

Исследование возможностей использования данных ICESat-2 для оценки высоты лесов России

С. А. Барталев^{1,2}, М. А. Богодухов^{1,2}, В. О. Жарко^{1,2}, В. М. Сидоренков³

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

² *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Москва, 117997, Россия*

³ *Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации
лесного хозяйства, Пушкино, 141202, Московская обл., Россия
E-mail: bogodukhov.ma@phystech.edu*

Представлен анализ возможностей использования данных ICESat-2 для оценки высоты лесов России и её пространственного распределения. Проведён краткий обзор доступных актуальных и архивных спутниковых лидарных данных и продуктов их обработки. Описаны принцип работы прибора ATLAS и схема формирования продукта ATL08, содержащего информацию о вертикальной структуре растительности. Реализован подход к автоматизированной загрузке и предобработке данных третьей версии продукта ATL08, включая фильтрацию пропущенных/повреждённых данных, преобразование в векторный формат, а также восстановление информации о границах участков земной поверхности, для которых предоставляются характеристики распределения высоты растительности. Были обработаны все доступные на территорию России данные ATL08 за период с 14.10.2018 по 13.05.2020 и сформирован набор данных более 125 млн лидарных измерений вертикальной структуры растительности, в том числе более 50 млн измерений высоты лесов. Исследование выполнялось на локальном и национальном пространственном уровнях. Исследование достоверности продукта ATL08 на локальном уровне (таксационные выделы) включало актуализацию данных наземных обследований на основе моделей хода роста насаждений, а также спутниковую оценку средней высоты леса и показателей её неопределённости с учётом точности исходных лидарных измерений и неоднородности лесного покрова. Представлены результаты локальной оценки достоверности данных ATL08, показавшие согласованность наземных и спутниковых измерений средней высоты лесов на уровне $R^2 = 0,67$ и $RMSE = 3,79$ м. Исследования на национальном уровне позволили рассмотреть примеры возможного использования сформированного набора данных в задачах изучения высоты и продуктивности лесов России. Приведены оценки распределения средней высоты лесов на территории страны, в том числе в разрезе различных типов лесного покрова.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, высота леса, ICESat-2, ATL08

Одобрена к печати: 02.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-195-206

Введение

Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко используются для оценки различных структурных и биофизических характеристик растительного покрова, выступая, в частности, практически безальтернативным источником получения актуальной информации такого рода в масштабах больших территорий. Высота лесов — важнейший параметр, связанный в том числе с биологической продуктивностью экосистем, информация о которой востребована как в научных задачах глобальных биосферных исследований, включая изучение углеродного цикла, так и в прикладных задачах оценки и управления лесными ресурсами. При этом существующая информация о распределении высоты лесного покрова на территории России на основе данных наземных обследований не отвечает современным требованиям актуальности, достоверности и детальности и/или не находится в открытом доступе. Непосредственные измерения высоты объектов земной поверхности, включая получение информации о вертикальной структуре растительности, на больших территориях могут выполняться с использованием спутниковых лидарных (*англ.* LIDAR — Light Detection and Ranging) данных.

Первой лидарной спутниковой системой ДЗЗ был прибор GLAS (*англ.* Geoscience Laser Altimeter System), установленный на спутнике ICESat (*англ.* Ice, Cloud, and land Elevation Satellite), функционировавший с 2003 по начало 2010 г. (<https://nsidc.org/data/icesat>). Измерения GLAS/ICESat легли в основу ряда работ, по результатам которых были сформированы наборы данных о пространственном распределении высоты растительности, в том числе в глобальном масштабе, включая территорию России (Healey et al., 2015; Lefsky, 2010; Los et al., 2012; Simard et al., 2011). При этом полученные наборы данных имели низкое пространственное разрешение (500 м — 0,5°) либо представляли собой набор точечных измерений, количество и пространственное распределение которых не позволяли репрезентативно характеризовать лесной покров России (<2600 измерений).

В настоящее время на орбите функционируют лидарные системы GEDI (*англ.* Global Ecosystem Dynamics Investigation) (<https://lpdaac.usgs.gov/data/get-started-data/collection-overview/missions/gedi-overview>) и прибор ATLAS (*англ.* Advanced Topographic Laser Altimeter System) на спутнике ICESat-2 (<https://nsidc.org/data/icesat-2>). Прибор GEDI установлен на Международной космической станции (МКС) и представляется первым спутниковым лидаром, разработанным и оптимизированным для изучения растительности. Данные GEDI нашли использование в задачах картографирования высоты растительного покрова больших территорий (Lang et al., 2022; Potarov et al., 2020); в то же время особенности орбиты МКС ограничивают покрытие данными между 51,6° северной и южной широты, что обуславливает недоступность прямых лидарных оценок высоты для большей части покрытой лесом территории России. При этом в составе основанного на измерениях GEDI глобального набора данных (Potarov et al., 2020) представлен в том числе прототип оценок высоты лесов на территории России. Хотя система ATLAS/ICESat-2, так же как и её предшественник, разработана в основном для мониторинга ледовых покровов, она имеет улучшенные характеристики и обладает значительным потенциалом для оценки высоты растительности на больших территориях (Liu et al., 2021), в том числе для бореальных лесов (Neuenschwander et al., 2020a).

Цель настоящей работы заключается в исследовании возможностей использования данных ATLAS/ICESat-2 для оценки высоты лесов России и её пространственного распределения. Исследование выполнялось на двух пространственных уровнях: локальном и национальном. На локальном уровне проведён анализ точности лидарных оценок средней высоты леса на основе сравнения с данными наземных измерений на уровне таксационных выделов. На национальном уровне лидарные данные использованы для изучения распределения средней высоты лесного покрова в масштабах России, в том числе в разрезе различных типов леса.

Экспериментальные данные

Стандартный продукт ATL08 данных ДЗЗ ATLAS/ICESat-2

Лидар ATLAS/ICESat-2 — спутниковая система активного дистанционного зондирования; прибор испускает лазерные импульсы и детектирует отражённое объектами земной поверхности излучение для получения информации об их вертикальной структуре. Пространственное разрешение прибора (размер «футпринта» — пятна лазерного луча на поверхности Земли) составляет около 14 м, а частота генерации лазерных импульсов обуславливает смещение футпринта каждого последующего импульса на расстояние около 70 см по мере пролёта спутника. Таким образом, происходит непрерывное получение информации вдоль трека спутника на земной поверхности для её участка (полосы) шириной 14 м. Программа наблюдений системы ATLAS/ICESat-2 разработана так, чтобы по мере её работы обеспечить расстояние между двумя соседними треками измерений порядка 3 км на экваторе, что определяет достаточно высокую пространственную плотность покрытия данными, в особенности для северных территорий.

ATLAS — лидар с подсчётом фотонов (*англ.* photon counting LIDAR); прибор испускает лазерные импульсы с высокой частотой и детектирует отдельные отражённые фотоны.

Измерение времени полёта фотона совместно с информацией о положении и ориентации прибора позволяет рассчитать координаты отражающего объекта земной поверхности, включая его высоту. Совокупность фотонов, детектируемых при выполнении измерений вдоль трека, формирует облако точек (координат отражающих объектов) для дальнейшего анализа. Пример облака точек, получаемого вдоль трека для покрытой лесной растительностью территории, приведён на *рис. 1*.

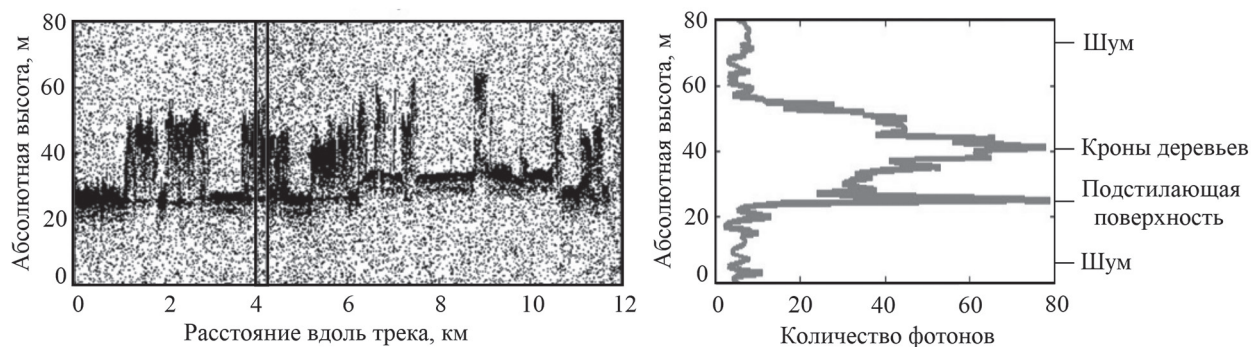


Рис. 1. Пример облака точек, получаемого лидаром с подсчётом фотонов для покрытой лесной растительностью территории (*слева*); гистограмма высот на обозначенном вертикальными линиями участке (адаптировано из работы (Markus et al., 2017)) (*справа*)

В работе использовался стандартный информационный продукт ATL08, полученный по данным системы ATLAS/ICESat-2 и содержащий информацию о значениях высоты растительности (Neuenschwander et al., 2020b). При формировании указанного продукта получаемое облако точек разделяется на следующие классы: подстилающая поверхность, листва/кроны (*англ.* сапору), верхний полог листвы/крон (*англ.* top-of-сапору) и шум (*рис. 2*). Далее непрерывный трек, соответствующий участку (полосе) земной поверхности шириной 14 м, разбивается на сегменты длиной 100 м.

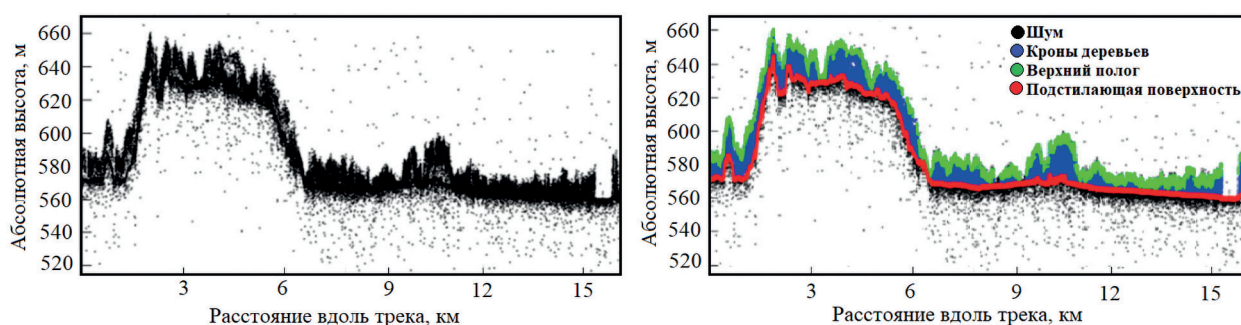


Рис. 2. Иллюстрация классификации облака точек при формировании стандартного информационного продукта ATL08 по данным системы ATLAS/ICESat-2 (адаптировано из работы (Neuenschwander, Magruder, 2019))

Высота отразивших фотоны элементов растительности (кроны/листва) оценивается относительно пространственно-интерполированных точек, отнесённых к классу подстилающей поверхности. Таким образом, каждое измерение (элемент) набора данных ATL08 соответствует участку земной поверхности 100×14 м вдоль трека (далее — сегмент) и содержит параметры, характеризующие распределение относительной высоты растительности на данном участке. Указанные параметры включают в себя значения минимума, максимума, среднего, стандартного отклонения и различные перцентили высот растительности, а также количество измерений и показатель степени их неопределённости (*англ.* uncertainty). В качестве

параметра, характеризующего высоту леса, в данной работе была выбрана величина h_{canopy} (98 перцентиль высот растительности). При этом пространственное расположение сегмента характеризуется в исходных данных только координатами его центра.

В исследовании были использованы все доступные на территорию России измерения продукта ATL08 за период с 14.10.2018 по 13.05.2020.

Наземные опорные данные и дополнительные материалы

В работе использовался набор данных наземных измерений характеристик лесов на уровне таксационных выделов. Указанный набор данных покрывает территорию двух административных районов на северо-востоке Костромской обл. общей площадью более 5 тыс. км², около 80 % которой занято лесом. Данная территория относится к зоне южной тайги, а основными преобладающими породами леса считаются ель (иногда с примесью пихты), сосна и берёза (иногда с примесью осины, ольхи или ивы).

Набор данных содержит около 35 тыс. таксационных выделов. Для каждого выдела предоставляется информация о средней высоте верхнего яруса насаждений, а также о других характеристиках лесного покрова, включая преобладающую породу и класс бонитета, по состоянию на 2014 г. Указанный набор данных использовался в рамках проведённых исследований для локальной оценки точности информационного продукта ATL08 по данным системы ATLAS/ICESat-2.

Для обеспечения возможности корректного сравнения с данными ATL08 опорная информация о высоте леса по результатам наземных измерений была актуализирована с приведением её к состоянию в 2019 г. на основе моделей хода роста и продуктивности лесных насаждений (Швиденко и др., 2008).

Анализ распределения средней высоты лесного покрова на уровне всей территории страны в разрезе различных типов леса выполнялся с использованием карты растительного покрова России за 2019 г., разработанной в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) на основе спутниковых данных ДЗЗ, полученных прибором MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Барталев и др., 2016).

Методы обработки экспериментальных данных

Предварительная обработка данных ATL08

Используемый в рамках настоящей работы стандартный информационный продукт ATL08 по данным системы ATLAS/ICESat-2 доступен к загрузке по адресу <https://nsidc.org/data/ATL08> через сервис EarthData (<https://search.earthdata.nasa.gov>). Загрузка и обработка данных проводились в текстовом (табличном) виде Tabular ASCII (*англ.* American Standard Code for Information Interchange) с преобразованием из исходного формата HDF5 (*англ.* Hierarchical Data Format) средствами сервиса. На этапе формирования заказа для загрузки были выбраны вышеупомянутые параметры распределения высот растительности.

Содержимое табличных файлов включает в себя выбранные параметры и вспомогательные данные, в том числе координаты центра сегмента. Измерения, для которых значение какого-либо параметра отсутствовало в силу недостаточного количества зафиксированных отражённых фотонов, исключались из дальнейшей обработки. Полученные данные преобразовывались в векторный формат shapefile, где каждому измерению соответствует точка с координатами центра сегмента и характеристиками высоты растительности в качестве атрибутов.

Предварительная обработка данных ATL08 выполнялась с использованием набора скриптов на языке Python. В результате был сформирован набор данных, включающий 128,3 млн лидарных измерений вертикальной структуры растительности, в том числе 52,4 млн измерений на покрытых лесом территориях согласно карте растительного покрова России (Барталев

и др., 2016). Распределение количества отобранных для исследований лидарных измерений по территории страны представлено на *рис. 3*.

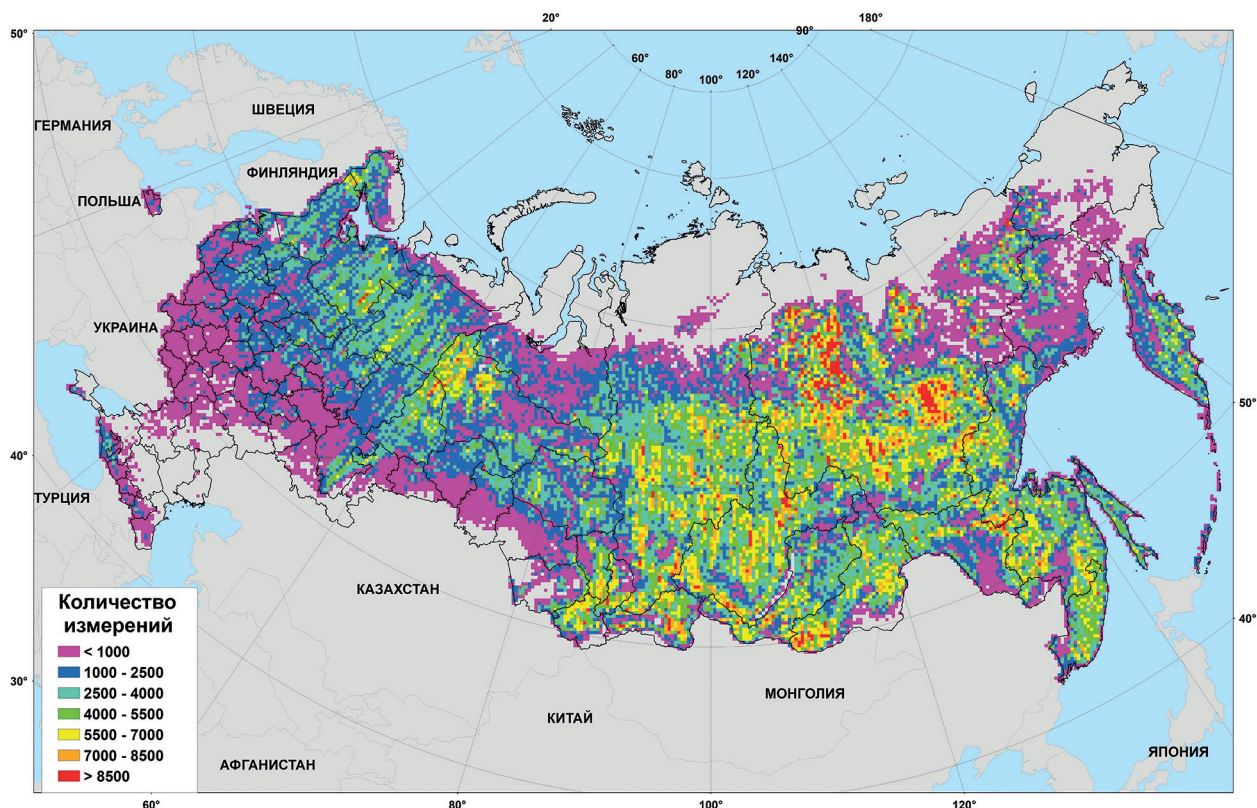


Рис. 3. Распределение количества обработанных измерений высоты лесного покрова по данным продукта ATL08 в ячейках регулярной сетки 23×23 км

Для корректного совместного анализа данных лидарных измерений с результатами наземного обследования, представленными в виде границ выделов в векторном формате, было также реализовано восстановление границ сегментов.

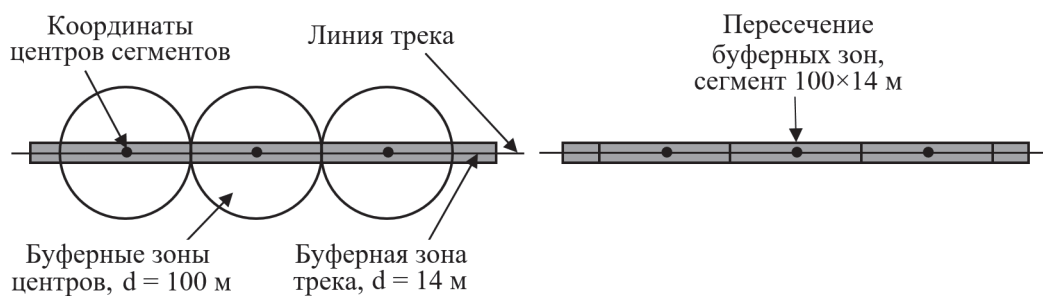


Рис. 4. Иллюстрация процедуры восстановления границ сегментов по данным ATL08

Реализованный метод основан на последовательном применении следующих геопространственных операций обработки векторных данных (*рис. 4*):

- 1) центры сегментов, соответствующих измерениям вдоль одного трека, объединяются в линию;
- 2) вокруг полученной линии трека выполняется построение буферного полигона с радиусом 7 м;

- 3) вокруг центров сегментов выполняется построение буферных полигонов с радиусом 50 м;
- 4) выполняется операция пересечения буферного полигона линии трека и буферных полигонов измерений. Полученные таким образом полигоны принимаются в качестве границ сегментов.

Обработка опорных данных наземных измерений и их сравнение с данными ATL08 на локальном уровне

Использованные в работе исходные данные наземных измерений содержали информацию о различных характеристиках лесного покрова на уровне таксационных выделов по состоянию на 2014 г. Для актуализации наземных данных информация о высоте, преобладающей породе и бонитете леса использовалась для оценки его возраста на основе соответствующих таблиц и моделей хода роста (Швиденко и др., 2008). Для каждого выдела затем определялся модельный прирост высоты за период с 2014 г. до даты проведения спутниковых измерений, принятой в среднем за 2019 г. Обновлённая таким образом высота верхнего яруса леса сравнивалась с параметром h_canopy продукта ATL08.

В сравнении участвовали только те спутниковые лидарные измерения, для которых восстановленные границы сегментов полностью находились внутри выделов. Для каждого такого измерения рассчитывался его вес на основе информации о степени неопределённости лидарной оценки высоты, доступной в составе продукта ATL08. Все измерения в пределах выдела затем использовались для расчёта средневзвешенной спутниковой оценки высоты леса. Кроме того, для каждого выдела также рассчитывалась общая неопределённость этой оценки, связанная как с неопределённостью исходных измерений, так и с неоднородностью высоты леса в выделе. Более детально указанный подход к обработке данных ATL08 описан в ранее опубликованной работе (Жарко и др., 2021).

Полученные средневзвешенные значения параметра h_canopy продукта ATL08 сравнивались с актуализированными данными наземных измерений.

Для сравнения были отобраны однородные выделы с наиболее достоверными спутниковыми оценками высоты, для которых рассчитанные значения критерия общей неопределённости не превышали 1 м. Кроме того, были отфильтрованы выделы, в которые попало менее 3 лидарных измерений, а также выделы, в которых за период 2014–2019 гг. были зафиксированы нарушения лесного покрова по данным проекта Global Forest Change (Hansen et al., 2013).

Гистограмма актуализированной средней высоты леса по данным наземных измерений в отобранных для сравнения выделах приведена на *рис. 5*.

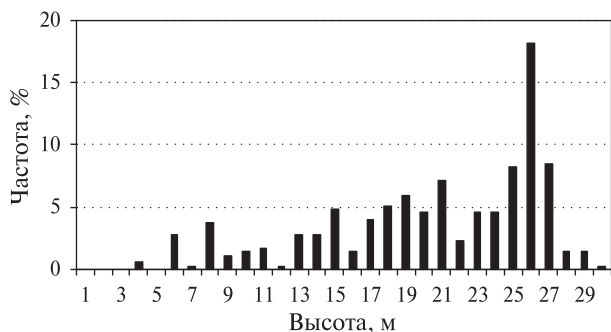


Рис. 5. Гистограмма средней высоты лесного покрова в отобранных для сравнения выделах

Анализ распределения средней высоты лесного покрова на национальном уровне

Обработанные лидарные измерения, попавшие согласно карте растительного покрова в пиксели лесных классов (Барталев и др., 2016), позволили оценить пространственное распределение средней высоты лесов всей территории России в ячейках регулярной сетки с шагом 23 км. Информация о принадлежности лидарных измерений к лесным классам вышеуказанной карты также использовалась для изучения распределения высот различных типов лесного покрова на территории страны.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты локальной оценки точности данных ATL08 представлены на *рис. 6*. Слева приведена диаграмма рассеяния при сравнении спутниковых и наземных измерений средней высоты леса для 352 выделов. Справа показаны средние значения и стандартные отклонения спутниковых оценок для различных диапазонов значений высоты леса с шагом 5 м.

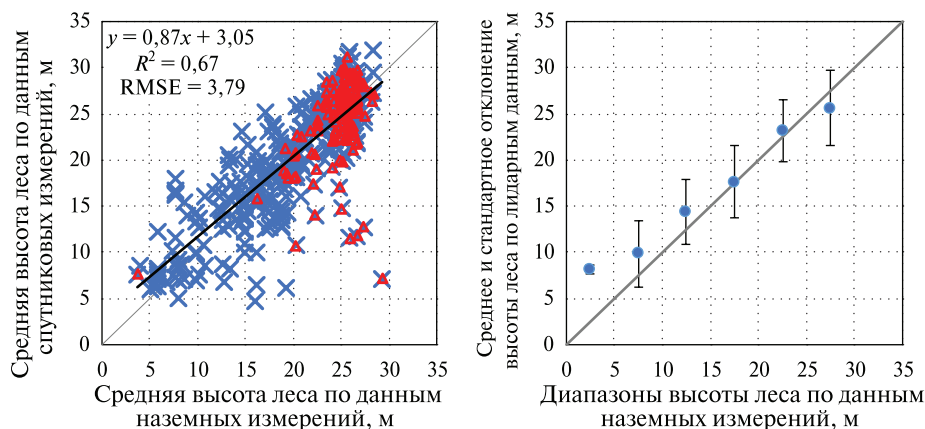


Рис. 6. Результаты оценки точности измерений средней высоты леса на уровне выделов по данным продукта ATL08; выделы с наличием подроста отмечены красным

Результаты сравнения продемонстрировали согласованность на уровне величины коэффициента детерминации $R^2 = 0,67$ и среднеквадратического отклонения $RMSE = 3,79$ м (*англ.* Root Mean Square Error). Для ряда выделов наблюдается явное занижение высоты леса по спутниковым оценкам относительно данных наземных измерений. Предположительно, это связано с наличием густого подроста/подлеска, что может приводить к неверному определению положения подстилающей поверхности при формировании продукта ATL08 и, как следствие, к недооценке высоты (выделы, для которых имеется информация о наличии подроста, отмечены красным на *рис. 6* (слева)). В целом, несмотря на некоторое завышение спутниковых оценок высоты леса в области низких значений и занижение в области высоких древостоев, полученные результаты демонстрируют достаточный для практического использования уровень достоверности лидарных данных ATL08.

Возможности применения полученного набора данных для оценки пространственного распределения высоты лесного покрова в масштабах всей территории России проиллюстрированы на *рис. 7* (см. с. 202). Полученные результаты в целом хорошо согласуются с известными закономерностями пространственного распределения высоты верхнего полога леса, такими как, например, высокие значения в европейской части России, на Дальнем Востоке и на Кавказе, а также уменьшение высоты древостоев с юга на север при продвижении на территории с менее благоприятными климатическими условиями. Совместное использование сформированного набора лидарных данных и данных о типах лесного покрова позволило также поучить информацию о статистическом распределении их высот (*рис. 8*, см. с. 202).

Приведённые на *рис. 8* данные также имеют содержательную интерпретацию. Так, лиственница на значительной части территории России произрастает в неблагоприятных климатических условиях, что подтверждается смещением пика гистограммы высот лесов данного типа в область более низких значений. С другой стороны, гистограмма высот лиственных лесов включает в себя различные породы, произрастающие как в суровых, так и в благоприятных лесорастительных условиях, что обуславливает соответствующую широкую форму распределения.

Таким образом, продукт ATL08 по данным лидарной системы ATLAS/ICESat-2 имеет значимый потенциал для оценки высоты лесов России и её пространственного распределения.

В частности, например, лидарные данные, несмотря на свои ограничения по возможностям непрерывного покрытия территории, могут использоваться при формировании обучающей выборки для картографирования высоты лесов на основе других данных ДЗЗ (Жарко и др., 2021). Кроме того, данные такого рода могут найти применение в задачах, связанных с оценкой продуктивности лесов (Богодухов и др., 2021, Zharko et al., 2020).

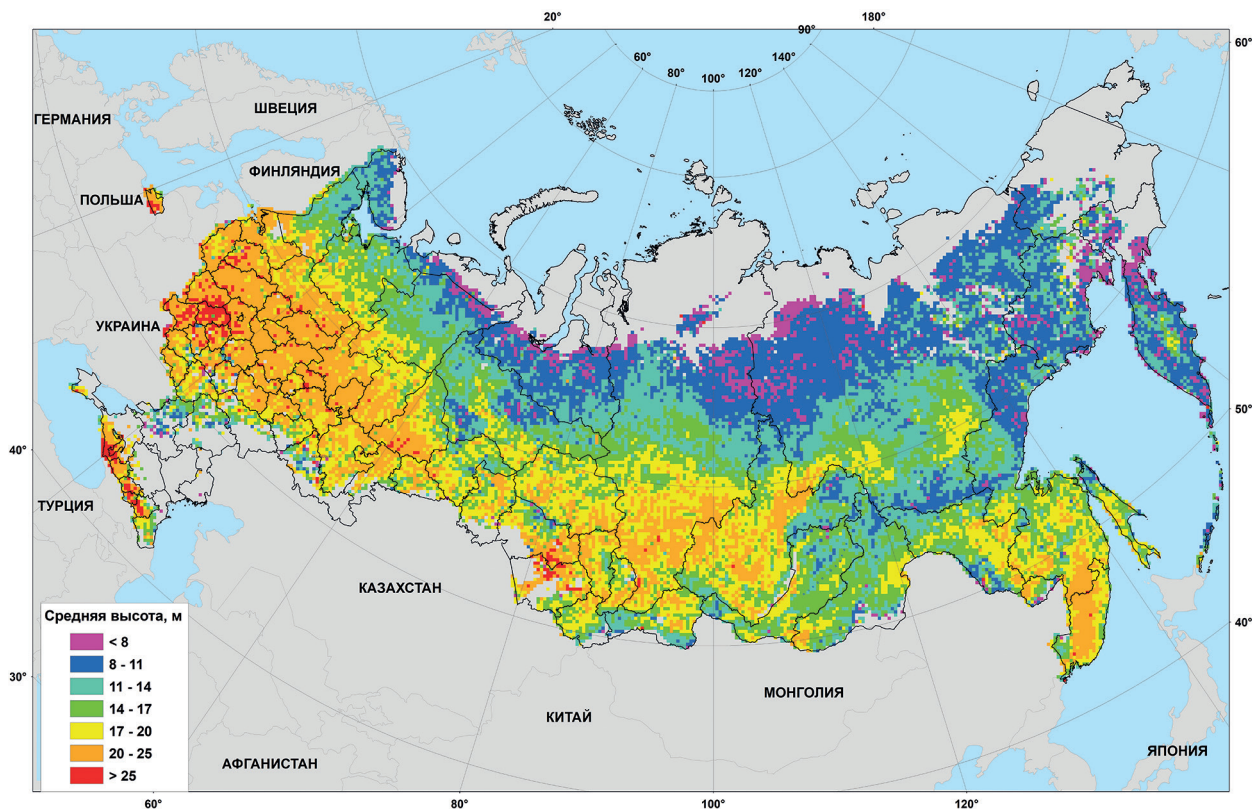


Рис. 7. Пространственное распределение средней высоты лесного покрова России в ячейках регулярной сетки размером 23×23 км, рассчитанной с использованием сформированного на основе продукта ATL08 набора данных

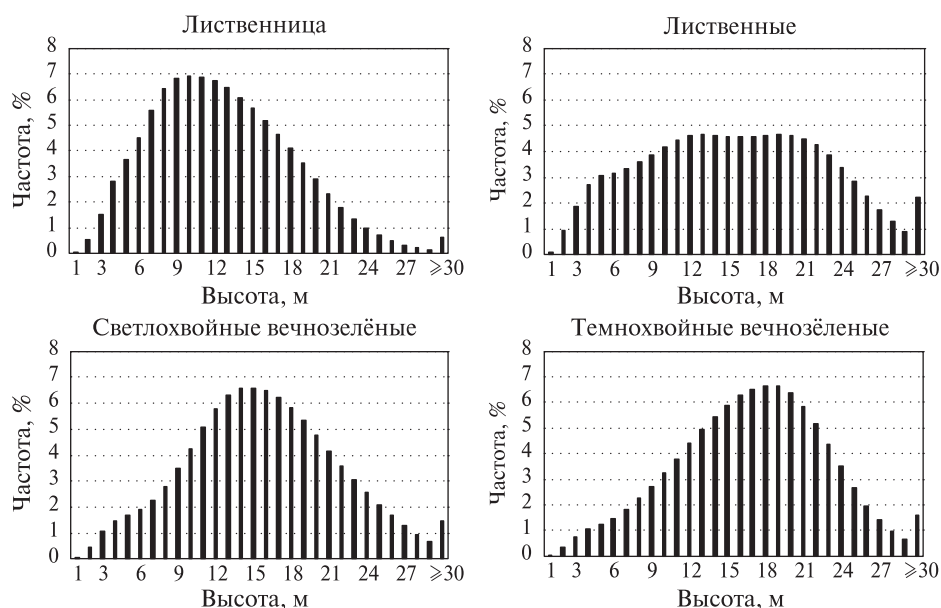


Рис. 8. Распределение высот различных типов лесного покрова на основе полученных данных лидарных спутниковых измерений

Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда № 19-77-30015. Подготовка и обработка данных наземных измерений высоты лесов проводились в рамках темы госзадания «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем», регистрационный номер научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ 121121600118-8. Обработка данных ДЗЗ проводилась с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

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. Богодухов М. А., Барталев С. А., Жарко В. О. Исследование возможностей оценки динамики высоты леса на территории России на основе использования разновременных данных ATL08 спутникового лидара ATLAS/ICESat-2 // Материалы 19-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 333. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
3. Жарко В. О., Барталев С. А., Богодухов М. А. Разработка карты высот лесного покрова России на основе совместного использования продуктов обработки оптических и лидарных спутниковых данных ДЗЗ // Материалы 19-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 347. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
4. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашицкий 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.
5. Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Нильссон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии. М.: Федеральное агентство лесного хоз-ва, 2008. 886 с.
6. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S., Goetz S., Loveland T., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342(6160). P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
7. Healey S. P., Hernandez M. W., Edwards D. P., Lefsky M. A., Freeman E., Patterson P. L., Lindquist E. J., Lister A. J. CMS: GLAS LiDAR-derived Global Estimates of Forest Canopy Height, 2004–2008. Oak Ridge, Tennessee, USA: ORNL DAAC, 2015. DOI: 10.3334/ORNLDAAC/1271.
8. Lang N., Kalischek N., Armston J., Schindler K., Dubayah R., Wegner J. D. Global canopy height regression and uncertainty estimation from GEDI LIDAR waveforms with deep ensembles // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 268. Art. No. 112760. 18 p. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112760.
9. Lefsky M. A global forest canopy height map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. Iss. 15. Art. No. L15401. 5 p. DOI: 10.1029/2010GL043622.
10. Liu A., Cheng X., Chen Z. Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 264. Art. No. 112571. 16 p. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112571.
11. Los S. O., Rosette J. A. B., Kljun N., North P. R. J., Chasmer L., Suárez, J. C., Hopkinson C., Hill R. A., van Gorsel E., Mahoney C., Berni J. A. J. Vegetation height and cover fraction between 60° S and 60° N from ICESat GLAS data // Geoscientific Model Development. 2012. V. 5. P. 413–432. DOI: 10.5194/gmd-5-413-2012.
12. Markus T., Neumann T., Martino A., Abdalati W., Brunt K., Csatho B., Farrell S., Fricker H., Gardner A., Harding D., Jasinski M., Kwok R., Magruder L., Lubin D., Luthcke S., Morison J., Nelson R., Neuenschwander A., Palm S., Zwally H. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 190. P. 260–273. DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.029.
13. Neuenschwander A., Magruder L. Canopy and Terrain Height Retrievals with ICESat-2: A First Look // Remote Sensing. 2019. V. 11(4). Art. No. 1721. 13 p. DOI: 10.3390/rs11141721.

14. Neuenschwander A., Guenther E., White J. C., Duncanson L., Montesano P. (2020a) Validation of ICESat-2 terrain and canopy heights in boreal forests // Remote Sensing of Environment. 2020 V. 251. Art. No. 112110. 15 p. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112110.
15. Neuenschwander A. L., Pitts K. L., Jelley B. P., Robbins J., Klotz B., Popescu S. C., Nelson R. F., Harding D., Pederson D., Sheridan R. (2020b) ATLAS/ICESat-2 L3A Land and Vegetation Height, Version 3. Boulder, Colorado, USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2020. DOI: 10.5067/ATLAS/ATL08.003 (accessed 01.12.2020).
16. Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Hansen M., Kommareddy A., Pickens A., Turubanova A., Tang H., Silva C. E., Armston J., Dubayah R., Blair J. B., Hofton M. Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 253. No. 112165. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.
17. Simard M., Pinto N., Fisher J. B., Baccini A. Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar // J. Geophysical Research: Biogeosciences. 2011. V. 116. Iss. G4. Art. No. 4021. 12 p. DOI: 10.1029/2011JG001708.
18. Zharko V., Bartalev S., Bogodukhov M. A method for the assessment of forest regrowth site index based on Earth observations and modelling // EGU General Assembly 2020, Online. 4–8 May 2020. EGU2020-20359. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-20359.

Investigation of ICESat-2 data capabilities for forest height estimation over Russia

S. A. Bartalev^{1,2}, M. A. Bogodukhov^{1,2}, V. O. Zharko^{1,2}, V. M. Sidorenkov³

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

² Center for Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow 117997, Russia

³ All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry
Pushkino 141202, Moscow region, Russia
E-mail: bogodukhov.ma@phystech.edu

The paper presents an analysis of ICESat-2 data capabilities for forest height estimation and assessment of its spatial distribution over Russia. A brief overview of available current and historic lidar satellite data products is carried out. Physical basis of ATLAS instrument operation as well as an approach to form ATL08 data product with information on vertical structure of vegetation are described. An approach for automated download and preprocessing of ATL08 product is implemented, including filtering of missing/corrupted data, conversion to vector format and delineation of borders of aggregated lidar footprints for which characteristics of vegetation height distribution are provided. All available ATL08 data over Russia for the period from 14.10.2018 till 13.05.2020 was processed to form a dataset of over 125M lidar measurements of vegetation vertical structure, including over 50M measurements of forest height. This study was performed at local and national spatial levels. Local-scale accuracy assessment of the ATL08 product (at the level of forest stands) included actualization of field survey data using models of forest growth, and satellite data based estimation of mean forest height and its uncertainty considering uncertainties of input lidar measurements and forest cover heterogeneity. Results of the local-scale accuracy assessment of ATL08 data are presented, showing agreement between ground based and satellite data based measurements of mean forest height at the level of $R^2 = 0,67$ and $RMSE = 3,79$ m. National level analysis included examples of potential use of the formed dataset to study height and productivity of Russian forests. Estimates of mean forest height spatial distribution over Russia, as well as distribution of mean height for different forest types, are presented.

Keywords: remote sensing, forest height, ICESat-2, ATL08

Accepted: 02.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-195-206

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. (in Russian).
2. Bogodukhov M. A., Bartalev S. A., Zharko V. O., Investigation of the possibility of estimating forest height dynamics on the territory of Russia based on the use of multi-time ATL08 data of the ATLAS/ICESat-2 satellite lidar, *Materialy 19-i mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 19th Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 15–19 Nov. 2021, Moscow: IKI RAN, 2021, p. 333 (in Russian), DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
3. Zharko V. O., Bartalev S. A., Bogodukhov M. A., Development of a height map of the forest cover of Russia based on the joint use of products for processing optical and lidar satellite remote sensing data, *Materialy 19-i mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 19th Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAN, 2021, p. 347 (in Russian), DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
4. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev 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.
5. Shvidenko A. Z., Shhepashhenko D. G., Nil'sson S., Bului Yu. I., *Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdenii osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoi Evrazii* (Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of northern Eurasia), Moscow: Federal'noe agentstvo lesnogo khozyaistva, 2008, 886 p. (in Russian).
6. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S., Goetz S., Loveland T., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 342, pp. 850–853, DOI: 10.1126/science.1244693.
7. Healey S. P., Hernandez M. W., Edwards D. P., Lefsky M. A., Freeman E., Patterson P. L., Lindquist E. J., Lister A. J., *CMS: GLAS LiDAR-derived Global Estimates of Forest Canopy Height, 2004–2008*, Oak Ridge, Tennessee, USA: ORNL DAAC, 2015, DOI: 10.3334/ORNLDAAC/1271.
8. Lang N., Kalischek N., Armston J., Schindler K., Dubayah R., Wegner J. D., Global canopy height regression and uncertainty estimation from GEDI LIDAR waveforms with deep ensembles, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 268, Art. No. 112760, 18 p., DOI: 10.1016/j.rse.2021.112760.
9. Lefsky M., A global forest canopy height map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System, *Geophysical Research Letters*, 2010, Vol. 37. Issue 15, Art. No. L15401, 5 p., DOI: 10.1029/2010GL043622.
10. Liu A., Cheng X., Chen Z., Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 264, Art. No. 112571, 10 p., DOI: 10.1016/j.rse.2021.112571.
11. Los S. O., Rosette J. A. B., Kljun N., North P. R. J., Chasmer L., Suárez, J. C., Hopkinson C., Hill R. A., van Gorsel E., Mahoney C., Berni J. A. J., Vegetation height and cover fraction between 60° S and 60° N from ICESat GLAS data, *Geoscientific Model Development*, 2012, Vol. 5, pp. 413–432, DOI: 10.5194/gmd-5-413-2012.
12. Markus T., Neumann T., Martino A., Abdalati W., Brunt K., Csatho B., Farrell S., Fricker H., Gardner A., Harding D., Jasinski M., Kwok R., Magruder L., Lubin D., Luthcke S., Morison J., Nelson R., Neuenschwander A., Palm S., Zwally H., The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 190, pp. 260–273, DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.029.
13. Neuenschwander A., Magruder L., Canopy and Terrain Height Retrievals with ICESat-2: A First Look, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(4), Art. No. 1721, 13 p., DOI: 10.3390/rs11141721.
14. Neuenschwander A., Guenther E., White J. C., Duncanson L., Montesano P. (2020a), Validation of ICESat-2 terrain and canopy heights in boreal forests, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 251, Art. No. 112110, 15 p., DOI: 10.1016/j.rse.2020.112110.
15. Neuenschwander A. L., Pitts K. L., Jelley B. P., Robbins J., Klotz B., Popescu S. C., Nelson R. F., Harding D., Pederson D., Sheridan R. (2020b), *ATLAS/ICESat-2 L3A Land and Vegetation Height, Version 3*, Boulder, Colorado, USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2020, DOI: 10.5067/ATLAS/ATL08.003 (accessed 01.12.2020).

16. Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Hansen M., Kommareddy A., Pickens A., Turubanova A., Tang H., Silva C. E., Armston J., Dubayah R., Blair J. B., Hofton M., Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 253, Art. No. 112165, DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.
17. Simard M., Pinto N., Fisher J. B., Baccini A., Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, Vol. 116, Art. No. 4021, Issue G4, 12 p., DOI: 10.1029/2011JG001708.
18. Zharko V., Bartalev S., Bogodukhov M., A method for the assessment of forest regrowth site index based on Earth observations and modelling, *EGU General Assembly 2020, Online*, 4–8 May 2020, EGU2020-20359, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-20359.