ОЦЕНКА БИОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕРЕВЬЕВ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО LIDAR И РАЗНОСЕЗОННОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ В ИСКУССТВЕННЫХ НАСАЖДЕНИЯХ

А. В. Кабонен[1,*], Н. В. Иванова[2]

[1]*Петрозаводский государственный университет, Россия*
**e-mail: alexkabonen@mail.ru*
[2]*Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Россия*

Поступила: 04.04.2022. Исправлена: 26.09.2022. Принята к опубликованию: 04.10.2022.

Достижения в области беспилотных летательных аппаратов и технологии LiDAR сделали возможным получение данных с высоким разрешением, которые можно использовать для автоматического детектирования отдельных деревьев и оценки их биометрических характеристик. Точность получаемых оценок остается малоизученной в условиях высокого видового разнообразия деревьев и разных сезонов проведения съемки. Целью данной работы стала оценка качества детектирования деревьев и их высот в смешанных и хвойных насаждениях по фотограмметрическим и наземным LiDAR данным в зависимости от фенологической фазы. В 2019–2021 гг. было проведено четыре аэрофотосъемки с квадрокоптера Phantom 4 Pro на территории арборетума (> 200 видов деревьев) Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Республика Карелия, Россия) в периоды безлистного состояния деревьев, роста зеленой биомассы, полного облиствения и осеннего окрашивания листьев. Дополнительно к этому было выполнено однократное наземное лазерное сканирование насаждения с помощью Leica BLK 360. Получены разносезонные RGB-ортофотопланы со сверхвысоким пространственным разрешением (1.1–2.8 см/пиксель) и трехмерные облака точек со средней плотностью 4200 точек/м^2 (фотограмметрическая обработка) и 11 600 точек/м^2 (лазерное сканирование). Дальнейший анализ проводили на трех модельных участках, различающихся по видовому составу и плотности произрастания деревьев. В среде статистического программирования R по фотограмметрическим облакам точек выполнен поиск вершин деревьев и оценены их высоты. В результате установлено, что алгоритмы обработки данных аэрофотосъемки позволили корректно детектировать большинство деревьев (78.9%) в периоды полного облиствения и осеннего окрашивания. Отмечено, что уменьшение зеленой биомассы на лиственных деревьях приводит к увеличению ложноположительных (FP) и ложноотрицательных срабатываний (FN). Показано, что корректность детектирования вершин деревьев возрастает на 9.4% в случае хвойных деревьев с конусовидной формой кроны вне зависимости от плотности крон и снижается на 10% в случае высокой сомкнутости крон широколиственных или хвойных деревьев с шарообразными кронами. Наиболее низкое значение оценки качества детектирования деревьев *F* (0.49) выявлено для периода безлистного состояния. Высокие значения качества *F* (0.84) для периодов полного облиствения и осеннего окрашивания показывают, что в целом качество детектирования деревьев было хорошим на всех исследованных участках. Значение *F* (0.69) для периода роста биомассы также свидетельствует о высоком качестве детектирования деревьев. При сопоставлении оценок высот деревьев выяснено, что высоты, оцененные по фотограмметрическим облакам точек, хорошо согласовывались с высотами, измеренными лазерным сканированием LiDAR ($R^2 = 0.99$). Наиболее близкие значения высот были получены для деревьев с конусовидной формой кроны. По разновременным фотограмметрическим облакам точек также выполнена оценка прироста в высоту разных видов исследуемых деревьев в период с 2019 по 2021 гг. Наибольший прирост высоты в год был получен для *Pinus sibirica* (52 см), а наименьший – для *Pseudotsuga menziesii* (32 см). В целом результаты исследования показали, что использованные методы могут быть успешно применены для подеревного картографирования древостоев и оценки высот деревьев в условиях многовидовых насаждений арборетумов или городских парков, а также в природных лесах.

Ключевые слова: lidR, беспилотные летательные аппараты, ботанический сад, лазерное сканирование, арборетум, фенология, фотограмметрия

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и системы лазерного сканирования Light Detection and Ranging (LiDAR) успешно нашли применение для решения задач сбора научных данных в области исследований окружающей среды и биоты (Li et al., 2012; Watts et al., 2012; Peerbhay et al., 2013). Лазерное сканирование представляет собой автоматическое сферическое измерение окружающего трехмерного (3D) пространства лазером с последующей регистрацией измерений в цифровом трехмерном виде, используя миллионы точек плотного облака. Преимущество использования лазерного ска-

нирования при исследовании природных территорий заключается в его способности быстро, автоматически и с детализацией на уровне миллиметров документировать окружающее пространство. БПЛА позволяют получить данные в виде набора геопривязанных RGB (red, green, blue) фотографий, снятых с перекрытием. Фотограмметрическая обработка этих материалов, как и в случае данных LiDAR, позволяет получить для дальнейшего анализа облака точек и трехмерные модели поверхности. Кроме того, результатом фотограмметрической обработки является RGB 2D ортофотоплан, который строится на основе фотографий и моделей высот.

В области изучения динамики древостоев использование БПЛА и LiDAR позволяет быстро получить данные о структуре лесных сообществ, необходимые для анализа их состояния и динамики (Liang et al., 2016). Например, эти данные востребованы для оценки характеристик отдельных деревьев при инвентаризации и управлении природными лесами (Lisein et al., 2013; Hudak et al., 2014) и городскими парками (Tasoulas et al., 2013), а также оценки санитарного состояния древостоев (Safonova et al., 2021) и моделировании углеродного цикла (Dalponte & Coomes, 2016; Brieger et al., 2019). Методы лазерного сканирования широко применяют для оценки биомассы древостоя в лесных экосистемах (Burt, 2017). Исследования с применением трехмерных облаков точек способствуют значительному прогрессу в разработке теорий формирования архитектоники крон деревьев (Lau et al., 2019) и предоставляют исходные данные для моделирования роста отдельных деревьев и насаждений (Raumonen et al., 2013).

При этом стоит отметить, что в настоящий момент подобные исследования зачастую затрагивают только лесные участки с небольшим числом видов деревьев (Zhou et al., 2013; Birdal et al., 2017; Miller et al., 2017; Медведев и др., 2019; Bennett et al., 2020; Picos et al., 2020) и в малой степени применяются на территориях с высоким видовым разнообразием деревьев (природные многовидовые леса, городские парки, дендрарии и т.п.) (Zahawi et al., 2015; Otero et al., 2018; Портнов и др., 2021). В исследованиях, выполненных на основе данных, полученных с помощью БПЛА, показано, что присутствие деревьев нескольких видов, выраженная ярусность или неоднородности в пологе снижают качество получаемых результатов и требуют верификации наземными методами (Alonzo et al., 2018; Иванова и др., 2021). Также известно, что при реконструкции отдельных деревьев с помощью LiDAR возникают сложности из-за различной морфологии крон деревьев разных видов и возрастов и проникающих свойств LiDAR (Liu & Wu, 2020).

Кроме того, мало исследованным остается влияние сезона съемки на качество получаемых оценок. Как правило, при сборе дистанционных данных исследователи целенаправленно используют съемку в определенный период вегетации растений, что связано с особенностями алгоритмов обработки данных. В исследовании Lisein et al. (2013) для получения модели высот полога леса авторы производили съемку в момент полного облиствения, а Onishi & Ise (2021) – в момент осеннего окрашивания листьев. Рядом авторов исследовано влияние сезонности деревьев на качество оценки характеристик деревьев по мультиспектральным данным. Результаты Jackson et al. (2020) показывают, что полеты в течение весеннего сезона более эффективны (точность > 80%) для картографирования некоторых видов деревьев на основе значений коэффициента отражения и информации о сегментации изображения. Результаты других исследований (Kolarik et al., 2019) доказывают, что включение подробной многоспектральной информации об отражательной способности за пределами видимого спектра помогает в оценке характеристик деревьев независимо от сезона. Вопрос влияния сезона съемки на качество результатов, полученных по облакам точек или цифровым моделям высот, пока остается вне внимания исследователей.

Целью данной работы стала оценка качества детектирования деревьев и их высот в смешанных и хвойных насаждениях по фотограмметрическим и наземным LiDAR данным в зависимости от фенологической фазы. Достижение цели требовало решения следующих задач: 1) проведение серии полевых работ с помощью БПЛА (аэрофотосъемка) и наземного LiDAR (лазерное сканирование) во время разных фенологических фаз развития деревьев; 2) фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков и сшивка данных лазерного сканирования; 3) детектирование отдельных деревьев и их высот по трехмерным облакам точек в среде статистического программирования R; 4) оценка качества детектирования деревьев и сравнение результатов в зависимости от фенологической фазы.

Материал и методы

Для достижения поставленных задач в период 2019–2021 гг. был проведен ряд аэрофотосъемок с БПЛА на территории арборетума (смешанное насаждение с высоким разнообразием видов деревьев) Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (ПетрГУ, Республика Карелия, Россия) в периоды безлистного состояния, роста зеленой биомассы, полного облиствения и осеннего окрашивания листьев. Дополнительно к этому было выполнено наземное лазерное сканирование по станциям. Для удобства читателя далее в подразделах представлены описания района и объекта исследования и методик проведения аэрофотосъемки и наземного LiDAR.

Район исследований

Ботанический сад ПетрГУ расположен на окраине г. Петрозаводск (рис. 1). Он имеет общую площадь 3.66 км^2 и разделен на две зоны: заповедную особо охраняемую (2.85 км^2), включающую геологический памятник природы регионального значения «Урочище Чертов стул» (0.75 км^2), и коллекционную зону (0.81 км^2). На коллекционную зону приходится исследуемый арборетум площадью 0.1 км^2. На момент проведения исследования возраст большинства деревьев составлял 40–50 лет, высота – более 10 м. Структура арборетума представляет собой групповые посадки интродуцированных в новые климатические условия многочисленных видов деревьев и кустарников, расположенных по географическому принципу трех естественных ареалов (флора Дальнего Востока, флора Европы и Североамериканская флора; Лантратова и др., 2001). Такой принцип размещения коллекций в арборетумах является достаточно распространенным и в других ботанических садах России и мира (Budilovskaia & Shao, 2021).

Растения в арборетуме высажены группами по 8–15 экземпляров одного вида. Основная часть территории арборетума характеризуется высоким разнообразием: 22 семейства, 45 родов и 141 вид древесных растений, которые представлены 1516 коллекционными деревьями и кустарниками. За пределами основной части арборетума единично встречаются и другие коллекционные деревья, не учтенные в рамках настоящего исследования. В Электронном приложении приведен полный список видов основной части арборетума на основе проведенной инвентаризации. Кроме значительного видового разнообразия, неоднородность данной территории обусловлена и крутым рельефом местности с перепадом высот около 20 м, что осложняло проведение съемочных работ и дальнейшую обработку данных. Значение высот над уровнем моря по территории арборетума варьирует от 72 м н.у.м. на юге до 93 м н.у.м. по северной границе.

Район исследования расположен в северо-западной части умеренного климатического пояса. Характерны продолжительная (4–5 месяцев), но не суровая зима, поздняя весна (апрель) с частыми возвратами холодов, прохладное и короткое лето (2 месяца), высокая относительная влажность воздуха, значительное количество осадков и неустойчивые погодные условия в течение всех сезонов (Громцев и др., 2003). Температурный режим 2019–2021 гг. на территории арборетума представлен на рис. 2 по данным метеостанции Davis Vantage Pro 2 Plus, установленной в 100 м западнее арборетума. Из данных следует, что среднегодовая температура воздуха в 2019–2021 гг. составила 4.45°C, 6.14°C и 3.93°C соответственно. Данные показатели (особенно в 2019 и 2020 гг.) свидетельствуют об увеличение в этой местности среднегодовых температур на 2–3°C относительно измерений до 2000 г. (Рыбаков, Белашев, 2020). Однако следует отметить, что предыдущие измерения температур, как указано Рыбаковым, Белашевым (2020), производились в 7 км от расположения метеостанции арборетума.

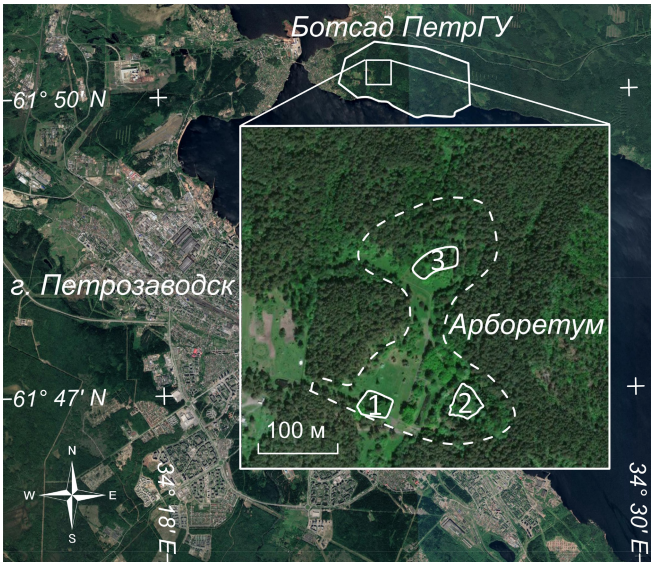

Рис. 1. Расположение арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Республика Карелия, Россия). Обозначения: 1–3 – исследованные участки.

Fig. 1. Location of the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University (Republic of Karelia, Russia). Designations: 1–3 – study sites.

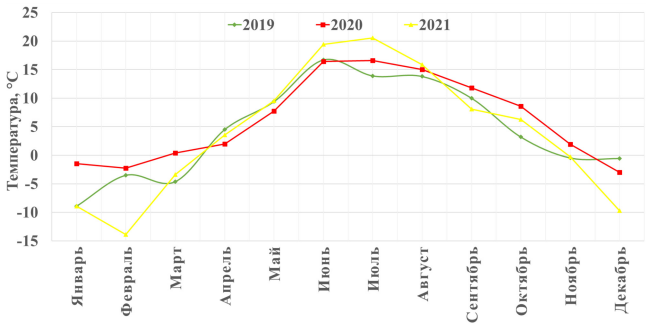

Рис. 2. Средние значения температур на территории арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Россия) в 2019–2021 г.
Fig. 2. Average temperatures in the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University (Russia) in 2019–2021.

Период со среднесуточными положительными температурами воздуха в 2019–2021 гг. составлял около восьми месяцев (230–240 дней). Переход среднесуточной температуры через 0°C (наступление весны) происходил в первых числах апреля. В 20-х числах апреля отмечалось увеличение суммы эффективных температур выше +5°C. В начале мая ожидаемо происходил рост зеленой биомассы растений, отмечалась фенологическая фаза «Начало развертывания листьев (или хвои)» (Onset of leaf flushing, BBCH 11). Здесь и далее названия фенофаз приводятся в соответствии с методическими рекомендациями Минина и др. (2020), Meier et al. (2009) и Meier (2018). Лето (устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через +10°C) наступало в начале июня и заканчивалось в конце августа. Пик прироста максимальной среднесуточной температуры приходился на середину июня – июля. За этот период растения достигали полного облиствения (фенологическая фаза «Полное облиствение» (Onset of leaf-out, BBCH 12–13)).

Климатическая осень и фенофаза «Начало осеннего окрашивания листьев» (Onset of autumn colouring of leaves, BBCH 92) начиналась в начале сентября, и к 20-м числам этого месяца уже отмечался массовый характер окрашивания листьев (Mass change in colouration of leaves, BBCH 94) у большей части видов деревьев арборетума. Однако у ряда видов в этот период уже была отмечена фенофаза «Начало листопада» (Onset of leaf abscission, BBCH 93), что вынудило производить аэрофотосъемку именно в этот период. Конец листопада (End of leaf abscission) или конец климатической осени заканчивались переходом среднесуточной температуры ниже 0°C в конце ноября (наступление зимы).

Данные результаты не противоречат выводам других авторов (Кищенко, 2014), исследовавших фенологическое развитие интродуцированной и местной флоры в условиях южной Карелии. Эти обстоятельства определили время проведения аэрофотосъемок и съемок LiDAR: во время безлистного состояния растений без покрова снега (до мая), роста зеленой биомассы (с начала мая до середины июня), полного облиствения (с середины июня до сентября) и осеннего окрашивания (сентябрь). Аэрофотосъемка и лазерное сканирование производились по всей территории арборетума. Однако для дальнейшего анализа были взяты три пробных участка, различающихся по составу и возрасту деревьев, а также площади (табл. 1), расположенных соответственно в каждом из секторов арборетума (рис. 1).

Таблица 1. Характеристики пробных площадок исследования на территории арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Россия)
Table 1. Characteristics of study sites for tree attributes investigated in the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University, Russia

Параметры	Участок 1	Участок 2	Участок 3
Расположение участка в арборетуме	Европейский сектор	Североамериканский сектор	Азиатский сектор
Площадь участка, м^2	4400	3500	2800
Средний возраст деревьев, лет	51 ± 5	43 ± 7	48 ± 4
Общее число стволов (лиственных/хвойных), шт.	58 (41/17)	53 (14/39)	45 (11/34)
Среднее расстояние между вершинами крон деревьев, м	3.5	3.7	4.2
Виды деревьев	*Picea pungens* Engelm., *Ulmus laevis* Pall., *Thuja occidentalis* L., *Betula pendula* var. *carelica* (Merckl.) Hämet-Ahti, *Pinus sylvestris* L., *Larix decidua* Mill., *Tilia cordata* Mill., *Acer platanoides* L., *Quercus robur* L.	*Abies balsamea* (L.) Mill., *Abies fraseri* (Pursh) Poir., *Betula pendula* Roth, *Thuja occidentalis* L., *Populus* × *canadensis* Moench, *Pinus strobus* L., *Pinus sibirica* Du Tour, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Abies concolor* (Gordon) Lindl. ex Hildebr., *Quercus robur* L., *Pinus sylvestris* L.	*Abies sibirica* Ledeb., *Pinus koraiensis* Siebold & Zucc., *Pinus sibirica* Du Tour, *Juglans mandshurica* Maxim., *Betula ermanii* Cham., *Tilia amurensis* Rupr, *Prunus maackii* Rupr.

Методика проведения аэрофотосъемки с БПЛА и фотограмметрическая обработка данных

В 2019–2021 гг. было проведено несколько съемок с помощью квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro V2.0. Этот БПЛА оснащен инерциальным измерительным блоком (IMU) и GPS, которые определяют положение и высоту дрона в пространстве во время полета, благодаря чему фотографии получаются с известными географическими координатами их центров (точность позиционирования GPS, как заявлено производителем, составляет от 0.1 м до 1.5 м). Также этот дрон оснащен улучшенной цифровой камерой FC6310S с широкоугольным объективом и 1-дюймовым 20-мегапиксельным CMOS-сенсором, способным улавливать красно-зелено-синюю (RGB) информацию в видимом спектре. Изображения RGB, полученные с помощью этой системы, имеют размер 5472 × 3648 пикселей, пространственное разрешение результирующего композитного изображения зависит от высоты полета дрона и перекрытия снимков.

Опыт применения БПЛА показывает, что известные и популярные решения для планирования маршрута полета на мобильные устройства Android и iOS, например, такие как приложения Pix4DCapture и DroneDeploy, имеют свою специфику, которую важно учитывать уже на стадии предполетной подготовки летательного аппарата. Эти приложения позволяют проводить полет по заранее заданному маршруту и в автоматическом режиме делать серию фотографий с необходимым для фотограмметрической обработки продольным и поперечным перекрытием. Однако в рамках данного исследования из-за помех связи пульта контроллера с БПЛА дрон управлялся пилотом вручную с помощью мобильного приложения DJI GO 4 без использования автоматического задания маршрута полета. Так как исследуемая территория имеет ориентиры на местности (групповые посадки из разных видов деревьев), а сам маршрут полета отображается на карте мобильного приложения в режиме реального времени, то оператором БПЛА была выполнена серия пролетов параллельными линиями по территории арборетума с достаточным перекрытием снимков для дальнейшей качественной реконструкции плотного облака точек. В дальнейшей фотограмметрической обработке (см. ниже) было указано высокое перекрытие снимков для всех исследуемых территорий. По визуальному анализу оно составляло от 70% до 90%.

Для периодов безлистного состояния, роста биомассы, полного облиствения и осеннего окрашивания полеты проходили при разных высотах. При этих высотах фотографии получаются с очень высоким пространственным разрешением с разбросом в пределах 1 см/пиксель в зависимости от локальных перепадов рельефа и высоты полета. Количество и специфика аэрофотосъемок были обусловлены несколькими причинами: необходимостью фотофиксации деревьев нижних ярусов и кустарников, находящихся под пологом верхнего яруса широколиственных деревьев, описания фенологической фазы деревьев и построением сезонных плотных облаков точек. Рис. 3 показывает примеры полетных RGB-фотографий. В табл. 2 приведены характеристики для всех полетов.

Фотограмметрическая обработка снимков проходила в программном обеспечении Agisoft Metashape Professional version 1.7.3 (Agisoft LLC, 2019), в котором реализована автоматизированная технология создания 2D планов и 3D моделей на основе цифровых снимков. Данная программа нашла широкое применение в России и в мире в области научных и прикладных задач, решаемых с применением БПЛА (Zhang J. et al., 2016; Алешко и др., 2017; Otero et al., 2018). С 2020 г. программа поддерживает импорт данных лазерного сканирования в фотограмметрическую обработку. Алгоритм обработки включал выравнивание снимков, построение плотного облака точек, растровой цифровой модели высот и ортофотоплана.

Таблица 2. Технические характеристики полетных планов и материалов фотограмметрической обработки, полученных на основе разносезонных аэрофотосъемок территории арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Россия)

Table 2. Characteristics of flight missions and date of the photogrammetric processing, obtained on the basis of multiseasonal aerial photography of the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University, Russia

Период полета	Дата	Высота полета, м	Число сделанных снимков, шт.	Разрешение ортофотоплана, см/пиксель	Плотность облака точек, точек/м^2
Безлистное состояние	28.04.2020	45	974	1.1	4600
Рост биомассы	22.05.2019	80	683	2.8	4300
Полное облиствение	21.06.2021	70	732	2.7	3800
Осеннее окрашивание	21.09.2021	60	894	1.2	4100

Рис. 3. Пример RGB-фотографий арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Россия) с четырех разных полетов. Обозначения: a – период безлистного состояния (высота: 45 м), b – рост биомассы (высота: 80 м), c – полное облиствение (высота: 70 м), d – осеннее окрашивание листьев (высота: 60 м).
Fig. 3. An example of RGB-photographs of the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University (Russia) from four various flights. Designations: a – period of leafless state (height: 45 m), b – leaf biomass growth (height: 80 m), c – complete foliage (height: 70 m), d – autumn leaf colouring (height: 60 m).

Всего было обработано от 122 000 (фаза роста биомассы) до 740 000 (фаза осеннего окрашивания) связующих точек со средней невязкой (ошибкой репроецирования, т.е. расстоянием между исходной проекцией точки на снимке и проекцией восстановленной трехмерной точки на этом же снимке) по всем полетам 0.52 пикселя размером 2.41 × 2.41 мкм. В результате были получены разносезонные RGB-ортофотопланы со сверхвысоким пространственным разрешением (1.1–2.8 см/пиксель) в формате GeoTiff в системе координат WGS84. Созданные ортофотопланы были экспортированы в геоинформационную систему Ботанического сада с элементами точечного картографирования растений в программном обеспечении MapInfo (Прохоров и др., 2013; Кабонен, Андрюсенко, 2018). Ортофотоплан арборетума в период осеннего окрашивания листьев доступен через репозиторий Zenodo (Kabonen, 2022), реконструированное плотное облако точек представлено на рис. 4. Текстурированные полигональные 3D-модели для всех периодов экспортированы на платформу просмотра 3D-моделей Sketchfab и доступны по ссылке (https://skfb.ly/o8SuX).

Методика наземного лазерного сканирования и первичные результаты

Для исследований растительной биоты чаще всего применяют следующие виды лазерного сканирования: 1) Воздушное лазерное сканирование (ВЛС), основанное на применение съемки с беспилотного воздушного судна (Wehr & Lohr, 1999). Излучаемые импульсы LiDAR во время ВЛС проникают ниже верхнего яруса деревьев и, таким образом, позволяют регистрировать множественные высотные сигналы и достигать земли в лесных районах, что позволяет оценивать характеристики отдельных деревьев (Nuurrä et al., 2008; Véga & St-Onge, 2009). 2) Наземное лазерное сканирование (НЛС), основанное на применении съемки с земли (Petrie & Toth, 2009; Reshetyuk, 2009; Vosselman & Maas, 2011; Liang et al., 2016). НЛС также подразделяется на: а) мобильное (перемещение сканера по территории в момент съемки); б) персональное или стационарное (съемка по станциям). Вся съемка территории арборетума производилась по станциям стационарной съемки.

Рис. 4. Плотное облако точек арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Россия) в период осеннего окрашивания листьев.
Fig. 4. Dense point cloud of the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University (Russia) obtained in the period of autumn colouration of leaves.

Съемка арборетума производилась в период полного облиствения растений, 25–26.06.2021 г. В качестве инструмента для проведения съемки использовался лазерный сканер Leica BLK360 (Швейцария) (рис. 5a). Данное оборудование обладает низкой погрешностью (менее 6 мм на каждые 10 м съемки) и небольшим размером лазерного пятна (2.25 мм). Первоначальные исследования производительности (Blaskow et al., 2018) подтверждают точность 3D-точки приблизительно 6 мм при расстоянии 10 м, как указано производителем. Сканер, в первую очередь, предназначен для измерений зданий со средними требованиями к точности на дальность до 60 м (Luhmann et al., 2019). Использование данного сканера для съемки растительности не заявлено производителем и требовало проведения специализированных испытаний. Данный лазерный сканер позволяет получать только локальные (X, Y, Z) координаты изучаемых объектов в метрических величинах без географической привязки. Однако впоследствии данная возможность появляется в программном обеспечении Cyclone REGISTER 360, если известны координаты отдельных точек. Для получения цвета облаков точек в сканер встроена RGB-камера, выполняющая панорамное фотографирование на 360° перед каждым сканированием.

Для проведения съемки сканер предварительно устанавливался на штатив. Маршрут лазерного сканирования (рис. 5b) проходил по дорожно-тропиночной сети арборетума с дополнительными заходами со станциями (от 1 до 3) в групповые посадки коллекционных растений арборетума. Расстояние между станциями составляло от 8 м до 18 м в зависимости от густоты деревьев. Процесс съемки проходил без применения марок, что было связано с трудностями при их креплении к многочисленным деревьям арборетума. Лазерное сканирование осуществлялось в режиме высокой плотности. В этом режиме процесс полного сканирования на одной станции, в том числе получения панорамных изображений и цветной текстуры, длился 6 мин, при этом общее количество станций составило 115 шт. Таким образом, для сканирования всего арборетума потребовалось около 690 мин. Во время съемки данные сначала сохранялись в сканере, а затем переносились на планшет iPad 12 Pro по сети WiFi. Также при проведении сканирования производилась предварительная сшивка данных в полевых условиях с помощью программы Cyclone FIELD (Leica Geosystems, Швейцария), установленной на планшете.

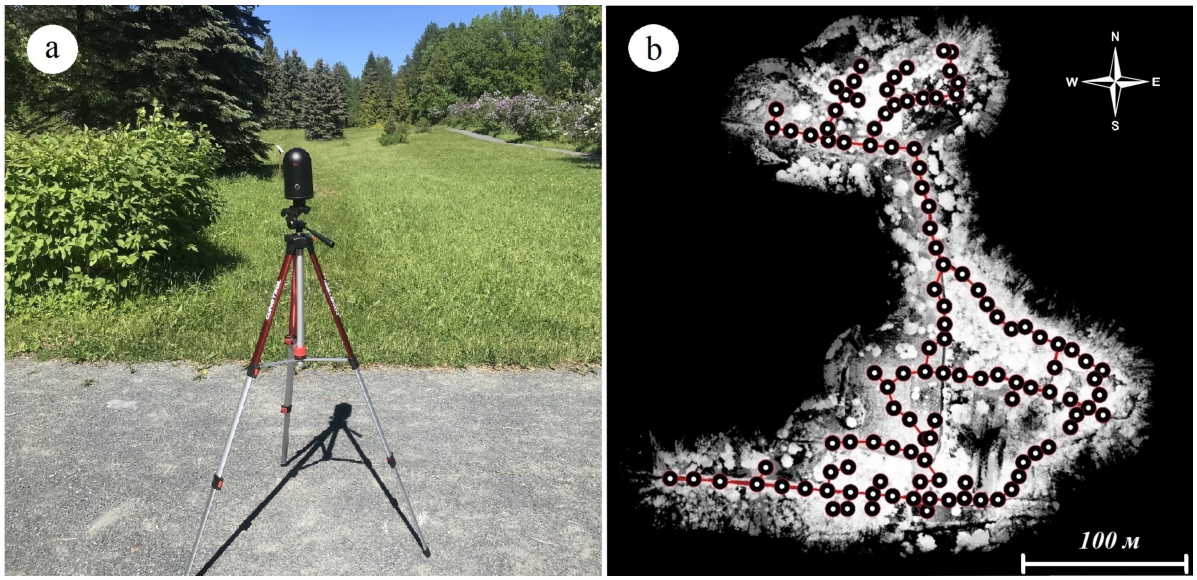

Рис. 5. Процесс стационарной съемки арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Россия). Обозначения: a – лазерный сканер Leica BLK360 на станции; b – расположение станций по арборетуму (маршрут съемки).
Fig. 5. Process of the stationary LiDAR survey of the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University, Russia. Designations: a – laser scanner Leica BLK360 at the station; b – arboretum stations location (survey route).

Дальнейшая обработка данных проводилась в программном обеспечении Cyclone REGISTER 360 (Leica Geosystems, Швейцария). Общая регистрация точек лазерного сканирования в программном обеспечении дала среднее стандартное отклонение 9 мм при общем количестве 4400 000 000 точек плотного облака. Регистрация проводилась без марок и с последующей оптимизацией. Лазерный сканер при проведении съемки деревьев показал хорошую эффективность при работе, однако активность солнечного излучения негативно влияла на получение панорамных изображений (появление бликов), а реконструированное облако точек в области верхушек крон деревьев имело шумы с белыми оттенками. Рис. 6 показывает обзор зарегистрированного облака точек разных частей арборетума.

Оценка характеристик деревьев

Оценку характеристик отдельных деревьев по фотограмметрическим облакам точек для каждого пробного участка и сезона года выполняли с помощью среды статистического программирования R version 4.1.2 (R Core Team, 2020) с использованием функций специализированного пакета lidR version 3.2.3 (Roussel et al., 2020), предназначенного для анализа трехмерных облаков точек в форматах .las и .laz. Пакет имеет полностью открытый исходный код и успешно интегрирован в R.

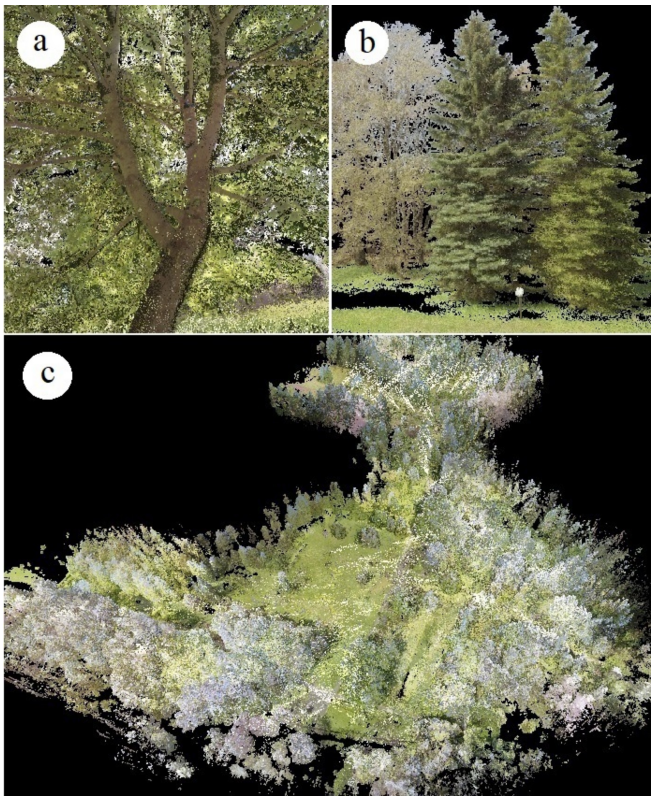

Рис. 6. Плотное облако точек лазерного сканирования арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Россия). Обозначения: a – архитектоника отдельного дерева *Acer platanoides*; b – группа деревьев из *Picea pungens*; c – общий вид арборетума.
Fig. 6. Dense point cloud of laser scanning of the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University, Russia. Designations: a – the architectonics of a separate *Acer platanoides* tree; b – the group of *Picea pungens* trees; c – general view of the arboretum.

Анализ с помощью пакета lidR предполагал выполнение нескольких последовательных этапов (рис. 7). На первом этапе для каждого пробного участка выполняли процедуру классификации множества точек на два типа: точки поверхности земли и остальные выше расположенные точки, т.е. точки всех деревьев. Точки земной поверхности выделяли по алгоритму cloth simulation filtering, реализованному в функции lasground() (Zhang W. et al., 2016). Далее выполняли нормализацию облаков точек древостоя относительно точек земной поверхности по алгоритму tin в функции lasnormalize(). Нормализация облака точек устранила влияние рельефа местности на оценки высот точек внутри облака и предоставила возможность сравнить высоты, полученные разными методами. На завершающем этапе строили цифровую модель высот древесного полога по алгоритму pitfree, реализованному в функции grid_canopy(). После этого с помощью функции tree_detection() выполняли автоматический поиск вершин деревьев по облаку точек. Затем, используя полученные координаты вершин деревьев, с помощью функции segment_trees() сегментировали кроны соответствующих деревьев. Подробное описание вычисления атрибутов деревьев с помощью пакета lidR представлено в работе Roussel et al. (2020).

Для верификации полученные результаты сравнивали с ручными измерениями по облаку точек LiDAR в программном обеспечении Cyclone 3DR (Leica Geosystems, Швейцария). Для сравнения на каждом пробном участке было определено число корректно детектированных алгоритмом деревьев (TP), число ложных срабатываний (FP) и число пропущенных деревьев (FN). Качество работы алгоритма было определено на основе общепринятых оценок (Goutte & Gaussier, 2005; Sokolova et al., 2008; Li et al., 2012). Для этого вычисляли значения полноты обнаружения p, качества обнаружения r и средневзвешенной оценки качества F по следующим формулам:

$$r = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$p = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$F = \frac{2 \times r \times p}{r + p}$$

где TP – число корректно детектированных алгоритмом деревьев, FP – число ложных срабатываний, FN – число пропущенных деревьев, p – полнота обнаружения, r – качество обнаружения, F – средневзвешенная оценка качества.

Для всех корректно детектированных деревьев сравнивали высоты, полученные в результате автоматических вычислений, с высотами, измеренными в ручном режиме по данным LiDAR. При этом следует отметить, что поскольку временной интервал между проведением съемки LiDAR и съемкой квадрокоптером составлял 1–3 года, данные LiDAR не были идеальным эталоном для оценок, полученных для 2019 и 2020 гг. Таким образом, помимо различий, обусловленных двумя разными методами сбора данных, присутствовала ошибка, связанная с ростом деревьев.

Результаты

Сравнение плотностей фотограмметрических облаков, полученных для разных фенологических фаз показало, что с увеличением зеленой биомассы увеличивается число точек, отнесенных к деревьям, и снижается число точек класса «земная поверхность» (табл. 3). При максимальной сомкнутости крон лиственных деревьев в период полного облиствения число точек земной поверхности стремится к нулю, что затрудняет процесс нормализации облаков древесного полога относительно уровня земли. Реконструированные по данным с БПЛА плотные облака для безлистного периода растений имеют точки, отнесенные к стволовой кроне деревьев. Однако их плотность на 1 м^2 имеет минимальные значения, несмотря на то, что полет БПЛА происходил при высоте непосредственно над верхушками крон деревьев (40 м) и большем количестве изображений.

Выявленные закономерности отразились на качестве детектирования деревьев в разные сезоны года (табл. 4). Выяснено, что в период безлистного состояния на всех участках детектировано наименьшее число деревьев за весь период наблюдений, о чем свидетельствуют низкие значения показателя r. Полнота обнаружения (p) также была низкой. Лишь в 25% случаев алгоритму корректно удалось обнаружить лиственные деревья. В период роста зеленой биомассы качество обнаружения деревьев возросло. Число корректно детектированных деревьев на всех трех участках составило 66% от общего числа деревьев, при этом количество ложных срабатываний снизилось в два раза относительно безлистного состояния. Наилучшие результаты получены для периодов полного облиствения и осеннего окрашивания листьев. Оценки качества детектирования для этих периодов были весьма схожими на всех трех пробных участках. Верификация полученных данных для этих периодов показала хорошее качество автоматического поиска деревьев.

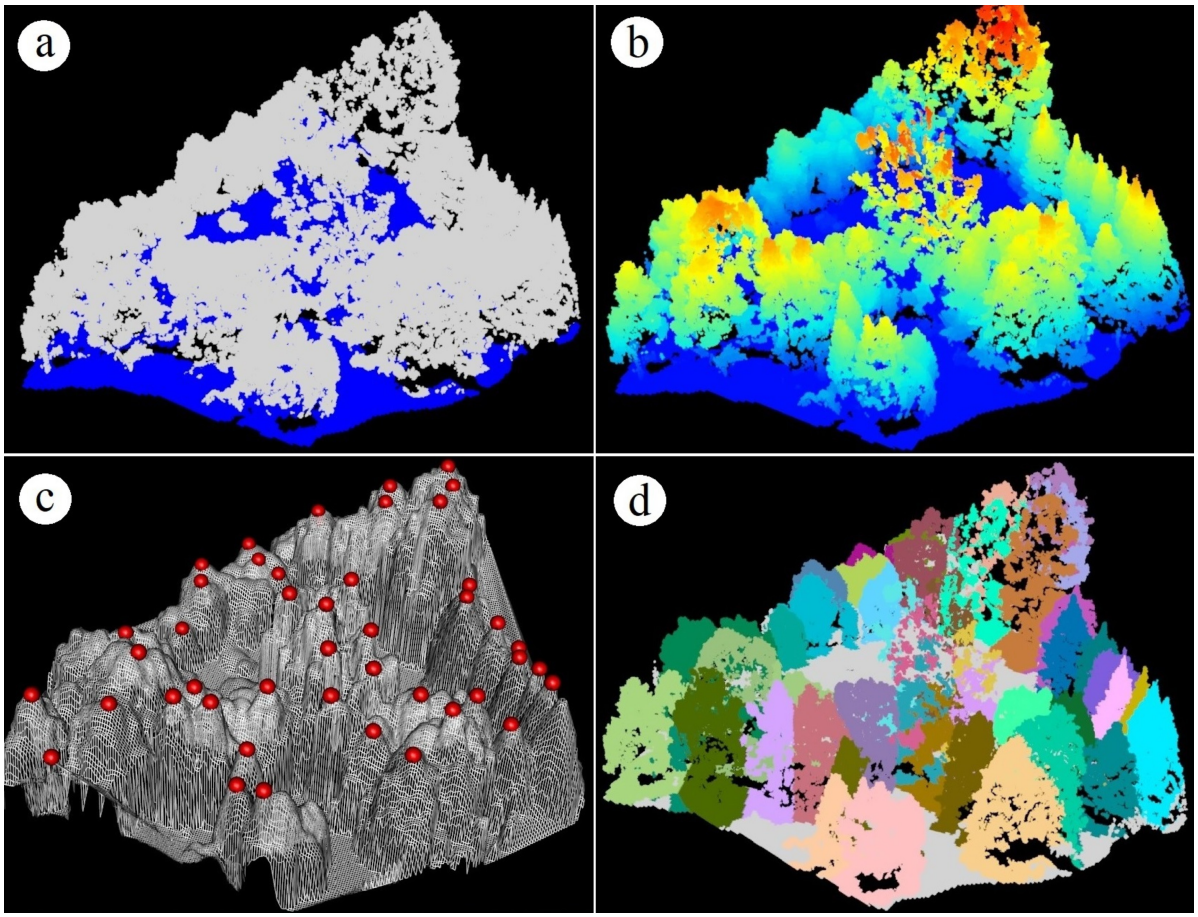

Рис. 7. Результаты этапов обработки облака точек в lidR (пример 3D-визуализации участка 2). Обозначения: a – выделение точек земной поверхности; b – нормализация облака точек; c – поиск вершин деревьев; d – выделение отдельных деревьев.
Fig. 7. Results of processing point clouds in lidR (example of 3D-visualisation for the study site 2). Designations: a – extraction of ground points; b – normalisation of the point cloud; c – treetops detection; d – segmentation of individual trees.

Таблица 3. Характеристики разносезонных фотограмметрических облаков точек, полученных на основе обработки материалов аэрофотосъемки территории арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Россия)
Table 3. Characteristics of multiseasonal photogrammetric point clouds, obtained on the basis of processing materials from aerial photography of the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University, Russia

Параметр	Участок	Безлистное состояние	Рост биомассы	Полное облиствение	Осеннее окрашивание
Число точек класса «земная поверхность», млн	1	11.1	4.8	2.8	3.1
	2	8.5	7.8	3.4	3.2
	3	9.1	7.1	3.6	3.9
Число точек класса «деревья», млн	1	2.3	7.4	9.5	9.4
	2	3.1	7.9	7.4	7.7
	3	4.4	5.1	6.8	7.4
Соотношение точек класса «земная поверхность» к классу «деревья», %	1	82.8/17.2	39.2/60.8	22.8/77.3	24.6/75.4
	2	72.5/27.5	49.3/51.7	31.6/68.4	29.3/70.7
	3	67.2/32.8	61.8/39.2	34.8/65.2	34.5/65.5

Таблица 4. Оценка качества результатов автоматического поиска вершин деревьев на территории арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Россия)
Table 4. Assessment of the automatically tree top detection quality in the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University, Russia

Фенологическая фаза	Участок 1			Участок 2			Участок 3		
	r	*p*	*F*	*r*	*p*	*F*	*r*	*p*	*F*
Безлистное состояние	0.34	0.41	0.37	0.54	0.63	0.58	0.64	0.74	0.68
Рост биомассы	0.65	0.75	0.69	0.59	0.82	0.68	0.64	0.84	0.72
Полное облиствение	0.75	0.92	0.83	0.76	0.93	0.84	0.81	0.92	0.86
Осеннее окрашивание	0.77	0.87	0.82	0.78	0.95	0.86	0.82	0.91	0.86

Примечание: *r* – качество обнаружения, *p* – полнота обнаружения, *F* – средневзвешенная оценка качества.

В результате ручного детектирования по облакам LiDAR на участке 1 учтено 58 деревьев, на участке 2 – 53 дерева, на участке 3 – 45 деревьев, а автоматическое детектирование выявило 59, 52 и 46 деревьев, соответственно, для двух периодов в среднем, что, в целом, составляет почти 100% от общего числа деревьев. При этом большинство деревьев (78.9%), найденных алгоритмом, были определены корректно. Следует отметить, что корректность поиска увеличивалась на 9.4% в случае хвойных деревьев с конусовидной формой кроны (*Abies sibirica* Ledeb., *A. balsamea* (L.) Mill., *A. fraseri* (Pursh) Poir., *Picea abies* (L.) H.Karst., *P. pungens* Engelm., *P. omorika* (Pancic) Purk., *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Larix sibirica* Ledeb.) независимо от сомкнутости крон и снижалась на 10% в случае высокой сомкнутости крон широколиственных или хвойных деревьев с шарообразными формами кроны (например, *Thuja occidentalis* L., род *Pinus*).

Из данных в табл. 4 следует, что с уменьшением количества зеленой биомассы на деревьях, увеличивалось число ложноположительных FP и ложноотрицательных срабатываний FN. В период безлистного состояния увеличение FP и FN было двукратным относительно полного облиствения. Это объясняется тем, что алгоритм воспринимал облака точек с низкой плотностью как группы из нескольких деревьев. Во всех случаях значение *r* было ниже, чем *p*, т.е. качество обнаружения деревьев превышало полноту их поиска. Эти результаты показывают, что на исследуемых участках алгоритм чаще находил ложные вершины, чем пропускал деревья, т.е. ошибка недооценки числа деревьев ниже, чем ошибка переоценки. На участках, где доминировали хвойные деревья, а участие лиственных не превышало 30% от общей массы, число неучтенных вершин было невелико. При высокой доле участия лиственных деревьев, напротив, отмечено максимальное число ложных и пропущенных вершин (рис. 8).

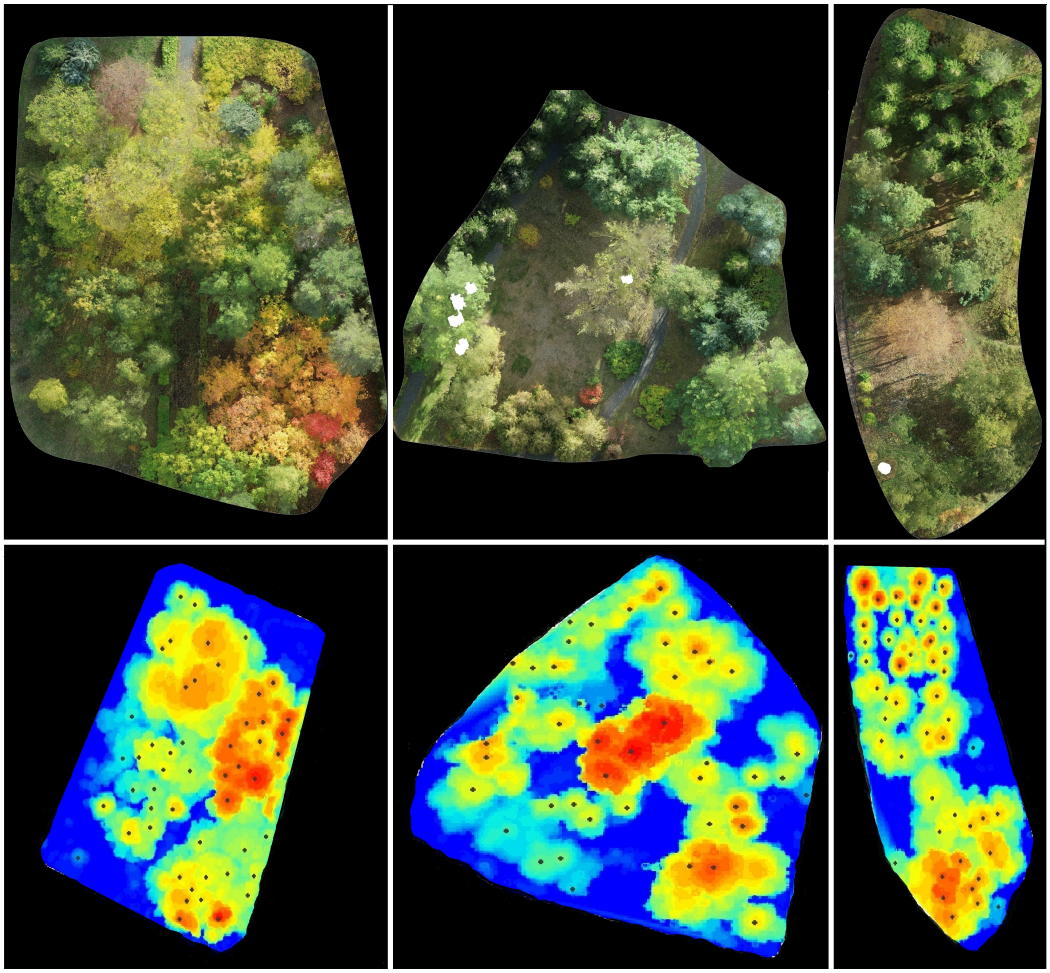

Рис. 8. Результаты поиска вершин и расчета высоты деревьев на территории арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Россия) (пример 2D-визуализации исследуемых участков). Обозначения: сверху – ортофотопланы участков; снизу – автоматически найденные вершины деревьев (обозначены точками).
Fig. 8. Results of tree detection and calculating individual tree heights in the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University, Russia (example of 2D-visualisation in all study sites). Designations: above – orthophoto mosaics; below – automatically detected tree tops (indicated by dots).

Так как значение индексов *p* и *r* для разных периодов было неоднородным, это по-разному повлияло на общую оценку качества *F*. Наиболее низкое значение *F* (0.49) было отмечено для периода безлистного состояния деревьев, что свидетельствует о низком качестве детектирования по причине наличия лиственных деревьев. Высокие значения *F* (0.84) для периодов полного облиствения и осеннего окрашивания показывают, что в целом качество детектирования деревьев было хорошим на всех исследованных участках. Значение *F* (0.69) для периода роста биомассы также можно охарактеризовать как качественное.

Результаты анализа данных наземного лазерного сканирования показали, что наличие листвы на деревьях при применении наземного LiDAR, в отличие от фотограмметрических облаков, не препятствует реконструкции архитектоники ствола дерева. Это позволяет производить расчеты диаметров стволов и объема стволовой биомассы. В то же время, период безлистного состояния растений (данные тестовой съемки в безлистный период не представлены в данной работе) позволяет реконструировать максимально возможные облака точек стволов лиственных деревьев, что позволяет вычислять характеристики стволовой архитектоники деревьев. На рис. 9 представлен результат реконструкции архитектоники крон для группы деревьев *Quercus robur* L. Цветом показано распределение высот на каждом сегменте каждого дерева. Шкала с цифрами характеризует численное значение высот. Анализ данных LiDAR показывает, что интродуцированный в климатические условия Карелии вид *Q. robur* в возрасте 75 лет имеет средние значения высоты 19.2 м. Вычисление средних высот этой группы растений с помощью данных БПЛА показало схожие показатели (18.8 м).

При сопоставлении высот деревьев выяснилось, что высоты, оцененные алгоритмом по данным с БПЛА, хорошо согласовывались с данными, измеренными по облакам LiDAR (рис. 10). Сходство оценок между высотами одних и тех же деревьев, полученных разными методами, весьма значительно (R^2 = 0.99), а значимых различий обнаружено не было. Сравнение высот представлено на рис. 10 для большинства исследуемых видов деревьев. Показаны данные измерений, выполненных для всех трех пробных площадей для периода полного облиствения.

Результаты автоматического вычисления высот успешно детектированных лиственных деревьев в момент безлистного состояния в большинстве случаев показали неоднородное занижение на 15–50% относительно данных LiDAR. Выявлено, что периоды появления и опадания листвы приводят к повышению точности оценки высоты хвойных деревьев в смешанных древостоях, что связано, вероятно, со снижением сплошной поверхности полога. В то же время для древостоев, состоящих только из хвойных деревьев, показано одинаковое качество оценки высот независимо от сезона года. При этом автоматически полученные высоты хвойных деревьев с конусовидной кроной имели наиболее близкие значения к данным LiDAR.

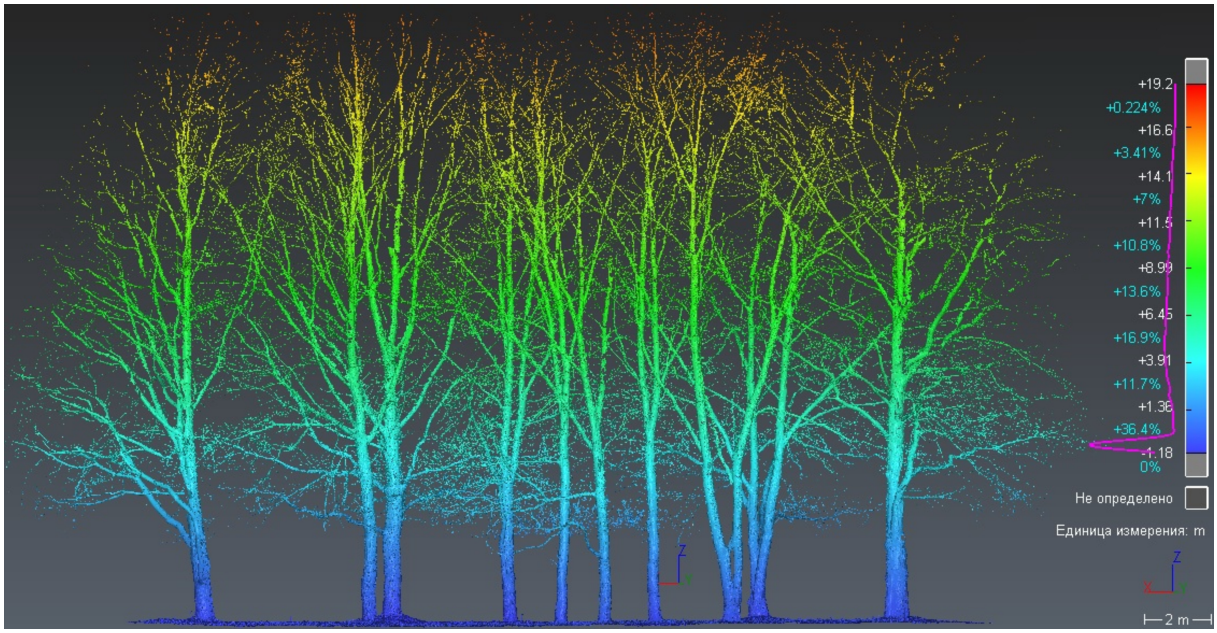

Рис. 9. 3D-визуализация архитектоники крон и изменение высот группы деревьев *Quercus robur* на основе LiDAR в период безлистного состояния.

Fig. 9. 3D-visualisation of the crown architectonics and distribution of heights in the group of *Quercus robur* trees derived from LiDAR in the leafless season.

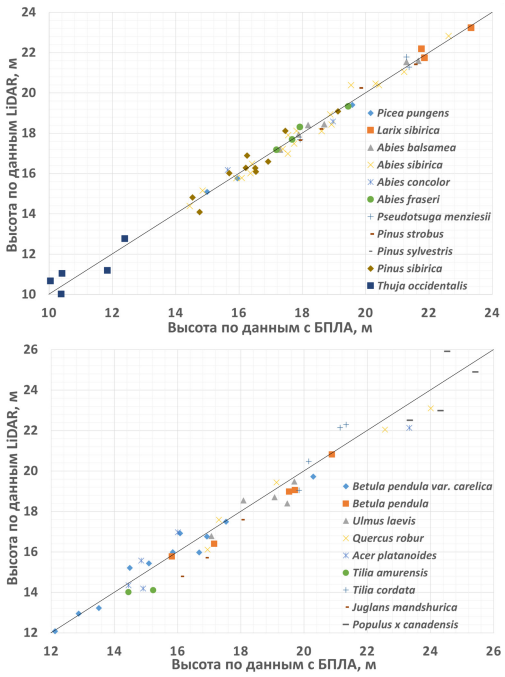

Рис. 10. Сравнение высот некоторых деревьев арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Россия), полученных на основе данных с беспилотного летательного аппарата и наземного LiDAR. Обозначения: наверху – хвойные деревья; внизу – лиственные деревья.

Fig. 10. Comparison of individual tree heights in the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University (Russia) obtained from an unmanned aerial vehicle and ground-based LiDAR data. Designations: above – coniferous trees; below – deciduous trees.

Результаты обработки данных с БПЛА позволили выявить неоднородные изменения высот у разных видов исследуемых деревьев в период с 2019 по 2021 гг. (табл. 5). Так, наибольший средний прирост по высоте в год был вычислен для *Pinus sibirica* (52 см), а у *Pseudotsuga menziesii* средний прирост составил 32 см, что является наименьшим показателем среди взятых модельных деревьев.

Обсуждение

Сравнение фотограмметрических облаков точек для разных фенологических фаз выявило, что соотношение точек, относящихся к деревьям и уровню земной поверхности, зависит от сезона проведения съемки. В безлистный период число точек, относящихся к деревьям, было минимальным, число точек земной поверхности – максимальным. По мере развития листвы, это соотношение выравнивалось, и становилось обратным (минимум точек земной поверхности, максимум точек деревьев) в фазе полного облиствения. Эти закономерности отражают количественные оценки качества автоматического детектирования деревьев в разные сезоны года. Наилучшие результаты для всех исследованных участков были получены в периоды полного облиствения и осеннего окрашивания листьев (значение оценки $F > 0.8$). Сходные результаты получены для природных лиственных лесов (из *Acer saccharum* Marshall, *A. rubrum* L., *Betula alleghaniensis* Britton, *Fagus* sp.) в провинции Нью-Брансуик, Канада (Nuijten et al., 2019). Nuijten et al. (2019) на основе анализа данных пяти разносезонных съемок (с 7 июня по 22 сентября) выяснили, что наиболее качественные результаты автоматического детектирования вершин ($p = 0.87$, $r = 0.89$) получены по данным сентябрьской съемки.

В результате проведенной работы нами выяснено, что оценка характеристик лиственных деревьев в безлистный период весьма затруднена: лишь в 25% случаев алгоритму корректно удалось обнаружить лиственные деревья (табл. 4). В то же время результаты для участков, состоящих только из хвойных деревьев, показали одинаковое качество распознавания на уровне отдельных деревьев, независимо от сезона года. Эти результаты свидетельствуют, что при исследовании лиственных древостоев число точек земной поверхности, недостаточное для алгоритмов обработки данных, может стать существенным препятствием для дальнейшего детектирования деревьев и оценки их характеристик. Известно, что эффективность алгоритмов снижается и при анализе насаждений с высокой сомкнутостью крон (Низаметдинов и др., 2021), т.к. при высоком проективном покрытии крон деревьев не просматриваются их комли и земная поверхность, что затрудняет извлечение трехмерных точек выше уровня земли (Lisein et al., 2013).

Таблица 5. Высоты некоторых исследуемых видов деревьев арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Россия) в период 2019–2021 гг. по данным, полученным с помощью беспилотного летательного аппарата

Table 5. Individual tree heights in the arboretum of the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University (Russia) during 2019–2021, according to data from an unmanned aerial vehicle

Вид дерева	№ дерева в базе данных Ботанического сада	Высота в 2019 г., м	Высота в 2020 г., м	Высота в 2021 г., м	Разница высот в 2019 и 2021 гг., м
Abies concolor	261 (830)	14.9	15.3	15.6	0.8
Abies fraseri	277 (836)	19.1	19.4	19.8	0.7
Pseudotsuga menziesii	247 (828)	17.3	16.4	17.9	0.6
Picea pungens	103 (806)	15.4	15.9	16.2	0.9
Pinus sibirica	519	15.5	16.1	16.5	1.1

Для решения этой проблемы исследователи используют облака точек земной поверхности, полученные в безлистный период, которые объединяют с облаками, полученными в период вегетации (Медведев и др., 2019). Тем не менее, применимость такого подхода, по всей видимости, зависит от поставленных задач и требует дополнительных исследований. По собственным неопубликованным данным, собранным в старовозрастных полидоминантных лесах заповедника «Калужские засеки» и в Приокско-Террасном биосферном заповеднике, замечено, что размах высот на моделях безлистного периода отличается от такового в вегетационный период. Выявленные особенности накладывают ряд ограничений на проведение работ в климатических условиях северных территорий из-за слишком короткого периода нахождения растений в состоянии полного облиствения (около 2.5 месяцев) или осеннего окрашивания (менее месяца), особенно с учетом того, что эти периоды характеризуются сильными ветрами и большим количеством осадков (Громцев и др., 2003).

Результаты работы также показали, что высоты, измеренные алгоритмом по фотограмметрическим данным, хорошо согласовывались с измеренными по облакам лазерного сканирования LiDAR. Эти результаты подтверждают уже опубликованные данные, полученные на других объектах (Birdal et al., 2017; Panagiotidis et al., 2017; Bennett et al., 2020). Стоит отметить, что существующие алгоритмы оценки высоты отдельных деревьев построены на анализе трехмерных облаков точек (Zhang J. et al., 2016; Kolarik et al., 2020; Roussel et al., 2020). При этом 3D-реконструкция отдельных деревьев представляет собой сложную задачу из-за различной морфологии архитектоники кроны, несовершенных фотограмметрических алгоритмов или проникающих свойств LiDAR на поверхность кроны деревьев (Liu & Wu, 2020). Взрослые лиственные деревья являются более сложным объектом для таких оценок по сравнению с хвойными. Предположительно, этим объясняется несколько большая разница в оценках двумя методами высот лиственных деревьев по сравнению с хвойными.

На основе полученных результатов также оценены приросты деревьев в высоту за время проведения исследования (три года). Показано, что для хвойных они составляют от 32 см до 52 см. В силу сезонности съемки для лиственных деревьев подобных оценок получить не удалось. Полученные значения в целом соответствуют существующим представлениям о динамике роста хвойных деревьев, поэтому весьма вероятно, что результаты не являются артефактами обработки данных. Кроме того, из литературы известно об успешном использовании данного подхода при исследовании других объектов. Так, Dempewolf et al. (2017) исследовали рост деревьев по данным разносезонной аэрофотосъемки в смешанных (из *Picea abies*, *Abies alba* Mill., *Pinus sylvestris*, *Betula pendula*, *Fagus sylvatica* L.) умеренных лесах Германии. Полученные ими результаты показали, что по моделям высот можно с уверенностью оценить приросты деревьев в высоту. В работе Lin et al. (2012) оценка приростов деревьев в высоту на основе данных лазерного сканирования выполнена в широколиственных лесах (из *Acer platanoides*) юга Финляндии. Было показано, что минимальный временной интервал для получения корректных оценок приростов на основе воздушного лазерного сканирования составляет два года, в то время как для наземного лазерного сканирования – один месяц. В то же время, полученные нами результаты сложно проверить при помощи наземных измерений, поскольку точные наземные оценки высот часто затруднительны в силу особенностей архитектуры крон деревьев (особенно лиственных, как упомянуто выше) (Alonzo et al., 2018; Bennett et al., 2020; Иванова и др., 2021). Как следствие, погрешность наземных измерений высот может превышать величину прироста и достигать до 1 м и более (Larjavaara & Muller-Landau, 2013).

Заключение

Данная работа является одной из первых в нашей стране по применению методов наземного лазерного сканирования для изучения структуры древостоев. На примере арборетума Ботанического сада ПетрГУ показана применимость наземного стационарного LiDAR и обработки данных аэрофотосъемки для оценки характеристик деревьев в искусственных многовидовых насаждениях. Установлено, что такие методы могут быть успешно использованы для подеревного картографирования насаждений и оценки высот отдельных деревьев. Метод обработки данных с БПЛА позволяет корректно детектировать в автоматическом режиме 78% деревьев в смешанных насаждениях в периоды полного облиствения и осеннего окрашивания. Уменьшение количества зеленой биомассы на деревьях приводит к увеличению ложноположительных и ложноотрица-

тельных срабатываний. Вне зависимости от сомкнутости крон качество детектирования вершин выше в случае хвойных деревьев с конусовидной формой кроны и ниже – в случае широколиственных деревьев или хвойных с шарообразной кроной. Для получения надежных оценок приростов деревьев в высоту по фотограмметрическим облакам точек и облакам LiDAR требуются дополнительные исследования.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия в рамках Программы поддержки прикладных научных исследований и разработок студентов и аспирантов ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (Договор №4-Г21 от 27.12.2021 г.). Работа Н.В. Ивановой по представлению результатов выполнена в рамках темы государственного задания ИМПБ РАН – филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Дополнительная информация

Перечень древесных видов арборетума Ботанического сада ПетрГУ (Электронное приложение. Список видов древесных растений в коллекции арборетума Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Республика Карелия, Россия)) может быть найден в **Электронном приложении**.

Литература

Алешко Р.А., Алексеева А.А., Шошина К.В., Богданов А.П., Гурьев А.Т. 2017. Разработка методики актуализации информации о лесном участке с использованием снимков со спутников и малых БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14(5). С. 87–99. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99

Громцев А.Н., Китаев С.П., Крутов В.И., Кузнецов О.Л., Линдхольм Т., Яковлев Е.Б. (ред.). 2003. Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 262 с.

Иванова Н.В., Шашков М.П., Шанин В.Н. 2021. Определение характеристик смешанных древостоев по данным аэрофотосъёмки с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) // Вестник Томского государственного университета. Биология. Т. 54. С. 158–175. DOI: 10.17223/19988591/54/8

Кабонен А.В., Андрюсенко В.В. 2018. Веб-геоинформационная система Ботанического сада Петрозаводского государственного университета // Hortus Botanicus. Т. 13. С. 356–360. DOI: 10.15393/j4.art.2018.5382

Кищенко И.Т. 2014. Рост и развитие интродуцированных лиственных видов деревьев в условиях Карелии. Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет. 161 с.

Лантратова А.С., Марковская Е.Ф., Обухова Е.Л., Платонова Е.А., Прохоров А.А. 2001. 50-летняя история Ботанического сада Петрозаводского университета // Hortus Botanicus. Т. 1. С. 9–18.

Медведев А.А., Тельнова Н.О., Кудиков А.В. 2019. Дистанционный высокодетальный мониторинг динамики зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель лесной растительностью // Вопросы лесной науки. Т. 2(3). DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-12

Минин А.А., Ананин А.А., Буйволов Ю.А., Ларин Е.Г., Лебедев П.А., Поликарпова Н.В., Прокошева И.В., Руденко М.И., Сапельникова И.И., Федотова В.Г., Шуйская Е.А., Яковлева М.В., Янцер О.В. 2020. Рекомендации по унификации фенологических наблюдений в России // Nature Conservation Research. Заповедная наука. Т. 5(4). С. 89–110. DOI: 10.24189/ncr.2020.060

Низаметдинов Н.Ф., Моисеев П.А., Воробьев И.Б. 2021. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев Хибин // Известия вузов. Лесной журнал. №4. С. 9–22. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22

Портнов А.М., Быховец С.С., Дин Е.С., Иванова Н.В., Фролов П.В., Шанин В.Н., Шашков М.П. 2021. Количественная оценка размеров окон в пологе старовозрастного широколиственного леса наземными и дистанционными методами // Математическое моделирование в экологии». Пущино: ФИЦ ПНЦБИ РАН. С. 99–102.

Прохоров А.А., Платонова Е.А., Шредерс М.А., Тарасенко В.В., Андрюсенко В.В., Куликова В.В. 2013. Компоненты информационного пространства ботанического сада. Геоинформационная система Ботанического сада ПетрГУ // Hortus Botanicus. Т. 8. С. 66–74.

Рыбаков Д.С., Белашев Б.З. 2020. Погодно-климатические условия, загрязнение атмосферного воздуха, вызовы скорой медицинской помощи и смертность населения в Петрозаводске // Экология человека. Т. 27(5). С. 21–30. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-5-21-30

Agisoft LLC. 2019. Agisoft Metashape (Version 1.5). Software. Available from https://www.agisoft.com/

Alonzo M., Andersen H.E., Morton D.C., Cook B.D. 2018. Quantifying Boreal Forest Structure and Composition Using UAV Structure from Motion // Forests. Vol. 9(3). Article: 119. DOI: 10.3390/f9030119

Bennett G., Hardy A., Bunting P., Morgan P., Fricker A. 2020. A Transferable and Effective Method for Monitoring Continuous Cover Forestry at the Individual Tree Level Using UAVs // Remote Sensing. Vol. 12(13). Article: 2115. DOI: 10.3390/rs12132115

Birdal A.C., Avdan U., Türk T. 2017. Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle // Geomatics, Natural Hazards and Risk. Vol. 8(2). P. 1144–1156. DOI: 10.1080/19475705.2017.1300608

Blaskow R., Lindstaedt M., Schneider D., Kersten T. 2018. Untersuchungen zum Genauigkeitspotential des terrestrischen Laserscanners Leica BLK360 // Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018 / T. Luhmann,

C. Schumacher (Eds.). Berlin/Offenbach: VDE Verlag GmbH. P. 284–296.

Brieger F., Herzschuh U., Pestryakova L.A., Bookhagen B., Zakharov E.S., Kruse S. 2019. Advances in the derivation of northeast siberian forest metrics using high-resolution UAV-based photogrammetric point clouds // Remote Sensing. Vol. 11(12). Article: 1447. DOI: 10.3390/rs11121447

Budilovskaia A., Shao Y. 2021. Study on Russian Botanical Garden construction characteristics – on the example of Russia Northern-West botanical gardens // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 787. Article: 012073. DOI: 10.1088/1755-1315/787/1/012073

Burt A.P. 2017. New 3D-measurements of forest structure. PhD Thesis. London: University College. 288 p.

Dalponte M., Coomes D.A. 2016. Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data // Methods in Ecology and Evolution. Vol. 7(10). P. 1236–1245. DOI: 10.1111/2041-210X.12575

Dempewolf J., Nagol J., Hein S., Thiel C., Zimmermann R. 2017. Measurement of within-season tree height growth in a mixed forest stand using UAV imagery // Forests. Vol. 8. Article: 231. DOI: 10.3390/f8070231

Goutte C., Gaussier E. 2005. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation // Advances in Information Retrieval. ECIR 2005. Lecture Notes in Computer Science / D.E. Losada, J.M. Fernández-Luna (Eds.). Vol. 3408. Berlin; Heidelberg: Springer. P. 345–359. DOI: 10.1007/978-3-540-31865-1_25

Hudak A.T., Haren A.T., Crookston N.L., Liebermann R.J., Ohmann J.L. 2014. Imputing forest structure attributes from stand inventory and remotely sensed data in western Oregon, USA // Forest Science. Vol. 60(2). P. 253–269. DOI: 10.5849/forsci.12-101

Hyyppä J., Hyyppä H., Leckie D., Gougeon F., Yu X., Maltamo M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests // International Journal of Remote Sensing. Vol. 29(5). P. 1339–1366. DOI: 10.1080/01431160701736489

Jackson M., Portillo-Quintero C., Cox R., Ritchie G., Johnson M., Humagain K., Subedi M.R. 2020. Season, classifier, and spatial resolution impact honey mesquite and yellow bluestem detection using an Unmanned Aerial System // Rangeland Ecology and Management. Vol. 73(5). P. 658–672. DOI: 10.1016/j.rama.2020.06.010

Kabonen A.V. 2022. Orthophoto mosaics of the Arboretum of Botanical Garden of Petrozavodsk State University // Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.6370597

Kolarik N., Ellis G., Gaughan A., Stevens R.F. 2019. Describing seasonal differences in tree crown delineation using multispectral UAS data and structure from motion // Remote Sensing Letters. Vol. 10(9). P. 864–873. DOI: 10.1080/2150704X.2019.1629708

Kolarik N.E., Gaughan A.E., Stevens F.R., Pricope N.G., Woodward K., Cassidy L., Salerno J., Hartter J. 2020. A multi-plot assessment of vegetation structure using a micro-unmanned aerial system (UAS) in a semi-arid savanna environment // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 164. P. 84–96. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.04.011

Larjavaara M., Muller-Landau H.C. 2013. Measuring tree height: A quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest // Methods in Ecology and Evolution. Vol. 4(9). P. 793–801. DOI: 10.1111/2041-210X.12071

Lau A., Martius C., Bartholomeus H., Shenkin A., Jackson T., Malhi Ya., Herold M., Bentley L.P. 2019. Estimating architecture-based metabolic scaling exponents of tropical trees using terrestrial LiDAR and 3D modelling // Forest Ecology and Management. Vol. 439. P. 132–145. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.02.019

Li W., Guo Q., Jakubowski M.K., Kelly M. 2012. A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 78(1). P. 75–84. DOI: 10.14358/PERS.78.1.75

Liang X., Kankare V., Hyyppä J., Wang Y., Kukko A., Haggrén H., Yu X., Kaartinen H., Jaakkola A., Guan F., Holopainen M., Vastaranta M. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 115. P. 63–77. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006

Lin Y., Hyyppä J., Kukko A., Jaakkola A., Kaartinen H. 2012. Tree height growth measurement with single-scan airborne, static terrestrial and mobile laser scanning // Sensors. Vol. 12(9). P. 12798–12813. DOI: 10.3390/s120912798

Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P. 2013. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small Unmanned Aerial System imagery // Forests. Vol. 4. P. 922–944. DOI: 10.3390/f4040922

Liu H., Wu C. 2020. Developing a scene-based triangulated irregular network (TIN) technique for individual tree crown reconstruction with LiDAR data // Forests. Vol. 11. Article: 28. DOI: 10.3390/f11010028

Luhmann T., Chizhova M., Gorkovchuk D., Hastedt H., Chachava N., Lekveishvili N. 2019. Combination of terrestrial laserscanning, UAV and close-range photogrammetry for 3D reconstruction of complex churches in Georgia // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 42-2/W11. P. 753–761. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-753-2019

Meier U. (Ed.). 2018. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants: BBCH Monograph. Quedlinburg: Open Agrar Repositorium. 204 p.

Meier U., Bleiholder H., Buhr L., Feller C., Hack H., Heß M., Lancashire P.D., Schnock U., Stauß R., van den Boom T., Weber E., Zwerger P. 2009. The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants – history and publications // Journal für Kulturpflanzen. Vol. 61(2). P. 41–52. DOI: 10.5073/JfK.2009.02.01

Miller E., Dandois J.P., Detto M., Hall J.S. 2017. Drones as a tool for monoculture plantation assessment in the steepland tropics // Forests. Vol. 8(5). Article: 168. DOI: 10.3390/f8050168

Nuijten R.J.G., Coops N.C., Goodbody T.R.H., Pelletier G. 2019. Examining the Multi-Seasonal Consistency of Individual Tree Segmentation on Deciduous Stands Using Digital Aerial Photogrammetry (DAP) and Unmanned

Aerial Systems (UAS) // Remote Sensing. Vol. 11(7). Article: 739. DOI: 10.3390/rs11070739

Onishi M., Ise T. 2021. Explainable identification and mapping of trees using UAV RGB image and deep learning // Scientific Reports. Vol. 11(1). Article: 903. DOI: 10.1038/s41598-020-79653-9

Otero V., Van De Kerchove R., Satyanarayana B., Martínez-Espinosa C., Fisol M.A.B., Ibrahim M.R.B., Sulong I., Mohd-Lokman H., Lucas R., Dahdouh-Guebas F. 2018. Managing mangrove forests from the sky: forest inventory using field data and unmanned aerial vehicle (UAV) imagery in the Matang Mangrove Forest Reserve, peninsular Malaysia // Forest Ecology and Management. Vol. 411. P. 35–45. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.12.049

Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Surový P., Chiteculo V. 2017. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery // International Journal of Remote Sensing. Vol. 38(8–10). P. 2392–2410. DOI: 10.1080/01431161.2016.1264028

Peerbhay K.Y., Mutanga O., Ismail R. 2013. Commercial tree species discrimination using airborne AISA Eagle hyperspectral imagery and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) in KwaZulu–Natal, South Africa // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 79. P. 19–28. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.01.013

Petrie G., Toth C.K. 2009. Terrestrial laser scanners // Topographic laser ranging and scanning: principles and processing / J. Shan, C.K. Toth (Eds.). Boca Raton: CRS Press. P. 87–128.

Picos J., Bastos G., Míguez D., Alonso L., Armesto J. 2020. Individual Tree Detection in a Eucalyptus Plantation Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-LiDAR // Remote Sensing. Vol. 12(5). Article: 885. DOI: 10.3390/rs12050885

R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Available from https://www.R-project.org/

Raumonen P., Kaasalainen M., Åkerblom M., Kaasalainen S., Kaartinen H., Vastaranta M., Holopainen M., Disney M., Lewis P. 2013. Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data // Remote Sensing. Vol. 5(2). P. 491–520. DOI: 10.3390/rs5020491

Reshetyuk Y. 2009. *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*. Doctoral thesis. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology. 174 p.

Roussel J., Auty D., Coops N.C., Tompalski P., Goodbody T.R., Meador A.S., Bourdon J., de Boissieu F., Achim A. 2020. lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data // Remote Sensing of Environment. Vol. 251. Article: 112061. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112061

Safonova A., Hamad Y., Dmitriev E., Georgiev G., Trenkin V., Georgieva M., Dimitrov S., Iliev M. 2021. Individual tree crown delineation for the species classification and assessment of vital status of forest stands from UAV images // Drones. Vol. 5(3). Article: 77. DOI: 10.3390/drones5030077

Sokolova M., Japkowicz N., Szpakowicz S. 2008. Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation // Advances in Artificial Intelligence. AI 2006. Lecture Notes in Computer Science / A. Sattar, Bh. Kang (Eds.). Vol. 4304. Berlin; Heidelberg: Springer. P. 1015–1021. DOI: 10.1007/11941439_114

Tasoulas E., Varras G., Tsirogiannis I., Myriounis C. 2013. Development of a GIS application for urban forestry management planning // Procedia Technology. Vol. 8. P. 70–80. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.11.011

Véga C., St-Onge B. 2009. Mapping site index and age by linking a time series of canopy height models with growth curves // Forest Ecology and Management. Vol. 257(3). P. 951–959. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.10.029

Vosselman G., Maas H.G. (Eds.) 2011. Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Dunbeath: Whittles Publishing. 336 p.

Watts A.C., Ambrosia V.G., Hinkley E.A. 2012. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use // Remote Sensing. Vol. 4(6). P. 1671–1692. DOI: 10.3390/rs4061671

Wehr A., Lohr U. 1999. Airborne laser scanning–an introduction and overview // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 54(2–3). P. 68–82. DOI: 10.1016/S0924-2716(99)00011-8

Zahawi R.A., Dandois J.P., Holl K.D., Nadwodny D., Reid J.L., Ellis E.C. 2015. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery // Biological Conservation. Vol. 186. P. 287–295. DOI: 10.1016/j.biocon.2015.03.031

Zhang J., Hu J., Lian J., Fan Z., Ouyang X., Ye W. 2016. Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring // Biological Conservation. Vol. 198. P. 60–69. DOI: 10.1016/j.biocon.2016.03.027

Zhang W., Qi J., Wan P., Wang H., Xie D., Wang X., Yan G. 2016. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation // Remote Sensing. Vol. 8(6). Article: 501. DOI: 10.3390/rs8060501

Zhou J., Proisy C., Descombes X., Le Maire G., Nouvellon Y., Stape J.L., Viennois G., Zerubia J., Couteron P. 2013. Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images // Forest Ecology and Management. Vol. 301. P. 129–141. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.10.007

References

Agisoft LLC. 2019. *Agisoft Metashape (Version 1.5). Software.* Available from https://www.agisoft.com/

Aleshko R.A., Alekseeva A.A., Shoshina K.V., Bogdanov A.P., Guriev A.T. 2017. Development of the methodology to update the information on a forest area using satellite imagery and small UAVs. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* 14(5): 87–99. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99 [In Russian]

Alonzo M., Andersen H.E., Morton D.C., Cook B.D. 2018. Quantifying Boreal Forest Structure and Composition Using UAV Structure from Motion. *Forests* 9(3): 119. DOI: 10.3390/f9030119

Bennett G., Hardy A., Bunting P., Morgan P., Fricker A. 2020. A Transferable and Effective Method for Monitoring Continuous Cover Forestry at the Individual Tree Level Using UAVs. *Remote Sensing* 12(13): 2115. DOI: 10.3390/rs12132115

Birdal A.C., Avdan U., Türk T. 2017. Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 8(2): 1144–1156. DOI: 10.1080/19475705.2017.1300608

Blaskow R., Lindstaedt M., Schneider D., Kersten T. 2018. Untersuchungen zum Genauigkeitspotential des terrestrischen Laserscanners Leica BLK360. In: T. Luhmann, C. Schumacher (Eds.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018.* Berlin/Offenbach: VDE Verlag GmbH. P. 284–296.

Brieger F., Herzschuh U., Pestryakova L.A., Bookhagen B., Zakharov E.S., Kruse S. 2019. Advances in the derivation of northeast siberian forest metrics using high-resolution UAV-based photogrammetric point clouds. *Remote Sensing* 11(12): 1447. DOI: 10.3390/rs11121447

Budilovskaia A., Shao Y. 2021. Study on Russian Botanical Garden construction characteristics – on the example of Russia Northern-West botanical gardens. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 787: 012073. DOI: 10.1088/1755-1315/787/1/012073

Burt A.P. 2017. *New 3D-measurements of forest structure.* PhD Thesis. London: University College. 288 p.

Dalponte M., Coomes D.A. 2016. Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in Ecology and Evolution* 7(10): 1236–1245. DOI: 10.1111/2041-210X.12575

Dempewolf J., Nagol J., Hein S., Thiel C., Zimmermann R. 2017. Measurement of within-season tree height growth in a mixed forest stand using UAV imagery. *Forests* 8: 231. DOI: 10.3390/f8070231

Goutte C., Gaussier E. 2005. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation. In: D.E. Losada, J.M. Fernández-Luna (Eds.): *Advances in Information Retrieval. ECIR 2005. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 3408. Berlin; Heidelberg: Springer. P. 345–359. DOI: 10.1007/978-3-540-31865-1_25

Gromtsev A.N., Kitaev C.P., Krutov V.I., Kuznetsov O.L., Lindkholm T., Yakovlev Ye.B. (Eds.). 2003. *Biota diversity of Karelia: formation conditions, communities, species.* Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of RAS. 262 p. [In Russian]

Hudak A.T., Haren A.T., Crookston N.L., Liebermann R.J., Ohmann J.L. 2014. Imputing forest structure attributes from stand inventory and remotely sensed data in western Oregon, USA. *Forest Science* 60(2): 253–269. DOI: 10.5849/forsci.12-101

Hyyppä J., Hyyppä H., Leckie D., Gougeon F., Yu X., Maltamo M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29(5): 1339–1366. DOI: 10.1080/01431160701736489

Ivanova N.V., Shashkov M.P., Shanin V.N. 2021. Obtaining tree stand attributes from unmanned aerial vehicle (UAV) data: the case of mixed forests. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Biologiya* 54: 158–175. DOI: 10.17223/19988591/54/8 [In Russian]

Jackson M., Portillo-Quintero C., Cox R., Ritchie G., Johnson M., Humagain K., Subedi M.R. 2020. Season, classifier, and spatial resolution impact honey mesquite and yellow bluestem detection using an Unmanned Aerial System. *Rangeland Ecology and Management* 73(5): 658–672. DOI: 10.1016/j.rama.2020.06.010

Kabonen A.V., Andryusenko V.V. 2018. Web-Geoinformation System of the Botanic Garden of the Petrozavodsk State University. *Hortus Botanicus* 13: 356–360. DOI: 10.15393/j4.art.2018.5382 [In Russian]

Kabonen A.V. 2022. Orthophoto mosaics of the Arboretum of Botanical Garden of Petrozavodsk State University. *Zenodo*. DOI: 10.5281/zenodo.6370597

Kishchenko I.T. 2014. *Growth and development of introduced deciduous tree species under conditions of the Karelia*. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University. 161 p. [In Russian]

Kolarik N., Ellis G., Gaughan A., Stevens R.F. 2019. Describing seasonal differences in tree crown delineation using multispectral UAS data and structure from motion. *Remote Sensing Letters* 10(9): 864–873. DOI: 10.1080/2150704X.2019.1629708

Kolarik N.E., Gaughan A.E., Stevens F.R., Pricope N.G., Woodward K., Cassidy L., Salerno J., Hartter J. 2020. A multi-plot assessment of vegetation structure using a micro-unmanned aerial system (UAS) in a semi-arid savanna environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 164: 84–96. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.04.011

Lantratova A.S., Markovskaya E.F., Obuhova E.L., Platonova E.A., Prokhorov A.A. 2001. 50-year history of the Botanical Garden of Petrozavodsk University Botanic Garden. *Hortus Botanicus* 1: 9–18. [In Russian]

Larjavaara M., Muller-Landau H.C. 2013. Measuring tree height: A quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. *Methods in Ecology and Evolution* 4(9): 793–801. DOI: 10.1111/2041-210X.12071

Lau A., Martius C., Bartholomeus H., Shenkin A., Jackson T., Malhi Ya., Herold M., Bentley L.P. 2019. Estimating architecture-based metabolic scaling exponents of tropical trees using terrestrial LiDAR and 3D modelling. *Forest Ecology and Management* 439: 132–145. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.02.019

Li W., Guo Q., Jakubowski M.K., Kelly M. 2012. A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 78(1): 75–84. DOI: 10.14358/PERS.78.1.75

Liang X., Kankare V., Hyyppä J., Wang Y., Kukko A., Haggrén H., Yu X., Kaartinen H., Jaakkola A., Guan F., Holopainen M., Vastaranta M. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115: 63–77. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006

Lin Y., Hyyppä J., Kukko A., Jaakkola A., Kaartinen H. 2012. Tree height growth measurement with single-scan airborne, static terrestrial and mobile laser scanning. *Sensors* 12(9): 12798–12813. DOI: 10.3390/s120912798

Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P. 2013. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small Unmanned Aerial System imagery. *Forests* 4: 922–944. DOI: 10.3390/f4040922

Liu H., Wu C. 2020. Developing a scene-based triangulated irregular network (TIN) technique for individual tree

crown reconstruction with LiDAR data. *Forests* 11: 28. DOI: 10.3390/f11010028

Luhmann T., Chizhova M., Gorkovchuk D., Hastedt H., Chachava N., Lekveishvili N. 2019. Combination of terrestrial laserscanning, UAV and close-range photogrammetry for 3D reconstruction of complex churches in Georgia. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 42-2/W11: 753–761. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-753-2019

Medvedev A.A., Telnova N.O., Kudikov A.V. 2019. Highly detailed remote sensing monitoring of tree overgrowth on abandoned agricultural lands. *Forest Science Issues* 2(3). DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-12 [In Russian]

Meier U. (Ed.). 2018. *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants: BBCH Monograph.* Quedlinburg: Open Agrar Repositorium. 204 p.

Meier U., Bleiholder H., Buhr L., Feller C., Hack H., Heß M., Lancashire P.D., Schnock U., Stauß R., van den Boom T., Weber E., Zwerger P. 2009. The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants – history and publications. *Journal für Kulturpflanzen* 61(2): 41–52. DOI: 10.5073/JfK.2009.02.01

Miller E., Dandois J.P., Detto M., Hall J.S. 2017. Drones as a tool for monoculture plantation assessment in the steepland tropics. *Forests* 8(5): 168. DOI: 10.3390/f8050168

Minin A.A., Ananin A.A., Buyvolov Yu.A., Larin E.G., Lebedev P.A., Polikarpova N.V., Prokosheva I.V., Rudenko M.I., Sapelnikova I.I., Fedotova V.G., Shuyskaya E.A., Yakovleva M.V., Yantser O.V. 2020. Recommendations to unify phenological observations in Russia. *Nature Conservation Research* 5(4): 89–110. DOI: 10.24189/ncr.2020.060 [In Russian]

Nisametdinov N.F., Moiseev P.A., Vorobiev I.B. 2021. Laser Scanning and Aerial Photography with UAV in Studying the Structure of Forest-Tundra Stands in the Khibiny Mountains. *Lesnoy Zhurnal* 4: 9–22. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22 [In Russian]

Nuijten R.J.G., Coops N.C., Goodbody T.R.H., Pelletier G. 2019. Examining the Multi-Seasonal Consistency of Individual Tree Segmentation on Deciduous Stands Using Digital Aerial Photogrammetry (DAP) and Unmanned Aerial Systems (UAS). *Remote Sensing* 11(7): 739. DOI: 10.3390/rs11070739

Onishi M., Ise T. 2021. Explainable identification and mapping of trees using UAV RGB image and deep learning. *Scientific Reports* 11(1): 903. DOI: 10.1038/s41598-020-79653-9

Otero V., Van De Kerchove R., Satyanarayana B., Martínez-Espinosa C., Fisol M.A.B., Ibrahim M.R.B., Sulong I., Mohd-Lokman H., Lucas R., Dahdouh-Guebas F. 2018. Managing mangrove forests from the sky: forest inventory using field data and unmanned aerial vehicle (UAV) imagery in the Matang Mangrove Forest Reserve, peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management* 411: 35–45. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.12.049

Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Surový P., Chiteculo V. 2017. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing* 38(8–10): 2392–2410. DOI: 10.1080/01431161.2016.1264028

Peerbhay K.Y., Mutanga O., Ismail R. 2013. Commercial tree species discrimination using airborne AISA Eagle hyperspectral imagery and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) in KwaZulu–Natal, South Africa. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 79: 19–28. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.01.013

Petrie G., Toth C.K. 2009. Terrestrial laser scanners. In: J. Shan, C.K. Toth (Eds.): *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. Boca Raton: CRS Press. P. 87–128.

Picos J., Bastos G., Míguez D., Alonso L., Armesto J. 2020. Individual Tree Detection in a Eucalyptus Plantation Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-LiDAR. *Remote Sensing* 12(5): 885. DOI: 10.3390/rs12050885

Portnov A.M., Bykhovets S.S., Din E.S., Ivanova N.V., Frolov P.V., Shanin V.N., Shashkov M.P. 2021. Quantitative assessment of canopy gaps of an old-growth broad-leaved forest by ground and remote methods. In: *Mathematical modeling in ecology*. Pushchino: Pushchino Scientific Center for Biological Research of RAS. P. 99–102. [In Russian]

Prokhorov A.A., Platonova E.A., Shreders M.A., Tarasenko V.V., Andryusenko V.V., Kulikova V.V. 2013. Components of the information space of Botanic Gardens. Geoinformational system of the Botanic Garden PetrSU. *Hortus Botanicus* 8: 66–74. [In Russian]

R Core Team. 2020. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Available from https://www.R-project.org/

Raumonen P., Kaasalainen M., Åkerblom M., Kaasalainen S., Kaartinen H., Vastaranta M., Holopainen M., Disney M., Lewis P. 2013. Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sensing* 5(2): 491–520. DOI: 10.3390/rs5020491

Reshetyuk Y. 2009. *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*. Doctoral thesis. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology. 174 p.

Roussel J., Auty D., Coops N.C., Tompalski P., Goodbody T.R., Meador A.S., Bourdon J., de Boissieu F., Achim A. 2020. lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment* 251: 112061. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112061

Rybakov D.S., Belashev B.Z. 2020. Weather conditions, air pollution, emergency calls and population mortality in Petrozavodsk. *Human Ecology* 27(5): 21–30. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-5-21-30 [In Russian]

Safonova A., Hamad Y., Dmitriev E., Georgiev G., Trenkin V., Georgieva M., Dimitrov S., Iliev M. 2021. Individual tree crown delineation for the species classification and assessment of vital status of forest stands from UAV images. *Drones* 5(3): 77. DOI: 10.3390/drones5030077

Sokolova M., Japkowicz N., Szpakowicz S. 2008. Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation. In: A. Sattar, Bh. Kang (Eds.): *Advances in Artificial Intelligence. AI 2006. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 4304. Berlin; Heidelberg: Springer. P. 1015–1021. DOI: 10.1007/11941439_114

Tasoulas E., Varras G., Tsirogiannis I., Myriounis C. 2013. Development of a GIS application for urban forestry management planning. *Procedia Technology* 8: 70–80. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.11.011

Véga C., St-Onge B. 2009. Mapping site index and age by linking a time series of canopy height models with growth curves. *Forest Ecology and Management* 257(3): 951–959. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.10.029

Vosselman G., Maas H.G. (Eds.) 2011. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning.* Dunbeath: Whittles Publishing. 336 p.

Watts A.C., Ambrosia V.G., Hinkley E.A. 2012. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use. *Remote Sensing* 4(6): 1671–1692. DOI: 10.3390/rs4061671

Wehr A., Lohr U. 1999. Airborne laser scanning–an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54(2–3): 68–82. DOI: 10.1016/S0924-2716(99)00011-8

Zahawi R.A., Dandois J.P., Holl K.D., Nadwodny D., Reid J.L., Ellis E.C. 2015. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biological Conservation* 186: 287–295. DOI: 10.1016/j.biocon.2015.03.031

Zhang J., Hu J., Lian J., Fan Z., Ouyang X., Ye W. 2016. Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. *Biological Conservation* 198: 60–69. DOI: 10.1016/j.biocon.2016.03.027

Zhang W., Qi J., Wan P., Wang H., Xie D., Wang X., Yan G. 2016. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing* 8(6): 501. DOI: 10.3390/rs8060501

Zhou J., Proisy C., Descombes X., Le Maire G., Nouvellon Y., Stape J.L., Viennois G., Zerubia J., Couteron P. 2013. Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images. *Forest Ecology and Management* 301: 129–141. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.10.007

TREE ATTRIBUTE ASSESSMENT IN URBAN GREENWOOD USING GROUND-BASED LIDAR AND MULTISEASONAL AERIAL PHOTOGRAPHY DATA

Alexey V. Kabonen[1,*], Natalya V. Ivanova[2]

[1]*Petrozavodsk State University, Russia*
**e-mail: alexkabonen@mail.ru*
[2]*Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Russia*

Advances in LiDAR and unmanned aerial vehicle technology have made high-resolution data available, which can be used for individual tree detection and assessing tree attributes. The accuracy of these assessments is still not clear for stands with high tree species diversity as well as leaf-off and leaf-on conditions. The aim of this study was to assess the quality of tree top detection and individual tree heights extracted from photogrammetric point clouds and canopy height models as well as ground-based LiDAR clouds in mixed and coniferous forest stands depending on the phenological stage. The study has been carried out in the Botanical Garden of the Petrozavodsk State University (Republic of Karelia, Russia). Four flight missions (in 2019–2021) using Phantom 4 Pro quadcopter were conducted in the arboretum (> 200 tree species) during periods of leafless, leaf biomass growth, full foliage and autumn leaf colouration. A single ground-based laser scanning was performed using a Leica BLK 360. Multiseasonal ultra-high resolution orthophoto mosaics (1.1–2.8 cm/pixel), photogrammetric point clouds (average density is 4200 points/m^2), as well as LiDAR clouds (11 600 points/m^2) were obtained. Further analysis was performed on three sites differing in tree species composition, tree density and site area. Tree tops were automatically detected from photogrammetric point clouds and their heights were estimated using R environment software. We found that most of the trees (78.9%) were correctly detected by algorithms based on photogrammetric data collected in periods of full foliage and autumn colouration. We also found that the number of false positive (FP) and false negative (FN) cases increased with decreasing in green biomass on deciduous trees. Compared with an average value, tree detection quality increased by 9.4% for coniferous trees with cone-shaped crowns (*Abies sibirica*, *A. balsamea*, *A. fraseri*, *Picea abies*, *P. pungens*, *P. omorika*, *Pseudotsuga menziesii*, *Larix sibirica*) regardless of the tree density, and tree detection quality decreased by 10% for coniferous trees with an ellipsoidal-shaped crowns (e.g. *Thuja occidentalis*, genus *Pinus*) or in cases for broad-leaved trees with high tree density. The lowest value of tree detection quality (F = 0.49) was found for the leafless period. High values (F = 0.84) obtained for periods of full foliage and autumn colouration indicates that tree detection quality was well in general. For the biomass growth period, this value (F = 0.69) also indicates a high quality of tree detection results. We also found that tree heights estimated using photogrammetric data well matched with tree heights measured on LiDAR clouds (R^2 = 0.99). The highest accuracy was obtained for coniferous trees with cone-shaped crowns. We also estimated the height increments of different tree species between 2019 and 2021 based on photogrammetric point clouds. The highest annual height increment was obtained for *Pinus sibirica* (52 cm), and the lowest for *Pseudotsuga menziesii* (32 cm). Overall, our results have shown the potential to use photogrammetric and LiDAR data for tree mapping and estimating tree attributes in multi-species forest stands of arboretums or urban parks, as well as in natural forests.

Key words: arboretum, botanical garden, laser scanning, lidR, phenology, photogrammetry, unmanned aerial vehicle