Валидация оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS для редкостойных лесов Кольского полуострова с использованием материалов съёмок беспилотных летательных аппаратов

Н. В. Шабанов[1], Н. В. Михайлов[2], Д. Н. Тихонов[2], О. В. Тутубалина[2], А. А. Медведев[3], Н. О. Тельнова[3], С. А. Барталев[1]

[1] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: nikolay.shabanov@d902.iki.rssi.ru

[2] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Москва, 119991, Россия*

[3] *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*

В настоящей работе представлены результаты валидации информационного продукта индекс листовой поверхности LAI (*англ.* Leaf Area Index) по данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), разработанного Институтом космических исследований РАН (ИКИ MODIS LAI продукт). Валидация проведена по участку разрежённого смешанного берёзово-елового леса площадью ~6,7 км^2, расположенного на южных склонах Хибинского горного массива в центральной части Кольского п-ова (Россия). Полевые работы были проведены в июне 2019 г. Валидация выполнена в соответствии с методологией масштабирования локальных точечных измерений к низкому пространственному разрешению данных MODIS (230 м) посредством промежуточного звена — изображения Sentinel-2 MSI (*англ.* Multispectral Instrument) высокого разрешения (10 м). Особенность данной работы заключается в том, что локальные измерения параметров древесного полога были проведены с использованием сьёмки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Этот подход эффективен в плане количественной оценки пространственной вариабельности структуры растительного покрова (РП) на больших участках. С использованием оценки сомкнутости крон по данным БПЛА и изображения Sentinel NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) на основе статистических и полуэмпирических методов была создана карта Sentinel LAI, которая рассматривалась как базовая при сравнении с продуктом ИКИ MODIS LAI. Рассчитанное среднее значение продукта на данном участке — LAI = 1,4, точность составляет 7,1 % (среднеквадратичная ошибка RMSE = 43,1 %). В настоящей работе установлено, что ИКИ MODIS LAI продукт может иметь низкое покрытие данными на Крайнем Севере России: в 2019 г. на территории участка оно составляло ~40 %. Основная причина — (потенциально) избыточная фильтрация теней от облаков при низком зенитном угле Солнца в северных широтах. Также в ходе работы отмечено, что разрежённый лес имеет чётко выраженную двухъярусную структуру (1 — деревья и 2 — объединённые нижние ярусы, включающие подлесок, травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы), что необходимо учитывать при дальнейшей оптимизации LAI-алгоритма и валидации LAI-продукта.

Ключевые слова: индекс листовой поверхности, LAI, MODIS, валидация, 3D-модель древесного полога, двухъярусный полог леса, сомкнутость крон

Одобрена к печати: 09.04.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-156-170

Введение

Индекс листовой поверхности LAI (*англ.* Leaf Area Index) является одним из ключевых биофизических 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 (Dickinson et al., 1986; Potter et al., 1993; Running, Coughlan, 1988). Ряд информационных продуктов оценки LAI на основе использования данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) в оптическом диапазоне был разработан Европейским космическим агентством

(*англ*. European Space Agency — ESA) и Национальным агентством США по аэронавтике и исследованию космического пространства (*англ*. NASA — National Aeronautics and Space Administration). Среди наиболее известных LAI-продуктов глобального охвата можно отметить GLOBCARBON (на основе данных SPOT/VEGETATION и ATSR/AATSR (*англ*. Along Track Scanning Radiometer/Advanced Along Track Scanning Radiometer)), CYCLOPES (на основе данных SPOT/VEGETATION) (Garrigues et al., 2007) и MOD15 (на основе данных MODIS (*англ*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)) (Knyazikhin et al., 1998; Yan et al., 2020). Валидация, т. е. оценка точности продукта путём сопоставления с локальными данными, проводится для различных типов растительности и климатических зон (Baret et al., 2006; Morisette et al., 2006) и служит базой при оптимизации новой версии продукта (Yang et al., 2006).

Информационные продукты, как правило, доступны в низком разрешении, однако валидационные данные собираются на локальных участках. Подверженные сильной изменчивости индивидуальные локальные измерения нерепрезентативны для средних величин, измеряемых посредством ДЗЗ на низком разрешении. По этой причине в рамках рабочих групп NASA CEOS LPV (Morisette et al., 2006) и ESA VALERI (http://w3.avignon.inra.fr/valeri/documents/VALERI-RSESubmitted.pdf) (Baret et al., 2006) были разработаны *валидационные протоколы* — схемы масштабирования локальных измерений (охват несколько метров) до уровня данных ДЗЗ низкого разрешения (>100 м) посредством промежуточного звена — данных ДЗЗ высокого разрешения (1–30 м) (*рис. 1*). На этапе сбора наземных измерений ключевым моментом становится выбор пространственного расположения измерений, так чтобы статистически данные этой выборки были бы репрезентативны по отношению к распределению изучаемого параметра во всём районе, где проводится валидация. На следующем шаге необходимо создать функциональную зависимость (*англ*. Transfer Function — TF) между наземными измерениями и спутниковыми данными высокого разрешения — например, путём регрессии. Далее необходимо применить TF к данным высокого разрешения для получения карты LAI высокого разрешения. Пространственное распределение карты LAI высокого разрешения репрезентативно для вариаций LAI по всему району валидации, и поэтому можно сравнивать данную карту с картой LAI низкого разрешения в статистическом смысле (гистограммы, статистические моменты и т. п.). Попиксельное сравнение с загрублённой (до низкого разрешения) карты высокого разрешения возможно, но в целом не рекомендуется ввиду статистического «размывания» величин попиксельных данных (Tan et al., 2006). Эффект состоит в том, что в силу ограничений алгоритма геолокации попиксельные данные MODIS собираются не в точности с площади данного пиксела, но захватывают половину соседних. Примеры реализации протоколов для валидации продукта NASA MODIS LAI даны в работах (Cohen et al., 2003; Tan et al., 2006; Wang et al., 2004), а также в обзоре (Yang et al., 2006).

Рис. 1. Методология валидации спутникового продукта низкого разрешения с помощью точечных локальных измерений посредством промежуточного звена — спутниковых данных высокого разрешения

Алгоритм ИКИ MODIS LAI разработан на основе алгоритма NASA MODIS LAI, улучшенного и адаптированного к системе потоковой обработки данных Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) (Шабанов и др., 2018). В настоящей работе мы применили процедуру валидации для оценки точности продукта ИКИ MODIS LAI для участка редкостойных лесов центральной части Кольского п-ова.

Материалы и методы

Район исследования

Исследования были проведены на участке площадью ~6,7 км^2 (или 128 MODIS-пикселей при разрешении 230 м), расположенном в центральной части Кольского п-ова на пологих южных склонах Хибинского массива в 10 км к юго-востоку от Кировска (*рис. 2*).

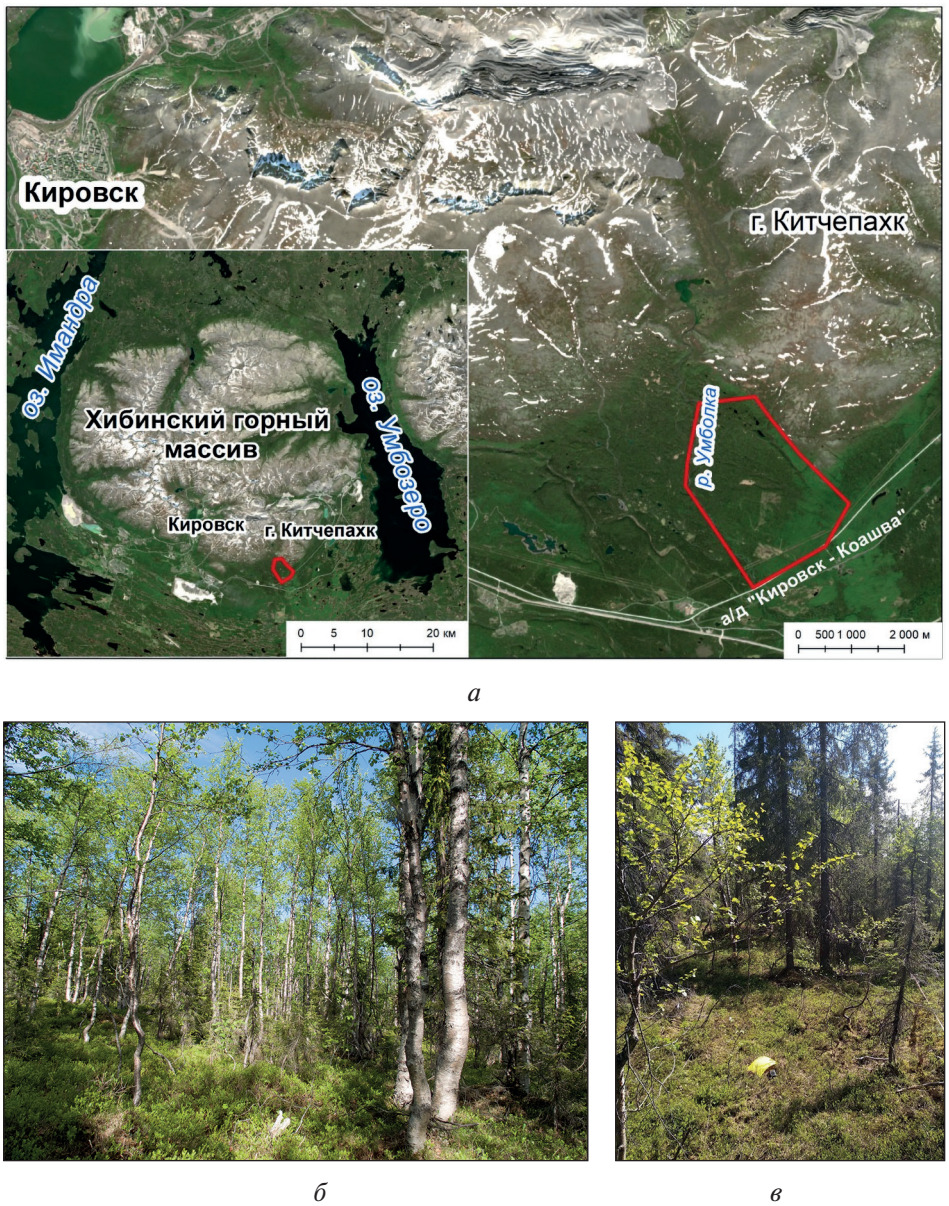

Рис. 2. Регион, где проводилась валидация продукта ИКИ MODIS LAI, — Кольский п-ов, горный массив Хибины (67,573223–67,540376° с. ш., 33,947955–34,022029° в. д.). Растительный покров — смешанный берёзово-еловый лес с преобладанием берёзы (*б*) на юго-востоке и ели (*в*) на северо-западе участка

С запада территория ограничена р. Умболкой, с востока — южным склоном г. Китчепахк, с юга — автодорогой Кировск – Коашва. Абсолютная высота варьирует от 230 до 380 м н. у. м. (над уровнем моря), крутизна склонов составляет 2–4°, в восточной части участка достигает 20–25°. Преобладают южные и юго-восточные экспозиции склонов, в восточной части — западные и юго-западные. Территория хорошо увлажнена, защищена от холодных северных ветров горными склонами Хибин, что создаёт благоприятный микроклимат для произрастания лесной растительности. Участок покрыт чернично-зеленомошным берёзово-еловым лесом с преобладанием берёзы (см. *рис. 2б*) на юго-востоке и ели (см. *рис. 2в*) — на северо-западе. Сомкнутость крон древостоя составляет, как правило, 30–50 %, преобладающая высота деревьев — 8–12 м для берёз и 10–15 м для елей. Леса основной части территории — старовозрастные (спелые и перестойные), в целом малонарушенные. В центре участка расположена зарастающая вырубка площадью около 0,15 км^2.

Продукт ИКИ MODIS LAI

Процесс построения информационного продукта ИКИ 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 (временная интерполяция) (Шабанов и др., 2018). Расчёт ежедневных значений LAI проводится путём сопоставления данных MODIS в красном (620–670 нм) и ближнем инфракрасном (ИК) (841–876 нм) каналах после применения атмосферной коррекции (Vermote et al., 2002) и соответствующих модельных данных (LUTs — Look Up Table), рассчитанных на основе стохастической модели уравнения переноса для растительного покрова (РП) (Shabanov et al., 2000). На основе набора ежедневных данных LAI формируются композитные изображения, очищенные от влияния облаков, снежного покрова и других мешающих факторов. Полученные таким образом композитные изображения LAI используются для восстановления непрерывных временных рядов данных методом LOESS (от *англ.* LOcal regrESSions) (Плотников и др., 2014). Последняя версия продукта включает следующие изменения алгоритма: а) разработаны недостающие компоненты параметризации стохастической модели РП, позволяющие в полной мере учесть эффект неоднородности полога в стохастическом уравнении переноса (Shabanov, Gastellu-Etchegorry, 2018); б) пересчитаны модельные данные (LUTs) впервые с учётом эффекта неоднородности РП для более широкого диапазона зенитного угла Солнца (>70°), что особенно актуально для Крайнего Севера России; в) выявлены аномалии в красном канале MODIS (полосы заниженных значений данных в красном канале при низких зенитных углах Солнца), которые были отфильтрованы на этапе построения композитных изображений. Временной ряд продукта ИКИ MODIS LAI по территории России сформирован в период с марта 2000 г. и доступен в среде сервиса спутникового мониторинга растительного покрова ВЕГА-Science (Лупян и др., 2011).

Данные Sentinel

В соответствии с требованиями протокола валидации в качестве спутниковых данных высокого разрешения было использовано изображение Sentinel-2 MSI (*англ.* Multispectral Instrument) за 17 июня 2019 г., полученное на портале Copernicus Open Access Hub (система Европейских центров морских прогнозов, https://scihub.copernicus.eu/). Данные имеют пространственное разрешение 10 м. В настоящей работе были использованы красный (665 нм) и ближний инфракрасный (842 нм) каналы Sentinel-2 MSI (https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook). Выбрана версия данных с оценкой коэффициента спектральной яркости (КСЯ) на нижней границе атмосферы (выполнена атмосферная коррекция). В качестве переменной, характеризующей вариабельность плотности листового покрова, был взят индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс):

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red). \quad (1)$$

Выбор индекса NDVI (альтернативные варианты — индексы EVI (*англ.* Enhanced Vegetation Index — усовершенствованный вегетационный индекс), EVI2, SR (*англ.* Simple Ratio), и т. п.), основан на тестах чувствительности индекса к сомкнутости крон древесного полога.

Данные БПЛА

Съёмка выполнялась 18–20 июня 2019 г. квадрокоптерами DJI Phantom-4 и DJI Phantom-4 PRO, оснащёнными цифровыми RGB-камерами (*табл. 1* и *2*), в ручном режиме с перекрытием между кадрами не менее 80 %. Дальнейшая стереофотограмметрическая обработка полученных изображений проводилась в специализированном программном обеспечении (ПО) (Agisoft Metashape Professional v.1.5.3, https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf). Для построенного плотного облака фотограмметрических точек была выполнена фильтрация шумов и выделение точек класса «земная поверхность». По классифицированному облаку точек были построены 3D-цифровые модели: включающая древесный полог (*цифровая модель местности — ЦММ*) и не включающая (*цифровая модель рельефа — ЦМР*). *Цифровая модель древесного полога* (*ЦМДП*) с пространственным разрешением 10 см и высотным разрешением ~1 см была получена как разность двух этих моделей. Более подробно алгоритм извлечения и анализа цифровой модели древесного полога изложен в работе (Медведев и др., 2020). На последнем этапе обработки ЦМДП была использована для построения карты сомкнутости полога. В частности, была произведена бинарная классификация ЦМДП по пороговому уровню высоты: древесный полог выше 2 м — кроны деревьев, ниже 2 м — участки межкроновых пространств. Значение сомкнутости крон было агрегировано на сетку пикселей Sentinel-2 MSI и для каждого пикселя рассчитывалось как отношение площади, занятой кронами, к площади всего пикселя.

Таблица 1. Технические характеристики БПЛА

Модель БПЛА и камеры	Phantom4Pro и Phantom4 Advanced, RGB-камера 20 МП
Высотные эшелоны съёмки (от точки взлёта)	100; 150; 200 м
Угол съёмки	В надир
Перекрытие снимков	70–80 %
Пространственное разрешение одиночных снимков	2,5 см
Пространственное разрешение ЦММ	7,8 см
Вертикальное разрешение ЦММ	30 см
Пространственное разрешение ортофотомозаик	5 см

Таблица 2. Параметры съёмок БПЛА

Дата съёмки	Обработанные снимки/общее количество	Площадь съёмки, км^2	Пространственное разрешение ортомозаики, см	Средняя плотность точек на 1 м^2
18.06.2019, 13:00–15:00	2143/2185	4,02	7,48	179
18.06.2019, 13:00–15:00	1281/1469	2,06	6,22	258
20.06.2019, 12:00–13:45	1643/1830	2,99	3,82	172
20.06.2019, 12:00–13:15	684/732	1,91	3,93	162
Всего	**5751/6216**	**6,69**	**5,36**	**193**

Карта растительного покрова

Для района исследования была создана карта растительного покрова с пространственным разрешением 10 м, включающая 4 класса: 1) не классифицировано; 2) берёзово-еловый лес; 3) елово-берёзовый лес; 4) кустарники. Классификация была выполнена алгоритмом максимального правдоподобия (*англ.* maximum likelihood) по зимнему и летним изображениям Sentinel-2 MSI за 2018 г. (г-н Дж. Томани, Кембриджский университет, частная переписка). Опорные выборки были сформированы по карте растительного покрова России за 2018 г., разработанной в ИКИ РАН (Барталев и др., 2016).

Результаты

Особенность данной валидационной работы заключается в том, что локальные измерения представлены не типичными наземными измерениями при помощи оптических инструментов, таких как LAI-2000, цифровая камера с объективом «рыбий глаз» и т. п. (Bréda, 2003), а по данным площадной аэрофотосъёмки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Преимущество такого подхода состоит в однородном охвате большой территории, однако предложенная методика оценки LAI по данным БПЛА требует дальнейшего тестирования (Lendzioch et al., 2019; Tian et al., 2017; Zhang et al., 2019). Для оценки LAI мы использовали оценку сомкнутости по данным БПЛА, а также известное из литературы соотношение доли просветов и LAI (Eriksson et al., 2006; Gonsamo, Pellikka, 2009; Nilson, 1971; Shabanov, Gastellu-Etchegorry, 2018):

$$1\text{-closure(LAI)} = \exp(-k \cdot \text{LAI}), \qquad (2)$$

где closure — сомкнутость крон; 1-closure — доля просветов; коэффициент k — настраиваемый параметр, который зависит от типа растений/экосистемы (Bréda et al., 2003). Значение $k = 0{,}5$ было использовано для елово-берёзового леса и $k = 0{,}8$ — для берёзово-елового. Заметим, что как стандартные, так и предложенный методы имеют общую теоретическую базу (связь между долей просветов и LAI), разница состоит лишь в позиционировании камеры и настройке значений параметров.

Отметим упрощения, использованные в настоящей работе для концептуального представления растительного полога для оценки LAI. Мы аппроксимировали двухъярусный полог леса в районе исследования (1-й ярус — кроны деревьев, 2-й ярус — подрост, подлесок и напочвенный покров) одноярусным, т. е. перераспределили фитоэлементы нижнего яруса в кроны деревьев. Другими словами, растительный покров сведён к древесному пологу, где деревья имеют кроны выше 2 м. Такое упрощение необходимо было сделать ввиду: а) отсутствия отлаженных методик наземных измерений и масштабирования LAI крайне разнородного нижнего яруса; б) отсутствия практических разработок модели переноса для многоярусного полога. В целом перераспределение фитоэлементов широко применяется в моделировании, например в одномерном уравнении переноса, где неоднородный растительный покров заменён моделью мутной среды (Nilson, 1971; Shabanov, Gastellu-Etchegorry, 2018). Влияние нижнего яруса на точность оценки LAI всего РП в редкостойном лесу было отмечено (без количественной оценки) в более ранних работах по валидации (Wang et al., 2004). Позднее была предложена методика для оценки влияния нижнего яруса на основе моделирования и эмпирических данных (Eriksson et al., 2006). Однако данная методика практически не реализуема для больших площадей при ограниченном наборе измерений, доступных при валидационных работах. Мы планируем разработать свою методику на основе новой версии модели стохастического уравнения переноса для многоярусной среды (Li et al., 2020).

Рассмотрим процесс построения карты сомкнутости высокого разрешения (*рис. 3*, см. с. 162). Район исследования имеет значительную неоднородность свойств РП смешанного хвойно-лиственного леса, изменяющихся с юго-востока на северо-запад: в направлении увеличения доли ели и снижения доли берёзы в породном составе древостоя (см. *рис. 3а*).

Оригинальная карта сомкнутости крон деревьев (*англ.* UAV — unmanned aerial vehicle closure) обладает рядом артефактов, возникающих на краях залётов или при обработке данных БПЛА (сложный рельеф, высокая сомкнутость крон), и не несёт информации о плотности фитоэлементов нижнего яруса. Для статистической обработки карты использовались данные Sentinel NDVI (см. *рис. 3б*), отражающие естественные вариации плотности полной фитомассы на местности. С использованием набора данных по всему району исследования была построена фазовая диаграмма Sentinel NDVI – UAV closure и рассчитана линейная регрессия: NDVI = 0,6685 + 0,0016×closure (см. *рис. 3г*). Это регрессионное соотношение было использовано в качестве TF для построения карты Sentinel closure (см. *рис. 3в*).

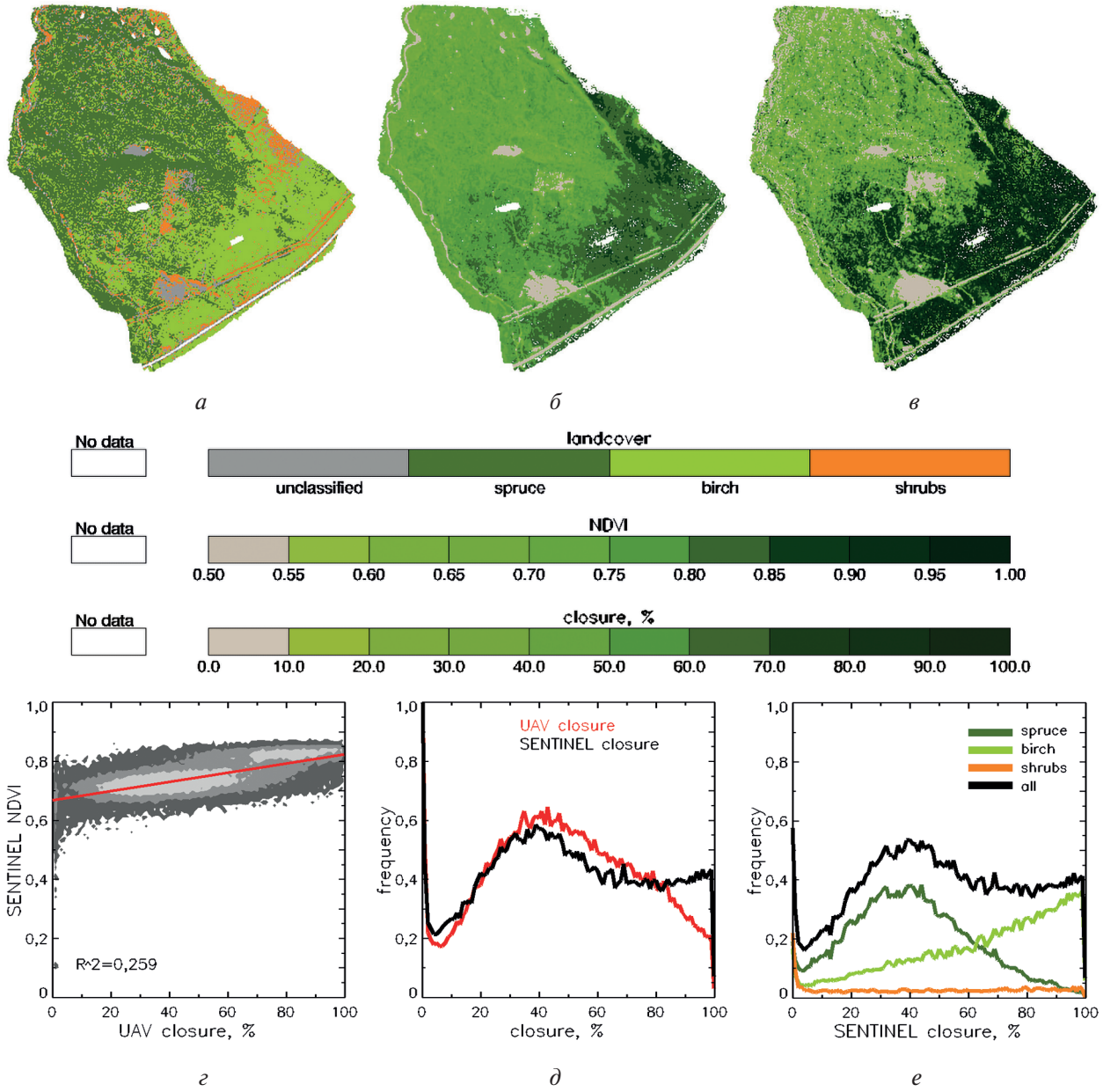

Рис. 3. Анализ и обработка данных для оценки сомкнутости (closure) РП: *а* — карта растительного покрова (landcover) для 2019 г. (unclassified — неклассифицированная растительность, spruce — берёзово-еловый лес, birch — елово-берёзовый лес, shrubs — кустарники); *б* — карта Sentinel NDVI за 17 июня 2019 г.; *в* — карта Sentinel closure за 17–20 июня 2019 г., полученная путём применения линейной регрессии (*г*) к данным Sentinel NDVI (*б*); *г* — статистическое соотношение между Sentinel NDVI и оценкой сомкнутости по данным БПЛА (UAV closure) по всему району исследования; *д* — сравнение гистограмм сомкнутости до (UAV closure) и после (Sentinel closure) статистической обработки; *е* — гистограммы распределения Sentinel closure по типам РП и всех растительных классов вместе (all)

Поясним физическую интерпретацию полученных данных. Рассчитывая регрессию Sentinel NDVI – UAV closure и затем вычисляя Sentinel closure по карте Sentinel NDVI, мы тем самым реализуем концепцию перераспределения фитоэлементов нижнего яруса в кроны. Sentinel NDVI — индикатор полной фитомассы полога, и следовательно, Sentinel closure — тоже. Заметим, что распределение полученной сомкнутости в целом сопоставимо с оригиналом (см. *рис. 3г*), различия возникают в результате исправления артефактов также ввиду модельных упрощений. Распределение сомкнутости в зависимости от породы показано на *рис. 3д*. Гистограммы для отдельных (смешанных) классов перекрываются, однако пиксели с преобладанием берёзы имеют более высокую сомкнутость, а с преобладанием ели — более низкую.

На основе сглаженной карты Sentinel closure (см. *рис. 3в*, формулу (2)) была построена карта Sentinel LAI (*рис. 4*). Поясним физическую интерпретацию полученной оценки LAI. Так как Sentinel closure относится к полной (перераспределённой) фитомассе полога (нижний ярус + верхний ярус), Sentinel LAI также является оценкой полного индекса листовой поверхности для всего полога. Влияние статистической обработки сомкнутости на оценку LAI оценено путём сопоставления гистограмм LAI, рассчитанных на основе сомкнутости до и после обработки (см. *рис. 4б*). Гистограммы распределения Sentinel LAI в зависимости от породы сохраняют зависимость, схожую с той, что была показана выше для сомкнутости (см. *рис. 4в*). Изображение Sentinel LAI высокого разрешения после усреднения до разрешения MODIS может быть сопоставлено с изображением MODIS LAI. Временной ряд продукта ИКИ MODIS LAI за 2019 г. в пределах района валидации был выделен и проведено его сравнение с Sentinel LAI (*рис. 5*, см. с. 164). Существенным ограничением MODIS LAI для рассматриваемого района в данном году было устойчивое наличие облачности (с малым количеством окон): покрытие данными составляло только 40 %. Для соблюдения соответствия пространственного покрытия двух наборов данных была произведена фильтрация изображения Sentinel LAI маской наличия данных MODIS LAI. Для оценки точности продукта MODIS LAI по отношению к Sentinel LAI мы использовали метрику «*относительная разница*» ΔLAI, определённую как:

$$\Delta LAI = 100\,\% \times (MODIS_LAI - Sentinel_LAI)/0{,}5(MODIS_LAI + Sentinel_LAI). \qquad (3)$$

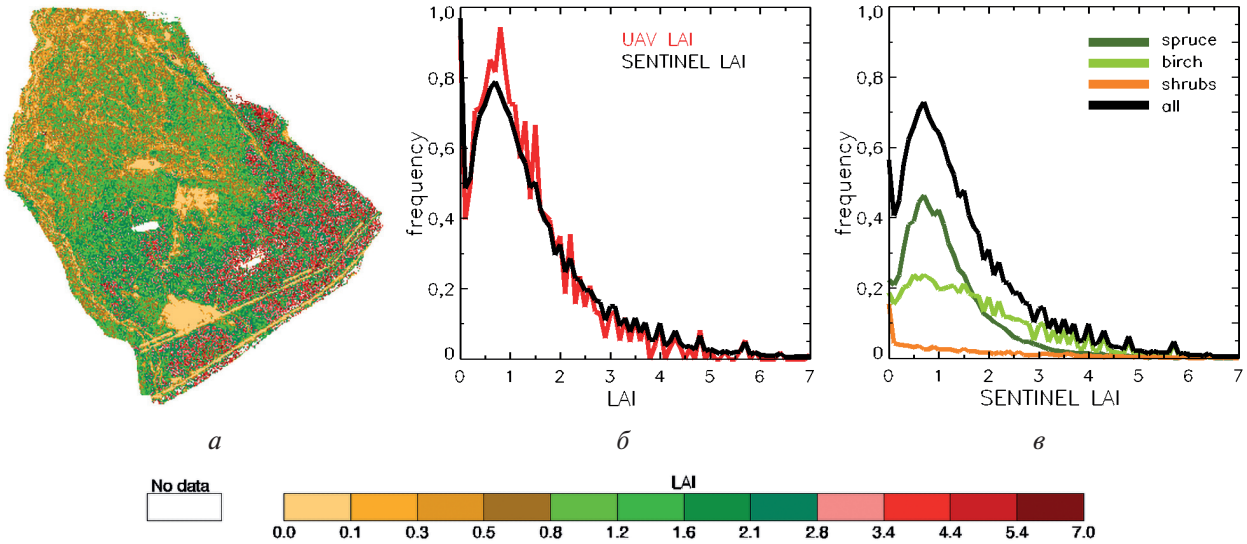

Рис. 4. Статистические свойства карты Sentinel LAI, рассчитанной по сомкнутости: *а* — карта Sentinel LAI в разрешении 10 м за июнь 2019 г.; *б* — сравнение распределений UAV LAI и Sentinel LAI, полученные на основе соответствующих версий сомкнутости; *в* — гистограммы распределения Sentinel LAI по типам РП. Обозначения см. на *рис. 3*

Сопоставление среднего значения Sentinel LAI (1,43±0,62) и MODIS LAI (1,36±0,92) для композитного периода 169 (18 июня 2019 г.) даёт оценку точности продукта по сегменту района исследования с доступными данными ΔLAI = –5,0 %.

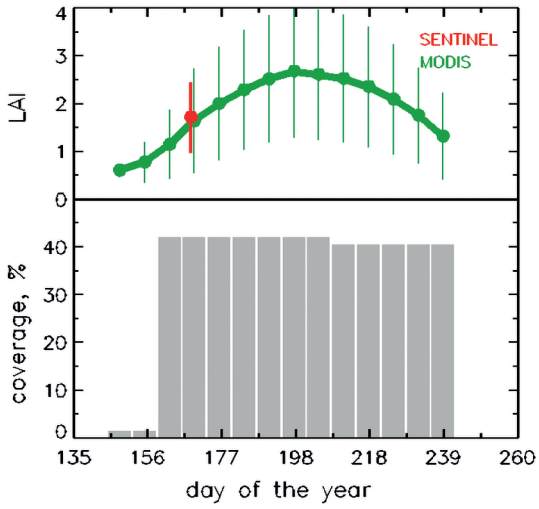

Рис. 5. Сравнение Sentinel LAI и сезонного профиля MODIS LAI за 2019 г. Каждое значение MODIS LAI (интерполированный композит) представлено как среднее по областям, где данные доступны. В нижней части графика указан процент покрытия безоблачными данными MODIS в летний период наблюдений (day of the year — порядковый номер дня года)

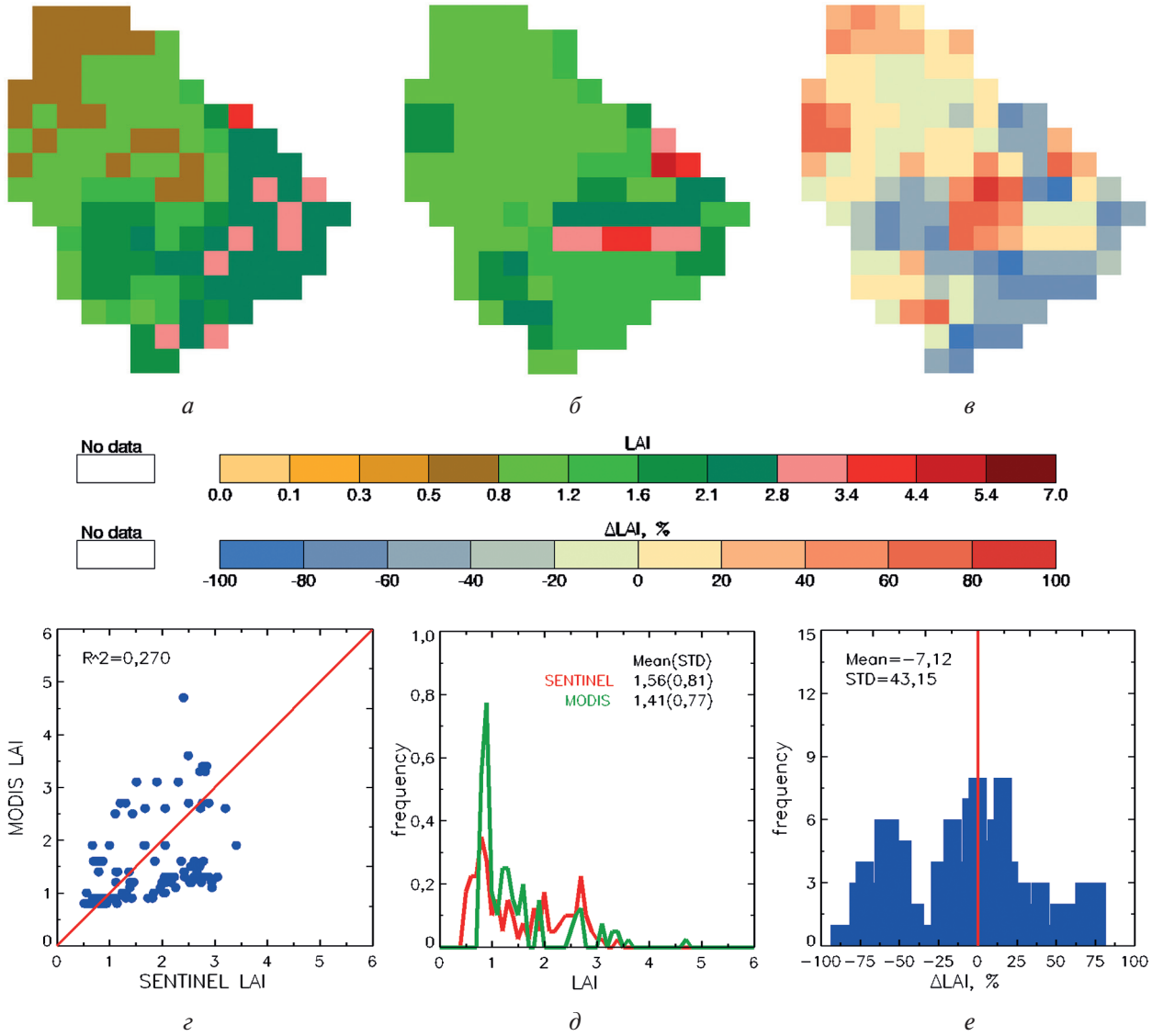

Рис. 6. Сравнение MODIS LAI и Sentinel LAI для композитного периода 176 (25 июня) 2019 г.: *а* — карта Sentinel LAI, загрублённая до разрешения MODIS (230 м); *б* — карта ИКИ MODIS LAI (композит без интерполяции); *в* — карта относительной разности MODIS LAI и Sentinel LAI (%); *г–е* — фазовая диаграмма, сопоставление гистограмм и гистограмма относительной разницы соответственно (%) между MODIS LAI и Sentinel LAI (Mean — среднее значение разницы, %; STD — стандартное отклонение, %)

В целях валидации продукта ИКИ MODIS LAI по всей полноте района исследования мы использовали продукт промежуточного этапа обработки (см. разд. «Материалы и методы») — композитное изображение без интерполяции за дату 176 (25 июня 2019 г.), максимально близкую (при условии наличия 100 % покрытия данными) по времени к Sentinel LAI (17 июня, калиброванный по данным БПЛА за 18 и 20 июня). Ввиду наличия облачности в соседних композитных периодах алгоритм интерполяции удаляет данные в текущем композитном периоде, по этой причине интерполированный продукт в этом случае имеет худшее покрытие, чем композитное изображение без интерполяции. Результаты сравнения Sentinel LAI и MODIS LAI (композитное изображение без интерполяции) представлены на *рис. 6* (см. с. 164). Пространственное распределение наборов данных и их относительная разница показаны на *рис. 6а—в*. Необходимо заметить, что, несмотря на отсутствие точного совпадения пространственного распределения, наблюдается указанный выше градиент изменения LAI с северо-запада на юго-восток. Карта относительной разности показывает, что наибольшая разница возникает на юге района с преобладанием сомкнутого, плотного покрова. Возможная причина — падение точности оценки сомкнутости по данным БПЛА и высокая чувствительность модели (уравнение (2)) к сомкнутости для плотной среды. Фазовая диаграмма показывает в целом неплохое соответствие между двумя наборами данных, однако уровень шума достаточно велик, что, возможно, является артефактом, вызванным статистическим размыванием MODIS-пикселей (Tan et al., 2006). Гистограммы двух наборов данных имеют хорошее соответствие в целом. Среднее значение ИКИ MODIS LAI составляет 1,4 (±0,8). Гистограмма ΔLAI показывает, что ИКИ MODIS LAI (композитное изображение без интерполяции) в среднем ниже Sentinel LAI на 7,1 % при стандартном отклонении RMSE = 43,1 % (*англ.* root-mean-square error). Рассчитанная точность продукта на данном участке находится внутри номинального предела 20 %, обусловленного точностью атмосферной коррекции данных MODIS (https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod15.php).

Заключение

В настоящей работе описана валидация информационного продукта ИКИ MODIS LAI по участку редкостойного берёзово-елового леса в центральной части Кольского п-ова. Работа выполнена в соответствии с методологией масштабирования точечных локальных измерений к низкому пространственному разрешению данных MODIS посредством промежуточного звена — изображения Sentinel-2 MSI высокого разрешения. Особенность данной работы заключается в том, что локальные измерения параметров древесного полога были проведены с использованием сьёмки БПЛА. Этот подход эффективен в плане количественной оценки пространственной вариабельности структуры растительного покрова (РП) на больших участках. Рассчитанное среднее значение продукта на данном участке: LAI = 1,4; точность составляет 7,1 % (среднеквадратичная ошибка RMSE = 43,1 %). В ходе работы установлено, что продукт ИКИ MODIS LAI может иметь низкое покрытие данными на Крайнем Севере России: в 2019 г. на территории района исследования оно составляло ~40 %. Основная причина — потенциально избыточная фильтрация теней от облаков при низком зенитном угле Солнца на Крайнем Севере. Также в ходе валидации отмечено, что редкостойный лес северных широт имеет чётко выраженную двухъярусную структуру: 1) верхний ярус древесной растительности; 2) объединённые нижние ярусы (подлеска, травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый). Проективное покрытие древесного яруса в различных районах и на разных фенологических стадиях составляет в среднем около 50 %, поэтому нижний ярус даёт существенный вклад в радиационный режим РП. Это необходимо учитывать при моделировании, используя, например, недавно разработанный вариант стохастического уравнения переноса для случая многоярусного РП (Li et al., 2020).

Обработка спутниковых данных и программная реализация методов были выполнены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования (ЦКП) ИКИ-Мониторинг (Лупян и др., 2019). Данные с БПЛА получены с использованием оборудования и методи-

ческих разработок лаборатории картографии Института географии РАН. Работа выполнена в рамках российско-британского проекта «Мультиплатформенный дистанционный мониторинг воздействия изменения климата на северные леса России». Проект финансируется Министерством науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61618X0099) и Британским Советом (грант Institutional Links № 352397111). 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 (версия 6).

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. *Лупян Е. А.*, *Савин И. Ю.*, *Барталев С. А.*, *Толпин В. А.*, *Балашов И. В.*, *Плотников Д. Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
3. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Кашницкий А. В.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Константинова А. М.*, *Кобец Д. А.*, *Мазуров А. А.*, *Марченков В. В.*, *Матвеев А. М.*, *Радченко М. В.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
4. *Медведев А. А.*, *Тельнова Н. О.*, *Кудиков А. В.*, *Алексеенко Н. А.* Анализ и картографирование структурных параметров редкостойных северотаёжных лесов на основе фотограмметрических облаков точек // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 150–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163.
5. *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.
6. *Шабанов Н. В.*, *Барталев С. А.*, *Ерошенко Ф. В.*, *Плотников Д. Е.* Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 166–178. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
7. *Baret F.*, *Morisette J. T.*, *Fernandes R. A.*, *Champeaux J. L.*, *Myneni R. B.*, *Chen J.*, *Plummer S.*, *Weiss M.*, *Bacour C.*, *Garriguess S.*, *Nickeson J.* Evaluation of the representativeness of networks of sites for the global validation and inter-comparison of land biophysical products: Proposition of the CEOS-BELMANIP // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44(7). 1794–1803. DOI: 10.1109/TGRS.2006.876030.
8. *Bréda N. J. J.* Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies // J. Experimental Botany. 2003. V. 54(392). P. 2403–2417. DOI: 10.1093/jxb/erg263.
9. *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.
10. *Dickinson R. E.*, *Henderson-Sellers A.*, *Kennedy P. J.*, *Wilson M. F.* Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR CCM: technical report. NCAR. Boulder, CO, 1986. No. NCAR/TN-275-STR. 69 p. DOI: 10.5065/D6668B58.
11. *Eriksson H. M.*, *Ekludh L.*, *Kuusk A.*, *Nilson T.* Impact of understory vegetation on forest canopy reflectance and remotely sensed LAI estimates // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 103. P. 408–418. DOI: 10.1016/j.rse.2006.04.005.
12. *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.
13. *Gonsamo A.*, *Pellikka P.* A new look at the top-of-canopy gap fraction measurements from high-resolution airborne imagery // EARSel eProceedings 2009. V. 8. P. 64–74.
14. *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. DOI: 10.1029/98JD02462.

15. *Lendzioch T.*, *Langhammer J.*, *Jenicek M.* Estimating Snow Depth and Leaf Area Index Based on UAV Digital Photogrammetry // Sensors. 2019. V. 19(5). Art. No. 1027. DOI: 10.3390/s19051027.
16. *Li X.*, *Huang H.*, *Shabanov N. V.*, *Chen L.*, *Yan K.*, *Shi J.* Extending the stochastic radiative transfer theory to simulate BRF over forests with heterogeneous distribution of damaged foliage inside of tree crowns // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 250. Art. No. 112040. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112040.
17. *Morisette J. T. Baret F.*, *Privette J. L.*, *Myneni R. B.*, *Nickeson J. E.*, *Garrigues S.*, *Shabanov N. V.*, *Weiss M.*, *Fernandes R. A.*, *Leblanc S. G.*, *Kalacska M.*, *Sánchez-Azofeifa G. A.*, *Chubey M.*, *Rivard B.*, *Stenberg P.*, *Rautiainen M.*, *Voipio P.*, *Manninen T.*, *Pilant A. N.*, *Lewis T. E.*, *Iiames J. S.*, *Colombo R.*, *Meroni M.*, *Busetto L.*, *Cohen W. B.*, *Turner D. P.*, *Warner E. D.*, *Petersen G. W.*, *Seufert G.*, *Cook R.* Validation of Global Moderate-Resolution LAI Products: A Framework Proposed within the CEOS Land Product Validation Subgroup // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44(7). P. 1804–1817. DOI: 10.1109/TGRS.2006.872529.
18. *Nilson T.* Theoretical analysis of frequency of gaps in plant stands // Agricultural and Forest Meteorology. 1971. V. 8(1). P. 25–38.
19. *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. DOI: 10.1029/93GB02725.
20. *Running S. W.*, *Coughlan J. C.* A general model of forest ecosystem processes for regional applications // Ecological Modeling. 1988. V. 42. P. 124–154. DOI: 10.1016/0304-3800(88)90112-3.
21. *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. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.04.021.
22. *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. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00128-0.
23. *Tan B.*, *Woodcock C. E.*, *Hu J.*, *Zhang P.*, *Ozdogan M.*, *Huang D.*, *Yang W.*, *Knyazikhin Y.*, *Myneni R. B.* The impact of gridding artifacts on the local spatial properties of MODIS data: Implications for validation, compositing, and band-to-band registration across resolutions // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 105. P. 98–114. DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.008.
24. *Tian J.*, *Wang L.*, *Li X.*, *Gong H.*, *Shi C.*, *Zhong R.*, *Liu X.* Comparison of UAV and WorldView-2 Imagery for Mapping Leaf Area Index of Mangrove Forest // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2017. V. 61. P. 22–31. DOI: 10.1016/j.jag.2017.05.002.
25. *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. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00089-5.
26. *Wang Y.*, *Woodcock C. E.*, *Buermann W.*, *Stenberg P.*, *Voipio P.*, *Smolander H.*, *Hame 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. P. 114–127. DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.007.
27. *Yan K.*, *Zou D.*, *Yan G.*, *Fang H.*, *Weiss M.*, *Rautiainen M.*, *Knyazikhin Y.*, *Myneni R.* A Bibliometric Visualization Review of the MODIS LAI/FPAR Products from 1995 to 2020 // J. Remote Sensing. 2020. V. 2021. Art. ID 7410921. DOI: 10.34133/2021/7410921.
28. *Yang W.*, *Tan B.*, *Huang D.*, *Rautiainen M.*, *Shabanov N. V.*, *Wang Y.*, *Privette J. L.*, *Huemmrich K. F.*, *Fensholt R.*, *Sandholt I.*, *Weiss M.*, *Ahl D. E.*, *Gower S. T.*, *Nemani R. R.*, *Knyazikhin Y.*, *Myneni R. B.* MODIS Leaf Area Index Products: From Validation to Algorithm Improvement // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44(7). P. 1885–1898. DOI: 10.1109/TGRS.2006.871215.
29. *Zhang D.*, *Liu J.*, *Ni W.*, *Sun G.*, *Zhang Z.*, *Liu Q.*, *Wang Q.* Estimation of Forest Leaf Area Index Using Height and Canopy Cover Information Extracted from Unmanned Aerial Vehicle Stereo Imagery // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2019. V. 12. P. 471–481. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2891519.

Validation of the MODIS LAI product over sparse boreal forest of the Kola Peninsula using UAV data

N. V. Shabanov[1], N. V. Mikhaylov[2], D. N. Tikhonov[2], O. V. Tutubalina[2], A. A. Medvedev[3], N. O. Telnova[3], S. A. Bartalev[1]

[1] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: nikolay.shabanov@d902.iki.rssi.ru
[2] *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
[3] *Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia*

This paper presents the results of validation of the MODIS LAI product developed at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (the IKI MODIS LAI product). Validation was performed over a sparse spruce-birch mixed forest stand (~6.7 km^2), located off the southern slopes of the Khibiny mountains in the central part of the Kola Peninsula, Russia. Field measurements were performed in June 2019. Validation was performed according to the methodology to scale local point measurements to the low resolution of MODIS data (230 m) via the intermediate link — high resolution Sentinel-2 MSI data (10 m). Special feature of this work is that local measurements of forest stand were performed using UAV technology. Such an approach is especially efficient in terms of mapping spatial variability of canopy structure at large areas. Using photogrammetric techniques, the UAV data were processed to create 3D model of canopy, and convert it to map of canopy closure. Using UAV-based estimate of canopy closure and Sentinel NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) data and applying statistical and semi-empirical methods Sentinel LAI map was derived to serve as a baseline for MODIS LAI product accuracy assessment. Mean calculated product value at the study region was LAI = 1.4 and product accuracy 7.1 % (RMSE = 43.1 %). We also report that the IKI MODIS LAI product may have low data coverage at the northern high latitude of Russia: over the extent of validation site the coverage was ~40 % in 2019. Key reason is a (potentially) excessive cloud shadow filtering at low solar zenith angles at high northern latitudes. We also highlight the fact that the sparse northern forests have a well-developed two-level structure (1 — trees and 2 — unified understory levels, which includes forest undergrowth, grass-shrub and moss-lichen), which needs to be taken into account in the future research on the LAI algorithm development and product validation.

Keywords: Leaf Area Index, MODIS, validation, 3D canopy model, multi-tier forest canopy, canopy closure

Accepted: 09.04.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-156-170

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Land cover mapping over Russia using Earth observation data*, Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
2. Loupian E. A., Slavin I., Bartalev S. A., Tolpin V., Balashov I., Plotnikov D., Satelllite serivice for vegetation monitoring VEGA, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198 (in Russian).
3. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
4. Medvedev A. A., Telnova N. O., Kudikov A. V., Alekseenko N. A., Use of photogrammetric point clouds for the analysis and mapping of structural variables in sparse northern boreal forests. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 7, No. 1, pp. 150–163 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163.
5. Plotnikov D. E., Miklashevitch T. S., Bartalev S. A., 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 (in Russian).

6. Shabanov N. V., Bartalev S. A., Eroshenko F. V., Plotnikov D. E., Development of capabilities for remote sensing estimate of Leaf Area Index from MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 166–178 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
7. Baret F., Morisette J. T., Fernandes R. A., Champeaux J. L., Myneni R. B., Chen J., Plummer S., Weiss M., Bacour C., Garriguess S., Nickeson J., Evaluation of the representativeness of networks of sites for the global validation and inter-comparison of land biophysical products: Proposition of the CEOS-BELMANIP, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44(7), pp. 1794–1803, DOI: 10.1109/TGRS.2006.876030.
8. Bréda N. J. J., Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies, *J. Experimental Botany*, 2003. Vol. 54(392), pp. 2403–2417, DOI: 10.1093/jxb/erg263.
9. 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.
10. Dickinson R. E., Henderson-Sellers A., Kennedy P. J., Wilson M. F., *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* (*BATS*) *for the NCAR CCM: technical report*, NCAR, Boulder, CO, 1986, No. NCAR/TN-275-STR, 69 p., DOI: 10.5065/D6668B58.
11. Eriksson H. M., Ekludh L., Kuusk A., Nilson T., Impact of understory vegetation on forest canopy reflectance and remotely sensed LAI estimates, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 103, pp. 408–418, DOI: 10.1016/j.rse.2006.04.005.
12. 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.
13. Gonsamo A., Pellikka P., A new look at the top-of-canopy gap fraction measurements from high-resolution airborne imagery, *EARSel eProceedings*, 2009, Vol. 8, pp. 64–74.
14. 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, DOI: 10.1029/98JD02462.
15. Lendzioch T., Langhammer J., Jenicek M., Estimating Snow Depth and Leaf Area Index Based on UAV Digital Photogrammetry, *Sensors*, 2019, Vol. 19(5), Art. No. 1027, DOI: 10.3390/s19051027.
16. Li X., Huang H., Shabanov N. V., Chen L., Yan K., Shi J., Extending the stochastic radiative transfer theory to simulate BRF over forests with heterogeneous distribution of damaged foliage inside of tree crowns, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 250, Art. No. 112040, DOI: 10.1016/j.rse.2020.112040.
17. Morisette J. T., Baret F., Privette J. L., Myneni R. B., Nickeson J. E., Garrigues S., Shabanov N. V., Weiss M., Fernandes R. A., Leblanc S. G., Kalacska M., Sánchez-Azofeifa G. A., Chubey M., Rivard B., Stenberg P., Rautiainen M., Voipio P., Manninen T., Pilant A. N., Lewis T. E., Iiames J. S., Colombo R., Meroni M., Busetto L., Cohen W. B., Turner D. P., Warner E. D., Petersen G. W., Seufert G., Cook R., Validation of Global Moderate-Resolution LAI Products: A Framework Proposed within the CEOS Land Product Validation Subgroup, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44(7), pp. 1804–1817, DOI: 10.1109/TGRS.2006.872529.
18. Nilson T., Theoretical analysis of frequency of gaps in plant stands, *Agricultural and Forest Meteorology*, 1971, Vol. 8(1), pp. 25–38.
19. 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(4), pp. 811–841, DOI: 10.1029/93GB02725.
20. Running S. W., Coughlan J. C., A general model of forest ecosystem processes for regional applications, *Ecological Modeling*, 1998, Vol. 42, pp. 124–154, DOI: 10.1016/0304-3800(88)90112-3.
21. 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, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.04.021.
22. 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(1), pp. 125–144, DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00128-0.
23. Tan B., Woodcock C. E., Hu J., Zhang P., Ozdogan M., Huang D., Yang W., Knyazikhin Y., Myneni R. B., The impact of gridding artifacts on the local spatial properties of MODIS data: Implications for validation, compositing, and band-to-band registration across resolutions, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 105, pp. 98–114, DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.008.
24. Tian J., Wang L., Li X., Gong H., Shi C., Zhong R., Liu X., Comparison of UAV and WorldView-2 Imagery for Mapping Leaf Area Index of Mangrove Forest, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, Vol. 61, pp. 22–31, DOI:10.1016/j.jag.2017.05.002.

25. 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, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00089-5.
26. Wang Y., Woodcock C. E., Buermann W., Stenberg P., Voipio P., Smolander H., Hame 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, pp. 114–127, DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.007.
27. Yan K., Zou D., Yan G., Fang H., Weiss M., Rautiainen M., Knyazikhin Y., Myneni R., A Bibliometric Visualization Review of the MODIS LAI/FPAR Products from 1995 to 2020, *J. Remote Sensing*, 2020, DOI: 10.34133/2021/7410921.
28. Yang W., Tan B., Huang D., Rautiainen M., Shabanov N. V., Wang Y., Privette J. L., Huemmrich K. F., Fensholt R., Sandholt I., Weiss M., Ahl D. E., Gower S. T., Nemani R. R., Knyazikhin Y., Myneni R. B., MODIS Leaf Area Index Products: From Validation to Algorithm Improvement, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44(7), pp. 1885–1898, DOI: 10.1109/TGRS.2006.871215.
29. Zhang D., Liu J., Ni W., Sun G., Zhang Z., Liu Q., Wang Q., Estimation of Forest Leaf Area Index Using Height and Canopy Cover Information Extracted from Unmanned Aerial Vehicle Stereo Imagery, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, Vol. 12, pp. 471–481, DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2891519.