Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS

Н.В. Шабанов¹, С.А. Барталев¹, Ф.В. Ерошенко², Д.Е. Плотников¹

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия ² Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр Михайловск, 356241, Россия E-mail: nikolay.shabanov@d902.iki.rssi.ru

Оценка биофизических параметров растительного покрова методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) представляет практический интерес для решения широкого круга научных и прикладных задач. Для получения оценок этих параметров, наряду с эмпирическими и статистическими подходами, получили распространение и методы, основанные на физических моделях. В данной статье представлены принципы оценки индекса листовой поверхности LAI (Leaf Area Index) по данным спутникового спектрорадиометра MODIS. Вычисление ежедневных значений LAI основано на данных измерений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в красном и ближнем ИК каналах MODIS, имеющих пространственное разрешение 250 м, с использованием результатов моделирования переноса фотонов в растительном покрове. Полученные значения LAI используются для построения очищенных от влияния облаков композитных изображений и реконструкции на их основе временных рядов индекса. В статье изложены физические принципы оценки значений LAI и приведён анализ получаемых результатов, в том числе сравнение с данными наземных измерений. Информационный продукт, содержащий значения LAI с еженедельной частотой для территории России за период с марта 2000 г. по настоящее время, доступен для анализа в среде сервиса спутникового мониторинга растительного покрова ВЕГА-Science.

Ключевые слова: индекс листовой поверхности, LAI, дистанционное зондирование, моделирование переноса излучения, MODIS

Одобрена к печати: 30.07.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178

Введение

Индекс листовой поверхности LAI (Leaf Area Index) представляет собой биофизическую характеристику растений, определяемую величиной отношения суммарной площади односторонней поверхности листьев на участке земной поверхности к площади данного участка (${\rm M}^2/{\rm M}^2$). Индекс LAI является одним из ключевых параметров, контролирующих потоки энергии и вещества (водяной пар и углекислый газ) между растительным покровом и атмосферой, и используется при моделировании продуктивности экосистем, климатических изменений, биогеохимических циклов (Boogaard et al., 1998; Dickinson et al., 1986; Potter et al., 1993; Running, Coughlan, 1988).

Существующие определения LAI могут несколько варьировать в зависимости от типов растений, их состояния или фазы развития, изучаемых фракций (вегетативные органы, стволы, ветви и пр.) (Asner et al., 2003). В настоящей работе под LAI будем понимать индекс, определяемый совокупным вкладом всех зелёных фракций растений, часто называемый GAI (Green Area Index).

Оценку LAI можно проводить с помощью методов прямых и бесконтактных измерений. При применении прямых методов проводятся контактные (деструктивные) измерения веса и площади поверхности листьев с последующим получением статистических соотношений между указанными характеристиками. Бесконтактные наземные методы оценки LAI могут быть основаны на использовании портативных спектрорадиометров (LAI-2000, DEMON, Ассираг и др.) и соответствующих соотношений с характеристиками отражённого или пропущенного растительным покровом излучения или специальной обработки фотографий полога, полученных предварительно калиброванной сверхширокоугольной камерой. При применении дистанционных (аэрокосмических) радиометрических измерений в оптическом диапазоне для оценки LAI часто используются их соотношения с характеристиками отражённого излучения или производными вегетационными индексами, такими как, например, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SR (Simple Ratio), EVI (Enhanced Vegetation Index) (Huete et al., 2002). Наряду с пассивными дистанционными методами, основанными на измерениях отражённого солнечного излучения, для оценки LAI применяют также радарные и лидарные измерения (Zheng, Moskal, 2009).

Первые глобальные карты LAI были построены в 1994 г. с использованием эвристического алгоритма и набора данных FASIR (Fourier Adjusted, Solar zenith angle corrected, Interpolated and Reconstructed) (Sellers et al., 1994), включающего ежемесячные композитные изображения пространственного разрешения 1×1°, полученные на основе данных NOAA AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Предпринятые в дальнейшем попытки оценки LAI на основе данных AVHRR (с таким же пространственным и временным разрешением) и 3D уравнения переноса с эмпирическим подбором параметров (Myneni et al., 1997) не позволили в полной мере использовать потенциал физического моделирования в силу применения усреднённых по диапазону изменений свободных параметров (геометрические характеристики падающего и отраженного излучения, отражение почвы) соотношений LAI-NDVI, индивидуально построенных для различных классов растительности. Следующий важный этап исследований и разработок в данном направлении в начале 2000-х гг. связан с запуском спектрорадиометра MODIS на борту спутников Terra и Aqua. Получаемый Национальным агентством США по аэронавтике и исследованию космического пространства NASA стандартный информационный продукт MODIS LAI (https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/ mod15.php) строится на основе прошедших атмосферную коррекцию данных многоканальных спутниковых измерений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) и результатов моделирования этой величины с помощью уравнения переноса излучения в растительной среде (Knyazikhin et al., 1998). Продукт NASA MODIS LAI имеет глобальный охват и строится регулярно с периодичностью 4 и 8 сут и пространственным разрешением 500 м. Проведённые независимые исследования продукта NASA MODIS LAI (Cohen et al., 2003; Garrigues et al., 2007; Yang et al., 2006), направленные на его валидацию в сравнении с наземными измерениями и другими спутниковыми измерениями LAI (MERIS LAI, CYCLOPES LAI), показывают, что его целесообразно использовать в основном для региональных и глобальных исследований, при том что локальная его применимость ограничена ввиду низкого пространственного разрешения и остаточного влияния атмосферы.

Исследования Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) в области методов дистанционной оценки LAI характеризуются методической и алгоритмической преемственностью по отношению к стандартному продукту NASA MODIS LAI и направлены на снижение ряда его ограничений, которое потенциально может быть достигнуто за счёт повышения пространственного разрешения данных ДЗЗ, улучшения качества фильтрации зашумленных влиянием облаков и атмосферы измерений КСЯ, использования более детальных в пространственном и тематическом отношении базовых карт растительного покрова, поиска более адекватных описаний физических процессов при моделировании переноса излучения и уточнения параметров модели. Проводимые исследования предполагают максимально полное использование разработанных к настоящему времени в ИКИ РАН методов предварительной обработки временных рядов данных MODIS пространственного разрешения 250 м и позволяют дополнить измерениями LAI ряд существующих спутниковых тематических продуктов, характеризующих состояние и динамику растительного покрова России (Барталев, Лупян, 2013; Барталев и др., 2015а, б, 2016). Представленный в настоящей статье новый информационный продукт IKI MODIS LAI характеризует еженедельную изменчивость индекса листовой поверхности для территории России за период с марта 2000 г. по настоящее время с пространственным разрешением 250 м.

Алгоритм оценки LAI

Для формирования информационного продукта IKI MODIS LAI используется модернизированный алгоритм оценки (Knyazikhin et al., 1998; Shabanov et al., 2005) и программное обеспечение NASA, адаптированное к принятой в ИКИ РАН технологии обработки данных MODIS. Настоящая работа описывает физические основы алгоритма оценки индекса листовой поверхности и предварительные результаты анализа нового информационного продукта.

КСЯ системы «растительность – почва» в пространстве их значений в красном (Red) и ближнем инфракрасном (БИК или NIR) диапазонах длин волн изменяются в зависимости от площади листовой поверхности и отражательной способности почвы (*puc. 1*, слева). При этом КСЯ почвы в указанном двумерном пространстве измерений меняются вдоль прямой линии (линия почв), в общем случае описываемой уравнением $R_{\text{NIR}} = aR_{Red} + b$ с коэффициентами $a \neq 1, b \neq 0$, где R_{NIR} и R_{Red} — значения КСЯ в красном и БИК спектральных диапазонах соответственно (Baret et al., 1993). При увеличении плотности (росте LAI) растительного покрова отражательная способность системы «растительность – почва» в указанном двумерном пространстве измерений стремится к общему пределу (точке сходимости), не зависящему мости значений КСЯ в почвы. Наличие не зависящей от отражательной способности почвы точки сходимости значений КСЯ в пространстве Red – NIR выражает эффект насыщения, т.е. ослабление чувствительности КСЯ к изменениям LAI с возрастанием значений последнего.

Построенный по данным MODIS и представленный на *puc. 1 (слева)* пример показывает области двумерного пространства Red – NIR, соответствующие значениям LAI ниже (красный цвет) и выше (зелёный цвет) уровня насыщения. Жёлтый цвет на *puc. 1* соответствует ситуациям измерения КСЯ, для которых не было найдено модельных решений (например, изза шумов, вносимых влиянием атмосферы или ограничений модели). В данном случае LAI вычисляется на основе эмпирического соотношения LAI –NDVI (см. *puc. 1, справа*), которое рассчитывается путём усреднения (по свободным параметрам) модельных данных КСЯ (LAI) в красном и БИК каналах. Таким образом, совокупность двух (физического и эмпирического го) подходов составляет вычислительную основу MODIS LAI алгоритма — основной и запасной алгоритмы соответственно.



Рис. 1. Физические принципы вычисления LAI основным (*слева*) и запасным (*справа*) алгоритмами. Основной алгоритм основан на моделирования КСЯ в красном и БИК каналах с помощью уравнения переноса. Запасной алгоритм основан на эмпирическом соотношении между NDVI и LAI



Рис. 2. Примеры изображений, получаемых на основе данных Terra MODIS (гранула h20v04) на трёх различных этапах оценки LAI: 1 — ежедневное изображение за 16 июня 2014 г.; 2 — композитное изображение за период 16–22 июня 2014 г.; 3 — восстановленное изображение за тот же период

Процесс построения информационного продукта IKI MODIS LAI включает в себя три последовательных этапа: 1) вычисление ежедневных значений LAI; 2) построение еженедельных композитных изображений LAI; 3) реконструкция временных рядов значений LAI (*puc. 2*). Входными данными для вычисления значений LAI являются прошедшие атмосферную коррекцию величины КСЯ, входящие в состав стандартного продукта MOD09 (Vermote et al., 2002) в красном (620-670 нм) и ближнем ИК (841-876 нм) каналах MODIS, информация о геометрических характеристиках солнечного освещения и наблюдения (азимутальный и зенитный углы Солнца и визирования), карта типов растительного покрова (Friedl et al., 2002). На выходе формируется ежедневный информационный продукт, содержащий попиксельные данные о наиболее вероятном значении LAI, его стандартном отклонении, характеристиках надёжности полученных оценок (Quality Control - QC). Используя стохастическую модель уравнения переноса (Huang et al., 2008; Shabanov et al., 2000, 2018), набор модельных значений КСЯ вычисляют индивидуально для заданных типов растительного покрова (луга, кустарники, с.-х. земли, степи, лиственный и хвойный леса) и геометрических характеристик освещения/наблюдения. Каждому из указанных типов растительного покрова поставлены в соответствие значения параметров уравнения переноса, характеризующие спектральное альбедо листа, архитектуру растительного покрова, LAI, КСЯ различных типов почв. Измеряемые в красном и БИК каналах MODIS значения КСЯ сравниваются с соответствующими им модельными данными для заданных геометрических условий освещения/наблюдения и типа растительного покрова. Среднее по набору значений LAI, для которых было найдено соответствие, принимается в качестве оценки величины индекса. Значение LAI вычисляется для каждого пиксела входных данных с указанием уровня качества получаемых оценок в зависимости от наличия (остаточного) облачного покрова и точности атмосферной коррекции (Vermote et al., 2002). Полное математическое описание алгоритма вычисления ежедневных значений LAI приведено в ранее опубликованной работе (Shabanov et al., 2005).

На основе набора ежедневных данных LAI формируются композитные изображения, очищенные от влияния облаков, снежного покрова и других мешающих факторов. Алгоритм построения композитных изображений предполагает использование данных наблюдений за период, включающий каждую календарную неделю и два ближайших к её границам пятидневных интервала. На первом этапе осуществляется фильтрация каждого изображения LAI на основе масок облаков (включая отбрасываемые ими на земную поверхность тени) и снежного покрова. Следующий шаг статистической фильтрации временных рядов LAI выполняется в отношении признанных не зашумленными на предыдущем этапе данных путём исключения значений, выходящих за границы коридора (две величины стандартного отклонения от средней величины измерений за каждый семнадцатидневный интервал). Далее из соответствующих календарной неделе измерений LAI выбираются наиболее близкие к среднему значения, формирующее еженедельные композитные изображения.

Полученные таким образом композитные изображения значений LAI используются для восстановления непрерывных временных рядов данных методом LOESS с использованием полиномов второй степени и скользящего окна переменной длины (Плотников и др., 2014). Реконструкция временных рядов значений LAI позволяет дополнительно минимизировать влияние шумов, вызванных остаточным влиянием атмосферы и других мешающих факторов, а также в большинстве случаев восстановить пропуски во временных рядах. Примеры результатов, получаемых на различных шагах фильтрации временных рядов LAI, представлены на *рис. 2*.

Анализ и валидация результатов дистанционной оценки LAI

Применение описанного выше алгоритма позволило сформировать временные ряды еженедельных данных LAI на всю территорию России за период с марта 2000 г. по настоящее время с пространственным разрешением 250 м. Анализ и валидация полученных результатов оценки LAI к настоящему времени выполнялись на территорию гранулы h20v04 MODIS (территория юга РФ, включая Краснодарский и Ставропольский края) применительно к сельскохозяйственной растительности. Использованные для валидации результатов спутниковой оценки LAI опорные данные представлены наземными измерениями GAI на восьми полях озимой пшеницы, выполненными Северо-Кавказским федеральным научным аграрным центром (СНИИСХ) (*таблица*) с помощью весового метода (Ерошенко, 2015) в 2013 г. В работе применялись данные только 6 полей (2–7); регион, занимаемый полем 1, был использован для тестирования алгоритма.

Номер поля	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Площадь поля, га	Количество внутренних пикселов поля изображения MODIS
1	45,181237	42,112702	43,75	7
2	45,121875	42,072535	31,25	5
3	45,144792	42,079111	18,75	3
4	45,146875	42,129576	12,50	2
5	45,128125	42,267481	156,25	25
6	45,138542	42,262167	56,25	9
7	45,136458	42,256003	87,50	14

Координаты центров и размеры полей СНИИСХ, данные которых использовались в настоящей работе

Последовательность изображений LAI, характеризующих фенологические изменения растительного покрова, представлена на *рис. 3* (см. с. 171). Покрытие территории значащими оценками LAI меняется в течение года, имея тенденцию возрастания от зимы к лету, что вызвано, в частности, изменением маскирующего влияния теней облаков, обусловленного, в свою очередь, сезонными изменениями высоты Солнца. Пространственные и сезонные вариации LAI зависят от типов растительного покрова. В частности, территории вдоль побережья Чёрного моря покрыты лесами, величина LAI которых существенно выше значений индекса доминирующей на территории с.-х. растительности. На *рис. 4* (см. с. 171) сравниваются имеющие различное пространственное разрешение продукты NASA MODIS LAI (5000 м) и IKI MODIS LAI (250 м), последний из которых демонстрирует большую вариабельность значений LAI сельскохозяйственных угодий.



Рис. 3. Временной ряд изображений LAI, иллюстрирующих вариабельность значений индекса в течение года. Приведены восстановленные композитные изображения LAI по данным Terra MODIS для гранулы h20v04 за 2014 г.



Рис. 4. Сравнение NASA MODIS LAI (версия 6, 26 июня – 2 июля 2014 г.) и IKI MODIS LAI информационных продуктов (23–29 июня 2014 г.) для восточного побережья Азовского моря (гранула h20v04)

Рассмотрим несколько примеров количественного анализа полученного IKI MODIS LAI продукта. На *рис. 5а* показаны результаты сравнения продукта IKI MODIS LAI (еженедельное восстановленное изображение, пространственное разрешение 250 м) и стандартного продукта NASA MODIS LAI (версия 6, 8-дневное композитное изображение, пространственное разрешение 500 м). Основные отличительные черты используемой NASA процедуры оценки LAI состоят в следующем: 1) при расчёте ежедневных значений LAI на вход подаются как отличные (в статистическом плане) КСЯ, так и отличные модельные данные; 2) при построении композитных изображений LAI используются данные за 8 дней без предварительного маскирования облаков, а из временного ряда выбираются данные лучшего качества (основной алгоритм) с последующим выбором максимального значения; 3) восстановление непрерывных временных рядов LAI не производится. Из *рис. 5а* следует, что значения IKI MODIS LAI имеют несколько более высокие величины, чем значения NASA MODIS LAI.

На *рис. 56* продемонстрирована чувствительность оценки LAI к выбору композитной схемы. Представленные на графике сезонные профили LAI получены с применением методов построения композитных изображений NASA и ИКИ РАН и с использованием для этого как данных Terra-MODIS, так и их комбинации с данными Aqua-MODIS. При этом можно отметить, что в сезонном профиле значений LAI, полученных методом ИКИ РАН, отсутствуют провалы в течение вегетационного периода, связанные с наличием остаточной облачности и неполной коррекцией влияния атмосферы. Обращает также на себя внимание факт, что комбинирование данных с двух спутников позволяет лучше заполнить пробелы и, как правило, приводит к сглаживанию сезонного профиля значений LAI.



Рис. 5. Результаты анализа различных оценок LAI на примере гранулы h20v04: *a* — сравнение композитного изображения LAI за период 16–22 июня 2014 г. и стандартного продукта NASA MODIS LAI за период 18–25 июня 2014 г. Сравнены гистограммы и диаграмма рассеяния, плотность данных показана цветом; *б* — влияние метода построения композитного изображения. Временные ряды значений LAI, полученные с использованием различных технологий для с.-х. поля № 1 (см. *таблицу*); *в* — влияние восстановления временных рядов LAI: период 16–22 июня 2014 г. Сравнены гистограммы и диаграмма рассеяния; *г* — сопоставление LAI и NDVI для с.-х. поля № 1



Рис. 6. Сравнение сезонной динамики спутниковых и наземных измерений LAI для индивидуальных с.-х. полей (см. *таблицу*). В качестве вспомогательной информации для сравнительного анализа сезонной динамики LAI на графике также приведены временные ряды NDVI

Оба метода дают приблизительно одинаковый сезонный максимум и минимум значений LAI. Одновременно необходимо отметить, что в сравнении с данными NASA MODIS LAI во временных рядах IKI MODIS LAI наблюдается некоторая задержка сезонного роста и спада значений индекса листовой поверхности.

На *рис. 5в* показано влияние использования процедуры восстановления временных рядов LAI. Из графика следует, что процедура восстановления временных рядов LAI приводит к сглаживанию артефактов в оценках его значений, в том числе имеющих нефизическую природу (минимум при LAI = 4, возникающий в связи переходом к вычислениям при достижении насыщения). Сравнение сезонных временных рядов LAI, полученных с использованием композитных и восстановленных изображений, приведено на *рис. 6*.

На *рис. 5г* сопоставлены сезонные профили LAI и NDVI для анализа потенциальных преимуществ и ограничений сравниваемых индексов. С теоретической точки зрения LAI — это биофизический параметр с ясной физической интерпретацией, характеризующий плотность фитоэлементов. Вегетационные индексы — это радиометрические величины, меняющиеся не только под влиянием характеристик растительности, но и в зависимости от оптических свойств почвы и атмосферы, геометрических характеристик солнечного освещения и спутниковой съёмки. Например, индекс SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) был разработан с целью минимизации влияния почвы, но он лишь отчасти может аппроксимировать LAI (Huete, 1998). Разработанные ранее вегетационные индексы, такие как, в частности, NDVI, лишены этого преимущества. В практическом плане на основании сравнения сезонных профилей видно, что динамический диапазон LAI шире. LAI более чувствителен к изменению содержания хлорофилла в период роста и увядания растительности. Проведём сравнительный анализ результатов спутниковых и наземных измерений LAI отдельных сельскохозяйственных полей озимой пшеницы (см. *рис. 6*). Спутниковые измерения представлены сезонными профилями средних по площади каждого поля значений LAI и NDVI. Наземные измерения LAI полей озимой пшеницы выполнены весовым методом для четырёх дат в течение вегетационного сезона 2013 г. (9, 30 апреля, 21 мая и 4 июня) (Ерошенко, 2015). Ввиду пространственной вариабельности значений индекса листовой поверхности внутри полей анализ ограничен сопоставлением результатов выборочных наземных измерений и соответствующих границ диапазона изменений индекса внутри поля, полученных по спутниковым данным.

В целом наблюдается довольно хорошее соответствие наземных и спутниковых данных LAI по всему диапазону значений. При этом можно отметить корреляцию сезонной динамики LAI по результатам наземных и спутниковых измерений, в то время как значения наземных измерений индекса, как правило, не выходят за пределы диапазона вариаций результатов спутниковой его оценки в пикселах, лежащих внутри границ поля. Наибольшее различие наблюдается для полей № 4 и 7, профиль сезонной вариабельности наземных измерений LAI которых сильно отличается от результатов спутниковой оценки LAI и NDVI. Возможная причина такого рода расхождений — в недостаточной репрезентативности точечных наземных измерений на данных полях. Кроме того, в 2013 г. посевы озимой пшеницы были частично поражены вирусом жёлтой карликовости ячменя. Особенно сильно это проявилось на поле № 6 и в меньшей степени — на поле № 7, что привело к изменению пигментации, а следовательно, и к изменению оптических свойств растений.

Заключение

В работе представлен разработанный ИКИ РАН новый информационный продукт, получаемый по данным MODIS с пространственным разрешением 250 м и характеризующий площадь листовой поверхности растительного покрова. В статье описаны физические основы получения LAI и приведены результаты предварительного тестирования продукта, включая его сравнение с наземными измерениями. Первая версия продукта за период с марта 2000 г. по настоящее время доступна для анализа в среде сервиса спутникового мониторинга растительного покрова ВЕГА-Science (sci-vega.ru, Толпин и др., 2014).

Дальнейшее развитие метода дистанционной оценки LAI предполагает переход от 1D к 3D моделированию переноса излучения в растительном покрове в соответствии с последними теоретическими разработками в области параметризации его структуры (Huang et al., 2008; Shabanov, 2018). Учёт 3D-эффектов при моделировании переноса излучения в растительном покрове позволит ввести поправки в соотношения между КСЯ и LAI, в том числе ослабить эффект насыщения, что в особенности актуально при использовании данных дистанционных измерений более высокого пространственного разрешения. Для дальнейшего повышения точности спутниковых измерений LAI необходима также оптимизация основных параметров модели, характеризующих архитектуру покрова, спектральное альбедо листа и КСЯ почвы для каждого типа растительного покрова. Выбор оптимальных значений параметров требует их статистического анализа для каждого типа растительного покрова с использованием репрезентативной для территории России выборки. При этом оптимизацию параметров модели целесообразно проводить на основе тематически и пространственно более детальной карты растительного покрова России (Барталев и др., 2015а).

Обработка спутниковых данных и программная реализация методов были выполнены с использованием ресурсов ЦКП ИКИ-Мониторинг (Лупян и др., 2015). Проект финансирует Британский Совет и Министерство образования и науки РФ (Соглашение о предоставлении субсидии № 14.616.21.0099 от 27 февраля 2018 г., уникальный идентификатор соглашения RFMEFI61618X0099). Авторы благодарят офис операционной обработки спутниковых данных NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), в частности д-ра С. Девадига (S. Devadiga), за предоставленное программное обеспечение NASA MODIS LAI алгоритм (версия 6).

Литература

- 1. *Барталев С.А., Лупян Е.А.* Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 197–214.
- 2. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. (2015а) Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.
- 3. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. (2015б) Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
- 4. 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.
- 5. *Ерошенко* Ф. В., *Сторчак И. Г., Шестакова Е. О.* Площадь ассимиляционной поверхности и NDVI посевов озимой пшеницы // Земледелие. 2015. № 7. С. 37–39.
- 6. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
- 7. Плотников Д. Е., Миклашевич Т. С., Барталев С. А. Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 103–110.
- Толпин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А., Плотников Д. Е., Матвеев А. М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7(306). С. 581–586.
- 9. Asner G. P., Scurlock J. M. O., Hicke J. A. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies // Global Ecology and Biogeography. 2003. V. 12. P. 191–205.
- 10. *Baret F., Jacquemoud S., Hanocq J.* The soil line concept in remote sensing // Remote Sensing Reviews. 1993. V. 7(1). P. 65–82.
- 11. Boogaard H. L., van Diepen C. A., Roetter R. P., Cabrera J. M. C. A., van Laar H. H. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Technical document 52, Wageningen, Netherlands: Winand Staring Centre, 1998. 144 p.
- Cohen B. W., Maiersperger T. K., Yang Z., Gower S. T., Turner D. P., Ritts W. D., Berterretche M., Running S. W. Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+ and MODIS for four sites in North America: A quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 88. P. 233–255.
- 13. *Dickinson R. E., Henderson-Sellers A., Kennedy P.J., Wilson M. F.* Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. Note NCAR/TN-275-STR. Colorado: Boulder, 1986. 69 p.
- Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F., Zhang X.Y., Muchoney D., Strahler A. H., Woodcock C. E., Gopal S., Schneider A., Cooper A. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 183. P. 287–302.
- Garrigues S., Lacaze R., Baret F., Morisette J. T., Weiss M., Nickeson J., Fernandes R., Plummer S., Shabanov N. V., Myneni R., Yang W. Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data // J. Geophysical Research. 2007. V. 113. G02028. DOI: 10.1029/2007JG000635.
- Huang D., Knyazikhin Y., Wang W., Privette J., Deering D. W., Stenberg P., Shabanov N. V., Tan B., Myneni R. B. Stochastic transport theory for investigating the three-dimensional canopy structure from space measurements // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112(1). P. 35–50.
- 17. *Huete A*. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. 1988. V. 25(3). P. 295–309.
- Huete A. R., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X., Ferreira L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. P. 195–213.
- 19. *Knyazikhin Y., Martonchik J. V., Myneni R. B., Diner D. J., Runing S.* Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data // J. Geophysical Research. 1998. V. 103. P. 32257–32275.

- Myneni R., Ramakrishna R., Nemani R., Running S. Estimation of global Leaf Area Index and Absorbed PAR using Radiative Transfer models // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1997. V. 35(6). P. 1380–1393.
- Potter C. S., Randerson J. T., Field C. B., Matson P.A., Vitousek P. M., Mooney H.A., Klooster S.A. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data // Global Biogeochemical Cycles. 1993. V. 7(4). P. 811–841.
- 22. *Running S. W., Coughlan J. C.* A general model of forest ecosystem processes for regional applications // Ecological Modeling. 1998. V. 42. P. 124–154.
- 23. Sellers P., Tucker C., Collatz C., Los O., Justice C., Dazlich D., Randall D. A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI // Intern. J. Remote Sensing. 1994. V. 15. Iss. 17. P. 3519–3545.
- 24. Shabanov N. V., Knyazikhin Y., Baret F., Myneni R. B. Stochastic modeling of radiation regime in discontinuous vegetation canopies // Remote Sensing of Environment. 2000. V. 74(1). P. 125–144.
- Shabanov N. V., Huang D., Yang W., Tan B., Knyazikhin Y., Myneni R. B., Ahl D. E., Gower S. T., Huete A., Aragao L. E., Shimabukuro Y. E. Analysis and optimization of the MODIS LAI and FPAR algorithm performance over broadleaf forests // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43(8). P. 1855–1865.
- 26. *Shabanov N. V., 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.
- 27. Yang W., Shabanov N., Huang D., Wang W., Dickinson R., Nemani R., Knyazikhin Y., Myneni R. Analysis of Leaf Area Index Products from Combination of MODIS Terra and Aqua Data // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 104. Iss. 3. P. 297–312.
- 28. Vermote E., El Saleous N., Justice C. O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. P. 97–111.
- 29. Zheng G., Moskal M. Retrieving Leaf Area Index (LAI) using remote sensing: theories, methods, and sensors // Sensors. 2009. V. 9. P. 2719–2745.

Development of capabilities for remote sensing estimate of Leaf Area Index from MODIS data

N. V. Shabanov¹, S. A. Bartalev¹, F. V. Eroshenko², D. E. Plotnikov¹

 ¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
² North-Caucasian Federal Scientific Agricultural Center Mikhailovsk 356241, Russia E-mail: nikolay.shabanov@d902.iki.rssi.ru

Retrieval of land biophysical parameters from remote sensing observations is of interest for a wide range of scientific and application projects. Along with the empirical and statistical methods, methods based on physical models are widely utilized in the retrievals. This paper presents an approach for estimation of Leaf Area index (LAI) from MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. Daily LAI retrievals are performed using MODIS measurements of the Bi-directional reflectance Factor (BRF) in Red and NIR bands at 250 m spatial resolution and radiative transfer modeling in a vegetation canopy. The obtained LAI estimates are further processed to derive cloud-free composites followed by the time series reconstruction. This paper presents the physical principles of LAI product retrievals and the results of the product analysis, including evaluation with the ground measurements. The time series of weekly LAI product over Russia since March 2000 are available in the Vega-Science, a system of vegetation cover monitoring.

Keywords: Leaf Area Index, remote sensing, radiative transfer modeling, MODIS

Accepted: 30.07.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178

References

- 1. Bartalev S.A., Lupian E.A., Issledovaniya i razrabotki IKI RAN po razvitiyu metodov sputnikovogo monitoringa rastitel'nogo pokrova (R&D on methods for satellite monitoring of vegetation by the Russian Academy of Sciences' Space Research Institute), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 197–214.
- 2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Sostoyanie i perspektivy razvitiya metodov sputnikovogo kartografirovaniya rastitel'nogo pokrova Rossii (State and perspectives of the development of methods for satellite mapping of vegetation cover in Russia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 203–221.
- Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Remote sensing estimate of Russian forest mortality due to fires), *Lesovedenie*, 2015, Vol. 2, pp. 83–94.
- 4. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
- 5. Eroshenko F.V., Ploshchad' assimilyatsionnoi poverkhnosti i NDVI posevov ozimoi pshenitsy (Leaf Area Index and NDVI of winter wheat sowings), F.V. Eroshenko, I.G. Storchak, E.O. Schestakova (eds.), *Zemledelie*, 2015, Vol. 7, pp. 37–39.
- 6. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov A.V., Kashnitskii V.Yu., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of systems for satellite data archiving, processing and analysis for tasks of environmental analysis and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
- Plotnikov D. E., Micklashevitsch T. S., Bartalev S. A., Vosstanovlenie vremennykh ryadov dannykh distantsionnykh izmerenii metodom polinomial'noi approksimatsii v skol'zyashchem okne peremennogo razmera (Reconstruction of the time series of remote sensing data with the polinomial approximation within a sliding window of variable size), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 103–110.
- Tolpin V.A., Loupian E.A., Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Matveev A.M., Vozmozhnosti analiza sostoyaniya sel'skokhozyaistvennoi rastitel'nosti s ispol'zovaniem sputnikovogo servisa "VEGA" (Capabilities satellite service "Vega" for analysis of condition of agricultural crops), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7(306), pp. 581–586.
- 9. Asner G. P., Scurlock J. M. O., Hicke J. A., Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies, *Global Ecology & Biogeography*, 2003, Vol. 12, pp. 191–205.
- 10. Baret F., Jacquemoud S., Hanocq J., The soil line concept in remote sensing, *Remote Sensing Reviews*, 1993, Vol. 7, No. 1, pp. 65–82.
- 11. Boogaard H. L., van Diepen C. A., Roetter R. P., Cabrera J. M. C. A., van Laar H. H., *User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5*, Technical document 52, Wageningen, Netherlands: Winand Staring Centre, 1998, 144 p.
- Cohen B. W., Maiersperger T. K., Yang Z., Gower S. T., Turner D. P., Ritts W. D., Berterretche M., Running S. W., Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+ and MODIS for four sites in North America: A quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 88, pp. 233–255.
- 13. Dickinson R. E., Henderson-Sellers A., Kennedy P.J., Wilson M. F., *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* (*BATS*) for the NCAR CCM, NCAR Tech. Note NCAR/TN-275-STR, Colorado: Boulder, 1986, 69 p.
- Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F., Zhang X.Y., Muchoney D., Strahler A.H., Woodcock C.E., Gopal S., Schneider A., Cooper A., Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 183, pp. 287–302.
- Garrigues S., Lacaze R., Baret F., Morisette J.T., Weiss M., Nickeson J., Fernandes R., Plummer S., Shabanov N.V., Myneni R., Yang W., Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data, *J. Geophysical Research*, 2007, Vol. 113, G02028, DOI: 10.1029/2007JG000635.
- Huang D., Knyazikhin Y., Wang W., Privette J., Deering D.W., Stenberg P., Shabanov N.V., Tan B., Myneni R. B., Stochastic transport theory for investigating the three-dimensional canopy structure from space measurements, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 1, pp. 35–50.

- 17. Huete A., A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 1988, Vol. 25, No. 3, pp. 295–309.
- Huete A. R., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X., Ferreira L. G., Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 83, pp. 195–213.
- 19. Knyazikhin Y., Martonchik J. V., Myneni R. B., Diner D. J., Runing S., Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data, *J. Geophysical Research*, 1998, Vol. 103, pp. 32257–32275.
- 20. Myneni R., Ramakrishna R., Nemani R., Running S., Estimation of Global Leaf Area Index and Absorbed PAR using radiative transfer models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, Vol. 35, No. 6, pp. 1380–1393.
- Potter C. S., Randerson J. T., Field C. B., Matson P. A., Vitousek P. M., Mooney H. A., Klooster S. A., Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data, *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, Vol. 7, No. 4, pp. 811–841.
- 22. Running S.W., Coughlan J.C., A general model of forest ecosystem processes for regional applications, *Ecological Modeling*, 1998, Vol. 42, pp. 124–154.
- 23. Sellers P., Tucker C., Collatz C., Los O., Justice C., Dazlich D., Randall D., A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI, *Intern. J. Remote Sensing*, 1994, Vol. 15, Issue 17, pp. 3519–3545.
- 24. Shabanov N. V., Knyazikhin Y., Baret F., Myneni R. B., Stochastic modeling of radiation regime in discontinuous vegetation canopies, *Remote Sensing of Environment*, 2000, Vol. 74, No. 1, pp. 125–144.
- 25. Shabanov N. V., Huang D., Yang W., Tan B., Knyazikhin Y., Myneni R. B., Ahl D. E., Gower S. T., Huete A., Aragao L. E., Shimabukuro Y. E., Analysis and optimization of the MODIS LAI and FPAR algorithm performance over broadleaf forests, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 8, pp. 1855–1865.
- 26. Shabanov N.V., 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.
- 27. Yang W., Shabanov N., Huang D., Wang W., Dickinson R., Nemani R., Knyazikhin Y., Myneni R., Analysis of Leaf Area Index Products from Combination of MODIS Terra and Aqua Data, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 104, Issue 3, pp. 297–312.
- 28. Vermote E., El Saleous N., Justice C.O., Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 83, pp. 97–111.
- 29. Zheng G., Moskal M., Retrieving Leaf Area Index (LAI) using remote sensing: theories, methods, and sensors, *Sensors*, 2009, Vol. 9, pp. 2719–2745.