

УДК 631.95:631.4

**Сравнительный анализ вегетационных индексов для
агроэкологического мониторинга озимой пшеницы в условиях
Московской области**

*Пивченко Д.В.¹, Мешалкина Ю.Л.^{1,2}, Ярославцев А.М.¹, Тихонова М.В.¹,
Визирская М.М.³, Васенев И.И.¹*

¹ РГАУ-МСХА им. К.А.Тимирязева

² МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения

³ ООО «ЕвроХим Трейдинг РУС»

Аннотация

По результатам мониторинговых агроэкологических исследований на представительном для дерново-подзолистых почв участке Опыта точного земледелия РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева проведена экспериментально-методическая работа со сравнительным анализом вегетационных индексов агроэкологического состояния озимой пшеницы по данным дистанционного зондирования с использованием беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера). По данным снимков, сделанных 9 июня 2017 г. в RGB- и NIRGB-зонах спектра, рассчитаны 16 вегетационных индексов, значения которых сопоставлены с результатами биометрических исследований (высота растений, густота стеблестоя, проективное покрытие, сухая наземная биомасса и ее части), проведенных в 24 элементарных участках мониторинга 9 и 29 июня 2017 года. Оптимальными вегетационными индексами для прогнозирования роста растений оказались TGI и VARI, для проективного покрытия – ENDVI. Для моделирования густоты стеблестоя также могут использоваться DVI, GDVI, TGI, GLI.

Ключевые слова: АГРОЭКОЛОГИЯ, БПЛА, ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ, ВЫСОТА РАСТЕНИЙ, ГУСТОТА ПРОДУКТИВНОГО СТЕБЛЕСТОЯ, ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ОЦЕНКА НАЗЕМНОЙ БИОМАССЫ, ПРОЕКТИВНОЕ ПОКРЫТИЕ, RGB, NIRGB, ПОДСОЛНЕЧНИК, АГРОХИМИКАТ, ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ, БОРОГУМ, БИОНЕКС, УРОЖАЙНОСТЬ, МАСЛИЧНОСТЬ

Введение

Ключевым элементом агроэкологической оптимизации современных технологий выращивания зерновых культур являются полевые методы агроэкологического

мониторинга, в которые все более активно внедряются цифровые технологии оперативной обработки данных о состоянии посевов, получаемых с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Использование БПЛА в сельском хозяйстве может значительно упростить мониторинг за состоянием посевов, снизить производственные затраты и прогнозировать урожайность сельскохозяйственных культур. Изображения дистанционного зондирования, полученные с использованием БПЛА, по сравнению со спутниковыми изображениями имеют более высокое пространственное и временное разрешение, а в сравнении с обычными летательными аппаратами БПЛА имеют более низкую стоимость, вес и потенциально более высокое разрешение съемки за счет меньшей минимальной высоты и скорости полета [1, 2].

На основании данных, полученных с БПЛА, можно проводить мониторинг агроэкосистем; оценивать объем сельскохозяйственных работ и контролировать их выполнение, прогнозировать сроки биологического созревания зерновых культур, внесение удобрений и оптимальные сроки начала уборки [3]. Точность предсказания урожая зависит от объема и качества мониторинга за различными параметрами роста и развития растений [4]. Надземная биомасса растений связана с потреблением солнечной энергии, урожайностью и качеством продукции и является одной из наиболее важных характеристик для мониторинга [5]. Обычные методы измерения биомассы оказывают деструктивное воздействие на объект исследований и являются трудоемкими. Внедрение технологий дистанционного зондирования с помощью БПЛА позволяет снизить объем трудозатрат [6].

Методы дистанционного зондирования основаны на измерении спектральных характеристик исследуемых объектов от видимого до ближнего инфракрасного диапазона длин волн. Результаты Бендинга с соавторами [7] и Жанноура с соавторами [8] показали, что цифровые камеры с видимым и инфракрасным спектрами, установленные на БПЛА, могут быть эффективно использованы для мониторинга параметров биомассы сельскохозяйственных культур. По данным Берни с соавторами [9], тепловые инфракрасные камеры, установленные на БПЛА, применимы для картирования нарушений в растительном покрове, а также для выявления зон, где происходит угнетение растений вследствие нехватки воды.

Данные спектральных камер, полученные с помощью БПЛА, могут использоваться для мониторинга параметров биомассы (например, высоты посевов, урожайности,

надземной биомассы и содержания азота) различных сельскохозяйственных культур, таких как пшеница, подсолнечник и травы [10, 11, 12]. В то же время массовое использование данных БПЛА в агроэкологическом мониторинге ограничено весом камер, стоимостью датчиков и, прежде всего, сложностью обработки исходных сцен и неоднозначностью агроэкологической интерпретации данных [2, 13].

Используемые для оценки объема и состояния надземной биомассы растений вегетационные индексы (ВИ) выводятся, главным образом, эмпирически [14, 15, 16] и подлежат экспериментальной верификации для использования при мониторинге различных сельскохозяйственных культур в условиях конкретных типов агроландшафтов.

Наибольшее распространение получили индексы, показывающие относительную разницу между отражениями в двух каналах: в красной области спектра (0,6-0,7 мкм), где лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, и в инфракрасной области спектра (0,7-1,0 мкм), где находится область максимального отражения клеточных структур листа [17].

Густая растительность с высокой фотосинтетической активностью будет связана с меньшим отражением в красной области спектра и большим – в инфракрасной области. Открытая почва на снимке формирует в спектральном пространстве красного – ближнего инфракрасного каналов прямую линию, называемую «линией почвы». Пиксели с одинаковым уровнем растительности расположены на параллельных линиях с линией почвы, и ВИ, по существу, показывают расстояние от нее [18].

Цель работы состояла в том, чтобы по данным дистанционного зондирования, полученным с квадрокоптера, и полевых биометрических измерений провести сравнительный анализ эффективности применения основных вегетационных индексов агроэкологического состояния посева озимой пшеницы на представительном участке дерново-подзолистых почв в Опыте точного земледелия РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Условия, материалы и методы

Исследования проводились в 2017 году на поле озимой пшеницы в Опыте точного земледелия РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, на полях которого общей площадью 6 га реализован четырехпольный севооборот (картофель, яровой ячмень, озимая пшеница и вико-овсяная смесь) с вариантами отвальной и минимальной обработки почвы, применения элементов традиционной и точной (прецизионной) систем земледелия [19].

Опыт расположен в типичных для Центрального региона России условиях Нечерноземной зоны. Окультуренные дерново-подзолистые почвы характеризуются легкосуглинистым гранулометрическим составом аккумулятивно-элювиальной части профиля со значительной сезонной динамикой содержания гумуса (органического вещества) в пахотном горизонте: от 2,5-2,9 % весной до 1,9-2,6 % осенью. В результате предыдущих известкований рН водной вытяжки колеблется в пределах от 5,8 до 6,2, что на 1,5-2,0 выше сопоставимых фоновых почв Лесной Опытной Дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. В целом почва опытного участка хорошо окультурена и отвечает требованиям выращиваемых культур [20]. Применяемая технология возделывания пшеницы предусматривает использование средних доз удобрений и средств защиты растений.

Измерение биомассы озимой пшеницы проводилось два раза за вегетационный период 2017 года: 9 июня и 29 июня. Первая дата соответствовала завершению фазы выхода в трубку, вторая – началу фазы созревания (молочная спелость). Измерение биомассы проводилось на 24 элементарных участках, расположенных в центральной части опытных делянок (рис. 1).



Рис. 1. Участки пробоотбора на поле озимой пшеницы в Опыте точного земледелия РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в 2017 г.

Элементарные участки («точки») пробоотбора первоначально фиксировались с

помощью спутниковой системы навигации. При повторном исследовании точка опробования несколько смещалась, но в пределах не более 1 м. В процессе мониторинга измерялись высота растений, густота продуктивного стеблестоя и проводилась цифровая съемка в видимом диапазоне для последующего расчета проективного покрытия как наиболее прямой неинвазивный способ оценки биомассы.

Высота растений пшеницы измерялась в сантиметрах: на фазе выхода в трубку – от поверхности почвы до отгиба верхнего листа; при наступлении колошения – до верхушки колоса, не считая остей. В качестве показателя использовалась средняя высота всех растений с площадки $0,5 \cdot 0,5 \text{ м} = 0,25 \text{ м}^2$ с последующим пересчетом на 1 м^2 . Густота продуктивного стеблестоя (далее густота стеблестоя) определялась также на площадках $0,25 \text{ м}^2$, а затем пересчитывалась на 1 м^2 .

Фотографии для последующего расчета проективного покрытия производились цифровой камерой с высоты 1,2 м. Нужно отметить, что во второй срок наблюдения верхние части растений частично выступали за рамку, что существенно снижало точность определения проективного покрытия. Расчеты делались в программе Fiji [21]. Проективное покрытие определялось как процент площади, занятой растениями пшеницы, выделение которых проводилось визуально по степени зеленой окраски.

Учет наземной биомассы производился 29 июня. В образец срезалась вся наземная биомасса с площадки $0,25 \text{ м}^2$. Образец взвешивался целиком, затем разбирался на стебли, листья и колосья, которые тоже взвешивались. После определения сухого вещества результаты пересчитывались на 1 м^2 .

Съемка была произведена 9 июня 2017 г. с помощью квадрокоптера DJI Phantom 2 на камеру Canon S100. Полет проходил на высоте 100 метров с 70%-ным перекрытием. Сшивание снимков было произведено в программном комплексе Agisoft Metashape 1.5. Снимки делались в RGB- и NIRGB-зонах спектра, с последующим расчетом вегетационных индексов (табл. 1). Для расчета ВИ по снимку NIRGB в качестве канала видимого поглощения был использован синий канал.

Значения яркости в каналах были получены со снимков с помощью программы QGIS 2.18. Вокруг каждой точки пробоотбора была построена буферная зона радиусом 0,7 м (соответственно, площадью $1,5 \text{ м}^2$). Размер буферной зоны отражал площадь, на которой проводились измерения, и неопределённость, связанную с некоторым возможным смещением точек пробоотбора. С помощью модуля «Зональная статистика» производился

расчет средней и медианной яркости в буфере по 3-м каналам (Red, Green, Blue – для снимка в RGB-спектре и NIR, Green, Blue – для снимка в NIRGB-спектре).

Таблица 1. Систематизация вегетационных индексов (ВИ), наиболее часто используемых для обработки данных при работе с БПЛА

Вегетационный индекс	Уравнение расчета ВИ
Нормализованный разностный ВИ [22]	$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$
Расширенный нормализованный разностный ВИ [23]	$ENDVI = ((NIR + G) - 2B) / ((NIR + G) + 2B)$
Нормализованный разностный ВИ зелёности [23]	$GNDVI = (NIR - G) / (NIR + G)$
Разностный ВИ [22]	$DVI = NIR - R$
Разностный ВИ зелёности [23]	$GDVI = NIR - G$
Оптимизированный почвенный ВИ [22]	$OSAVI = (1.16)(NIR - R) / (NIR + R + 1.16)$
Перенормализованный разностный ВИ [23]	$RDVI = (NIR - R) / \sqrt{(NIR + R)}$
Почвенный ВИ зелёности [24]	$GSAVI = 1,5 * (NIR - GREEN) / (NIR + GREEN + 0,5)$
ВИ зелёности листьев [25]	$GLI = (2 * GREEN - RED - BLUE) / (2 * GREEN + RED + BLUE)$
Триангулярный ВИ зелёности листьев [26]	$TGI = -0,5 [190(R - G) - 120(R - B)] / (R + G + B)$
Нормализованный ВИ разности зеленого и красного [27]	$NGRDI = (GREEN - RED) / (GREEN + RED)$
ВИ, устойчивый к влиянию атмосферы [23]	$VARI = (G - R) / (G + R - B)$

Разностный ВИ DVI, самый простой индекс такого типа, позволяет отделять растительность от прочих природных объектов. Использование нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений соответствует наиболее распространенному индексу NDVI. Показано, что при этом увеличивается точность измерения и уменьшается влияние различий в освещенности частей снимка [17].

Цифровые камеры, устанавливаемые на БПЛА, часто фиксируют отражение в инфракрасном, синем и зеленых каналах – по типу NIRGB. Для камер такого типа вместо красного канала можно использовать в качестве канала видимого поглощения синий канал [28]. Для цифровых камер такого типа был специально разработан индекс ENDVI, где, помимо голубого, присутствует и зеленый канал [28]. Этот индекс и ему подобные ВИ опираются на зеленый цвет как на цвет, отражающий здоровые растения.

Индекс GNDVI более чувствителен к концентрациям хлорофилла по сравнению с индексом NDVI, его часто используют при оценке угнетенной и стареющей растительности. Индекс GDVI разработан для оценки состояния растительного покрова в

засушливых районах. Индекс RDVI менее чувствителен, чем NDVI, к влиянию перепадов рельефа и экспозиции склонов. Индексы OSAVI и GSAVI относятся к семейству индексов SAVI, в которых минимизировано действие открытой поверхности почвы.

Специальная группа индексов выделяет растительность в видимой части спектра, опираясь на зеленый цвет как индикатор хлорофилла. Индекс GLI позволяет отличать живые растения от почвы и неживого вещества. Индекс TGI разработан для мониторинга хлорофилла и косвенно отражает содержание азота в листьях, что может быть использовано для определения норм внесения удобрений для участков с высоким проективным покрытием растительности. Считается, что индекс NGRDI может быть использован для мониторинга культурных растений и отделения их от сорняков. Индекс VARI разработан для случаев, когда возникает необходимость в ослаблении влияния разницы освещения и атмосферных явлений.

Сравнение средних проводилось по критерию Стьюдента. Для исследования зависимостей между вегетационными индексами и параметрами биомассы рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена. Все гипотезы проверялись с уровнем значимости 0,05.

Результаты и обсуждение

Статистический анализ распределения исследуемых биометрических параметров озимой пшеницы (табл. 2) показал относительно незначительное варьирование в пределах поля всех параметров в фазу выхода в трубку и в начале фазы созревания. Распределения высоты растений симметричны, их медианы близки к средним. Коэффициенты вариации небольшие: 4-5 %. Статистически достоверный рост озимой пшеницы составил 23,2 см за 20 дней.

Густота стеблестоя в оба срока наблюдения, наоборот, характеризуется высоким варьированием с коэффициентом вариации 24-25 %. Разница в средних (174,8 шт./м²) не является статистически значимой и, возможно, частично связана с некоторым смещением площадок мониторингового пробоотбора. Среднее проективное покрытие существенно увеличилось во второй срок наблюдения: на 14,3% по сравнению с первым – при значительном снижении его внутривольного варьирования: с 9% до 6%. Распределения наземной биомассы, а также ее частей, являются симметричными, при небольшом варьировании в пределах поля – с коэффициентом вариации 3-5 %.

Таблица 2. Описательные статистики для биометрических показателей озимой пшеницы в даты исследования, с объемом выборки 24

Показатель	Дата	Среднее	Станд. отклонение	Медиана	Минимум	Максимум
Высота растений, см	09/06	45,3	2,2	45	41	50
	29/06	68,5	2,8	69	64	74
Густота стеблестоя, шт./м ²	09/06	746,5	178,3	690	400	1070
	29/06	921,3	229,8	925	525	1440
Проективное покрытие, %	09/06	62,8	5,7	63	53	71
	29/06	77,1	4,3	78	68	84
Масса листьев, кг/м ²	29/06	0,326	0,074	0,326	0,202	0,487
Масса стеблей, кг/м ²	29/06	1,488	0,309	1,515	0,955	2,236
Масса колосьев, кг/м ²	29/06	0,454	0,154	0,445	0,234	0,782
Наземная биомасса, кг/м ²	29/06	2,267	0,509	2,373	1,391	3,412

Проведенные исследования зависимости используемых в работе ВИ от параметров наземной биомассы показали нелинейность описываемых связей, что подтверждается значениями коэффициентов корреляции Спирмена (табл. 3 и 4), которые оказались близкими к значениям коэффициентов корреляции Пирсона и в то же время несколько выше их по модулю.

Помимо ВИ, в таблицы включены значения отражения в каналах. Для инфракрасного снимка: NIR – инфракрасный, GREEN – зеленый, BLUE – голубой; для снимка в видимом диапазоне: R – красный, G – зеленый, B – голубой.

Лучшими для мониторинга за высотой растений в фазу выхода в трубку оказались ВИ, полученные со снимка RGB, вычисляемые как разность значений отражения в красном и зеленом каналах. Максимальное значение наблюдается с индексом VARI (0,63), то есть по снимку можно предсказать практически 40% от варьирования высоты растений пшеницы. Максимальное значение коэффициента корреляции, полученное для высоты растений пшеницы, составило 0,78, то есть по данным дистанционного зондирования можно предсказать 61% от варьирования высоты растений пшеницы на начало фазы созревания. Для снимка RGB коэффициенты корреляции оказались выше, чем для инфракрасного снимка NIRGB.

Максимальное значение коэффициента корреляции, полученное для густоты стеблестоя растений пшеницы, составило 0,68, то есть по данным съемки можно

предсказать 46% внутривольного варьирования и сезонной динамики этого показателя. Густота стеблестоя одинаково хорошо коррелирует с показателями обоих снимков, однако значения коэффициентов корреляции получились несколько выше для снимка NIRGB.

Максимальное значение коэффициента корреляции, полученное для проективного покрытия растений пшеницы в фазу выхода в трубку, составило 0,53, то есть по снимку можно предсказать до 28% внутривольного варьирования и сезонной динамики проективного покрытия посева.

Проективное покрытие 9 июня не имеет корреляционных зависимостей с вегетационными индексами, рассчитанными по снимку в RGB-спектре. Для проективного покрытия от 29 июня не оказалось ни одного значимого коэффициента корреляции.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Спирмена между ВИ и биометрическими показателями озимой пшеницы в 2017 году

Вегетационный индекс	Высота растений, см		Густота стеблестоя, шт./м ²		Проективное покрытие, %
	9 июня	29 июня	9 июня	29 июня	9 июня
Снимок NIRGB					
NIR	0,61	0,61	-	0,52	-
GREEN	0,47	-	-	-	-
BLUE	-	-	-	-	-
NDVI	-	0,51	0,62	0,46	0,48
ENDVI	-	0,56	0,68	0,53	0,53
GNDVI	-	-	-	-	-
DVI	-	0,72	0,63	0,60	0,47
GDVI	-	0,66	0,60	0,59	-
OSAVI	-	0,49	0,64	0,45	0,50
RDVI	-	0,65	0,63	0,62	0,51
GSAVI	-	-	0,41	-	-
Снимок RGB					
R	-	-0,43	-	-	-
G	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	-
GLI	0,44	0,75	0,59	0,47	-
TGI	0,41	0,78	0,66	0,48	-
NGRDI	0,56	0,67	0,49	0,47	-
VARI	0,63	0,63	0,44	0,44	-

Таблица 4. Коэффициенты корреляции Спирмена между ВИ и показателями сухой надземной биомассы, полученными в начале созревания озимой пшеницы, 29 июня 2017 года

Вегетационный индекс	Листья кг/м ²	Стебли. кг/м ²	Колосья кг/м ²	Общая надземная биомасса, кг/м ²
Снимок NIRGB				
NIR	-	-	-	-
GREEN	-	-	-	-
BLUE	-	-	0,46	-
NDVI	-0,60	-0,59	-0,70	-0,63
ENDVI	-0,69	-0,65	-0,75	-0,70
GNDVI	-	-	-0,47	-
DVI	-0,69	-0,71	-0,80	-0,74
GDVI	-0,57	-0,64	-0,76	-0,67
OSAVI	-0,61	-0,58	-0,68	-0,61
RDVI	-0,68	-0,67	-0,80	-0,71
GSAVI	-	-	-0,54	-0,42
Снимок RGB				
R	0,54	0,67	0,60	0,64
G	-	-	-	-
B	-	-	0,44	-
GLI	-0,69	-0,81	-0,85	-0,82
TGI	-0,71	-0,80	-0,85	-0,81
NGRDI	-0,63	-0,77	-0,74	-0,76
VARI	-0,62	-0,74	-0,67	-0,72

Информативность вегетационных индексов для сухой наземной биомассы и ее составляющих (см. табл. 4) оказалась существенно выше, чем для высоты растений, густоты стеблестоя и проективного покрытия (см. табл. 3). Достаточно высокие значения коэффициентов корреляции были получены как для снимка в видимом свете, так и для снимка в инфракрасном диапазоне – с наиболее высокими значениями для колосьев.

Максимальное по модулю значение коэффициента корреляции, полученное для наземной биомассы, составило 0,82. Процент объясненного варьирования при этом составил 67% ($R^2=0,67$), для колосьев – 72% ($R^2=0,72$ при $R=0,85$), для стеблей – 64% ($R^2=0,64$ при $R=0,80$), для листьев – 50% ($R^2=0,50$ при $R=0,71$). Важно подчеркнуть, что установленная при исследовании высокая предсказуемость биомассы колосьев позволяет уточнять урожай пшеницы на корню, с учетом пространственного варьирования посевов, по используемым данным дистанционного зондирования.

Проведенные мониторинговые исследования показали, что в целом для

предсказания надземной биомассы исследуемого посева озимой пшеницы наиболее популярный индекс NDVI далеко не всегда дает лучшие результаты по сравнению с другими проанализированными вегетационными индексами. Более высокие коэффициенты корреляции, по сравнению с NDVI, показал его расширенный вариант – индекс ENDVI. Еще лучшие результаты во всех исследованных случаях дали индексы DVI и GDVI. Вегетационные индексы VARI и TGI показали лучшие результаты для видимой части спектра.

Заключение

Сравнительный анализ информативности основных вегетационных индексов, рассчитанных по данным дистанционного зондирования видимого и инфракрасного диапазона, полученных с БПЛА, для характеристики временного и пространственного разнообразия посевов озимой пшеницы в условиях Московской области выявил новые возможности их использования для предсказания целого ряда параметров биомассы пшеницы на фазах выхода в трубку и начала созревания.

Оптимальными для прогнозирования роста озимой пшеницы оказались вегетационные индексы, рассчитанные по снимку видимого диапазона (TGI и VARI), а для отслеживания проективного покрытия – ВИ, рассчитанные по инфракрасному снимку (например, ENDVI). Для моделирования густоты стеблестоя, а также сухой массы надземной биомассы и ее частей, подходят вегетационные индексы с обоих снимков: наибольшие коэффициенты корреляции были получены для индексов DVI, GDVI, TGI, GLI. Индексы GNDVI и GSAVI оказались неэффективными для описанного случая, при отсутствии выраженной разреженности посевов, когда варьирование всех параметров надземной биомассы не превышало 25%.

Список использованных источников

1. Sankaran S., Khot R., Espinoza Z., Jarolmasjed S., Sathuvalli R., Vandemark J., Miklas N., Carter H., Pumphrey O., Knowles R. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review // Eur. J. Agron. 2015. Vol. 70. P. 112–123.
2. Liu J., Zhao C., Yang G., Yu H., Zhao X., Xu B., Niu Q. Review of field-based phenotyping by unmanned aerial vehicle remote sensing platform // Trans. Chin. Soc. Agric. Eng. 2016. Vol. 32. P. 98–106.

3. Шумилов Ю.В., Данилов Р.Ю., Костенко И.А., Данилова А.В., Семочкин К.В., Пачкин А.А. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в технологии точного земледелия // Молодой ученый. – 2015, № 9-2 (89). – С. 146-147.
4. Wang L., Zhou X., Zhu X., Dong Z., Guo W. Estimation of biomass in wheat using random forest regression algorithm and remote sensing data // Crop J. 2016. Vol. 4. P. 212–219.
5. Campos M., García F.J., Camps G., Grau G., Nutini F., Crema A., Boschetti M. Multitemporal and multiresolution leaf area index retrieval for operational local rice crop monitoring // Remote Sens. Environ. 2016. Vol. 187. P. 102–118.
6. He L., Chen Z., Jiang Z., Wen B., Wu W.B., Ren, J., Liu B., Tuya H. Comparative analysis of GF-1, HJ-1, and Landsat-8 data for estimating the leaf area index of winter wheat // J. Integr. Agric. 2016. Vol. 16. P. 266–285.
7. Bendig J., Yu K., Aasen H., Bolten A., Bennertz S., Broscheit J., Gnyp M., Bareth G. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2015. Vol. 39. P. 79–87.
8. Jannoura R., Brinkmann K., Uteau D., Bruns C., Joergensen R. Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter // Biosyst. Eng. 2014. Vol. 129 P. 341–351.
9. Berni J., Zarcotejada P., Sepulcrecantó G., Fereres E., Villalobos F. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery // Remote Sens. Environ. 2009. Vol. 113. P. 2380- 2388.
10. Vonbueren S., Burkart A., Hueni A., Rascher U., Tuohy M., Yule I. Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: Challenges and limitations // Biogeosciences. 2015. Vol. 12. P. 163–175.
11. Vega F., Ramírez F., Saiz M., Rosúa F. Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop // Biosyst. Eng. 2015. Vol. 132. P. 19–27.
12. Honkavaara E., Saari H., Kaivosoja J., Nen L., Hakala T., Litkey P., Kynen J., Pesonen L. Processing and Assessment of Spectrometric, Stereoscopic Imagery Collected Using a Lightweight UAV Spectral Camera for Precision Agriculture // Remote Sens. 2013. Vol. 5. P. 5006–5039.
13. Moshou D., Bravo C., Oberti R., West J., Bodria L., McCartney A., Ramon H. Plant disease detection based on data fusion of hyper-spectral and multi-spectral fluorescence imaging using Kohonen maps // Real-Time Imaging. 2005. Vol. 11. P. 75–83.
14. Pu R., Gong P. Wavelet transform applied to EO-1 hyperspectral data for forest LAI and crown closure mapping // Remote Sens. Environ. 2004. Vol. 91. C. 212–224.
15. Delegido J., Fernandez G., Gandia S., Moreno J. Retrieval of chlorophyll content and LAI of crops using hyperspectral techniques: Application to PROBA/CHRIS data // Int. J. Remote Sens. 2008. Vol. 29. C. 7107–7127.
16. Meroni M., Colombo R., Panigada C. Inversion of a radiative transfer model with

hyperspectral observations for LAI mapping in poplar plantations // Remote Sens. Environ. 2004.

17. Дубинин М. NDVI – теория и практика [Электронный ресурс] // Географические информационные системы и дистанционное зондирование. GIS-Lab и авторы. – 2002-2018. – <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (дата обращения: 18.05.2019).

18. Дубинин М. Почвенная линия и ее определение [Электронный ресурс] // Географические информационные системы и дистанционное зондирование. GIS-Lab и авторы. – 2002-2018. – <http://gis-lab.info/qa/vi-soilline.html> (дата обращения: 18.05.2018).

19. Беленков А.И., Тюмаков А.Ю., Сабо У.М. Точное (координатное) земледелие в РГАУ МСХА имени К. А. Тимирязева: реальность и перспективы // Вестник АГАУ. – 2015, №4 (126). – С. 5-7.

20. Железова С.В., Акимов Т.А., Белошапкина О.О., Березовский Е.В. Влияние разных технологий возделывания озимой пшеницы на урожайность и фитосанитарное состояние посевов (на примере полевого опыта Центра точного земледелия РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева) // Агрохимия. – 2017, № 4. – С. 72–82.

21. Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E., Kaynig V., Longair M., Pietzsch T., Preibisch S., Rueden C., Saalfeld S., Schmid B., Tinevez J.Y., White D.J., Hartenstein V., Eliceiri K., Tomancak P., Cardona A. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis // Nature Methods. 2012. Vol. 9. P. 676-682.

22. Yue J., Yang G., Li C., Li Z., Wang Y., Feng H., Xu B., Estimation of Winter Wheat Above-Ground Biomass Using Unmanned Aerial Vehicle-Based Snapshot Hyperspectral Sensor and Crop Height Improved Models // Remote Sens. 2017. Vol. 9. 708.

23. Susantoro T.M., Wikantika K., Saepuloh A., Harsolumakso A.H. Selection of vegetation indices for mapping the sugarcane condition around the oil and gas field of North West Java Basin, Indonesia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. 149. С. 1

24. Sripada R.P., Heiniger R.W., White J.G., Weisz R. Aerial color infrared photography for determining late-season nitrogen requirements in corn // Agronomy Journal. 2005. Vol. 97. С. 1443-1451.

25. Hunt JR.E.R., Doraiswamy P.C., McMurtrey J.E., Daughtry C.S.T., Perry E.M., Akhmedov B. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 2013. Vol. 21. С.103–112.

26. Hunt JR.E.R., Daughtry C.S.T., Eitel J.U.H., Long D.S. Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index // Agronomy Journal. 2011. Vol. 103. С. 1090–1099.

27. Hunt JR. E.R., Cavigelli M., Daughtry C.S.T., McMurtrey III J.E., Walthall C.L. Evaluation of Digital Photography from Model Aircraft for Remote Sensing of Crop Biomass

and Nitrogen Status // Precision Agriculture 2005. Vol. 6. С.359-378.

28. Enhanced Normalized Difference Vegetation Index (ENDVI) [Электронный ресурс] // Махмах 1997-2019. URL <http://gis-lab.info/qa/vi-soilline.html> (дата обращения: 18.05.2019).

=====
Цитирование:

Пивченко Д.В., Мешалкина Ю.Л., Ярославцев А.М., Тихонова М.В., Визирская М.М., Васенев И.И. Сравнительный анализ вегетационных индексов для агроэкологического мониторинга озимой пшеницы в условиях Московской области // АгроЭкоИнфо. – 2019, №3. – http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/3/st_324.doc.