

Оценка возможностей определения высоты и проективного покрытия защитных лесных насаждений по данным ICESat-2

С. С. Шинкаренко, С. А. Барталев, М. А. Богодухов, В. О. Жарко

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

Сообщение посвящено результатам анализа возможностей использования информационного продукта ATL08 по данным спутникового лидара ATLAS/ICESat-2 (*англ.* Advanced Topographic Laser Altimeter System/Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) для определения высоты защитных лесных насаждений. Отметки высот, соответствующие растительности согласно лидарным данным за 2019–2022 гг., сопоставлялись с результатами обработки материалов аэросъёмки, выполненной в Волгоградской обл. в 2022 г. Установлена значимая связь между средними и максимальными значениями высоты полога, определёнными на основе материалов аэросъёмки и с использованием данных лазерного сканирования в сегментах 20×14 м, при их покрытии древесно-кустарниковой растительностью более чем на 50 %. Для средних значений высоты среднеквадратическая ошибка (СКО) составила $\pm 0,7$ м, а коэффициент детерминации $R^2 = 0,85$; для максимальных значений высоты эти показатели составили соответственно $\text{СКО} = \pm 2,2$ м и $R^2 = 0,83$. Сопоставление проективного покрытия по лидарным данным, рассчитанного как отношение числа фотонов выше определённой пороговой высоты к общему числу фотонов сегмента, и данных аэросъёмки показало недостаточную точность этого подхода. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования лидарных данных ATL08 для оценки высоты защитных лесных насаждений, но не для определения проективного покрытия.

Ключевые слова: защитные лесополосы, дистанционное зондирование, лидары, древесно-кустарниковая растительность, ICESat-2

Одобрена к печати: 20.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-174-183

Введение

Технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко применяются при изучении лесов, в том числе для оценки их горизонтальной и вертикальной структуры. Разработаны методы определения сомкнутости и полноты древостоев на основе оптических спутниковых данных (Ховратович и др., 2019; Hansen et al., 2013). Вертикальная структура полога, к которой можно отнести ярусность и высоту, анализируется обычно на основе данных активного дистанционного зондирования Земли с помощью радаров и лидаров. Данные о высоте лесов крайне важны для определения их биомассы и бонитета, мониторинга хода роста насаждений.

Защитные лесные насаждения (ЗЛН) практически не охвачены лесоустройством и государственной инвентаризацией лесов и, как следствие, характеризуются острым недостатком объективных и современных данных об их характеристиках. По этой причине оценка их состояния представляется достаточно актуальной задачей. Сомкнутость полога ЗЛН может быть определена на основе оптических данных ДЗЗ (Терехин, 2022; Шинкаренко, Барталев, 2023; Шинкаренко и др., 2022), но вопрос определения высоты защитных лесных насаждений по спутниковым данным проработан недостаточно. Одним из источников данных о высоте насаждений становится информационный продукт ATL08, основанный на результатах лазерного сканирования прибором ATLAS (*англ.* Advanced Topographic Laser Altimeter System), установленным на спутнике ICESat-2 (*англ.* Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) и предоставляющим данные о высоте лесного покрова в полосах 100×14 м (Neuenschwander et al., 2021). Этот информационный продукт уже используется для картографирования высоты лесов России (Барталев и др., 2022) и в некоторых регионах Китая (Sun et al., 2020).

Указанные данные могут быть представлены в виде сегментов шириной 14 м и длиной 20 м (Neuenschwander et al., 2022), способных обеспечить достаточно высокую пространственную детальность измерений высоты. Данные проекта (Potapov et al., 2020), основанные на измерениях прибором GEDI (*англ.* Global Ecosystem Dynamics Investigation), например, имеют пространственное разрешение 30 м, что делает их менее пригодными для анализа ЗЛН, зачастую имеющих ширину 10–15 м.

Для оценки возможностей использования лидарных данных ATLAS/ICESat-2 для определения высоты ЗЛН проведено сопоставление её значений, полученных на основе продукта ATL08, и данных аэросъёмки.

Материалы и методы исследования

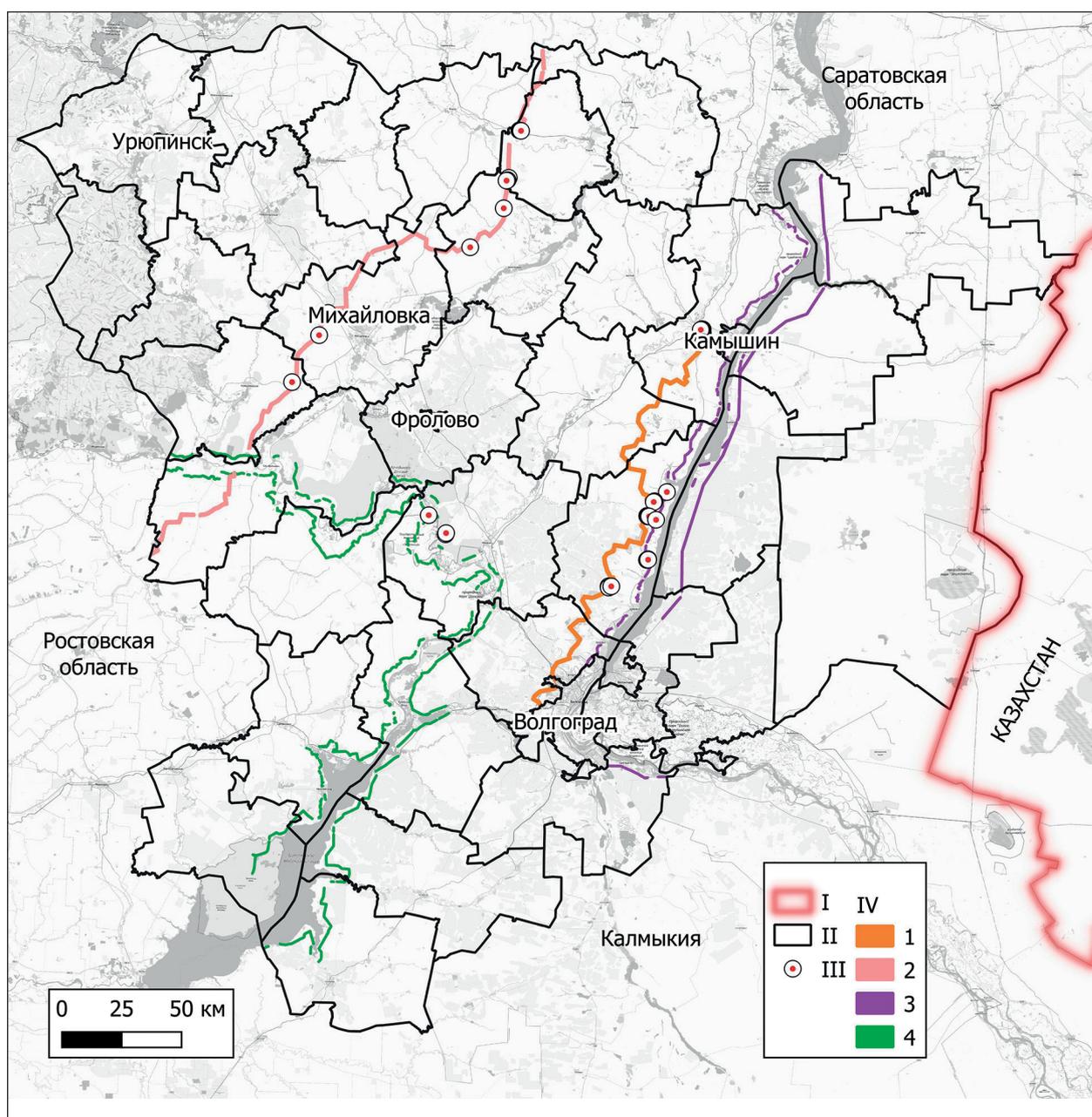


Рис. 1. Расположение тестовых полигонов в Волгоградской обл.: I — государственная граница РФ; II — границы муниципальных районов; III — тестовые полигоны; IV — ГЗЛП: 1 — Камышин — Волгоград, 2 — Пенза — Каменск, 3 — Саратов — Астрахань, 4 — Воронеж — Ростов-на-Дону

Исследование выполнено на десяти тестовых полигонах в Волгоградской обл. (государственные защитные лесные полосы (ГЗЛП): Камышин—Волгоград, Пенза—Каменск, Саратов—Астрахань, Воронеж—Ростов-на-Дону), где в августе и сентябре 2022 г. выполнялась аэросъёмка на общей площади 137 га (рис. 1, см. с. 175). Были выбраны все доступные сегменты ATL08, пересекающие границы ортофотопланов по данным аэросъёмки, в том числе и не захватывающие древесно-кустарниковые насаждения. Всего проанализировано 168 сегментов ATL08 размером 20×14 м, полученных по данным лидарных измерений в период с апреля 2019 г. по июль 2022 г. (рис. 2). Поскольку большая часть насаждений достигла возраста спелости, то разница в датах измерений не сыграла существенной роли при определении высоты полога древостоев. В границах каждого сегмента методом зональной статистики определялась средняя и максимальная высота согласно данным аэросъёмки, которые в дальнейшем сопоставлялись со средними значениями высоты полога и величинами, соответствующими 98-му перцентилю высот, в каждом сегменте по результатам лазерного сканирования. Данные о высотных отметках 98-го перцентиля входят в стандартные атрибуты информационного продукта ATL08 и используются в качестве максимальной высоты, что позволяет отфильтровать шумы и артефакты, у которых могут быть большие значения высоты. За полог древесно-кустарниковой растительности по данным аэросъёмки принимались объекты относительной высотой больше 1 м.

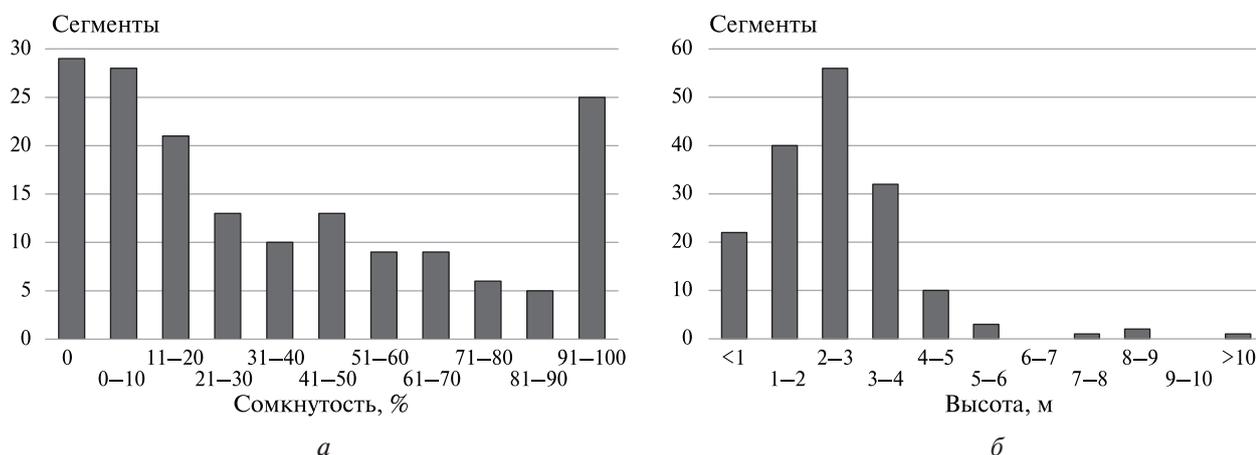


Рис. 2. Распределение сегментов ATL08 по сомкнутости по данным аэросъёмки (а) и по средней высоте ЗЛН по лидарным данным ATL08 (б)

Проективное покрытие полога в границах сегментов ATL08 рассчитывалось по данным аэросъёмки как отношение числа пикселей со значениями высоты более 1 м к общему количеству пикселей. Также проводился и расчёт проективного покрытия по лидарным данным: определялось отношение числа фотонов, отражённых от поверхности высотой выше определённого порога, или фотонов, классифицированных как полог насаждения, к общему числу фотонов в сегменте. В дальнейшем проводилось сопоставление полученных величин проективного покрытия по данным аэросъёмки и ATL08.

Более подробно исследованные ЗЛН описаны в работе (Выприцкий, Шинкаренко, 2022), технологии получения и обработки данных аэросъёмки представлены в публикации (Шинкаренко, Барталев, 2023), а лидарных данных — в статье (Барталев и др., 2022).

В насаждениях присутствует достаточно густой подрост и кустарники, образующие второй и третий ярус, которые зачастую не фиксируются по данным аэросъёмки, так как перекрываются кронами деревьев. Большая проникающая способность лидара позволяет определять высоту не только верхнего, но и второго и третьего ярусов, что сказывается на значениях высоты насаждений в сегментах ATL08 (см. рис. 2б).

Результаты и обсуждение

Пример сопоставления высот по данным аэросъёмки и ATL08 показан на *рис. 3*.

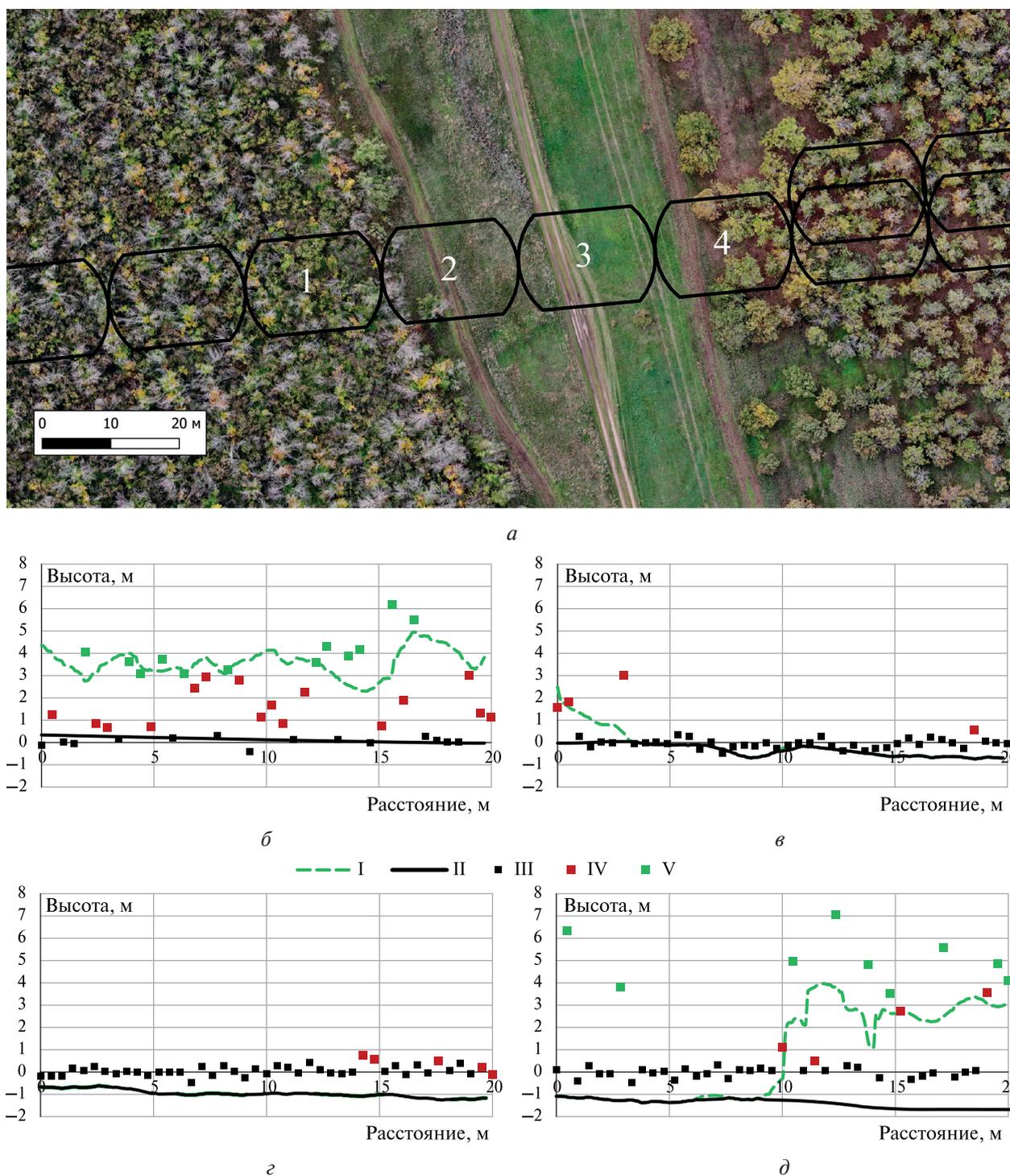


Рис. 3. Пример совмещения данных ATL08 ATLAS/ICESat-2 (границы сегментов показаны чёрным контуром) и фрагмента ортофотоплана (*a*). Распределение фотонов вдоль трека сканирования в сегментах 1–4 ATL08 (*б–д*), высотные отметки древесно-кустарниковой растительности и профили рельефа по данным аэросъёмки: I — древесно-кустарниковая растительность по данным аэросъёмки, II — профиль рельефа по данным аэросъёмки, III — профиль рельефа по ATL08, IV — древесно-кустарниковая растительность по ATL08, V — древесный полог ЗЛН по ATL08

При формировании продукта ATL08 проводится классификация отражённых фотонов с их разделением на три класса по типу отражающих элементов зондируемой поверхности: напочвенный покров, древесно-кустарниковая растительность и древесный полог. Полог по аэросъёмке выделялся по разнице высот цифровых моделей поверхности и рельефа, такой подход распространён достаточно широко (Медведев и др., 2020; Chianucci et al., 2016). Поскольку по лидарным данным и материалам аэросъёмки получены относительные высотные отметки, то сравнивать уровни поверхности напочвенного покрова и древесного полога между ними напрямую нельзя. Тем не менее отметки поверхности напочвенного покрова по данным лазерного сканирования достаточно точно соответствуют результатам, полученным по материалам аэросъёмки. Это подтверждают и другие исследования (Huang et al., 2020).

Точность определения относительных высотных отметок земной поверхности под пологом зависит не только от проективного покрытия, но и от конструкции насаждений: под древесным пологом без нижних ярусов точность выше, чем при наличии подроста и кустарников (Xi et al., 2023). Поскольку точность определения высоты полога зависит от точности полученных отметок земной поверхности, то при наличии подроста и кустарникового яруса растёт погрешность. Также погрешность может возникать из-за возможных ошибок географической привязки сегментов ATL08.

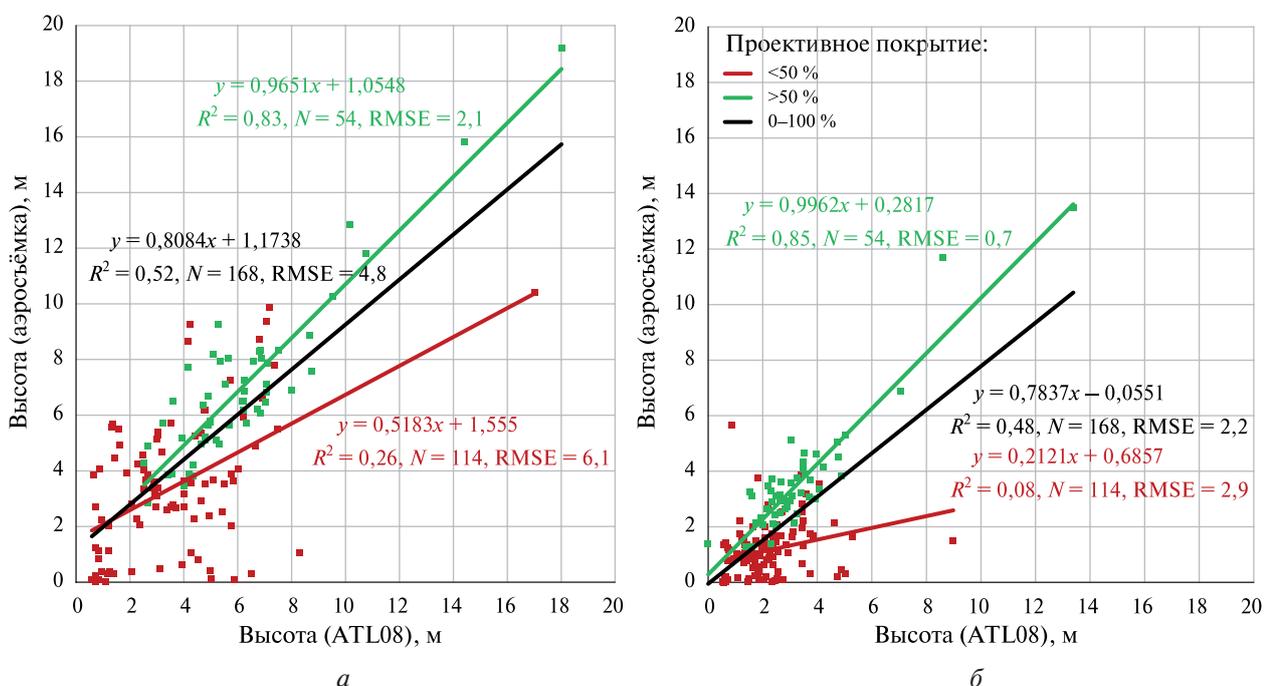


Рис. 4. Сопоставление максимальной (а) и средней (б) высоты ЗЛН по данным аэросъёмки и ATL08 в сегментах с разной степенью проективного покрытия древесного полога

На рис. 4 показаны связи значений средней и максимальной высоты насаждений по данным аэросъёмки с оценками их высоты по данным лазерного сканирования в границах сегментов ATL08. Фильтрация сегментов, покрытых лесом менее чем на 50 %, позволяет существенно увеличить точность получаемых оценок. Для средних значений высоты среднеквадратическая ошибка (СКО) составила $\pm 0,7$ м, а коэффициент детерминации $R^2 = 0,85$, для максимальной высоты соответствующие показатели составили $СКО = \pm 2,2$ м и $R^2 = 0,83$. При этом угловой коэффициент уравнения линейной регрессии практически равен единице для средних высот и 0,97 — для максимальных её значений. Для территории лесной зоны России точность определения высоты древостоев по данным ATL08 в сравнении с материалами наземного обследования лесов на уровне таксационных выделов была на уровне $R^2 = 0,67$,

СКО = $\pm 3,8$ м (Барталев и др., 2022). В Финляндии наибольшая точность (средняя ошибка 13,7–14,8 %) была достигнута при использовании данных лидарной съёмки летом в ночное время суток, полученных сильным лучом (Neuenschwander et al., 2020). Оценка высоты полога в Китае по данным ATL08 и результатам фотограмметрической обработки спутниковых стереопар ZY-3 показала точность лидарной оценки на уровне $R^2 = 0,51$ и СКО = $\pm 3,3$ – $3,5$ м (Lin et al., 2020).

При проективном покрытии древесно-кустарниковой растительности менее 50 % связь между средними высотами в сегментах отсутствует, а между максимальными наблюдается очень большая среднеквадратическая ошибка. Согласно выводам (Neuenschwander et al., 2020), наиболее точные оценки высоты полога получаются при проективном покрытии от 40 до 85 %. Меньшие значения проективного покрытия сегментов могут быть связаны как с неудовлетворительным состоянием древостоев, так и с только частичным перекрытием сегментов ATL08 границами ЗЛН. Второй аспект может играть важную роль при определении высот ЗЛН, ширина которых меньше размеров сегмента ATL08. Для оценки влияния ширины ЗЛН на точность определения высоты по лидарным данным требуется проведение дополнительных исследований на основе большей выборки наземных данных, включающей разные типы ЗЛН.

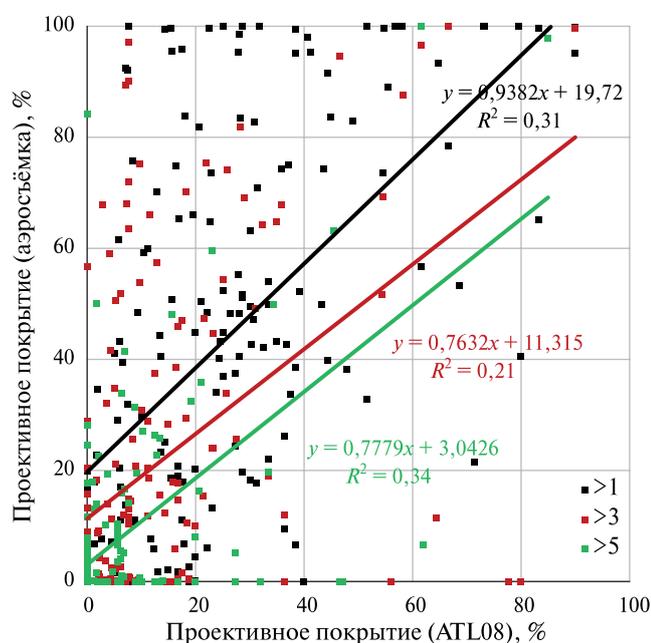


Рис. 5. Сопоставление проективного покрытия сегментов по данным аэросъёмки и ATL08 при разных пороговых высотах полога

На рис. 5 показано сопоставление проективного покрытия сегментов ATL08, рассчитанного как отношение числа фотонов (пикселей в случае аэросъёмки) выше пороговой высоты по данным аэросъёмки и спутникового лидара к их общему количеству. Наиболее тесная связь между показателями проективного покрытия по данным аэросъёмки и ATL08 наблюдается при пороговой высоте полога 1 и 5 м: R^2 равен 0,31 и 0,34 соответственно, а СКО — ± 34 и ± 14 % соответственно. При большей сомкнутости и высоте насаждений снижается точность определения полога и его высотных отметок по лидарным данным, так как меньше фотонов проникает под полог и достигает приёмника из-за переотражений (Xi et al., 2023). Коэффициент корреляции между общим числом фотонов и их количеством, отнесённым к пологу по данным ATL08, составляет $r = -0,41$ ($p < 0,001$), что свидетельствует о значимой слабой отрицательной связи и подтверждает вышесказанное: в более открытых ландшафтах растёт доля зарегистрированных фотонов. Тем не менее связь между проективным покрытием и средней высотой древесно-кустарниковой растительности в исследованных насаждениях

по данным аэросъёмки и общим количеством зарегистрированных фотонов в сегментах ATL08 отсутствует. Возможно, что это связано с относительно небольшими величинами проективного покрытия и высоты защитных лесных насаждений. Используемый подход определения проективного покрытия на основе отношения количества фотонов класса полога к общему их числу не позволяет получить достоверные результаты.

Заключение

Данные ATL08 могут успешно применяться для определения высоты ЗЛН при проективном покрытии древесно-кустарниковой растительности более 40–50 %. При этом границы ЗЛН могут быть картографированы как на основе экспертного дешифрирования высокодетальных спутниковых снимков, так и с использованием бисезонного индекса леса по данным Sentinel-2, показавшего достаточно высокий уровень связи с сомкнутостью насаждений. Возможность определения высоты и сомкнутости полога ЗЛН открывает дальнейшие перспективы дистанционной оценки их запаса стволовой древесины.

По результатам проведённых экспериментов оценка сомкнутости проективного покрытия при использовании данных продукта ATL08 спутникового лидара ATLAS/ICESat-2 не показала достаточного уровня достоверности. Это может быть связано с недостаточным количеством детектируемых отражённых фотонов в пределах рассматриваемых участков земной поверхности.

Необходимо продолжение исследований возможностей использования данных ATL08 для определения высоты и проективного покрытия ЗЛН на примере других типов насаждений, в том числе полезащитных лесных полос, ширина которых не превышает 15–20 м. На территорию распространения ЗЛН в России покрытие данными ATL08 ещё недостаточно, поэтому желательно выбирать участки для проведения наземных лесотаксационных работ и аэросъёмки, для которых уже имеются лидарные данные.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6). Обработка данных ДЗЗ проводилась с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. *Барталев С. А., Богодухов М. А., Жарко В. О., Сидоренков В. М.* Исследование возможностей использования данных ICESat-2 для оценки высоты лесов России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 195–206. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-195-206.
2. *Вытрицкий А. А., Шинкаренко С. С.* Анализ влияния почвенно-климатических условий на сохранность государственных защитных лесных полос на основе данных Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 147–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-147-163.
3. *Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий 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.
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. Терехин Э. А. Выявление зависимостей между параметрами лесов Среднерусской лесостепи и спектральными отражательными свойствами на основе данных Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 124–137. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-124-137.
 6. Ховратович Т. С., Барталев С. А., Кашицкий А. В. Метод детектирования изменений лесов на основе попиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 102–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
 7. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Возможности оценки сомкнутости защитных лесных насаждений на основе бисезонного индекса леса и материалов съёмки БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 189–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-189-202.
 8. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Васильченко А. А. Метод картографирования защитных лесных насаждений на основе разновременных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и бисезонного индекса леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 207–222. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222.
 9. Chianucci F., Disperati L., Guzzi D., Bianchini D., Nardino V., Lastrì C., Rindinella A., Corona P. Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. V. 47. P. 60–68. DOI: 10.1016/j.jag.2015.12.005.
 10. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
 11. Huang J., Xing Y., Qin L., Xia T. Accuracy verification of terrain under forest estimated from ICESat-2/ATLAS data // Infrared and Laser Engineering. 2020. V. 49. No. 11. Art. No. 20200237. DOI: 10.3788/IRLA20200237.
 12. Lin X., Xu M., Cao C., Dang Y., Bashir B., Xie B., Huang Z. Estimates of Forest Canopy Height Using a Combination of ICESat-2/ATLAS Data and Stereo-Photogrammetry // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 3649. DOI: 10.3390/rs12213649.
 13. Neuenschwander A., Guenther E., White J. C., Duncanson L., Montesano P. 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.
 14. 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. ATLAS/ICESat-2 L3A Land and Vegetation Height, Version 5: User Guide. Boulder, Colorado, USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2021. 19 p. DOI: 10.5067/ATLAS/ATL08.005.
 15. Neuenschwander A., Pitts K., Jelley B., Robbins J., Markel J., Popescu S., Nelson R., Harding D., Pederson D., Klotz B., Sheridan R. Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite 2 (ICESat-2): Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Land-Vegetation Along-Track Products (ATL08). Version 6. 2022. 144 p. DOI: 10.5067/1PJ82T4JS50L.
 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., Hofman M. Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 253. Art. No. 112165. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.
 17. Sun T., Qi J., Huang H. Discovering forest height changes based on spaceborne lidar data of ICESat-1 in 2005 and ICESat-2 in 2019: a case study in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China // Forest Ecosystems. 2020. V. 7. Art. No. 53. DOI: 10.1186/s40663-020-00265-w.
 18. Xi L., Li L., Shu Q., Sun Y., Huang J., Song H. Forest Terrain Inversion Based on Icesat-2/ATLAS with Different Laser Intensities // Polish J. Environmental Studies. 2023. V. 32. No. 1. P. 341–351. DOI: 10.15244/pjoes/153928.

Assessment of possibilities for protective forest belts canopy closure and height estimation based on ICESat-2 data

S. S. Shinkarenko, S. A. Bartalev, M. A. Bogodukhov, V. O. Zharko

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

This paper presents the results of the analysis of possibilities for using ATL08 product on vegetation canopy height based on ATLAS/ICESat-2 data to estimate the height of protective forest belts (wind-breaks/shelterbelts). Vegetation height according to lidar data for 2019–2022 was compared with 2022 aerial photography survey data in Volgograd region. A significant strong correlation was found between mean and maximum canopy heights determined from aerial survey and laser scanning data for 20×14 m segments with tree and shrub coverage of more than 50 %. For mean heights RMSE = 0.7 m and coefficient of determination $R^2 = 0.85$; for maximum heights RMSE = 2.2 m and $R^2 = 0.83$. Comparison of the forest canopy closure based on lidar data, calculated as the ratio of the number of photons above a threshold height to the total number of photons in the segment, and aerial data showed the insufficient accuracy of this approach. Obtained results indicate potential of using ATL08 lidar data for protective forest belts' height mapping.

Keywords: protective forest belts, remote sensing, lidars, trees and shrubs, ICESat-2

Accepted: 20.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-174-183

References

1. Bartalev S. A., Bogodukhov M. A., Zharko V. O., Sidorenkov V. M., Investigation of ICESat-2 data capabilities for forest height estimation over Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 195–206 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-195-206.
2. Vypritskiy A. A., Shinkarenko S. S., Analysis of soil and climatic factors influence on the protective forest condition based on Sentinel-2 data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 147–163 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-147-163.
3. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
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. 17, No. 1, pp. 150–163 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163.
5. Terekhin E. A., Relationships between forest stand parameters and Sentinel-2 spectral reflectance in the Central Russian forest-steppe, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 6, pp. 124–137 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-124-137.
6. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Kashnitskiy A. V., Forest change detection based on sub-pixel estimation of crown cover density using bitemporal satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 102–110 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
7. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Possibilities of assessing protective forest canopy using Sentinel-2 based bi-seasonal forest index and UAV data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 1, pp. 189–202 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-189-202.
8. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Vasilchenko A. A., Method for protective forest plantations mapping based on multi-temporal high spatial resolution satellite images and Bi-Season Forest Index, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 207–222 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222.
9. Chianucci F., Disperati L., Guzzi D., Bianchini D., Nardino V., Lastri C., Rindinella A., Corona P., Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing

- UAV, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, Vol. 47, pp. 60–68, DOI: 10.1016/j.jag.2015.12.005.
10. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 342, pp. 850–853, DOI: 10.1126/science.1244693.
 11. Huang J., Xing Y., Qin L., Xia T., Accuracy verification of terrain under forest estimated from ICESat-2/ATLAS data, *Infrared and Laser Engineering*, 2020, Vol. 49, No. 11, Art. No. 20200237, DOI: 10.3788/IRLA20200237.
 12. Lin X., Xu M., Cao C., Dang Y., Bashir B., Xie B., Huang Z., Estimates of Forest Canopy Height Using a Combination of ICESat-2/ATLAS Data and Stereo-Photogrammetry, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 3649, DOI: 10.3390/rs12213649.
 13. Neuenschwander A., Guenther E., White J. C., Duncanson L., Montesano P., 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.
 14. 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., *ATLAS/ICESat-2 L3A Land and Vegetation Height, Version 5: User Guide*, Boulder, Colorado, USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2021, 19 p., DOI: 10.5067/ATLAS/ATL08.005.
 15. Neuenschwander A., Pitts K., Jelley B., Robbins J., Markel J., Popescu S., Nelson R., Harding D., Pederson D., Klotz B., Sheridan R., *Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite (ICESat-2): Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Land-Vegetation Along-Track Products (ATL08), Version 6*, 2022, 144 p., DOI: 10.5067/1PJ82T4JS50L.
 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. Sun T., Qi J., Huang H., Discovering forest height changes based on spaceborne lidar data of ICESat-1 in 2005 and ICESat-2 in 2019: a case study in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China, *Forest Ecosystems*, 2020, Vol. 7, Art. No. 53, DOI: 10.1186/s40663-020-00265-w.
 18. Xi L., Li L., Shu Q., Sun Y., Huang J., Song H., Forest Terrain Inversion Based on Icesat-2/ATLAS with Different Laser Intensities, *Polish J. Environmental Studies*, 2023, Vol. 32, No. 1, pp. 341–351, DOI: 10.15244/pjoes/153928.