

Особенности оценки биомассы и запасов углерода методами наземного и воздушного сканирования на карбоновом полигоне

Вероника Антоновна КОСТЫК^{1,2}
инженер-лаборант, аспирант
kostyk.1956@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6494-8947>

Кирилл Иванович КАЛАШНИКОВ¹
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
kalashnikov.ki@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4232-1796>

Евгений Андреевич ЛЯЛЮШКО¹
старший преподаватель
lialyushko.ea@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9081-6323>

Константин Андреевич НАГОРНЫЙ¹
инженер
nagorny.k.a@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0259-1162>

Снежана Валентиновна ВИХРЕНКО¹
ведущий инженер, аспирант
vikhrenko.sv@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9531-1419>

¹Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

²Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Аннотация. Биомасса – важнейший показатель при мониторинге глобального углеродного цикла. Карбоновые полигоны являются площадками для детального изучения газообмена и способностей экосистем к эмиссии и депонированию парниковых газов. Подобные климатические проекты изучают отдельные компоненты ландшафта, например, почвы, болота, водные объекты, растительность, включая леса. Индивидуальные параметры различных пород деревьев в смешанных лесах являются ценными показателями, которые требуются в том числе для климатических проектов и лесного хозяйства. Исследования по этой теме сосредоточены на определении характеристик отдельных деревьев в лесах с преобладающей породой. Проблема определения биомассы в смешанных лесах изучена недостаточно. Цель исследования заключалась в проведении эксперимента по совмещению методик сканирования для оценки биомассы. В данной работе оценка биомассы деревьев определялась в смешанном лесу путем объединения данных воздушного и наземного сканирования местности, а также результатов мультиспектральной аэрофотосъемки территории. Основные этапы исследования включали классификацию деревьев с помощью мультиспектральных данных в сочетании с натурными наблюдениями; объединение результатов наземной и воздушной съемки, где определение вида дерева по аэрофотосъемке выступает в качестве основы для класси-

фикации облака точек; облако точек использовано для нахождения диаметра и высоты отдельных деревьев. Результаты показывают, что применяя особые условия обработки мультиспектральных снимков, можно разделить деревья по видам, при комбинации с данными лазерного сканирования оценить биомассу деревьев в сложном насаждении. Для оценки точности лазерного сканирования были проведены выборочные натурные измерения диаметра и высоты деревьев, которые показали расхождения в пределах 9 %. При сравнении натуральных и лазерных методов измерений диаметров и высот выявлены возможности повышения точности и скорости получения данных о деревьях. Произведенная оценка биомассы способствует уточнению расчетов запасов углерода в отдельных компонентах экосистемы.

Ключевые слова: биомасса, запасы углерода, лазерное сканирование, аэрофотосъемка, карбоновый полигон

Для цитирования: Костык В.А., Калашников К.И., Лялюшко Е.А., Нагорный К.А., Вихренко С.В. Особенности оценки биомассы и запасов углерода методами наземного и воздушного сканирования на карбоновом полигоне // Тихоокеанская география. 2026. № 3. С. 101–110. https://doi.org/10.35735/26870509_2026_27_9

Original article

Features of biomass and carbon stock assessment using ground-based and airborne scanning methods at the carbon polygon

Veronika A. KOSTYK^{1,2}
laboratory engineer, postgraduate student
kostyk.1956@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6494-8947>

Kirill I. KALASHNIKOV¹
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor
kalashnikov.ki@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4232-1796>

Evgeny A. LIALIUSHKO¹
senior lecturer
lialiushko.ea@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9081-6323>

Konstantin A. NAGORNYI¹
engineer
nagornyi.ka@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0259-1162>

Snezhana V. VIKHRENKO¹
leading engineer, postgraduate student
vikhrenko.sv@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9531-1419>

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

²Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. Biomass represents a crucial metric in the ongoing surveillance of the global carbon cycle. Carbon polygons serve as platforms for thorough examination of gas exchange processes and ecosystem capabilities regarding greenhouse gas emissions and sequestration. Since 2022, the Far Eastern Carbon Polygon has been functioning in Primorsky Krai, Russia, One of its sites, «Ajax» being analyzed in this study. Such climate-focused projects investigate distinct landscape components such as soils, wetlands,

water bodies, vegetation, particularly forests. Individual parameters of various tree species in mixed forests constitute valuable indicators necessary for climate initiatives and forestry management alike. Studies addressing this subject typically focus on identifying tree-specific characteristics within dominant-species forests. Nevertheless, challenges persist concerning biomass evaluation in mixed-species forests. The purpose of the study was to conduct an experiment on combining scanning techniques for biomass assessment. To address this issue, the present study employs an integrative method combining airborne and terrestrial scanning data along with multispectral aerial photography. Primary phases encompassed tree classification using multispectral data augmented by field studies conducted over a trial plot; fusion of ground survey outcomes with aerial reconnaissance results, wherein multispectral-determined tree species classification forms the cornerstone for point-cloud segmentation; finally, exploiting the resultant point cloud to derive individual tree diameters and heights. Findings suggest that specialized procedures for processing multispectral imagery enable distinguishing tree species. Combining these results with laser scanning-derived metrics allows for robust biomass estimation in mixed forest stands. Selective ground measurements of tree diameters and heights corroborated laser scanning data, revealing deviations within 9%. A comparative analysis highlighted opportunities for enhancing both the accuracy and efficiency of data acquisition methods. These advances contribute significantly towards improving environmental monitoring frameworks, thereby facilitating informed decision-making in climate change mitigation strategies and sustainable forest management endeavors. The biomass assessment helps to refine calculations of carbon reserves in individual ecosystem components.

Keywords: biomass, carbon stock, laser scanning, aerial photography, carbon polygon

For citation: Kostyk V.A., Kalashnikov K.I., Lialushko E.A., Nagornyi K.A., Vikhrenko S.V. Features of biomass and carbon stock assessment using ground-based and airborne scanning methods at the carbon polygon. *Pacific Geography*. 2026;(3):101–110. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2026_27_9

Введение

Согласно общеизвестным оценкам, за последнее столетие на планете значительно увеличились выбросы углекислого газа, что оказывает влияние на глобальное изменение климата и ухудшение экологической обстановки [1]. Наземные экосистемы способны эффективно снижать выбросы углекислого газа благодаря фотосинтезу. Лесной покров представляет собой крупнейшее хранилище углерода на суше, способное контролировать выбросы, выступать регулятором глобального круговорота углерода и замедлять климатические изменения [2]. Особую важность приобретают задачи оперативного и детального определения биомассы лесов, что способствует принятию эффективных решений по климатической повестке.

Общепринятые методы определения вида, высоты и диаметра ствола дерева основываются на натурных измерениях. Временные и трудовые затраты на полевые работы не всегда соответствуют качеству полученных данных, которые обладают большой степенью субъективности, например, высота дерева часто определяется с погрешностью более 1 м [3]. Развитие беспилотной авиации (беспилотные летательные аппараты, БПЛА), систем позиционирования, фотограмметрической обработки открывает новые возможности в изучении лесов [4].

Дистанционное зондирование Земли (с помощью БПЛА) в последнее время все чаще используется для определения метрических характеристик. Например, технология LIDAR (Light Detection and Ranging — обнаружение и определение дальности с помощью света) используется для получения информации о конфигурации кроны и расчетов биомассы [5]. Подробный выбор метрик для моделирования биомассы по результатам применения этой технологии рассмотрен в работе [6], где описано локальное применение лазерного сканирования. Стоит отметить преимущественное применение LIDAR при воздушном сканировании [7–9], где отдельные деревья и высота могут быть получены из облака точек с долей корректного детектирования деревьев относительно полевого учета, равной 86 %. Согласно исследованиям [10–15], чаще всего воздушная лидарная съемка применяется в изуче-

нии лесных угодий, преимущественно это участки с имеющимися пробными площадями или с преобладающей породой. Гораздо реже встречаются исследования о совмещении наземной и воздушной съемки [16, 17], что может повысить процент идентифицированных деревьев и уточнить диаметры стволов в однородном лесу.

Ряд отечественных ученых достаточно подробно описали количественные показатели обобщенных пород деревьев [18], что теоретически обосновано в монографии и закреплено базой данных в открытом доступе. Стоит отметить работы [19, 20], в которых определение дендрометрических характеристик производится с помощью наземного (статичного) лазерного сканирования и аэрофотосъемки, что позволяет в значительной степени расширить возможности изучения лесов. Однако стоит отметить, что исследования в этой сфере проводятся в основном в центральной части страны и касаются деревьев с «эталонными» характеристиками, часто произрастающими в заповедных зонах.

Одним из недостатков технологий воздушного (ВЛС) и наземного лазерного сканирования (НЛС) для определения биомассы является необходимость натурных обследований при определении вида растения. Альтернативным источником данных могут стать мульти- и гиперспектральные данные дистанционного зондирования. Мультиспектральные изображения находят широкое применение в дистанционном зондировании Земли. Использование мультиспектральных сенсоров позволяет извлекать спектральные характеристики объектов и, в отличие от традиционных камер, работающих в видимом диапазоне, получать информацию, не доступную зрению человека. Мультиспектральные данные дистанционного зондирования позволяют разделить деревья по видам, но не представляют достаточной информации об их метрических характеристиках. Воздушное и лазерное сканирование позволяет получить трехмерную информацию об отдельных деревьях, но не характеризует видовой состав деревьев.

Цель исследования — разработать и апробировать комбинированный метод оценки наземной биомассы отдельных деревьев в смешанном лесу на основе интеграции данных наземного и воздушного лазерного сканирования (НЛС и ВЛС) с мультиспектральной съемкой с БПЛА на карбоновом полигоне. В задачи входили: классификация пород деревьев по мультиспектральным данным; совмещение наземного и воздушного облаков точек для получения высот и диаметров стволов; верификация результатов по данным полевых описаний; расчет биомассы и запасов углерода для отдельных пород. Новизна работы заключается в том, что комбинация ВЛС, НЛС и мультиспектральной съемки впервые апробирована на карбоновом полигоне в условиях Приморья.

Материалы и методы

В исследовании предложен комбинированный метод определения биомассы отдельных деревьев, основанный на результатах наземного и воздушного лазерного сканирования, а также мультиспектральных данных дистанционного зондирования с помощью БПЛА. Этот метод позволяет точнее и быстрее оценить биомассу леса и отдельных деревьев и подходит для локальных участков. Метод применялся на участке карбонового полигона на территории парка кампуса Дальневосточного федерального университета, расположенного на о-ве Русский (б. Аякс), г. Владивосток. Проверка результатов проходила на основе данных натурных обследований.

Объект исследования – смешанный лес (искусственные посадки и естественный лес) [21]. Карбоновый полигон представляет собой участок земли и морской акватории с общей площадью 24 га. Средняя высота сухопутной части полигона над уровнем моря 18.5 м с перепадами от 39 до 2 м.

Климат региона муссонный, вегетационный период продолжается 170 дней, средняя температура января -7 °С, июля +17.3 °С, среднегодовая сумма атмосферных осадков 853 мм. Длительность морозного периода (температура воздуха меньше 0 °С) составляет

90 дней. Скорость роста температуры воздуха – $0.3^{\circ}\text{C}/10$ лет, средняя многолетняя тенденция роста сумм атмосферных осадков – $14,8 \text{ мм}/10$ лет [22].

Подготовительный этап заключался в закреплении на местности 27 опознавательных знаков, координаты которых определены в системе UTM 52N с помощью ГНСС-приемника (глобальная навигационная спутниковая система) PrinCe I90 в режиме RTK (Real Time Kinematic «кинематика в реальном времени»). Для всех видов работ выбрана общая система координат WGS 84 с проекцией UTM 52 для Северного полушария. Каждый вид съемки проводился одновременно 23.03.2025 и 01.07.2025, схемы съемки приведены на рис. 1.



Рис. 1. Схема маршрутов съемок карбонового полигона (о. Русский)

Fig. 1. Shooting route map of the carbon test site (Russky Island)

Мультиспектральная аэрофотосъемка выполнялась квадрокоптером DJI Mavic 3 Multispectral. Полет осуществлялся по составленному полетному заданию на высоте 60 м с продольным и поперечным перекрытием снимков 80 и 70 % соответственно. Обработка фотоснимков произведена в ПО Agisoft Metashape.

Воздушное лазерное сканирование произведено беспилотным летательным аппаратом DJI Matrice 300 RTK с полезной нагрузкой Zenmuse L1. Полет совершался на высоте 60 м относительно рельефа, скорость полета 3 м/с, частота сканирования 160 kHz с фиксацией до 3 эхо-сигналов и плотностью 400 точек/м². Фотографирование для окрашивания облака точек в RGB велось параллельно при сканировании с продольным и поперечным перекрытием 70 и 30 % соответственно. Обработка результатов ВЛС проводилась в ПО DJI Terra.

Наземное лазерное сканирование выполнено с помощью сканера GreenValley LiGrip H300. Траектория движения менялась в зависимости от внешних факторов, но выбиралась таким образом, чтобы в полном объеме охватить территорию съемки. Обработка произведена в ПО Lidar360.

Полученные облака точек очищены от шумов с помощью инструмента Noise Filter, произведено выделение точек рельефа инструментом Classify Ground Points, нормализа-

ция рельефа выполнена инструментом Normalize by Ground Points; сегментация отдельных деревьев произведена через Point Cloud Segmentation, диаметры и высоты получены инструментом Statistic Individual Tree Attributes. Для корректной работы указанных инструментов установлены критерии исследуемой территории, где минимальная высота дерева 14 м, высота ствола для идентификации по диаметру 1.3 м, минимальный диаметр дерева 10 см. Расчет биомассы (W) произведен по формуле, предложенной в работе [23]: $W = a(D^2H)^b$, где D – диаметр дерева на высоте 1.3 м, H – высота дерева, a и b – рассчитанные параметры для отдельных пород [24].

Результаты и их обсуждение

В результате наземного и воздушного сканирования получены облака точек, по результатам аэрофотосъемки составлен мультиспектральный ортофотоплан, по натурным наблюдениям выборочно зафиксированы параметры деревьев на бумаге. Точность взаимного расположения облаков измерялась с помощью внутренней функции ПО Lidar360 – парные точки. Выбирается характерная точка на двух облаках. После определения как минимум 3 общих характерных точек программа выдает СКО по каждой из них. Поскольку разности в координатах облаков точек относительно малы, был использован алгоритм ICP (interactive closest points), встроенный в ПО Lidar360. С помощью него облака были соединены с СКО 6 см. Совмещение облаков выполнено по опознавательным знакам с точностью 3–5 см.

Два облака точек были объединены и классифицированы по видам объектов (травы, деревья, здания, дороги). Произведена процедура нормализации для приведения к единому уровню рельефа. Выполнена процедура идентификации деревьев, нахождения диаметра и высоты дерева по объединенному облаку точек. Выявлено 679 деревьев. Произведено сравнение полученных диаметров и высот с натурными измерениями 18 тестовых деревьев, в результате чего установлено, что традиционное измерение высоты в сложных условиях дает погрешность в 1–2 м [25], лазерное же сканирование определяет высоту с точностью 1–10 см. Стоит отметить, что погрешность определения диаметра мерной лентой составляет менее 1 см, однако определение отметки измерения в 1.3 м содержит большую погрешность благодаря сложному рельефу и наклону ствола. В то же время облако точек позволяет определять диаметр дерева по длине ствола через заданный интервал, например, 5 см, что компенсирует общую погрешность определения диаметра в 1–5 см.

Составлена схема распределения деревьев по шести категориям, которая представлена на рис. 2.

Стоит отметить, что работы по выделению шести классов деревьев не включали в себя определение полных биномиальных названий (рода и вида), например, для ивы *Tilia*, так как на исследуемой территории произрастает более одного представителя рода. Для удобства шесть указанных классов получили упрощенные названия: дубы, березы, липы, ясени, другие. На исследуемой территории идентифицировано 1255 деревьев, из них для расчетов выбрано 679, имеющих диаметр ствола более 10 см.

По результатам мультиспектральной аэрофотосъемки произведена кросс-валидация видов через стратифицированную случайную выборку в ПО ArcGIS Pro. Значение одного из шести классов деревьев по ортофотоплану откорректировано авторами на основе натурного обследования. В качестве критерия точности принята метрика $F1$ в пределах от 0 до 1, ее величина составила в среднем 0.75.

Оценка биомассы произведена с помощью соответствующих аллометрических уравнений (см. табл.).

Общий объем отсканированного леса составляет около 1 028 м³, суммарная надземная биомасса равна 353 971 кг, наибольший вклад (62.7 %) вносят дубы (81 070 кг), ивы (79 406 кг), березы (17 499 кг). Согласно традиционным методам оценки запасов углерода

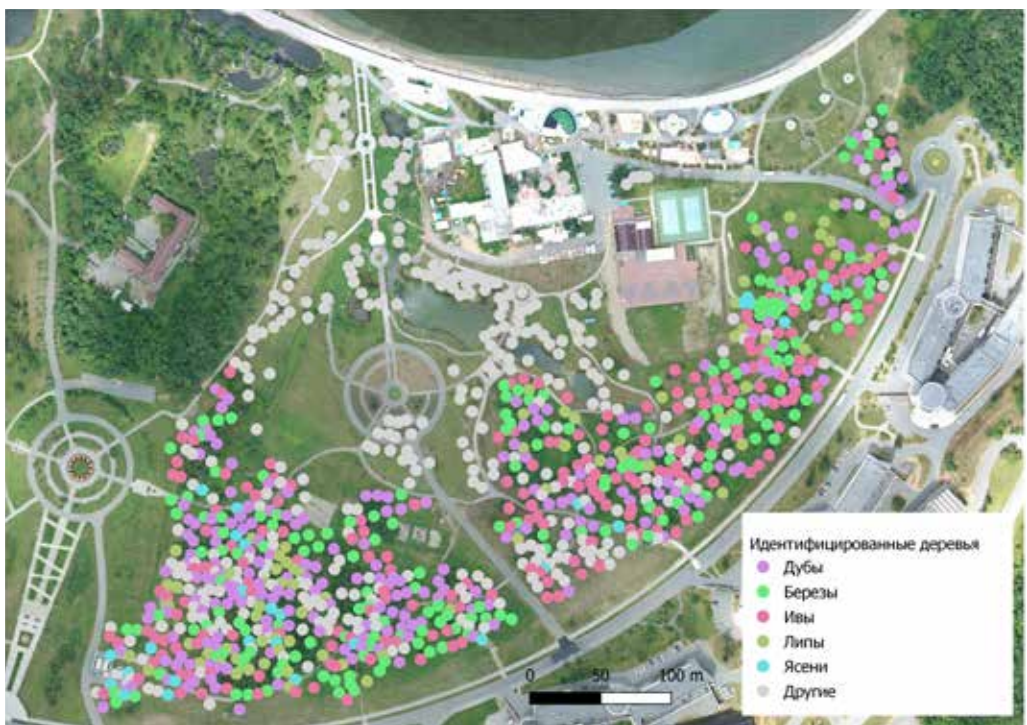


Рис. 2. Схема расположения идентифицированных деревьев на площадке карбонового полигона
Fig. 2. The layout of the identified trees on the carbon polygon site

Таблица

Количественные параметры исследуемых деревьев
Table. Quantitative parameters of the studied trees

Класс	Количество деревьев, шт.	Биомасса, кг	Углерод, кг
Дубы	201	81070	40535
Березы	115	17499	8749
Ивы	110	79406	39703
Липы	52	12237	6119
Ясени	37	17472	8736
Другие	164	146289	73145

для деревьев принят переходный коэффициент 0.5, на который необходимо умножить биомассу.

Полученные оценки могут внести значительные уточнения в климатические проекты, например, карбоновые полигоны, также способствовать развитию рынка углеродных единиц. Предложенный алгоритм позволяет оценить биомассу деревьев с точностью, сопоставимой с полевой, при значительном сокращении трудозатрат.

Заключение и выводы

В результате проведения комплекса работ по наземному и воздушному лазерному сканированию, а также мультиспектральной аэрофотосъемки на территории дальневосточного карбонового полигона (б. Аякс) комбинированным способом произведена клас-

сификация деревьев, получены высоты и диаметры стволов, произведена верификация по натурным данным, произведен расчет биомассы и запасов углерода для отдельных пород. При сравнении с натурными данными вычисления по облаку точек показали точность более 90 % (диаметр и высота). Идентифицированные деревья разделены на шесть классов, преобладающими деревьями (63 % от общего числа) являются дубы, березы, ивы; около 13 % территории занимают липы и ясени; 24 % других деревьев следует определить в будущих исследованиях, проводя подробные геоботанические описания, которые позволяют расширить и уточнить классификацию. Установлено, что наземное облако точек может быть использовано отдельно от воздушного, так как обладает достаточной детальностью. Метод определения вида дерева по мультиспектральной съемке требует значительной доработки (так как предварительная точность метода составляет 63 %), но для задач общей оперативной оценки биомассы на территории более 1 га по известным породам деревьев демонстрирует удовлетворительную идентификацию. Описанный метод позволяет в сжатые сроки получить полную информацию о лесном покрове для оперативных и сезонных оценок биомассы. В сложных лесных насаждениях для определения видов деревьев предлагается использовать мультиспектральные методы, а для оценки отдельных параметров деревьев – технологию LIDAR. Точное объединение этих двух типов данных позволяет распознавать породы деревьев и вычислять биомассу и запасы углерода отдельных деревьев в сложных лесных условиях. Полученные результаты способны существенно скорректировать климатические инициативы, включая проекты карбонового полигона, а также стимулировать развитие рынка углеродных единиц.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FZNS-2026-0020 «Оценка ресурсного потенциала прибрежно-морских экосистем».

Acknowledgments. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. FZNS-2026-0020 “Assessment of the resource potential of coastal marine ecosystems”.

Литература

1. Hember R., Kurz W. Low tree-growth elasticity of forest biomass indicated by an individual-based model // *Forests*. 2018, Vol. 9. P. 25. <https://doi.org/10.3390/f9010021>.
2. Krofcheck D., Litvak M., Lippitt C., Neuenschwander A. Woody biomass estimation in a southwestern US. Juniper savanna using lidar-derived clumped tree segmentation and existing allometries // *Remote Sens*. 2016. Vol. 8. P. 15. <https://doi.org/10.3390/rs8060453>.
3. Sterenczak K., Mielcarek M., Wertz B., Bronisz K., Zajączkowski G., Jagodziński A.M., Ochał W., Skorupski M. Factors influencing the accuracy of ground-based tree-height measurements for major European tree species // *J. Environ. Manag.* 2019, Vol. 231. P. 1284–1292. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.100>.
4. Berra E., Gaulton R., Barr S. Assessing spring phenology of a temperate woodland: A multiscale comparison of ground, unmanned aerial vehicle and Landsat satellite observations // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 223. P. 229–242. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.010>.
5. Anjin C., Yongmin K., Yongil K., Yangdam E. Estimation of individual tree biomass from airborne lidar data using tree height and crown diameter // *Disaster Adv.* 2012. Vol. 5. P. 360–365.
6. Borsah A., Nazeer M., Wong M. LIDAR-Based Forest Biomass Remote Sensing: A Review of Metrics, Methods, and Assessment Criteria for the Selection of Allometric Equations // *Forests*. 2023. Vol. 14. P. 22. <https://doi.org/10.3390/f14102095>.
7. Cao L., Liu H., Fu X., Zhang Z., Ruan H. Comparison of UAV lidar and digital aerial photogrammetry point clouds for estimating forest structural attributes in subtropical planted forests // *Forests*. 2019. Vol. 10. P. 22. <https://doi.org/10.3390/f10020145>.
8. Lisein J., PierrotDeseilligny M., Bonnet S., Lejeune P. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small Unmanned Aerial System imagery // *Forests*. 2013. Vol. 4. P. 922–944. <https://doi.org/10.3390/f4040922>.
9. Li W., Guo Q., Jakubowski M.K., Kelly M. A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2012. Vol. 78 (1). P. 75–84. <https://doi.org/10.14358/PERS.78.1.75>.

10. Hudak A.T., Haren A.T., Crookston N.L., Liebermann R.J., Ohmann J.L. Imputing Forest structure attributes from stand inventory and remotely sensed data in western Oregon, USA // *Forest Science*. 2014. Vol. 60 (2). P. 253–269. <https://doi.org/10.5849/forsci.12-101>.
11. Safonova A., Hamad Y., Dmitriev E., Georgiev G., Trenkin V., Georgieva M., Dimitrov S., Iliev M. Individual tree crown delineation for the species classification and assessment of vital status of forest stands from UAV images // *Drones*. 2021. Vol. 5 (3). P. 18. <https://doi.org/10.3390/drones5030077>.
12. Dalponte M., Coomes D.A. Treecentric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data // *Methods in Ecology and Evolution*. 2016. Vol. 7 (10). P. 1236–1245.
13. Brieger F., Herzsich U., Pestryakova L.A., Bookhagen B., Zakharov E.S., Kruse S. Advances in the Derivation of Northeast Siberian Forest Metrics Using High-Resolution UAV-Based Photogrammetric Point Clouds // *Remote Sens*. 2019. Vol. 11. P. 24. <https://doi.org/10.3390/rs11121447>.
14. Neuville R., Bates J.S., Jonard F. Estimating Forest Structure from UAV-Mounted LiDAR Point Cloud Using Machine Learning // *Remote Sens*. 2021. Vol. 13. P. 18. <https://doi.org/10.3390/rs13030352>.
15. Алексеев А.С., Данилов Ю.И., Никифоров А.А. Опыт применения беспилотного летательного аппарата для инвентаризации и оценки опытных лесных культур Лисинской части учебно-опытного лесничества Ленинградской области // *Труды Санкт-Петербургского НИИЛХ*. 2020. № 2. С. 46–58. <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.2.46>.
16. Иванова Н.В., Шашков М.П., Шанин В.Н. Определение характеристик смешанных древостоев по данным аэрофотосъемки с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) // *Вестн. Том. гос. ун-та. Биология*. 2021. № 54. С. 158–175.
17. Pu Y., Xu D., Wang H., Li X., Xu X. A New Strategy for Individual Tree Detection and Segmentation from Leaf-on and Leaf-off UAV-LiDAR Point Clouds Based on Automatic Detection of Seed Points // *Remote Sens*. 2023. Vol. 15. P. 19. <https://doi.org/10.3390/rs15061619>.
18. Усольцев В.А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, 2023. 530 с.
19. Кабонен А.В. Оценка состояния и структуры насаждений с применением аэрофотосъемки и лазерного сканирования: дис. ... канд. с.-х. наук: 4.1.6. Петрозаводск, 2024. 118 с.
20. Кабонен А.В., Димитров В.М. Оценка дендрометрических характеристик насаждений по данным наземного лазерного сканирования // *Сибирский лесной журнал*. 2025. № 5. С. 90–99.
21. Дальневосточный Карбоновый полигон. 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://carbon-polygons.ru/polygons/karbonovyyj-poligon-v-primorskom-kraye> (дата обращения: 15.02.2026).
22. Костык В.А., Лисина И.А., Вихренко С.В. Климатические условия функционирования карбоновых полигонов на юге Приморского края // *Почво- и углерод-сберегающие технологии в АПК России и Мира. Материалы Международной научной конференции, Москва, 26–28 ноября 2024 г. Москва; Владивосток: ДВФУ, 2024. С. 60–64.*
23. Lian X., Zhang H., Xiao W., Lei Y., Ge L., Qin K., He Y., Dong Q., Li L., Han Y. et al. Biomass Calculations of Individual Trees Based on Unmanned Aerial Vehicle Multispectral Imagery and Laser Scanning Combined with Terrestrial Laser Scanning in Complex Stands. *Remote Sens*. 2022, Vol. 14. P. 18. <https://doi.org/10.3390/rs14194715>.
24. Li H., Lei Y. Estimation and Evaluation of Forest Biomass Carbon Storage in China; China Forestry Press: Beijing, China, 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://clck.ru/3Untez> (дата обращения: 15.07.2025).
25. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 5 августа 2022 г. № 510 «Об утверждении Лесоучетной инструкции». [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://urtmag.ru/upload/iblock/604/Prikaz-Minprirody-Rossii-ot-05_08_2022-N-510-Ob-utverzhenii.pdf (дата обращения: 15.02.2026).

References

1. Hember, R.; Kurz, W. Low tree-growth elasticity of forest biomass indicated by an individual-based model. *Forests*. 2018;(9):25. <https://doi.org/10.3390/f9010021>.
2. Krofcheck, D.; Litvak, M.; Lippitt, C.; Neuenschwander, A. Woody biomass estimation in a southwestern US. Juniper savanna using lidar-derived clumped tree segmentation and existing allometries. *Remote Sens*. 2016;(8):15. <https://doi.org/10.3390/rs8060453>. (In English)
3. Sterenczak, K.; Mielcarek, M.; Wertz, B.; Bronisz, K.; Zajączkowski, G.; Jagodziński, A.M.; Ochał, W.; Skorupski, M. Factors influencing the accuracy of ground-based tree-height measurements for major European tree species. *J. Environ. Manag.* 2019;(231):1284–1292. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.100>.
4. Berra, E.; Gaulton, R.; Barr S. Assessing spring phenology of a temperate woodland: A multiscale comparison of ground, unmanned aerial vehicle and Landsat satellite observations. *Remote Sensing of Environment*. 2019;(223):229–242. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.010>.
5. Anjin, C.; Yongmin, K.; Yongil, K.; Yangdam, E. Estimation of individual tree biomass from airborne lidar data using tree height and crown diameter. *Disaster Adv.* 2012;(5):360–365.
6. Borsah, A.; Nazeer, M.; Wong, M. LIDAR-Based Forest Biomass Remote Sensing: A Re-view of Metrics, Methods, and Assessment Criteria for the Selection of Allometric Equations. *Forests*. 2023;(14):22. <https://doi.org/10.3390/f14102095>.

7. Cao, L.; Liu, H.; Fu, X.; Zhang, Z.; Ruan, H. Comparison of UAV lidar and digital aerial photogrammetry point clouds for estimating forest structural attributes in subtropical planted forests. *Forests*. 2019;(10):22. <https://doi.org/10.3390/f10020145>.
8. Lisein J.; PierrotDeseilligny M.; Bonnet S.; Lejeune P. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small Unmanned Aerial System imagery. *Forests*. 2013;(4):922–944. <https://doi.org/10.3390/f4040922>.
9. Li, W.; Guo, Q.; Jakubowski, M.K.; Kelly, M. A new method for segmenting individual trees from the Li-DAR point cloud. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2012;78(1):75–84. <https://doi.org/10.14358/PERS.78.1.75>.
10. Hudak, A.T.; Haren, A.T.; Crookston, N.L.; Lieberman, R.J.; Ohmann, J.L. Imputing Forest structure attributes from stand inventory and remotely sensed data in western Ore-gon, USA. *Forest Science*. 2014;60(2):253–269. <https://doi.org/10.5849/forsci.12-101>.
11. Safonova, A.; Hamad, Y.; Dmitriev, E.; Georgiev, G.; Trenkin, V.; Georgieva M.; Dimitrov S.; Iliev M. Individual tree crown delineation for the species classification and assessment of vital status of forest stands from UAV images. *Drones*. 2021;5(3):18. <https://doi.org/10.3390/drones5030077>.
12. Dalponte, M.; Coomes, D.A. Treecentric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in Ecology and Evolution*. 2016; 7(10):1236–1245.
13. Brieger, F.; Herzsuh, U.; Pestryakov, A. L.A.; Bookhagen, B.; Zakharov, E.S.; Kruse, S. Advances in the Derivation of Northeast Siberian Forest Metrics Using High-Resolution UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. *Remote Sens*. 2019;(11):24. <https://doi.org/10.3390/rs11121447>.
14. Neuville, R.; Bates, J.S.; Jonard, F. Estimating Forest Structure from UAV-Mounted Li-DAR Point Cloud Using Machine Learning. *Remote Sens*. 2021;(13):18. <https://doi.org/10.3390/rs13030352>.
15. Alekseev, A.S.; Danilov, Yu.I.; Nikiforov, A.A. Experience of using an unmanned aerial vehicle for inventory and evaluation of experimental forest crops in the Chinese part of the educational and experimental forestry of the Leningrad region. In *Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry*. 2020;(2):46-58. (In Russian). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.2.46>.
16. Ivanova, N.V.; Shashkov, M.P.; Shanin, V.N. Determination of characteristics of mixed stands based on aerial photography using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Tomsk State University Journal. Biology*. 2021;(54):158-175. (In Russian).
17. Pu, Y.; Xu, D.; Wang, H.; Li, X.; Xu, X. A New Strategy for Individual Tree Detection and Segmentation from Leaf-on and Leaf-off UAV-LiDAR Point Clouds Based on Automatic Detection of Seed Points. *Remote Sens*. 2023;(15):19. <https://doi.org/10.3390/rs15061619>.
18. Usoltsev, V.A. Biomass and primary products of Eurasian forests. Yekaterinburg: Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2023. P. 530. (In Russian).
19. Kabonen, A.V. Assessment of the condition and structure of plantings using aerial photography and laser scanning: dissertation... Candidate of Agricultural Sciences: 4.1.6. Petrozavodsk, 2024. 118 p. (In Russian).
20. Kabonen, A.V.; Dimitrov V.M. Evaluation of dendrometric characteristics of plants according to ground laser scanning data. *Siberian Forest Journal*. 2025;(5):90–99.
21. Far Eastern Carbon landfill. 2024. (In Russian). Available online: <https://carbon-polygons.ru/polygons/karbonovyyj-poligon-v-primorskom-krae> [Accessed: 15.02.2026].
22. Kostyk, V.A.; Lisina, I.A.; Vikhrenko, S.V. Climatic conditions of carbon landfills in the south of Primorsky Krai. In *Soil- and carbon-saving technologies in the agro-industrial complex of Russia and the world*. Proceedings of International Scientific Conference, Moscow, November 26–28, Moscow-Vladivostok: 2024, 60–64. (In Russian).
23. Lian, X.; Zhang, H.; Xiao, W.; Lei, Y.; Ge, L.; Qin, K.; He, Y.; Dong, Q.; Li, L.; Han, Y.; et al. Biomass Calculations of Individual Trees Based on Unmanned Aerial Vehicle Multispectral Imagery and Laser Scanning Combined with Terrestrial Laser Scanning in Complex Stands. *Remote Sens*. 2022;(14):18. <https://doi.org/10.3390/rs14194715>.
24. Li, H.; Lei, Y. Estimation and Evaluation of Forest Biomass Carbon Storage in China; China Forestry Press: Beijing, China, 2010. Available online: <https://clck.ru/3Untez> [Accessed: July 15.07.2025].
25. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated August 5, 2022 No. 510 "On approval of Forest Management Instructions". (In Russian). Available online: https://urtmag.ru/upload/iblock/604/Prikaz-Minprirody-Rossii-ot-05_08_2022-N-510-Ob-utverzhenii.pdf [Accessed: 15.02.2026].



Статья поступила в редакцию 27.02.2026; одобрена после рецензирования 11.05.2026; принята к публикации 15.05.2026.

The article was submitted 27.02.2026; approved after reviewing 11.05.2026; accepted for publication 15.05.2026.