

## Сезонная динамика проективного покрытия растительности агроэкосистем на основе спектральной спутниковой информации

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*

Проективное покрытие зелёной фитомассой — один из ключевых параметров, определяющих состояние растительного покрова. В статье изложены результаты оценки проективного покрытия агроэкосистем, типичных для зоны лесостепи, выполненной на основе спутниковых данных Sentinel и MODIS. Объект исследования — агроландшафты, характерные для территории юга Центрального Черноземья. Проведён анализ свыше 200 измерений, полученных в процессе полевых исследований, и выполнена количественная оценка связи фактических и расчётных по спутниковым данным величин проективного покрытия. Установлена высокая корреляция между его фактическими значениями и величинами, рассчитанными по данным MODIS и Sentinel-2 MSI. На основе данных Sentinel изучена вариабельность проективного покрытия зелёной фитомассой в пределах контуров посевных площадей для различных типов растительности агроэкосистем. Оценка проведена для разных фаз развития посевов. На основе вегетационного индекса NDVI рассчитана и проанализирована сезонная динамика проективного покрытия зелёной фитомассой для ключевых региональных видов посевов: ячменя ярового, озимой пшеницы, сои, кукурузы, подсолнечника и многолетних трав. Установлено, что сезонная динамика расчётного проективного покрытия отражает основные фенофазы типов растительности, характерных для агроэкосистем южной лесостепи.

**Ключевые слова:** проективное покрытие, зелёная фитомасса, растительный покров, агроэкосистемы, дистанционное зондирование, вегетационные индексы, MODIS, Sentinel

Одобрена к печати: 30.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-111-123

### Введение

Моделирование развития растительности посевных площадей требует сведений о её биофизических параметрах, к которым в том числе относится проективное покрытие зелёной фитомассой (Fraction of Vegetation Cover, Green Vegetation Fraction). Оно определяется как отношение проекции вегетирующих побегов и листьев к общей площади участка земной поверхности и выражается в долях или процентах. Анализ его временных и территориальных закономерностей обуславливает актуальность использования данных дистанционного зондирования в связи с их возрастающими возможностями, связанными в первую очередь с количественным анализом характеристик растительности (Барталев и др., 2016; Савин и др., 2017).

Для анализа проективного покрытия на основе данных дистанционного зондирования могут быть использованы различные подходы. Достаточно широко используются методы, применяющие вегетационные индексы (VIs), включая NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Purevdorj et al., 1998; Zhang et al., 2006), или анализ спектральных смесей (SMA) (Camacho-De Coca et al., 2004). Другие подходы основаны на использовании уравнения переноса (Kallel et al., 2007; Shabanov, Gastellu-Etchegorry, 2018) или искусственных нейронных сетей (Varet et al., 1995; Jia et al., 2015).

Связь между проективным покрытием и вегетационным индексом NDVI, согласно исследованиям (Gutman, Ignatov, 1998; Jiménez-Muñoz et al., 2009; Imukova et al., 2015), может

быть описана уравнением линейного вида. Однако основная сложность использования данного подхода состоит в подборе коэффициентов уравнения, которые могут различаться для разных видов растительности. По результатам исследований (Jiang et al., 2006; Shabanov, Gastellu-Etchegorry, 2018) установлено, что зависимость между проективным покрытием и NDVI имеет более сложный вид и приближается к линейной только при определённых условиях.

Ранее для аграрной растительности южной лесостепи (территория Белгородской области) на основе спутниковых данных MODIS и полевой экспериментальной информации 2012–2015 гг. изучена зависимость вегетационного индекса NDVI от проективного покрытия (Терехин, 2016). Выявлено, что значения вегетационного индекса характеризуются статистически значимыми различиями для разных градаций проективного покрытия (0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 %).

Однако невысокое пространственное разрешение (250 м/пиксель) данных MODIS вносит ряд ограничений при количественной оценке отражательных свойств конкретных аграрных полей, особенно небольших размеров. Вследствие того, что на отдельные угодья приходится малое количество пикселей, становится проблематичной или невозможной оценка вариативности спектра отражения в их пределах. Решение подобных задач требует привлечения более детальных спутниковых данных, например Sentinel, Landsat, и использования специализированных подходов, основанных на сопоставлении дистанционных данных различного пространственного разрешения, в частности скейлинга (Wang et al., 2004). Его суть заключается в создании картограммы исследуемого параметра растительности (например, индекса листовой поверхности или проективного покрытия) на основе данных высокого пространственного разрешения или с привлечением полевой информации. После этого выполняется снижение разрешения полученной картограммы до величины разрешения менее детальных снимков, с которыми планируется сопоставление, и выполняется анализа картограмм, созданных на основе дистанционных данных разной детальности.

Другие подходы к решению этой проблемы основаны на сравнении исследуемых параметров, вычисленных методом зональной статистики в пределах контуров конкретных угодий. Однако применение этого подхода требует создания векторного слоя всех анализируемых объектов, число которых может быть достаточно велико.

Цель настоящей работы заключалась в изучении проективного покрытия агроэкосистем лесостепи на основе совместного применения различных типов спутниковых данных (MODIS, Sentinel-2) с использованием полевой информации. В задачи исследования входил анализ сезонной динамики проективного покрытия для основных видов растительности агроэкосистем, типичных для территории лесостепной зоны. Исследование проводилось в Белгородской области, где пахотные земли составляют около 60 % территории.

## Материалы и методика исследования

В экспериментальной части исследования проводилась оценка проективного покрытия агроэкосистем по данным с двух сенсоров различного пространственного и временного разрешения. Первый блок работ включал анализ проективного покрытия на основе информационных продуктов, создаваемых на базе снимков MODIS. Второй блок посвящён его изучению с использованием данных со спутника Sentinel-2A.

**Первый блок исследований.** На первом этапе была выполнена верификация зависимости NDVI от проективного покрытия, которая описана статье (Терехин, 2016), и проверка её эффективности для анализа величины проективного покрытия на уровне конкретных обрабатываемых полей на примере полевых данных 2016 г.

Для этой цели нами на протяжении вегетационного периода 2016 г. на совокупности обрабатываемых полей общей площадью 1510 га (при средней площади 50,3 га), расположенных на территории Новооскольского и Чернянского районов Белгородской области, проведена оценка величины проективного покрытия.

Полевые исследования были проведены с начала мая по конец октября 2016 г.: 02.05.2016, 30.05.2016, 26.06.2016, 17.07.2016, 01.08.2016, 27.08.2016, 24.09.2016, 22.10.2016. Величина фактического проективного покрытия оценивалась по фотографиям, сделанным в надиры с небольшой высоты в различных участках посевных площадей. Если при обследовании выяснялось, что проективное покрытие в пределах одного аграрного поля существенно различается, производились замеры в разных его частях. Одновременно фиксировалась стадия развития растительного покрова и его текущее состояние. В общей сложности полевые данные включали свыше 200 измерений.

На следующем этапе для каждого исследуемого аграрного поля на основе снимков высокого пространственного разрешения, полученных с ресурса ArcGIS World Imagery, был подготовлен его векторный контур. Он был необходим для расчёта величин вегетационного индекса, соответствующих каждой площади в определённый временной срез. После этого для каждой посевной площади на основе информационных продуктов MOD13Q1 (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>) методом зональной статистики рассчитали сезонный ряд вегетационного индекса с 6 апреля по 1 ноября 2016 г. То есть для каждого аграрного поля рассчитывалось значение NDVI, усреднённое в пределах его контуров. Информационные продукты MOD13Q1 (Didan, 2015) содержат композитные значения вегетационного индекса NDVI за 16 дней с пространственным разрешением 250 м. Они формируются на основе атмосферно и радиометрически откорректированных спутниковых снимков MODIS, что позволяет сравнивать между собой значения индекса за разные даты.

На следующем этапе значения вегетационного индекса были пересчитаны в величины проективного покрытия. Для вычисления использовали уравнение зависимости NDVI от проективного покрытия, полученное ранее (Терехин, 2016) на основе анализа данных с посевных площадей Белгородской области:

$$\text{NDVI} = 0,4495\text{GVF} + 0,3724, \quad (1)$$

где GVF — проективное покрытие зелёной фитомассой (green vegetation fraction) в долях от 0 до 1.

Данное уравнение характеризует проективное покрытие в целом для растительности посевных площадей, типичных для Белгородской области. Оно рассчитано и апробировано для изучения региональных особенностей сезонной динамики проективного покрытия агроэкосистем. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) согласно этому уравнению составлял 0,908 при уровне значимости 0,05. Необходимо отметить, что отрицательные расчётные значения проективного покрытия по данной зависимости фактически соответствуют его полному отсутствию, т. е. нулевой величине.

В связи с тем, что MOD13Q1 являются композитными изображениями вегетационного индекса, для сравнения фактических и расчётных значений проективного покрытия нами подбирались 16-дневные временные интервалы, охватывающие даты полевых работ. Таким способом была сформирована необходимая выборка, включающая фактические значения проективного покрытия, определённые по полевым данным, и его расчётные величины, вычисленные по NDVI. На её основе была выполнена оценка эффективности рассчитанного ранее уравнения зависимости NDVI от проективного покрытия зелёной фитомассой.

Анализ фактических и расчётных значений вегетационного индекса провели как для всех анализируемых посевных площадей в целом, так и для групп полей с различными типами аграрной растительности: ячменя, пшеницы озимой, сои, подсолнечника, кукурузы и многолетних трав. Статистическая оценка расчётных и фактических величин состояла в анализе тесноты связи между ними (на основе коэффициентов корреляции и детерминации) и сравнении их сезонного хода.

Заключительный этап этого блока исследований включал расчёт и анализ графиков сезонной динамики проективного покрытия зелёной фитомассой для основных типов аграрной растительности региона (по данным MODIS). Кривые сезонной динамики посевов рассчитывались по используемому уравнению за 13 дат с начала апреля по конец октября 2016 г. Анализ полученных кривых позволил установить основные особенности сезонного изменения

проективного покрытия зелёной фитомассой для ключевых региональных видов растительности агроэкосистем.

**Второй блок исследований.** На этом этапе для анализа проективного покрытия были использованы данные со спутника Sentinel-2A (сенсор MSI) уровня обработки L1C (выполнена геометрическая и радиометрическая коррекция). Спутниковые снимки с Sentinel-2A MSI, в отличие от снимков с сенсора MODIS, характеризуются более высоким пространственным разрешением в красном, ближнем инфракрасном (10 м/пиксель) и других каналах. В связи с этим они позволяют анализировать не только среднее проективное покрытие для угодий, но и проводить анализ его вариабельности в пределах конкретных обрабатываемых полей.

С другой стороны, снимки Sentinel-2 характеризуются более низким временным разрешением, составляющим 10 дней. Вследствие этого на территорию исследования на вегетационный период 2016 г. не удалось подобрать непрерывную серию безоблачных изображений и, соответственно, вычислить сезонный временной ряд спектральных показателей, как, например, по MODIS для NDVI. В то же время на некоторые сроки, близкие к датам полевых работ или совпадающие с ними, удалось сделать подборку снимков: 7 августа, 27 августа, 26 октября — и провести их анализ. В настоящей работе исследовалось проективное покрытие, рассчитанное на основе данных Sentinel-2 двумя способами:

- методом пересчёта значений вегетационного индекса NDVI с использованием предложенной зависимости (1);
- с помощью методики, использующей обученную нейронную сеть, которая реализована в специализированном программном обеспечении SNAP (<http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>).

Для снимков Sentinel выполнили пересчёт в коэффициенты спектральной яркости на нижней границе атмосферы (перевод из уровня L1C в уровень L2A). После этого на их основе рассчитали растры проективного покрытия.

В первом случае растры проективного покрытия создавали методом предварительного расчёта NDVI с последующим пересчётом в значения проективного покрытия по уравнению (1). Во втором случае применяли методику вычисления проективного покрытия, реализованную в SNAP и основанную на использовании коэффициентов спектральной яркости из большинства каналов сенсора MSI.

После этого провели количественное сравнение величин проективного покрытия, вычисленных по разным типам данных:

- по значениям NDVI, извлечённым из данных MO13Q1;
- по значениям NDVI, извлечённым из снимков Sentinel-2 с использованием предложенного уравнения (Терехин, 2016);
- по данным Sentinel уровня L2A с использованием методики, реализованной в инструменте SNAP Biophysical Processor.

Кроме того, выполнили анализ вариабельности проективного покрытия в пределах конкретных обрабатываемых полей на основе данных Sentinel. Для этого использовался метод количественной оценки коэффициента вариации проективного покрытия и метод анализа его вычисленных картограмм.

Необходимо отметить, что к настоящему времени Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (NOAA) на основе данных VIIRS разработаны информационные продукты, характеризующие еженедельное проективное покрытие на глобальном уровне (<https://www.ospo.noaa.gov/Products/land/gvf/index.html>) с пространственным разрешением 1 км/пиксель. Алгоритм основан на вычислении проективного покрытия по значениям вегетационного индекса EVI (Enhanced Vegetation Index). Однако вследствие относительно небольшого размера аграрных угодий региона (около 50 га) в настоящем исследовании не удалось провести количественный анализ проективного покрытия по этим данным.

Заключительный этап исследования состоял в создании региональной карты проективного покрытия посевных площадей на основе данных Sentinel-2A. Её подготовка требовала



покрытия территории Белгородской области (юг Среднерусской возвышенности) безоблачными снимками. Для 2016 г. такое покрытие удалось подобрать только на конец августа (*табл. 1*). Все снимки, представленные в таблице, прошли атмосферную коррекцию (пересчёт в уровень L2A) с использованием модуля Sen2Cor.

*Таблица 1.* Снимки Sentinel-2A, используемые для создания региональной карты проективного покрытия посевных площадей Белгородской области

Ячейка спутниковой сцены	Дата получения снимка	Покрываемая территория региона
T37UDS	27.08.2016	Восточная часть
T37UDR	27.08.2016	Юго-восточная часть
T37UCS	30.08.2016	Центральная часть
T36UXB	30.08.2016	Западная часть

Расчёт растров проективного покрытия для создания его региональной карты по данным Sentinel-2 осуществили с помощью инструмента Biophysical Processor, работа которого основана на обученной нейронной сети. Для создания карты проективного покрытия использовали специально подготовленный нами и уточнённый по спутниковым данным 2016 г. векторный слой всех посевных площадей региона, включающий контуры свыше 32 000 полей (1,5 млн га). На основе растров проективного покрытия для каждого аграрного угодья вычислили его среднюю величину методом зональной статистики в программе ERDAS по состоянию на 27–30 августа 2016 г. После этого рассчитали среднее значение проективного покрытия аграрных полей для каждого административного района Белгородской области и на основе полученных данных методом пространственной интерполяции подготовили картограмму территориального распределения проективного покрытия на дату исследования. Для повышения достоверности при анализе использовали обрабатываемые поля площадью не менее 1 га.

Для пространственного сопоставления на региональном уровне величин проективного покрытия, вычисленных по данным Sentinel MSI и MODIS, нами также была подготовлена региональная карта проективного покрытия на основе данных MOD13Q1 от 28 августа 2016 г. Значения индекса пересчитали в величины проективного покрытия по уравнению (1), после чего методом зональной статистики по аналогии с данными Sentinel вычислили значения проективного покрытия для каждого аграрного поля Белгородской области, а затем усреднили для каждого административного района. При анализе использовали обрабатываемые поля площадью не менее 20 га. После этого выполнили сравнение полученных картограмм. Результаты исследования получены с применением программного обеспечения и оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием Белгородского государственного национального исследовательского университета.

## Результаты и их обсуждение

Сравнение вычисленной по данным MOD13Q1 и фактической величины проективного покрытия зелёной фитомассой, определённой в полевых условиях, показало, что их коэффициент корреляции составил 0,88. Коэффициент детерминации, соответственно, равен 0,77 на уровне значимости меньше 0,05. При сопоставлении средних по всем посевным площадям фактических и расчётных значений проективного покрытия (*табл. 2*) было выявлено, что его расчётные величины, как правило, выше фактических. Обусловлено это тем, что они получены по композитным изображениям за 16 дней, характеризующим NDVI не на конкретную дату, а его максимальное значение за соответствующий период времени.

В то же время, что очень важно, сезонная динамика расчётного проективного покрытия в основном соответствует сезонной динамике фактического проективного покрытия.

Таблица 2. Сравнение сезонной динамики фактического и расчётного (по данным MOD13Q1) проективного покрытия зелёной фитомассой по 2016 г.

Проективное покрытие	Дата							
	2 мая	30 мая	26 июня	17 июля	1 августа	27 августа	24 сентября	22 октября
Среднее фактическое	0,32	0,71	0,81	0,69	0,70	0,71	0,22	0,25
Среднее расчётное	0,40	0,94	0,90	0,79	0,82	0,82	0,26	0,32
Стандартное отклонение фактическое	0,31	0,41	0,21	0,35	0,37	0,25	0,31	0,22
Стандартное отклонение расчётное	0,28	0,24	0,16	0,23	0,31	0,18	0,26	0,14

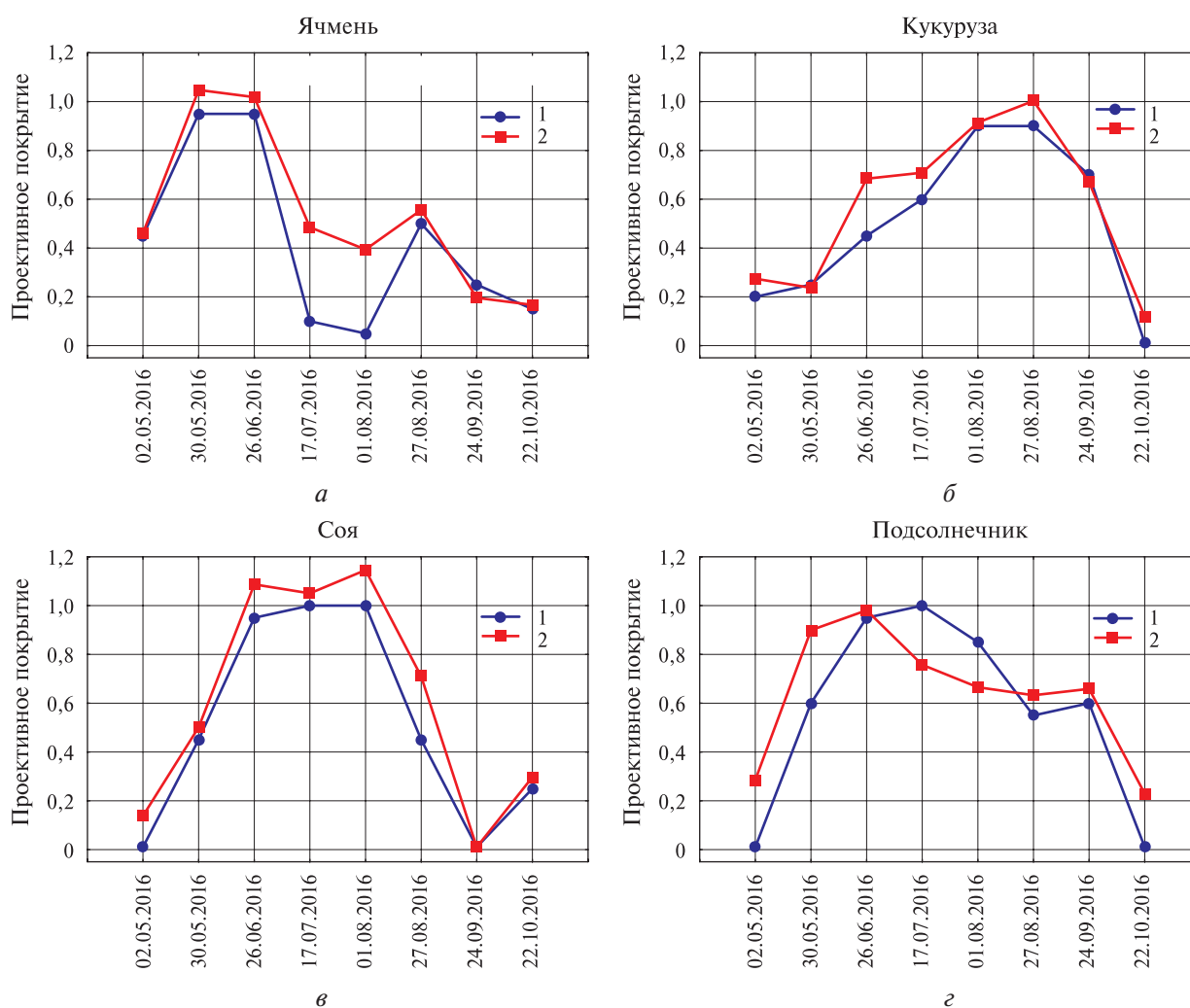


Рис. 1. Фактическая (1) и расчётная (2) сезонная динамика проективного покрытия зелёной фитомассой для полей с различными типами растительности

Необходимо отметить, что с точки зрения мониторинга конкретных типов посевов интерес представляет анализ фактических и расчётных значений проективного покрытия, проведённый для отдельных видов растительности агроэкосистем, например озимой пшеницы или ячменя. При сравнении фактических и расчётных величин проективного покрытия для конкретных типов посевов были определены следующие значения коэффициента корреляции (уровень значимости меньше 0,05): для ячменя ярового — 0,97; подсолнечника — 0,96; кукурузы — 0,84; сои — 0,95; пшеницы озимой — 0,74; многолетних трав — 0,68. Графический

анализ (рис. 1, см. с. 116) также показал, что расчётная сезонная динамика проективного покрытия в значительной степени совпадает с фактической.

На рис. 1а видно, что для полей с ячменём максимум проективного покрытия зелёной фитомассой пришёлся на период с 30 мая по 26 июня, что является особенностью зерновых культур, выращиваемых в регионе. Разница между фактическим и расчётным проективным покрытием максимальна в период 17 июля – 1 августа по следующей причине. На полях с ячменём в это время наблюдается быстрая смена состояний растительного покрова: с середины июля по его конец происходит быстрое созревание посевов и их уборка, а с начала по середину августа успевают взойти сидеральные культуры. Вследствие того, что в информационных продуктах MOD13Q1 фиксируется наибольшее значение вегетационного индекса за 16-дневный период, они не всегда позволяют зафиксировать реальное состояние растительности на основе значений вегетационных индексов. Хотя, как показали результаты настоящего исследования, такие случаи встречаются достаточно редко.

Для полей с подсолнечником максимальное значение зафиксировано в первой половине июля, с соей — в июле. Поле с ячменём (см. рис. 1а) после уборки урожая было засеяно сидеральными культурами, непродолжительный рост которых обусловил увеличение проективного покрытия в конце августа – начале сентября (второй пик синего графика на рис. 1а). Поле с соей (рис. 1в) после уборки урожая в конце сентября было засеяно озимой пшеницей, что привело к росту проективного покрытия в период с 24 сентября по 22 октября. Подобный анализ нами был проведён для всех тестовых полей. На рис. 2 показаны сезонные значения проективного покрытия (GVF, Green Vegetation Fraction) для посевной площади с соей, график динамики проективного покрытия зелёной фитомассой которой можно увидеть на рис. 1в.

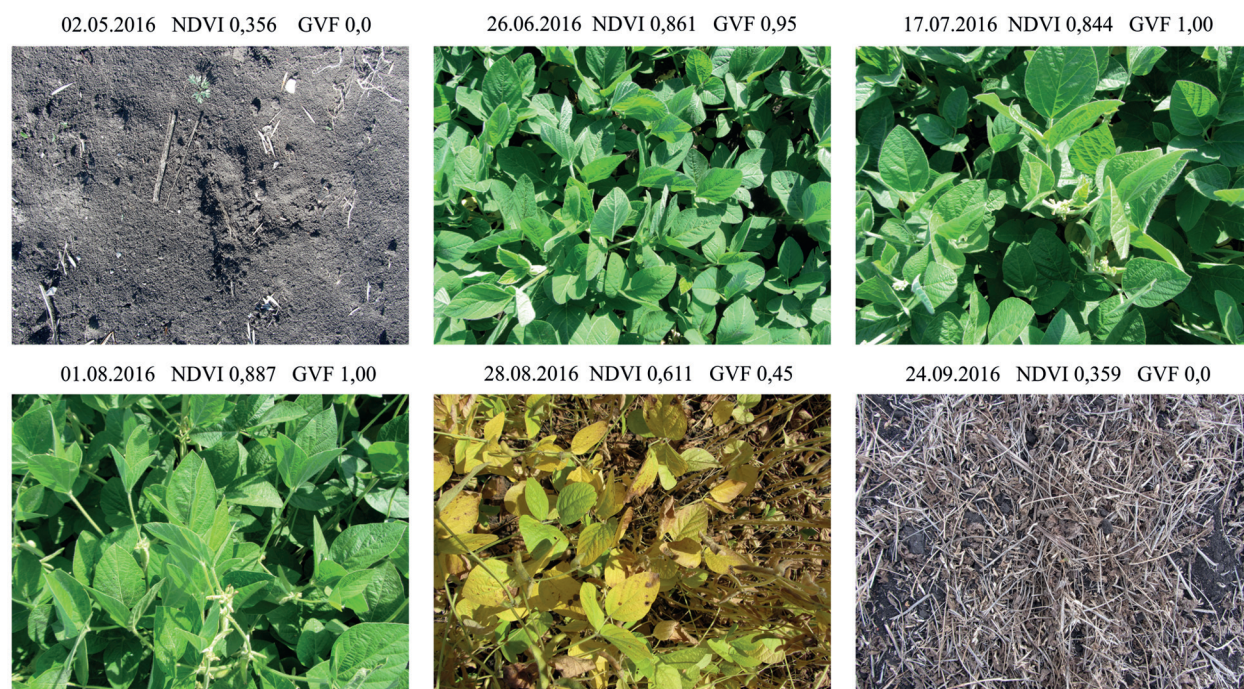


Рис. 2. Сезонное изменение состояния растительного покрова посевной площади с соей, её NDVI и проективного покрытия зелёной фитомассой (GVF)

Таким образом, верификация используемой зависимости NDVI от проективного покрытия (1), проведённая на основе полевых данных 2016 г., показала высокое сходство его расчётных и фактических значений, а следовательно, возможность применения этой зависимости для количественной оценки проективного покрытия конкретных типов посевов на отдельных обрабатываемых полях.



Использование расчётной зависимости позволило на основе NDVI по данным MOD13Q1 вычислить кривые сезонной динамики проективного покрытия для основных региональных типов растительности агроэкосистем: озимой пшеницы, ячменя ярового, сои, кукурузы, подсолнечника, многолетних трав (рис. 3).

Характеризуя графики на рис. 3, стоит отметить, что озимая пшеница и ячмень яровой с конца июля уже не присутствуют на полях и состояние растительного покрова таких угодий определяется особенностями обработки полей после уборки урожая.

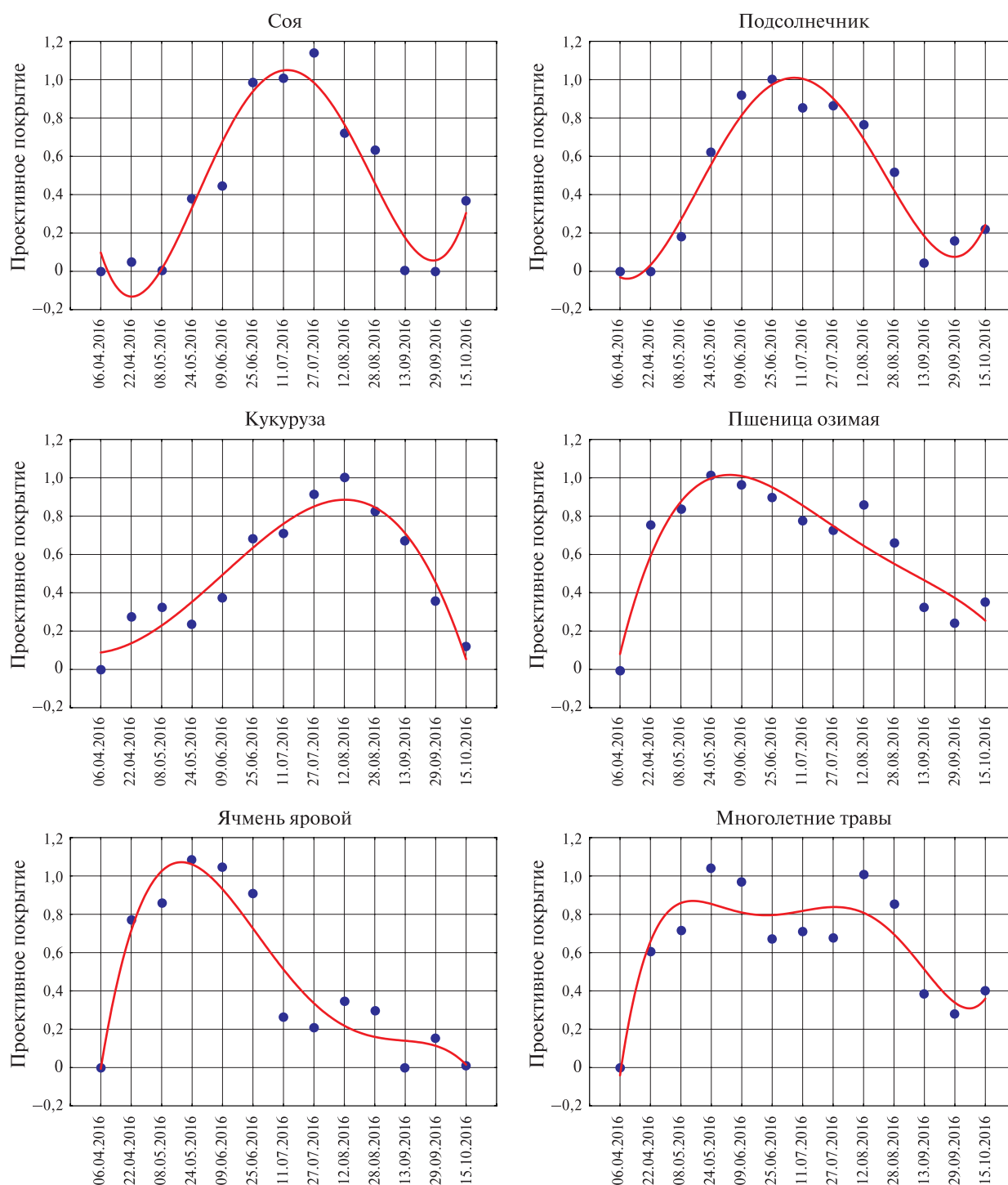


Рис. 3. Сезонная динамика проективного покрытия основных типов растительности, типичных для агроэкосистем лесостепи Центрально-Черноземного района (Белгородская область), рассчитанная по данным MODIS



Для получения более полной картины, характеризующей проективное покрытие посевных площадей, включая анализ его вариабельности внутри их контуров, изучены его величины, вычисленные на основе данных Sentinel-2A. Анализ проведён для дат вегетационного периода, на которые в 2016 г. удалось подобрать безоблачные изображения. Сравнение величин проективного покрытия, средних для конкретных угодий, измеренных по разным типам данных (MOD13Q1, Sentinel-L2A), показало, что в две из трёх изученных дат величины проективного покрытия, рассчитанные по методике, реализованной в инструменте SNAP Biophysical Processor, характеризуются наиболее тесной корреляцией с фактическими значениями (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициент корреляции между фактическими значениями проективного покрытия и его величинами, вычисленными разными способами

Дата	MOD13Q1 (NDVI)	Sentinel-2 (NDVI)	Sentinel-2 (Biophysical Processor)
07.08.2016	0,87	0,90	0,91
27.08.2016	0,72	0,76	0,74
26.10.2016	0,79	0,84	0,84

В то же время из данных в табл. 3 видно, что их коэффициент корреляции не намного выше коэффициента корреляции с фактическими значениями величин, рассчитанных по значениям NDVI с использованием уравнения (1). Ближайшие даты полевых исследований, с которыми проводилось сравнение: 01.08.2016, 27.08.2016 и 22.10.2016.

Анализ проективного покрытия, вычисленного по данным Sentinel-2 с использованием инструмента Biophysical Processor SNAP, позволил оценить его сезонные значения для различных типов растительности, а также вариабельность на основе коэффициента вариации в пределах конкретных угодий (табл. 4).

Таблица 4. Характеристика проективного покрытия, рассчитанного на основе данных Sentinel-2A для различных типов растительности агроэкосистем

Тип растительности агроэкосистем	07.08.2016		27.08.2016		26.10.2016	
	Среднее	Коэффициент вариации, %	Среднее	Коэффициент вариации, %	Среднее	Коэффициент вариации, %
Подсолнечник	0,61	18,2	0,44	20,2	0,03	130,7
Кукуруза	0,67	9,2	0,64	80,1	0,09	30,2
Соя	0,87	11,2	0,72	16,3	0,03	111,5
Многолетние травы	0,33	32,4	0,64	14,5	0,20	34,3

Из табл. 4 видно, что проективное покрытие, рассчитанное на основе данных Sentinel-2, объективно отражает стадии развития растительности, несмотря на то, что в таблице представлены только его значения на некоторые даты развития посевов. В частности, для подсолнечника, кукурузы и сои в период с 7 августа по 26 октября на территории лесостепной зоны наблюдается снижение величины проективного покрытия зелёной фитомассой вследствие созревания посевов и их последующей уборки. При этом в первой декаде августа (07.08.2016) из этих трёх культур наибольшее проективное покрытие характерно для сои. Для полей с многолетними травами, наоборот, характерно периодическое повышение и снижение величины проективного покрытия на протяжении вегетационного сезона, что также отражено в табл. 4. Вариация проективного покрытия в пределах отдельных полей наглядно отражается на его картограммах, вычисленных для разных сроков (рис. 4, см. с. 120).

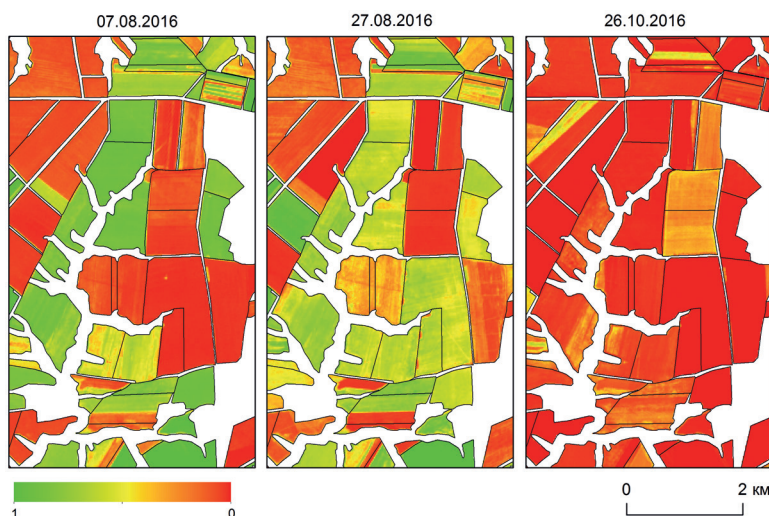


Рис. 4. Пример картограмм, характеризующих динамику проективного покрытия посевных площадей и его вариабельность, рассчитанную на основе данных Sentinel-2

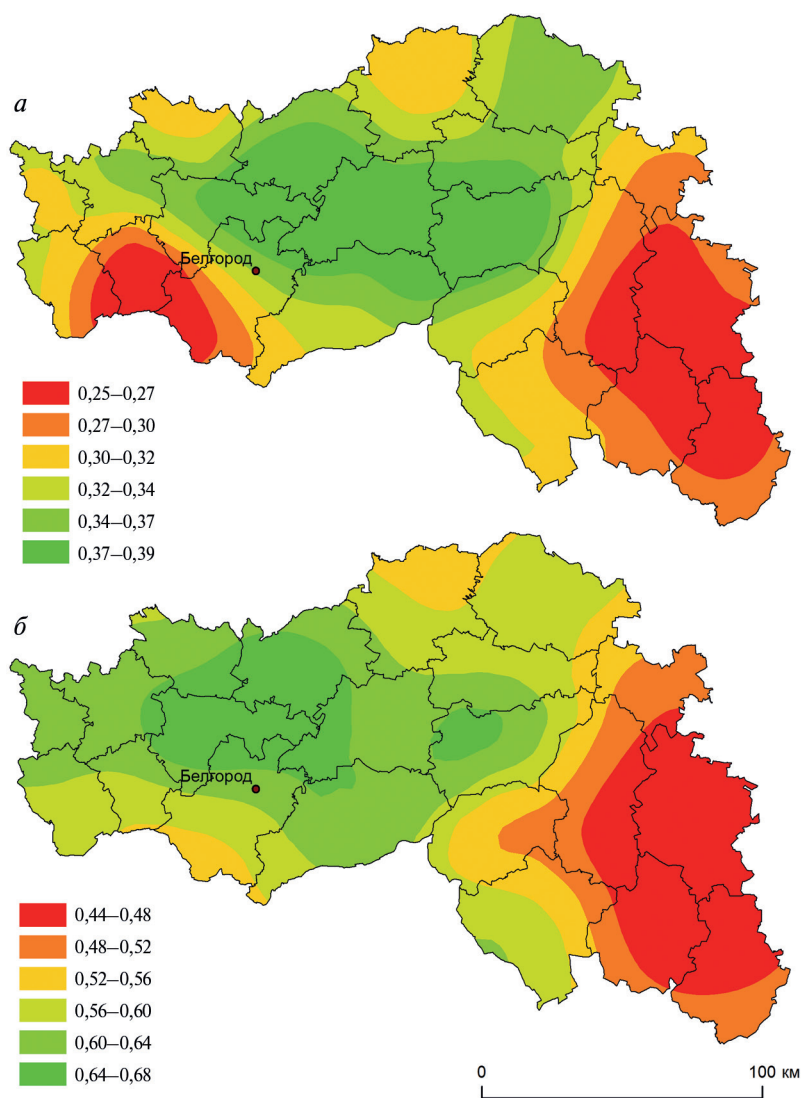


Рис. 5. Картограмма пространственного изменения проективного покрытия посевных площадей на территории Белгородской области 27–30 августа 2016 г. по данным Sentinel-2 (а) и 28 августа – 12 сентября 2016 г. по данным MOD13Q1 (б)

Коэффициент вариации показывает также стадию развития посевов. В сроки наибольшего проективного покрытия зелёной фитомассой посевы характеризуются максимальной однородностью и наименьшими величинами коэффициента вариации. Вследствие созревания посевов коэффициент вариации начинает расти, потому что на полях появляются участки с разным проективным покрытием.

Сравнение региональной картограммы проективного покрытия посевных площадей, рассчитанной по данным Sentinel-2 MSI за 27–30 августа 2016 г., и аналогичной картограммы, рассчитанной по данным MOD13Q1 за 28 августа – 12 сентября 2016 г., позволило установить, что территориальные особенности проективного покрытия, отражённые на них, во многом аналогичны (рис. 5).

С другой стороны, на рис. 5 видно, что значения проективного покрытия, полученные по данным MOD13Q1 (см. рис. 5б), завышены по сравнению с величинами, вычисленными по Sentinel-2. Объяснить это можно тем, что MOD13Q1, являясь композитными изображениями, характеризуют наибольшее значение NDVI за 16-дневный временной интервал, что отражается и на завышении расчётных величин проективного покрытия.

## Выводы

В результате выполненных исследований получены новые количественные данные о влиянии проективного покрытия зелёной фитомассой на спектральный отклик растительности агроэкосистем, типичных для зоны лесостепи (юг Центрального Черноземья). С использованием фактических значений проективного покрытия, измеренных с помощью полевых данных, проведена оценка точности его вычисления на основе различных типов спутниковой информации: MOD13Q1 и Sentinel-2. Установлено, что проективное покрытие, рассчитанное по методике, основанной на нейронных сетях и реализованной в Sentinel Application Platform, характеризуется наиболее тесной корреляцией с фактическими данными, но в то же время она не намного выше корреляции, которую показали значения, вычисленные на основе предложенного уравнения зависимости NDVI от проективного покрытия. На основе данных Sentinel-2 проведён анализ средних сезонных значений проективного покрытия для различных типов посевов и выполнена оценка его вариабельности в пределах аграрных угодий. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования сезонного развития растительного покрова аграрных угодий, территориальной оценки факторов, способствующих изменению зелёной фитомассы растительности, оценке урожайности агроэкосистем.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-00049).

## Литература

1. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. Савин И. Ю., Докукин П. А., Вернюк Ю. И., Жоголев А. В. О влиянии засоренности на NDVI посевов ярового ячменя, определяемый по спутниковым данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 185–195.
3. Терехин Э. А. Влияние проективного покрытия растительности посевных площадей на ее спектрально-отражательные свойства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 61–71.
4. Baret F., Clevers J. G. P. W., Steven M. D. The Robustness of Canopy Gap Fraction Estimates from Red and Near-Infrared Reflectances: A Comparison of Approaches. *Remote Sensing of Environment*. 1995. V. 54. P. 141–151.
5. 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.

6. *Didan K.* MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC. 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD13Q1.006.
7. *Gutman G., Ignatov A.* The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models // Intern. J. Remote Sensing. 1998. V. 19. No. 8. P. 1533–1543.
8. *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.
9. *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.
10. *Jiang Z., Huete A., Chen J., Chen Y., Li J., Yan G., Zhang X.* Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 101. P. 366–378.
11. *Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Plaza A., Guanter L., Moreno J., Martínez P.* Comparison Between Fractional Vegetation Cover Retrievals from Vegetation Indices and Spectral Mixture Analysis: Case Study of PROBA/CHRIS Data Over an Agricultural Area // Sensors. 2009. V. 9. No. 2. P. 768–793.
12. *Kallel A., Le Hégarat-Masclé S., Otlé 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.
13. *Purevdorj T., Tateishi R., Ishiyama T., Honda Y.* Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices // Intern. J. Remote Sensing. 1998. V. 19. No. 18. P. 3519–3535.
14. *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.
15. *Wang Y., Woodcock C. E., Buermann W., Stenberg P., Voipio P., Smolander H., Häme T., Tian Y., Hu J., Knyazikhin Y., Myneni R. B.* Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 91. No. 1. P. 114–127.
16. *Zhang X., Yan G., Li Q., Li Z.-L., Wan H., Guo Z.* Evaluating the fraction of vegetation cover based on NDVI spatial scale correction model // Intern. J. Remote Sensing. 2006. V. 27. No. 24. P. 5359–5372.

## Seasonal dynamics of the agroecosystems green vegetation fraction derived from satellite data

E. A. Terekhin

*Belgorod State University, Belgorod 308015, Russia*  
*E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

Fraction of green vegetation cover is one of the important parameters determining the vegetation state. This paper presents the results of green vegetation fraction estimation for agroecosystems typical of south forest-steppe zone using both Sentinel and MODIS remote sensing data. Study objects are agrolandscapes of the south of Central Chernozem Region of Russia. The assessment of the relationship between the actual and calculated green vegetation fraction values has been made using over 200 measurements obtained during the field research. High correlation between the actual green vegetation fraction values and its values calculated from MODIS and Sentinel-2 MSI data was established. The variability of green vegetation fraction within the contours of crop areas was studied using Sentinel data for different types of crops. Seasonal dynamics of the fraction of green vegetation cover was calculated for main regional crop types using NDVI values: barley, winter wheat, sunflower, soybean, corn, sunflower and perennial grasses. It was found that the seasonal dynamics of calculated fraction of green vegetation corresponds to the main phenophases of vegetation types in the south of forest-steppe.

**Keywords:** green vegetation fraction, green phytomass, vegetation cover, agroecosystems, remote sensing, vegetation indices, MODIS, Sentinel

Accepted: 30.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-111-123



## References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
2. Savin I. Yu., Dokukin P. A., Vernyuk Yu. I., Zhogolev A. V., O vliyaniy zasorennosti na NDVI posevov yarovogo yachmenya, opredelyaemyi po sputnikovym dannym MODIS (About the influence of weeds on spring barley NDVI determined from MODIS satellite data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 185–195.
3. Terekhin E. A., Vliyanie proektivnogo pokrytiya rastitel'nosti posevnykh ploshchadei na ee spektral'no-otrazhatel'nye svoystva (Influence of crop areas vegetation cover fraction on their spectral reflectivity properties), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 61–71.
4. Baret F., Clevers J. G. P. W., Steven M. D., The Robustness of Canopy Gap Fraction Estimates from Red and Near-Infrared Reflectances: A Comparison of Approaches, *Remote Sensing of Environment*, 1995, Vol. 54, pp. 141–151.
5. 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.
6. Didan K., *MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]*, NASA EOSDIS LP DAAC, 2015, DOI: 10.5067/MODIS/MOD13Q1.006.
7. Gutman G., Ignatov A., The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models, *Intern. J. Remote Sensing*, 1998, Vol. 19, No. 8, pp. 1533–1543.
8. Imukova K., Ingwersen J., Streck T., Determining the spatial and temporal dynamics of the green vegetation fraction of croplands using high-resolution RapidEye satellite, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, Vol. 206, No. Supplement C, pp. 113–123.
9. 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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, pp. 4787–4796.
10. Jiang Z., Huete A., Chen J., Chen Y., Li J., Yan G., Zhang X., Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 101, pp. 366–378.
11. Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Plaza A., Guanter L., Moreno J., Martínez P., Comparison Between Fractional Vegetation Cover Retrievals from Vegetation Indices and Spectral Mixture Analysis: Case Study of PROBA/CHRIS Data Over an Agricultural Area, *Sensors*, 2009, Vol. 9, No. 2, pp. 768–793.
12. 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, Vol. 111, pp. 553–566.
13. Purevdorj T., Tateishi R., Ishiyama T., Honda Y., Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices, *Intern. J. Remote Sensing*, 1998, Vol. 19, No. 18, pp. 3519–3535.
14. 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.
15. Wang Y., Woodcock C. E., Buermann W., Stenberg P., Voipio P., Smolander H., Häme T., Tian Y., Hu J., Knyazikhin Y., Myneni R. B., Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland, *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 91, No. 1, pp. 114–127.
16. Zhang X., Yan G., Li Q., Li Z.-L., Wan H., Guo Z., Evaluating the fraction of vegetation cover based on NDVI spatial scale correction model, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, No. 24, pp. 5359–5372.