

Оценка пространственно-временных изменений в зелёной фитомассе аграрной растительности с использованием спектрально-отражательных признаков

Э. А. Терехин

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Федерально-региональный центр аэрокосмического и наземного мониторинга
объектов и природных ресурсов, Белгород, 308015, Россия
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

Выполнена количественная оценка связи между проективным покрытием и значениями вегетационного индекса NDVI для ключевых видов аграрной растительности юга Среднерусской возвышенности: озимой пшеницы, подсолнечника, сои, многолетних трав. Исследование проведено с использованием фактических данных о проективном покрытии растительности агроэкосистем Белгородской обл. Установлено, что связь между проективным покрытием и вегетационным индексом может быть описана логистической кривой для всех изученных видов посевов. Рассчитанные уравнения характеризуют основные различия в динамике зелёной фитомассы между типами аграрной растительности. С использованием вычисленных уравнений выполнена пространственно-временная оценка зелёной фитомассы для пшеницы озимой на территории Белгородской обл. в течение периода вегетации. Подготовлена серия картосхем, характеризующих территориальное изменение проективного покрытия пшеницы на протяжении вегетационного периода — с начала апреля по середину июля. Выявлены различия в сезонной динамике проективного покрытия посевов пшеницы, произрастающих в различных природно-климатических условиях: типичной и южной лесостепи. Установлено, что они наблюдаются в период созревания посевов. В сроки достижения максимальных величин проективного покрытия существенных территориальных различий в нём в пределах региона не выявлено.

Ключевые слова: проективное покрытие, агроэкосистемы, спектрально-отражательные признаки, пространственный анализ, NDVI, MODIS, Среднерусская возвышенность

Одобрена к печати: 19.01.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-138-148

Введение

Оценка влияния параметров растительности агроэкосистем на их спектральный отклик выступает задачей, решение которой необходимо для изучения состояния растительного покрова посевных площадей с применением данных дистанционного зондирования. Один из таких параметров — проективное покрытие угодий зелёной фитомассой (*англ.* fractional green vegetation cover), определяемое как отношение проекции вегетирующих побегов и листьев к общей площади участка, на которой расположен агроценоз. Изменение фитомассы во времени характеризует стадии развития аграрной растительности и может быть использовано для оценки её созревания и продуктивности (Glenn et al., 2008). В связи с этим моделирование связи между проективным покрытием и спектрально-отражательными признаками посевов становится актуальной задачей, решение которой необходимо для совершенствования методов дистанционного анализа агроэкосистем (Brown et al., 2017; Imukova et al., 2015).

Для оценки проективного покрытия на основе спутниковых данных к настоящему времени предложен ряд подходов. К ним относятся использование вегетационных индексов (Gao et al., 2020), методов спектральных смесей (Camacho-De Coca et al., 2004; Johnson et al., 2012), методов, использующих уравнение переноса (Kallel et al., 2007; Shabanov, Gastellu-Etchegorry, 2018), искусственных нейронных сетей (Jia et al., 2015).

Однако вследствие высокого разнообразия растительности посевных площадей разных регионов, различающихся по природно-климатическим условиям, становится актуальным моделирование проективного покрытия конкретных типов посевов и его влияния на спек-

тральный отклик. Интенсивная динамика фитомассы аграрной растительности обуславливает необходимость использования регулярно получаемых спутниковых данных, позволяющих изучить спектральные признаки в несколько временных срезов периода вегетации (Миклашевич и др., 2019; Шинкаренко, Барталев, 2020).

Белгородская обл., расположенная на юге Среднерусской возвышенности, характеризуется переходными условиями от типичной к южной лесостепи. В настоящее время в её пределах выделяют два агроклиматических района (Лебедева и др., 2015), различающихся условиями увлажнения и теплообеспеченности. Различия наблюдаются в осадках, сумме активных температур, гидротермическом коэффициенте (Буряк, Терехин, 2020).

Посевные площади составляют около 60 % территории региона и характеризуются разнообразием видов аграрной растительности (Терехин, 2015), среди которых представлены пшеница озимая, подсолнечник, соя, многолетние травы и другие виды. Исследование спектрального отклика посевов региона необходимо не только для моделирования их развития, но и для изучения сезонной динамики одних и тех же типов растительности в условиях, различающихся по тепло- и влагообеспеченности.

Цель исследования состояла в вычислении моделей, описывающих связь между проективным покрытием и индексом NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) для различных типов посевов, и в пространственно-временном анализе проективного покрытия аграрных угодий в пределах юга Среднерусской возвышенности.

Материалы и методика исследования

Исследование проведено на территории Белгородской обл., географически расположенной на юге Среднерусской возвышенности и характеризующейся преимущественно природно-климатическими условиями лесостепной зоны.

Первый этап включал количественный анализ связи между проективным покрытием и спектрально-отражательными признаками для основных типов растительности агроэкосистем региона: пшеницы озимой, подсолнечника, сои, многолетних трав. Для моделирования связи между параметрами растительности и её спектральным откликом был выполнен сбор необходимого фактического материала. В течение вегетационных периодов 2019–2020 гг. на тестовых посевных площадях суммарной площадью 1518 га (при средней площади 48 га), расположенных на территории Белгородской обл., был выполнен сбор информации о проективном покрытии угодий. Исследования проводили в течение восьми временных срезов в 2019 г. (с 1 мая по 25 октября) и семи временных срезов в 2020 г. (с 14 июня по 26 сентября). Замеры проективного покрытия выполнялись на основе полевых фотографий, сделанных в нади́р. Съёмку для всех видов посевов старались проводить с одинакового расстояния. Для высокорослых культур (например, подсолнечника) оно достигалось методом подъёма фотоаппарата на соответствующую высоту.

В общей сложности было проведено 377 измерений проективного покрытия. Полученная информация вносилась в геоинформационную базу данных, после чего был выполнен расчёт спектральных характеристик на основе данных дистанционного зондирования.

Интенсивное изменение зелёной фитомассы растительности на протяжении вегетационного периода предусматривало применение регулярно получаемых спутниковых данных для объективной оценки её спектрального отклика. В настоящее время единственным видом спутниковой информации, позволяющим рассчитать сезонный ряд спектральных характеристик для конкретных угодий, выступают снимки с сенсора MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Didan, 2015; Justice et al., 2002). Для вычисления отражательных признаков исследуемых угодий были применены информационные продукты MOD13Q1, включающие 16-дневные композитные изображения вегетационного индекса NDVI (Didan, 2015). Они создаются на основе атмосферно и радиометрически откорректированных снимков MODIS, что обеспечивает возможность их использования для сравнения спектральных

признаков, измеренных в разные временные срезы. Основным ограничением информационных продуктов MOD13Q1 выступает их относительно невысокое пространственное разрешение (250 м/пиксель), которое необходимо учитывать при выборе минимальных по площади анализируемых объектов, а также нужно стараться исключать из анализа уголья сложной формы.

Значения вегетационного индекса NDVI, рассчитанные на основе данных MOD13Q1, выступали, таким образом, единственным спектральным признаком, соответствующим требованиям исследований. Для расчёта значений вегетационного индекса были применены изображения MOD13Q1 версии 6 (источник данных <https://earthexplorer.usgs.gov/>), полученные в вегетационные периоды 2019–2020 гг. на сроки, охватывающие промежутки времени, в которые проводились полевые наблюдения. Значения NDVI для исследуемых угодий вычислили методом зональной статистики. Таким образом, была сформирована выборка значений, позволившая провести оценку связи вегетационного индекса и проективного покрытия для различных типов аграрной растительности региона.

Второй этап исследования включал пространственно-временной анализ проективного покрытия в пределах Белгородской обл. с использованием моделей, полученных на предыдущем этапе. Анализируемые объекты для решения этой задачи подбирали исходя из следующих критериев:

1. Наиболее объективная пространственная оценка сезонных территориальных особенностей фитомассы возможна при анализе угодий с одним типом аграрной растительности.
2. Объекты исследования должны быть представлены во всех частях исследуемой территории, что необходимо для получения корректных оценок пространственной интерполяции.

Из региональных видов аграрной растительности в наибольшей степени обозначенным критериям соответствует озимая пшеница. Её посевы в последние годы широко представлены во всех административных районах Белгородской обл. и занимают до 35 % посевных площадей региона. В связи с этим аграрные поля с ней были использованы для пространственно-временной оценки зелёной фитомассы, которую провели на примере вегетационного сезона 2020 г.

Для этой цели была сформирована аналитическая выборка из аграрных полей с озимой пшеницей, представленных в разных частях Белгородской обл. в сезон 2020 г. (посевы 2019 г.). Формирование выборки осуществлено методом дешифрирования аграрных полей с озимой пшеницей на основе совместного анализа информационных продуктов MOD13Q1, характеризующих значения NDVI второй половины марта – начала апреля, и снимков Landsat-8 OLI начала – середины июля. Для дешифрирования был использован подготовленный ранее векторный слой всех посевных площадей Белгородской обл.

Дешифрирование производили на основе критериев, которым удовлетворяют поля с озимой пшеницей и которым не соответствует ни один другой тип аграрной растительности в регионе:

1. Повышенные в сравнении со всеми остальными посевными площадями значения вегетационного индекса NDVI в период 21 марта – 6 апреля, обусловленные вегетацией озимых, уже присутствующих на полях с прошлого года. Величины индекса измерялись на основе растров MOD13Q1 (рис. 1, см. с. 141) и анализировались также в пределах контуров отдельных угодий.
2. Наличие признаков полного созревания посевов или признаков уборки урожая в сроки первой половины – середины июля, что определялось на основе снимков Landsat-8 OLI соответствующего периода. Вместе с этим применяли метод визуального дешифрирования озимых на снимках Landsat в комбинации каналов SWIR2 – SWIR1 – RED (SWIR – *англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный; RED – красный) и RED – GREEN – BLUE (GREEN – зелёный; BLUE – синий), в которых созревшие или убранные зерновые чётко отличаются от всех остальных культур.

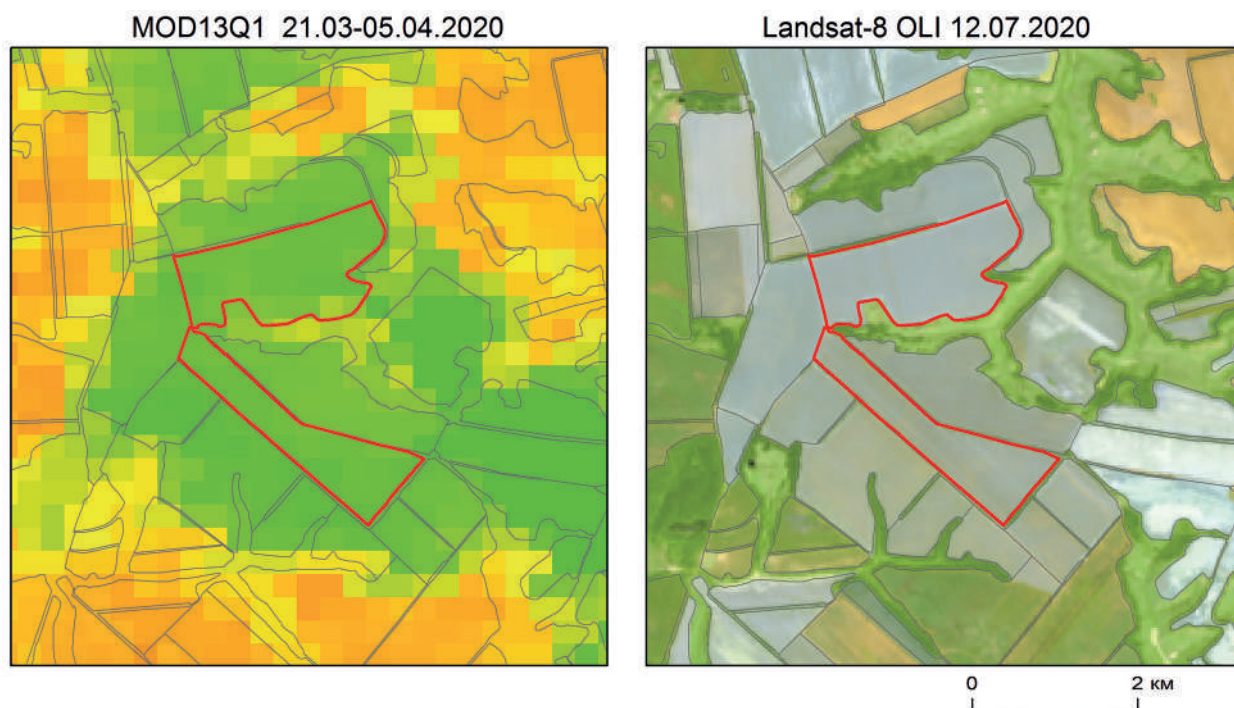


Рис. 1. Примеры полей с озимой пшеницей на изображениях MOD13Q1 и Landsat-8 OLI

В общей сложности таким способом было выявлено 308 аграрных полей с озимыми сезона 2019–2020 гг. суммарной площадью 32 644,5 га при средней площади 105,9 га. В анализ стремились отбирать значительные по размеру угодья для объективного анализа их спектрального отклика.

Для каждой отобранной посевной площади на основе данных MOD13Q1 методом зональной статистики получен сезонный ряд значений вегетационного индекса NDVI с начала апреля по начало августа, т. е. полностью охватывающий стадии развития озимых в 2020 г. Значения NDVI вычислены на следующие даты: 6, 22 апреля; 8, 24 мая; 9, 25 июня; 12, 28 июля; 12 августа периода 2020 г. После этого с использованием вычисленных уравнений связи между проективным покрытием и NDVI на каждую дату выполнена оценка проективного покрытия исследуемых угодий.

На основе полученных данных с применением пространственной интерполяции (радиальные базисные функции, *англ.* radial basis functions — RBF) была рассчитана серия картосхем, характеризующих территориальное изменение проективного покрытия озимой пшеницы в пределах региона на протяжении периода вегетации. С их использованием проведён пространственно-временной анализ величины проективного покрытия озимой пшеницей в пределах Белгородской обл.

На заключительном этапе была осуществлена оценка различий в сезонной динамике проективного покрытия посевов озимой пшеницы в разных природных и агроклиматических условиях.

Результаты и их обсуждение

Одна из ключевых особенностей проективного покрытия заключается в постоянстве размаха его значений, охватывающих интервал от 0 до 1. Наличие предельных величин обуславливает необходимость применения функций, изменяющихся в ограниченном диапазоне. Анализ графиков рассеяния для проективного покрытия и NDVI позволил сделать вывод, что связь между этими параметрами может быть описана логистической моделью для различных видов аграрной растительности:

$$y = A + \frac{K - A}{1 + e^{(Bx+C)}}, \quad (1)$$

где: y — значения проективного покрытия; x — значения вегетационного индекса NDVI; A — нижняя асимптота; K — верхняя асимптота; B , C — эмпирические константы для конкретных типов посевов.

В случае проективного покрытия нижняя асимптота (A) будет равна нулю, а верхняя (K) — единице. Таким образом, формула (1) примет следующий вид:

$$y = \frac{1}{1 + e^{(Bx+C)}}. \quad (2)$$

С её использованием было проведено моделирование зависимости между проективным покрытием и NDVI для ключевых типов аграрной растительности Белгородской обл. (табл. 1).

Таблица 1. Логистические функции, описывающие связь между проективным покрытием и вегетационным индексом NDVI

Тип посевов	Уравнение	Коэффициент детерминации R^2
Пшеница озимая	$y = 1/(1 + \exp(-14,512x + 10,1225))$	0,85
Подсолнечник	$y = 1/(1 + \exp(-8,59581x))^{147,413}$	0,87
Соя	$y = 1/(1 + \exp(-17,9x + 12,7149))$	0,84
Многолетние травы	$y = 1/(1 + \exp(-14,269x + 8,27725))$	0,82

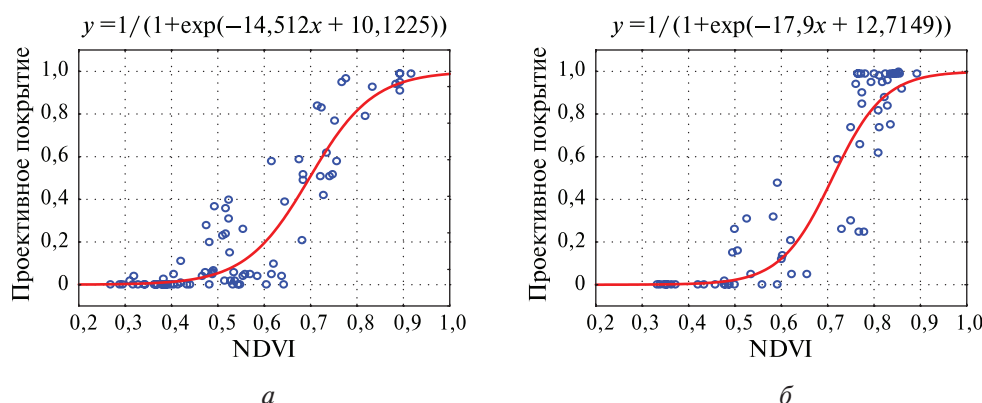


Рис. 2. Графики, описывающие связь между проективным покрытием и NDVI озимой пшеницы (а) и сои (б)

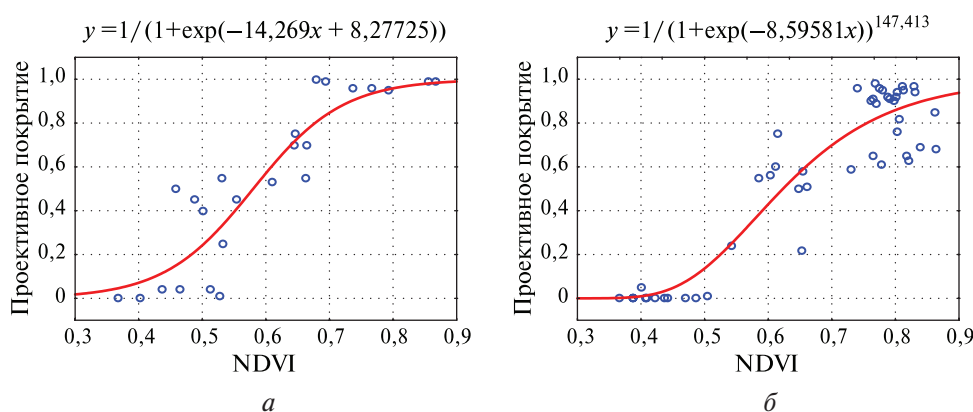


Рис. 3. Графики, описывающие связь между проективным покрытием и NDVI многолетних трав (а) и подсолнечника (б)

Результаты показали, что логистическая модель достаточно эффективно описывает связь между проективным покрытием и вегетационным индексом. Коэффициенты детерминации вычисленных уравнений составили от 0,82 до 0,87, т.е. полученные уравнения хорошо описывали уровень варьирования зависимой переменной.

Графическая визуализация полученных результатов показала, что они отражают ключевое различие между отдельными видами аграрной растительности. Оно связано с разной интенсивностью изменения NDVI вследствие динамики проективного покрытия (рис. 2, 3, см. с. 142).

Основное ограничение вычисленных уравнений — достаточно значительный разброс значений проективного покрытия вокруг регрессионной кривой. Тем не менее они отражают ключевые особенности изменения фитомассы разных типов аграрной растительности и могут быть применены для оценки проективного покрытия на значительных территориях, в пределах которых наблюдаются существенные различия в развитии посевов, например отдельных областей. Таким образом, на основе спектрально-отражательных признаков удалось смоделировать динамику проективного покрытия аграрной растительности, отражающую различия между посевами по этому критерию.

Результаты пространственного анализа зелёной фитомассы для озимой пшеницы в пределах Белгородской обл., выполненные в разные сроки вегетационного периода (восемь временных срезов), позволили установить ряд региональных закономерностей. Территориальная оценка проведена методом интерполяции данных о проективном покрытии с 302 полей с озимой пшеницей (показаны на рис. 4, 5, см. с. 144), расположенных в различных частях Белгородской обл. Установлено, что в период высоких сезонных значений проективного покрытия различия в пределах региона по этому показателю практически отсутствуют (см. рис. 4).

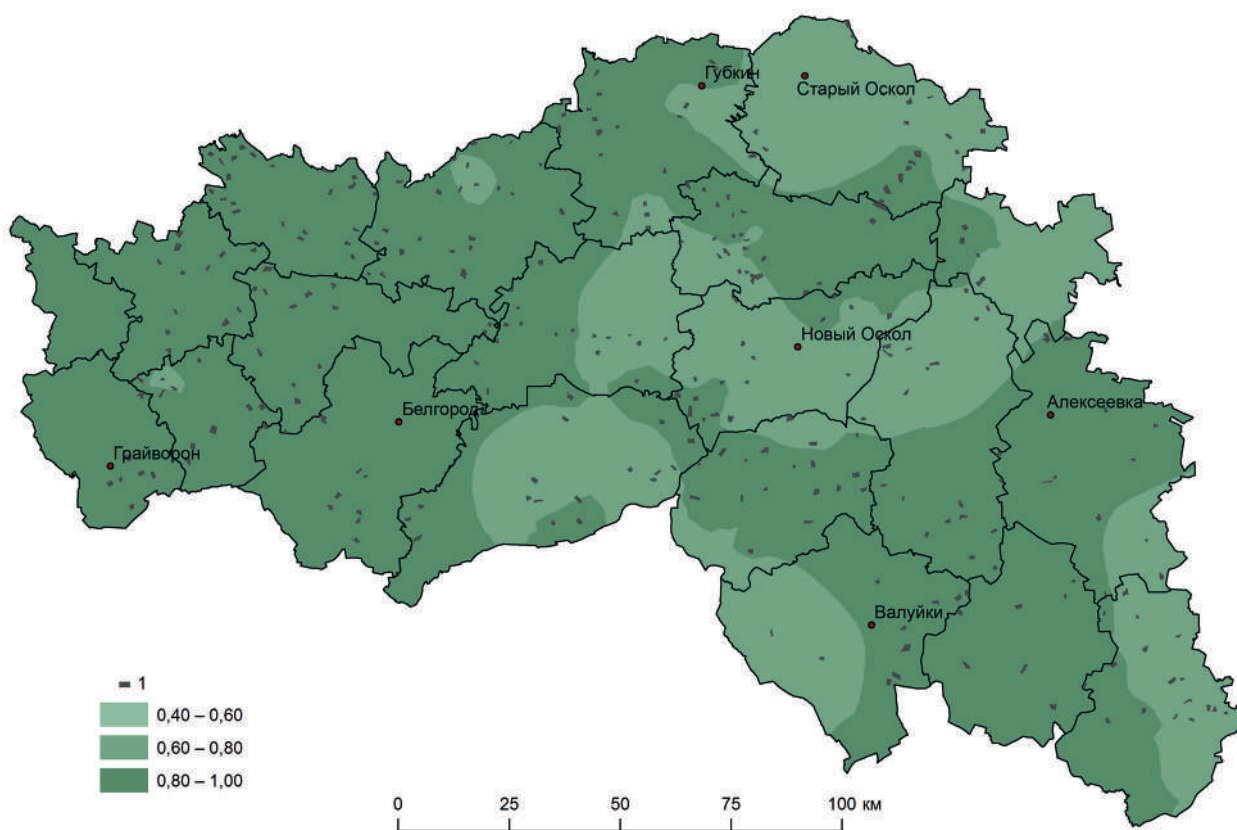


Рис. 4. Пространственное изменение в пределах Белгородской обл. величины проективного покрытия озимой пшеницы 8–24 мая 2020 г. 1 — анализируемые аграрные поля

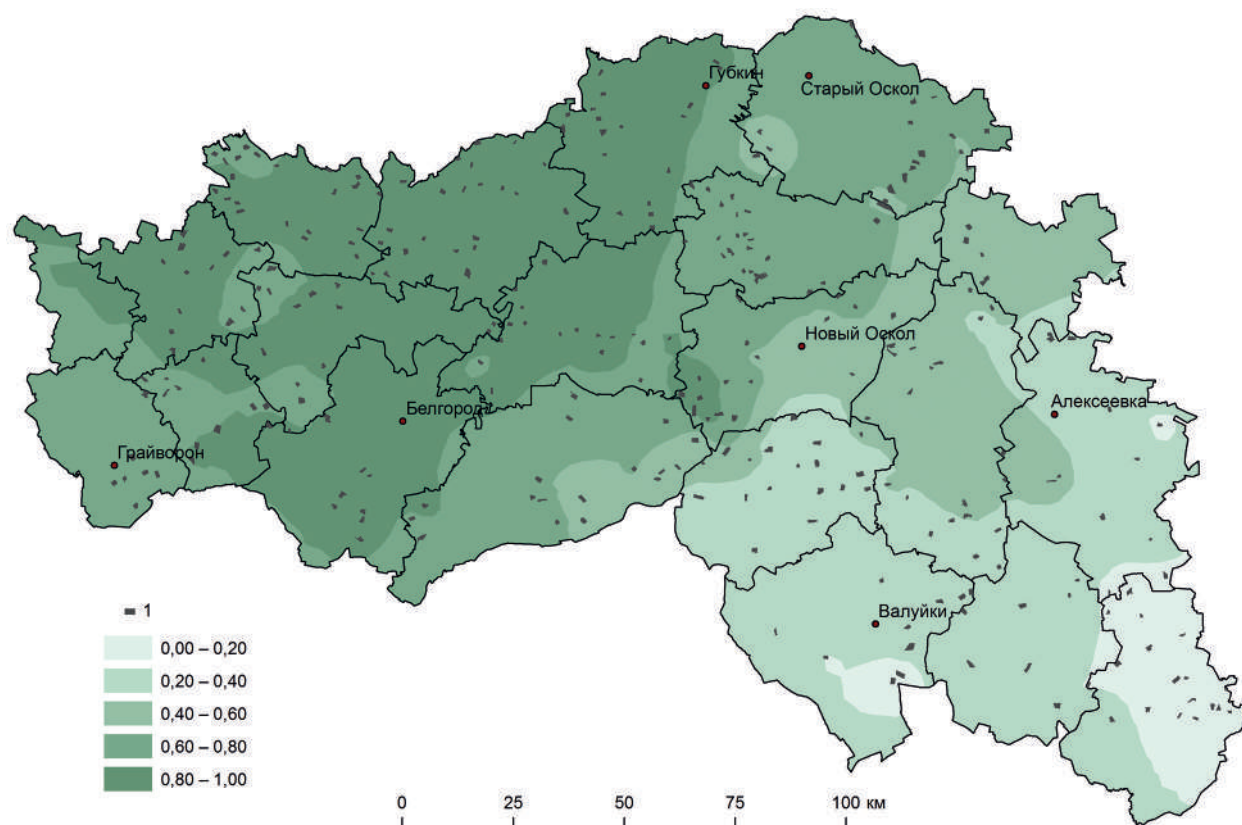


Рис. 5. Пространственное изменение в пределах Белгородской обл. проективного покрытия озимой пшеницы 25 июня – 12 июля 2020 г. 1 — анализируемые аграрные поля

Территориальные различия в величине проективного покрытия начинают наблюдаться с десятых чисел июня и достигают максимума в конце июня – первой половине июля (см. рис. 5). Основной тренд пространственных изменений простирается в направлении с северо-запада на юго-восток.

Согласно результатам анализа агроклиматических условий региона (Буряк, Терехин, 2020), в этом же направлении происходит смена величины гидротермического коэффициента. Данный показатель, в свою очередь, выступает одним из климатических индикаторов природных зон лесостепи и степи. То есть выявленные различия могут быть следствием природно-климатических факторов. В пределах территории Белгородской обл. они проявляются в смене природных условий от типичной к южной лесостепи. Соответственно, этот фактор мог оказывать влияние на территориальные различия в динамике зелёной фитомассы посевов.

Для проверки этого предположения была проведена оценка значимости сезонных различий проективного покрытия, вычисленных в пределах подзон типичной и южной лесостепи, которые расположены на территории Белгородской обл.

Результаты статистического анализа показали (табл. 2), что влияние фактора подзоны на проективное покрытие, действительно, начинает сказываться с последней декады мая (с 24.05.2020) и наиболее существенно проявляется в конце июня – начале июля (25 июня – 12 июля). Об этом свидетельствуют значения t -критерия, которые выше критической величины, составляющей для данного числа степеней свободы 1,96 при уровне значимости 0,05. В период, предшествующий максимальным сезонным значениям проективного покрытия (до 24 мая), значимых различий в нём между подзонами лесостепи не наблюдается. Сравнивая величины проективного покрытия, следует отметить, что в подзоне типичной лесостепи они всегда несколько выше, чем в южной лесостепи. То есть влияние фактора подзоны лесостепи проявляется в период созревания и не выявлено в период роста посевов.

Таблица 2. Сравнение проективного покрытия пшеницы озимой в подзонах лесостепи в пределах Белгородской обл.

Дата	Подзона		t-критерий
	типичной лесостепи	южной лесостепи	
06.04.2020	0,18	0,15	1,15
22.04.2020	0,57	0,55	0,50
08.05.2020	0,82	0,80	0,69
24.05.2020	0,93	0,91	2,13
09.06.2020	0,91	0,85	5,47
25.06.2020	0,68	0,21	11,02
12.07.2020	0,05	0,02	3,24

Особенности сезонной динамики проективного покрытия в южной лесостепи практически не отличаются от аналогичной динамики в подзоне типичной лесостепи. Но во время созревания посевов, судя по расчётным данным, снижение объёмов зелёной фитомассы происходит быстрее (рис. 6).

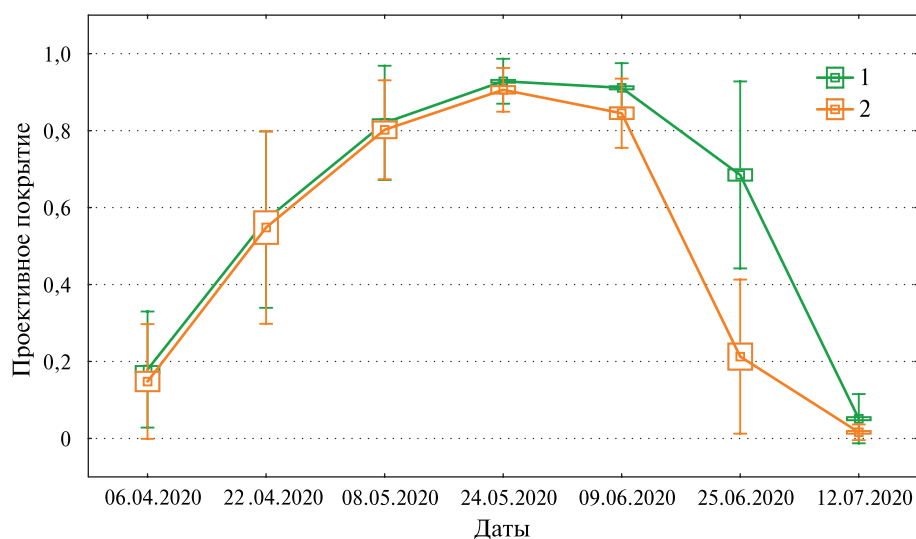


Рис. 6. Сезонная динамика проективного покрытия озимой пшеницы в условиях типичной (1) и южной (2) лесостепи

Графики на рис. 6 характеризуют изменения проективного покрытия зелёной фитомассой для посевов озимой пшеницы от начала вегетации после зимнего периода до уборки посевов. При этом соответствующие различия отмечены не для одной даты, а для всего периода созревания озимой пшеницы. Подзона южной лесостепи наиболее близка к степной зоне по условиям тепло- и влагообеспеченности, что, по всей видимости, отражается и на особенностях сезонной динамики фитомассы аграрной растительности.

Выводы

На основе материалов полевых наблюдений и спектральной спутниковой информации вычислены и описаны зависимости, характеризующие изменение проективного покрытия и вегетационного индекса NDVI для различных видов аграрной растительности, типичных для территории юга Среднерусской возвышенности. Установлено, что для пшеницы озимой, сои,

подсолнечника, многолетних трав зависимость между проективным покрытием и NDVI может быть описана логистической (сигмоидной) моделью с коэффициентами детерминации от 0,82 до 0,87. С использованием вычисленной зависимости проведён пространственно-временной анализ динамики зелёной фитомассы для посевов озимой пшеницы в вегетационный сезон 2020 г. Определено, что динамика проективного покрытия в условиях подзоны южной лесостепи отличается от аналогичной динамики в типичной лесостепи. Выявленные различия проявляются в период созревания посевов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-35-20018.

Литература

1. Буряк Ж.А., Терехин Э.А. Геоинформационное моделирование пространственно-временной изменчивости агроклиматических условий // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44. № 3. С. 333–342.
2. Лебедева М.Г., Соловьев А.Б., Толстомятова О.С. Агроклиматическое районирование Белгородской области в условиях меняющегося климата // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Сер.: Естественные науки. 2015. № 9(206). Вып. 31. С. 160–167.
3. Миклашевич Т.С., Барталев С.А., Плотников Д.Е. Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 143–154.
4. Терехин Э.А. Оценка сезонных значений вегетационного индекса (NDVI) для детектирования и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 23–31.
5. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 179–194.
6. Brown L.A., Dash J., Ogutu B.O., Richardson A.D. On the relationship between continuous measures of canopy greenness derived using near-surface remote sensing and satellite-derived vegetation products // Agricultural and Forest Meteorology. 2017. V. 247. P. 280–292.
7. Camacho-De Coca F., García-Haro F.J., Gilabert M.A., Meliá J. Vegetation cover seasonal changes assessment from TM imagery in a semi-arid landscape // Intern. J. Remote Sensing. 2004. V. 25. No. 17. P. 3451–3476.
8. Didan K. MOD13Q1 — MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid. 2015. V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. URL: <http://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>.
9. Gao L., Wang X., Johnson B.A., Tian Q., Wang Y., Verrelst J., Mu X., Gu X. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2020. V. 159. P. 364–377.
10. Glenn E.P., Huete A.R., Nagler P.L., Nelson S.G. Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape // Sensors. 2008. V. 8. P. 2136–2160.
11. Imukova K., Ingwersen J., Streck T. Determining the spatial and temporal dynamics of the green vegetation fraction of croplands using high-resolution RapidEye satellite images // Agricultural and Forest Meteorology. 2015. V. 206. No. Suppl. C. P. 113–123.
12. Jia K., Liang S., Liu S., Li Y., Xiao Z., Yao Y., Jiang B., Zhao X., Wang X., Xu S., Cui J. Global Land Surface Fractional Vegetation Cover Estimation Using General Regression Neural Networks From MODIS Surface Reflectance // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2015. V. 53. P. 4787–4796.
13. Johnson B., Tateishi R., Kobayashi T. Remote Sensing of Fractional Green Vegetation Cover Using Spatially-Interpolated Endmembers // Remote Sensing. 2012. V. 4. No. 9. P. 2619–2634.
14. Justice C.O., Townshend J.R.G., Vermote E.F., Masuoka E., Wolfe R.E., Saleous N., Roy D.P., Morisette J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. No. 1–2. P. 3–15.
15. Kallel A., Le Hégarat-Masclé S., Ottlé C., Hubert-Moy L. Determination of vegetation cover fraction by inversion of a four-parameter model based on isoline parametrization // Remote Sensing of Environment. 2007. V. 111. P. 553–566.
16. Shabanov N., Gastellu-Etchegorry J.-P. The stochastic Beer–Lambert–Bouguer law for discontinuous vegetation canopies // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2018. V. 214. P. 18–32.

Assessment the spatial-temporal changes in green phytomass of agricultural vegetation using spectral response

E. A. Terekhin

Belgorod State University, Belgorod 308015, Russia

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

Assessment of the relationships between fractional green vegetation cover and NDVI vegetation index values for main species of agricultural vegetation in the south of the Central Russian Uplands (winter wheat, sunflower, soybeans, perennial grasses) was carried out. The study was carried out using actual data on green vegetation fraction of agroecosystems in the Belgorod Region. The relationship between fractional green vegetation cover and vegetation index can be described by a logistic curve for all studied crops. The calculated equations characterize the main differences in the dynamics of green phytomass between types of agricultural vegetation. A spatio-temporal assessment of the winter wheat green vegetation fraction in the Belgorod Region was carried out using the calculated equations. A series of schematic maps was prepared that characterize the territorial change in the winter wheat green vegetation fraction during the growing season, from early April to mid-July. Differences in the seasonal dynamics of crop green vegetation fraction growing in different climatic conditions were identified: the typical and southern forest-steppe. They are observed during the ripening period of winter wheat. During the period of maximum values of the green vegetation fraction, no significant territorial differences were found within the region.

Keywords: fractional green vegetation cover, agroecosystems, spectral response, spatial analysis, NDVI, MODIS, Central Russian Upland

Accepted: 19.01.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-138-148

References

1. Buryak Zh. A., Terekhin E. A., Geoinformatsionnoe modelirovanie prostranstvenno-vremennoi izmenchivosti agroklimaticheskikh uslovii (Geoinformation modeling of spatio-temporal variability of agroclimatic conditions), *Regional'nye geosistemy*, 2020, Vol. 44, No. 3, pp. 333–342.
2. Lebedeva M. G., Solov'ev A. B., Tolstopyatova O. S., Agroklimaticheskoe raionirovanie Belgorodskoi oblasti v usloviyakh menyayushchegosya klimata (Agroclimatic zoning of the Belgorod Region in a changing climate), *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta, Ser.: Estestvennye nauki*, 2015, No. 9(206), Vyp. 31, pp. 160–167.
3. Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Interpolyatsionnyi algoritm vosstanovleniya dlinnykh vremennykh ryadov dannykh sputnikovyykh nablyudenii rastitel'nogo pokrova (Interpolation algorithm for the recovery of long satellite data time series of vegetation cover observation), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 143–154.
4. Terekhin E. A., Otsenka sezonnykh znachenii vegetatsionnogo indeksa (NDVI) dlya detektirovaniya i analiza sostoyaniya posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur (Assess the seasonal NDVI values for detection and analysis of agricultural crops), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 1, pp. 23–31.
5. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Sezonnaya dinamika NDVI pastbishchnykh landshaftov Severnogo Prikaspiya po dannym MODIS (NDVI seasonal dynamics of the North Caspian pasture landscapes from MODIS data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 179–194.
6. Brown L. A., Dash J., Ogotu B. O., Richardson A. D., On the relationship between continuous measures of canopy greenness derived using near-surface remote sensing and satellite-derived vegetation products, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, Vol. 247, pp. 280–292.
7. Camacho-De Coca F., García-Haro F. J., Gilabert M. A., Meliá J., Vegetation cover seasonal changes assessment from TM imagery in a semi-arid landscape, *Intern. J. Remote Sensing*, 2004, Vol. 25, No. 17, pp. 3451–3476.
8. Didan K., *MOD13Q1 — MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid*, 2015, V006, NASA EOSDIS Land Processes DAAC, available at: <http://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>.

9. Gao L., Wang X., Johnson B.A., Tian Q., Wang Y., Verrelst J., Mu X., Gu X., Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, Vol. 159, pp. 364–377.
10. Glenn E. P., Huete A. R., Nagler P. L., Nelson S. G., Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape, *Sensors*, 2008, Vol. 8, pp. 2136–2160.
11. Imukova K., Ingwersen J., Streck T., Determining the spatial and temporal dynamics of the green vegetation fraction of croplands using high-resolution RapidEye satellite images, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, Vol. 206, No. Suppl. C, pp. 113–123.
12. Jia K., Liang S., Liu S., Li Y., Xiao Z., Yao Y., Jiang B., Zhao X., Wang X., Xu S., Cui J., Global Land Surface Fractional Vegetation Cover Estimation Using General Regression Neural Networks from MODIS Surface Reflectance, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, pp. 4787–4796.
13. Johnson B., Tateishi R., Kobayashi T., Remote Sensing of Fractional Green Vegetation Cover Using Spatially-Interpolated Endmembers, *Remote Sensing*, 2012, Vol. 4, No. 9, pp. 2619–2634.
14. Justice C. O., Townshend J. R. G., Vermote E. F., Masuoka E., Wolfe R. E., Saleous N., Roy D. P., Morisette J. T., An overview of MODIS Land data processing and product status, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 83, pp. 3–15.
15. Kallel A., Le Hégat-Masclé S., Ottlé C., Hubert-Moy L., Determination of vegetation cover fraction by inversion of a four-parameter model based on isoline parametrization, *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 111, pp. 553–566.
16. Shabanov N., Gastellu-Etchegorry J.-P., The stochastic Beer–Lambert–Bouguer law for discontinuous vegetation canopies, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, Vol. 214, pp. 18–32.