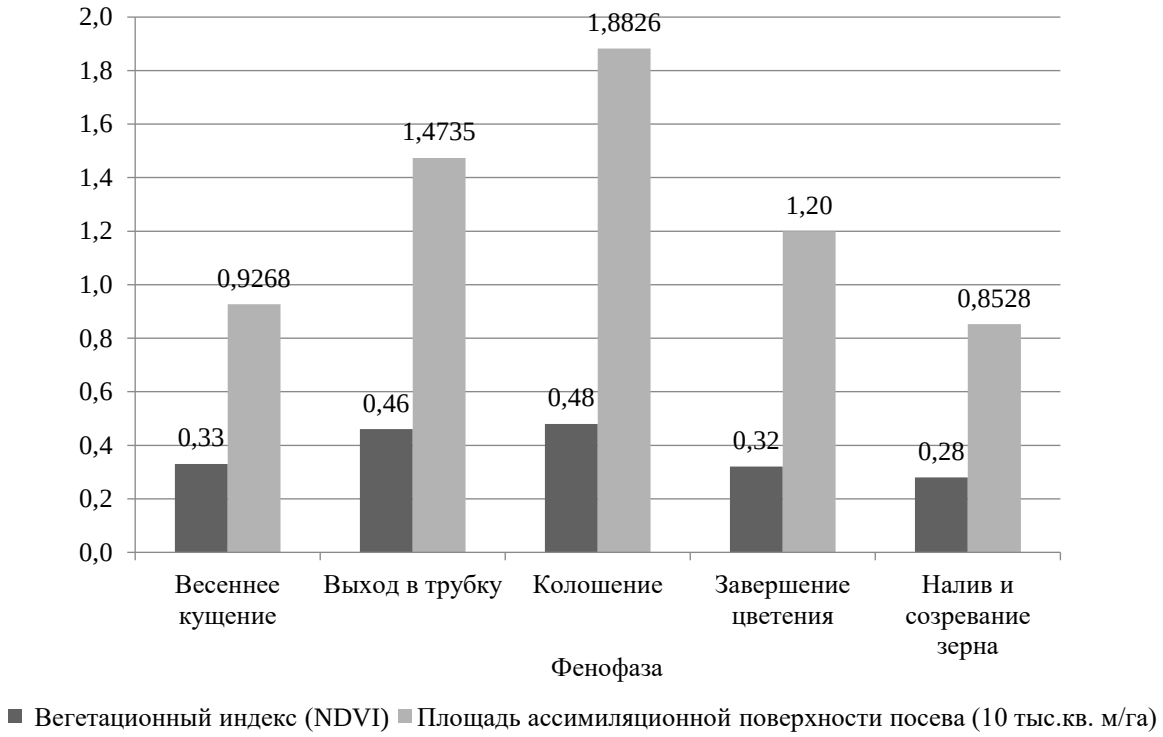

Рисунок 1 – Динамика вегетационного индекса (NDVI) и площади ассимиляционной поверхности посева озимой пшеницы по фазам развития (среднее за 2018–2019 гг.)

В результате проведённого корреляционного анализа установлено наличие прямой линейной связи между площадью ассимиляционной поверхности и вегетационным индексом (NDVI) посева озимой пшеницы (рисунок 2).

Коэффициент корреляции в целом за вегетацию составил 0,84, что свидетельствует о наличии сильной связи, описываемой уравнением регрессии (1):

$$y = 30266x + 1252 \quad (1)$$

где y – площадь ассимиляционной поверхности, $м^2$/га;

x – вегетационный индекс (NDVI).

Коэффициент детерминации (R^2) указывает на зависимость величины вегетационного индекса посева (NDVI) от динамики площади ассимиляционной поверхности посева озимой пшеницы в 70,6 % случаев.

В разрезе отдельных фаз развития между приведёнными параметрами посева выявлено варьирование силы связи от средней (r = 0,70) в фазе налива зерна, до сильной (r = 0,80–0,93) в предшествующие периоды вегетации.

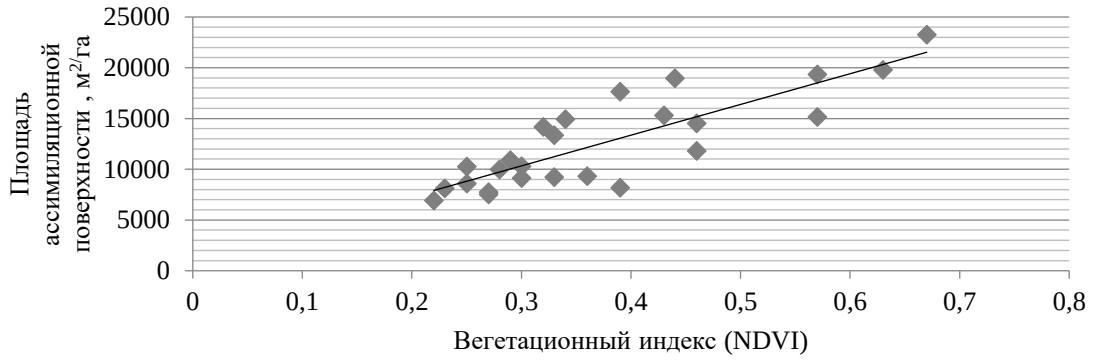

Рисунок 2 – Взаимосвязь между площадью ассимиляционной поверхности и вегетационным индексом (NDVI) агроценоза озимой пшеницы (среднее за 2018–2019 гг.)

Наиболее же сильная связь между вегетационным индексом и площадью ассимиляционной поверхности отмечена в фазе колошения (r = 0,93). Указанная зависимость описывается уравнением регрессии (2):

$$y = 20813x + 8798 \quad (2)$$

Корреляционная связь между высотой растений озимой пшеницы и вегетационным индексом посева в периоды максимального развития листостебельной массы оказалась сильной, с максимальной силой связи (r = 0,93) в фазу колошения. В целом же за вегетацию, ввиду значительной динамики высоты растений, связь оказалась слабой, с коэффициентом корреляции 0,34, свидетельствующим о зависимости одного параметра от другого только в 11,6 % случаев.

Несколько иная зависимость (см. таблицу), с сильной связью в период максимального развития листостебельной массы (r = 0,92) и в фазе налива зерна (r = 0,88) и средней – до фазы колошения (r = 0,65–0,66), выявлена между высотой растений и площадью ассимиляционной поверхности. В целом за вегетацию связь оказалась средней, с коэффициентом корреляции 0,48, свидетельствующим о зависимости одного параметра от другого только в 23,0 % случаев.

В результате проведённых исследований также выявлено наличие прямой линейной связи между количеством продуктивных стеблей озимой пшеницы в фазу колошения и NDVI (рисунок 3).

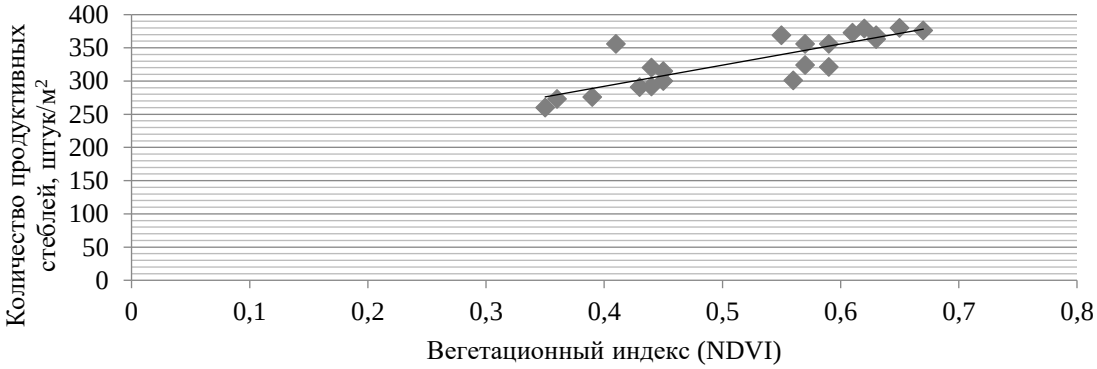

Рисунок 3 – Взаимосвязь между количеством продуктивных стеблей и вегетационным индексом (NDVI) агроценоза озимой пшеницы в фазе колошения (среднее за 2018-2019 гг.)

Коэффициент корреляции между указанными параметрами в целом за вегетацию был равен 0,81, что указывает на наличие сильной связи, описываемой уравнением регрессии (3):

$$y = 318,7x + 164,6 \quad (3)$$

где y – количество продуктивных стеблей, шт./м^2;

x – вегетационный индекс (NDVI).

Коэффициент детерминации (R^2) свидетельствует о зависимости величины вегетационного индекса посева от количества продуктивных стеблей пшеницы в фазе колошения в 69,3 % случаев.

Таким образом, проведённые в степной зоне Оренбургского Предуралья исследования, позволили выявить сильную линейную связь между площадью ассимиляционной поверхности озимой пшеницы и вегетационным индексом посева (NDVI) до фазы налива зерна, а также между NDVI и количеством продуктивных стеблей в фазу колошения. Установлено, что использование инновационных методов сканирования посевов с помощью оптического устройства Green Seeker Handheld Crop Sensor, Model HCS-100 позволяет проводить оперативный и достоверный мониторинг фитометрических параметров посевов.

Выводы

Динамика вегетационного индекса (NDVI) и изменение площади ассимиляционной поверхности агроценоза озимой пшеницы в течение вегетации находятся в корреляционных связях. Одни и те же значения вегетационного индекса посева (NDVI) могут соответствовать как меньшей площади ассимиляционной поверхности посева в ранние фазы развития за счёт большей концентрации хлорофилла, так и большей площади – в более поздние фазы развития, при снижении интенсивности зелёного окрашивания. Это обстоятельство необходимо учитывать при интерпретации вегетационного индекса, особенно при дешифрировании космических снимков, полученных в разновозрастных посевах.

Корреляционный анализ экспериментальных данных в целом за вегетацию указывает на наличие между площадью ассимиляционной поверхности и NDVI посева сильной прямой линейной связи (r = 0,84). Наиболее же сильная связь между указанными параметрами отмечена в фазе колошения (r = 0,93), когда изменение одного из указанных параметров сопровождается изменением другого в 87,9 % случаев. Зависимость описывается уравнением регрессии y = 20813x + 8798, где y – площадь ассимиляционной поверхности, м^2/га; x – вегетационный индекс.

Количество продуктивных стеблей озимой пшеницы и вегетационный индекс посева в фазу колошения также связаны сильной прямой линейной связью (r = 0,81), наблюдаемой в 69,3 % случаев и описываемой уравнением регрессии y = 318,7x + 164,6, где y – количество продуктивных стеблей, шт./м^2; x – вегетационный индекс (NDVI).

Выявленные зависимости могут быть использованы для оценки состояния и оперативного управления ростом и развитием растений путем дифференциации норм технологического воздействия на различных участках поля и положены в основу более детальной интерпретации спутниковых снимков.

В данной статье представлены материалы продолжающихся исследований по научному обоснованию и поиску практических приемов адаптации элементов «цифровых технологий» в ландшафтно-адаптивное земледелие степной зоны Оренбургского Предуралья. Указанные исследования развиваются в направлении конвергенции ДДЗ и результатов мониторинга посевов портативными измерительными устройствами с активными источниками излучения (сенсорами), с

учетом видовых (сортовых) и возрастных оптических особенностей полевых культур. Они станут основой рекомендаций и on-line справочников по дифференциации норм технологического воздействия на различных участках поля для конкретных почвенно-климатических условий региона, в зависимости от физиологического состояния растений (в том числе обеспеченности элементами минерального питания), гетерогенности почвенного и растительного покрова, засорённости, заражённости болезнями, заселённости вредителями и др.

Статья подготовлена по теме НИР Института степи УрО РАН: «Степи России: ландшафтно-экологические основы устойчивого развития, обоснование природоподобных технологий в условиях природных и антропогенных изменений окружающей среды», № ГР АААА-А17-117012610022-5.

Литература

1. Tucker C. J., Holben B. N., Elgin J. H., Mc Murtrey J. E. Relationships of spectral data to grain yield variation // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1980. Vol. 46. P. 657–666.
2. Дунаева Е. А., Ёлкина Е. С., Барталёв С. А., Плотников Д. Е., Вечерков В. В., Головастова Е. С. Особенности идентификации посевов озимых зерновых средствами дистанционного зондирования земли // Таврический вестник аграрной науки. 2018. № 4 (16). С. 18–31.
3. NDVI – теория и практика. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://gis-lab.info/qa/ndvi.html (дата обращения 06.06.2019).
4. Alcantara C., Kuemmerle T., Prishchepov A. V., Radeloff V. C. Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 124. P. 334–347.
5. Сахарова Е. Ю., Сладких Л. А., Захватов М. Г. Спутниковый мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности зерновых культур на юге Западной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 4. № 1. С. 66–71.
6. Wall L., Larocque D., Leger P. M. The early explanatory power of NDVI in crop yield modeling // International Journal of Remote Sensing. 2007. Vol. 29. P. 2211–2225.
7. Ерошенко Ф. В., Сторчак И. Г., Шестакова Е. О. Площадь ассимиляционной поверхности и NDVI посевов озимой пшеницы // Земледелие. 2015. № 7. С. 37–39.
8. Стукалов Р. С. Эффективность возделывания озимой пшеницы в зависимости от технологии в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края // Таврический вестник аграрной науки. 2016. № 2 (6). С. 107–121.
9. Ничипорович А. А. Фотосинтетическая деятельность растений и пути повышения их продуктивности // Теоретические основы фотосинтетической продуктивности. М.: Наука, 1972. С. 511– 526.
10. Гулянов Ю. А., Досов Д. Ж. Особенности формирования площади листьев и фотосинтетического потенциала при различном сочетании приёмов удобрения озимой пшеницы на чернозёмах южных Оренбургского Предуралья // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2014. № 3 (47). С. 26–29.
11. Линков С. А., Акинчин А. В., Донченко И. С., Попов А. А. Использование методов дистанционного зондирования для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2018. № 3 (19). С. 92–97.
12. Mulla D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps // Biosystems engineering. 2013. No. 4. P. 358–371.
13. Skakun S., Justice C. O., Roger J. C., Vermote E. Transitioning from MODIS to VIIRS: an analysis of inter-consistency of NDVI data sets for agricultural monitoring // International Journal of Remote Sensing. 2018. Vol. 39. No. 4. P. 971–992.
14. Whitcraft A. K., Becker-Reshef I., Justice C. O. A Framework for defining spatially explicit Earth observation requirements for a global agricultural monitoring initiative (GEOGLAM) // Remote Sensing. 2015. Vol. 7. No. 2. P. 1461–1481.
15. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
16. Доспехов Б. А., Васильев И. П., Туликов А. М. Практикум по земледелию. М.: Агропромиздат, 1987. 383 с.
17. Дубинин М. Получение бесплатных космических снимков Landsat TM, ETM+ через Glovis // GIS-Lab, 2011. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://gis-lab.info/qa/landsat-glovis.html (дата обращения: 10.06.2019).

References

1. Tucker C. J., Holben B. N., Elgin J. H., Mc Murtrey J. E. Relationships of spectral data to grain yield variation // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1980. Vol 46. P. 657–666.
2. Dunaieva Ie. A., Elkina E. S., Plotnikov D. E., Bartalev S. A., Vecherkov V. V., Golovastova E. S. Features of winter grain crops identification by means of remote sensing // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2018. No. 4 (16). P. 18–31.
3. NDVI – theory and practice. [Electronic resource]. Access point: http://gis-lab.info/qa/ndvi.html (reference's date: 06.06.2019).
4. Alcantara C., Kuemmerle T., Prishchepov A. V., Radeloff V. C. Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 124. P. 334–347.
5. Sakharova E. Yu., Sladkikh L. A., Zakhvatov M. G. Satellite monitoring of crops and forecasting the yield of grain crops in the south of Western Siberia // Interexpo Geo-Siberia. 2014. Vol. 4. No. 1. P. 66–71.
6. Wall L., Larocque D., Leger P. M. The early explanatory power of NDVI in crop yield modeling // International Journal of Remote Sensing. 2007. Vol. 29. P. 2211–2225.
7. Eroshenko F. V., Storchak I. G., Shestakova E. O. Area of assimilative surface and NDVI of winter wheat crops // Zemledelie. 2015. No. 7. P. 37–39.
8. Stukalov R. S. Efficiency of winter wheat cultivation depending on technology in the zone of unstable moistening of Stavropol Krai // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2016. No. 2 (6). P. 107–121.
9. Nichiporovich A. A. Photosynthetic activity of plants and ways to increase their productivity // Theoretical foundations of photosynthetic productivity. Moscow: Nauka, 1972. P. 511–526.
10. Gulyanov Yu. A., Dosov D. Zh. Peculiarities of leaf surface and the photosynthetic potential formation as result of using different methods of winter wheat fertilization on southern chernozems of Orenburg Perduralye//Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2014. No. 3 (47). P. 26–29.
11. Linkov S. A., Akinchin A. V., Donchenko I. S., Popov A. A. The use of remote sensing techniques to assess the condition of agricultural crops// Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives. 2018. No. 3 (19). P. 92–97.
12. Mulla D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps // Biosystems engineering. 2013. No. 4. P. 358–371.
13. Skakun S., Justice C. O., Roger J. C., Vermote E. Transitioning from MODIS to VIIRS: an analysis of inter-consistency of NDVI data sets for agricultural monitoring // International Journal of Remote Sensing. 2018. Vol. 39. No. 4. P. 971–992.
14. Whitcraft A. K., Becker-Reshef I., Justice C. O. A Framework for defining spatially explicit Earth observation requirements for a global agricultural monitoring initiative (GEOGLAM) // Remote Sensing. 2015. Vol. 7. No. 2. P. 1461–1481.
15. Dospekhov B. A. Methods of field research (with the basics of statistical processing of research results). Moscow: Agropromizdat, 1985. 351 p.
16. Dospekhov B. A., Vasilyev I. P., Tulikov A. M. Workshop on agriculture. Moscow: Agropromizdat, 1987. 383 p.
17. Dubinin M. Getting free satellite images of Landsat TM, ETM + via Glovis. [Digital source] // GIS-Lab, 2011. [Electronic resource]. Access point: http://gis-lab.info/qa/landsat-glovis.html (reference's date 12.09.2019).

UDC 631/635:632.08:633.1

Gulyanov Yu. A.

MONITORING OF THE PHYTOMETRIC INDICATIONS USING INNOVATIVE CROP SCANNING METHODS

Summary. *Monitoring of the phytometric indications of winter wheat agrocenoses in modern "digital technologies" is necessary for the effective control of plant growth and development. Such control is carried out by differentiating the norms of technological impact in different parts of the field according to their heterogeneity. The purpose of the study was to reveal the interrelations between the Vegetation Index (NDVI) and phytometric indications by scanning crops with hand sensor Green Seeker Handheld Crop Sensor, Model HCS-100. The research was carried out in 2018–2019 in the dry steppe zone of Orenburg Pre-Ural regions. Type of soil – southern chernozems. The object of study – winter soft wheat (Triticum aestivum L.,) 'Povolzhskaya 86'. Records, measurements and observations were carried out according to B. A. Dospekhov methodology and methodology of Gossortoispytanie (state standard for strain testing). The software package Excel was used for correlation and regression analysis of*

experimental data. NDVI dynamics and change in the area of assimilation surface of agrocenosis of winter wheat during the growing season are in the correlation relationship. The same NDVI values can correspond to both a smaller area of the assimilation surface in the early phases of crop development due to a higher concentration of chlorophyll and a larger area in the later phases of development when the intensity of green staining decreases. This circumstance must be taken into account when interpreting NDVI, especially when decrypting satellite images obtained from crops of different ages. The results of the correlation analysis indicate the presence of a strong direct linear relationship (r = 0.84) between the plantation parameters during the growing season. This is described by the regression equation y = 30266x + 1252, where: y is the area of the assimilation surface, m^2/ha; x – Vegetation Index (NDVI). The revealed dependences can be used for the crops' assessment, control of plant growth and development, as well as for more detailed interpretation of satellite images.

Keywords: *assimilation surface area, crop scanning, hand sensor Green Seeker Handheld, Vegetation Index (NDVI), Triticum aestivum L., winter soft wheat.*

Гулянов Юрий Александрович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, старший научный сотрудник отдела степеведения и природопользования, Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН) – обособленное структурное подразделение ФГБУН Оренбургского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ОФИЦ РАН); 460000, Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11; e-mail: iury.gulynov@yandex.ru.

Gulyanov Yuriy Aleksandrovich, Dr. Sc. (Agr.), professor, senior researcher of the Department of steppe studying and environmental management, Institute of the Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – a separate unit of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Orenburg Federal Research Center" of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 11, Pioneer str., Orenburg, 460000, Russia; e-mail: iury.gulynov@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию – 25.06.2019.
Дата принятия к печати – 25.07.2019.