

RESEARCH ARTICLES

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДРЕВОСТОЕВ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ ПРИОКСКО-ТЕРРАСНОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА (РОССИЯ) ПО МАТЕРИАЛАМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С КВАДРОКОПТЕРА

Н. В. Иванова^{1,2*}, М. П. Шашков², В. Н. Шанин²

¹Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Россия

*e-mail: Natalya.dryomys@gmail.com

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Россия

Поступила: 13.03.2021. Исправлена: 28.05.2021. Принята к опубликованию: 02.07.2021.

Исследование выполнено в Приокско-Террасном биосферном заповеднике (Московская область, Россия) на трех участках сосновых лесов (50 × 50 м каждый), различающихся по составу и возрасту. Цель работы – изучение структуры древостоя по фотограмметрическим облакам точек и цифровым моделям высот древесного полога (СНМ). Для проведения аэрофотосъемки использовали квадрокоптер DJI Phantom 4. На основе полученных фотографий в программе Agisoft Metashape для каждого участка строили фотограмметрическое облако точек и ортофотоплан. Затем облака точек обрабатывали в среде статистического программирования R при помощи функций специализированного пакета *lidR*. Точки класса «земная поверхность» выделяли по алгоритму *csf*, затем выполняли нормализацию облака точек по алгоритму пространственной интерполяции *tin*. Далее проводили поиск вершин отдельных деревьев (локальных максимумов) с использованием алгоритма *lmf*. Для верификации полученных результатов на каждом участке выполняли наземные учеты деревьев. На основе этих данных оценивали полноту обнаружения деревьев алгоритмом *r* (*recall*), качество обнаружения деревьев *p* (*precision*) и средневзвешенную оценку *F* (*F-score*). На следующем этапе из нормализованных облаков точек для каждого участка строили СНМ (30 см/пиксель) по алгоритму *pit-free* и выполняли сегментацию крон деревьев двумя методами: водоразделов (*watershed segmentation*) и расширяющихся областей (*region-growing segmentation*). Полученные результаты сравнивали с оценками, полученными путем ручного дешифрирования ортофотопланов. Результаты исследования показали высокое качество автоматического детектирования вершин, алгоритмом найдено от 46.7% до 87.5% деревьев, учтенных на пробных участках наземными методами. Полнота обнаружения деревьев *r* варьировала от 0.5 до 0.9, качество обнаружения деревьев *p* от 0.9 до 1.0, а средневзвешенная оценка *F*, учитывающая оба эти показателя, от 0.7 до 0.9. Наилучшие результаты получены для участка одноярусного древостоя, где преобладали крупные деревья. Ярусность и неоднородности в лесном пологе снижали качество автоматического детектирования. Высоты, оцененные по фотограмметрическим облакам точек, хорошо согласовывались с высотами, измеренными наземными методами. Зависимость описывалась прямой $y = 0.99x$ при $R^2 = 0.99$. Оценки общей площади крон, полученные по цифровым моделям высот с использованием метода водоразделов и метода с расширяющимися областями, как правило, превышали результаты ручной векторизации ортофотоплана. Различия между автоматическими и полученными вручную оценками достигали 25.1%. Разница в результатах, полученных при помощи двух алгоритмов, для одних и тех же участков составляла от 0.2% до 19.7%. Более качественные оценки отмечены для участков с более разреженным древостоем. В целом, результаты работы показали, что по фотограмметрическим облакам точек можно быстро получить качественные оценки численности и высот деревьев в одноярусных сосновых лесах, что подтверждает перспективность использования этих методов для изучения структуры древостоев. Широко используемые алгоритмы сегментации крон деревьев не дают надежных оценок, получаемые результаты нуждаются в дополнительной коррекции.

Ключевые слова: Agisoft Metashape, *lidR*, БПЛА, фотограмметрические облака точек, цифровые модели высот древесного полога

Введение

В последние годы для изучения лесных экосистем все шире применяются данные воздушного лазерного сканирования (LiDAR) и материалы аэрофотосъемки, полученной при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (Anderson & Gaston, 2013; Pajares, 2015; Zhang J. et al., 2016; Miller et al., 2017). Такой подход позволяет быстро получить ин-

формацию для больших площадей (в десятки и более гектар) при низких трудозатратах, что делает дистанционные данные важным дополнением к традиционным наземным методам исследований (Dandois & Ellis, 2013; Puliti et al., 2015; Messinger et al., 2016). Двухмерные изображения (ортофотопланы), являющиеся результатом обработки данных аэрофотосъемки, имеют высокое пространственное разрешение

(до 1–3 см на местности), сами по себе являясь важным источником для визуального и автоматического дешифрирования. Фотограмметрическая обработка изображений позволяет строить облака точек и трехмерные растровые модели, которые являются основой для дальнейшего анализа данных.

Многие современные методы обработки материалов аэрофотосъемки и данных LiDAR бесплатно доступны в пакетах для среды статистического программирования R (R Core Team, 2020); большой объем справочных материалов способствует широкому использованию этого инструментария для решения фундаментальных и практических задач. Так, фотограмметрические облака точек, облака LiDAR и трехмерные цифровые модели широко применяются в мире для изучения структуры древостоев (Hudak et al., 2014; Hansen et al., 2015), оценки наземной биомассы лесной растительности и определения характеристик отдельных деревьев (Zarco-Tejada et al., 2014; Puliti et al., 2015; Mohan et al., 2017; Birdal et al., 2017; Otero et al., 2018; Bennett et al., 2020; Krisanski et al., 2020; Picos et al., 2020). В то же время, обзор отечественной литературы показал, что российские исследователи, работающие с материалами аэрофотосъемки, полученной при помощи БПЛА, как правило, используют только двухмерные ортофотопланы (иногда с привлечением мультиспектральной съемки) (Денисов и др., 2016; Алешко и др., 2017; Домнина и др., 2017; Санников и др., 2018; Богданов и др., 2019), тогда как фотограмметрические облака точек или облака LiDAR пока редко становятся объектами для анализа (Медведев и др., 2019, 2020; Ершов и др., 2020; Ковязин и др., 2020).

В связи с этим целью данной работы стало исследование структуры древостоев сосновых лесов Приокско-Тerrasного биосферного заповедника по фотограмметрическим облакам точек и цифровым моделям высот.

Материал и методы

Приокско-Тerrasный государственный природный биосферный заповедник имени М.А. Заблоцкого организован в 1945 г. В 1979 г. он включен во всемирную сеть биосферных резерватов ЮНЕСКО. Приокско-Тerrasный заповедник расположен на юге Московской области на левом берегу р. Ока в пределах самого крупного лесного массива южного Подмосковья. По геоботаническому райони-

рованию территория Приокско-Тerrasного заповедника относится к подтаежной (хвойно-широколиственной полосе) в составе Московского округа. Большая часть территории Приокско-Тerrasного заповедника представлена средневозрастными, приспевающими и спелыми лесами, среди которых преобладают сосняки (из *Pinus sylvestris* L.) разнообразных типов, занимающие 44.5% от его площади (Заугольнова, 2000; Архипов и др., 2020).

В качестве объектов исследования выбрано три лесных участка с преобладанием сосны в древостое, различающихся по составу, возрасту и типу лесорастительных условий (табл. 1). Далее в тексте статьи исследованные участки названы по номерам лесоустroительных кварталов, в которых они расположены. На каждом участке заложено по одной временной пробной площади размером 50 × 50 м.

Аэрофотосъемку участков проводили 02.08.2020 г. квадрокоптером DJI Phantom 4 в режиме mosaic flight mode с 90% перекрытием снимков с высоты 117 м. Во избежание краевого эффекта съемку выполняли с буферной зоной шириной 10 м, таким образом размер каждой анализируемой сцены составил 70 × 70 м. Для составления полетного плана использовали он-лайн сервис Drone Deploy (<https://www.dronedeploy.com>) и одноименное мобильное приложение для автоматического управления квадрокоптером. Последовательность этапов обработки материалов аэрофотосъемки представлена на рис. 1.

Сначала изображения обрабатывали в программе фотограмметрической обработки Agisoft Metashape (Agisoft LLC, 2019). Это отечественная разработка, которая широко применяется по всему миру для создания ортофотоизображений и трехмерных моделей высокого качества на основе цифровых фотографий. Для каждого участка сначала выполняли выравнивание изображений (Align photos), в ходе которого были автоматически определены общие точки смежных фотографий и оценены параметры камеры в момент съемки каждой фотографии. Далее на основе данных о положении камер и используемых фотографий, строили плотные облака точек (Dense point cloud). После этого выполняли построение цифровой модели поверхности (Digital elevation model, DEM), на основе которой и выровненных фотографий для каждой пробной площади строили ортофотопланы.

Таблица 1. Таксационные характеристики древостоев на исследованных участках леса по материалам лесоустройства 2015 г.
Table 1. The forest stand attributes of study sites according to the forest inventory of 2015

Параметры	Участок 36а	Участок 36	Участок 34а
Формула древостоя	10С+Е+Б	9С+1Е, 2-й ярус 10Е	10С+Б
Класс возраста	Спелый, 7 класс возраста	Спелый, 7 класс возраста	Средневозрастной, 4 класс возраста
Бонитет	1	1	1
Запас, м³/10 000 м²	413	310	330
Тип лесорастительных условий	В2	В2	А2
Тип леса	Сосняк мелкоотравный	Сосняк мелкоотравный	Сосняк брусничниковый

Примечание: Обозначения формул древостоя: С – *Pinus sylvestris* (сосна), Е – *Picea abies* (ель), Б – *Betula* spp. (береза).



Рис. 1. Этапы обработки данных аэрофотосъемки.
Fig. 1. Unmanned aerial vehicle data processing flowchart.

Плотные облака точек обрабатывали в среде статистического программирования R с использованием функций специализированного пакета lidR ver. 2.2.2 (Roussel et al., 2020), который предназначен для обработки данных воздушного лазерного сканирования (LiDAR) и фотограмметрических облаков точек. Сначала выделяли точки, относящиеся к классу «земная поверхность». Для этого использовали функцию lasground() и алгоритм cloth simulation filtering (Zhang W. et al., 2016). Этот алгоритм разработан специально для природных (не городских) территорий и позволяет учесть особенности микрорельефа за счет разной эластичности виртуальной ткани, которая опускается на перевернутое облако точек. Далее выполняли нормализацию облака точек по уровню земной поверхности с помощью функции lasnormalize() по алгоритму tin, в процессе которой значения высот были нормированы на уровень земной поверхно-

сти. Используемый нами алгоритм пространственной интерполяции на основе триангуляции Делоне выполняет линейную интерполяцию внутри каждого треугольника. После этого по нормализованному облаку точек определяли вершины отдельных деревьев. Для этого использовали алгоритм lmf (Popescu & Wynne, 2004), реализованный в функции tree_detection(), который выделяет деревья из облака точек в процессе нахождения локальных максимумов внутри скользящего окна заданного размера и формы. Для каждого участка тестировали несколько сочетаний размера круглого скользящего окна (ws) и минимальной высоты детектируемых алгоритмом деревьев (hmin), оптимальные значения подбирали на основе визуального сопоставления результатов с ортофотопланом в среде QGIS (QGIS Development Team, 2019).

На следующем этапе строили цифровые модели высот древесного полога (canopy height model,

СНМ) по алгоритму pit-free (Khosraviour et al., 2014) с помощью функции `grid_sapору()`. Этот алгоритм основан на вычислении триангуляций на разных высотах и позволяет избежать появления пикселей с неинтерпретированной высотой. Далее по цифровым моделям высот выделяли кроны отдельных деревьев. Для этого использовали два широко применяющихся для сегментации изображений метода (Kolarik et al., 2020): водоразделов (watershed segmentation) и расширяющихся областей (region-growing segmentation). Метод водоразделов основан на разделении объектов по сильным градиентам высот между ними. Метод расширяющихся областей, напротив, выделяет объекты на основе сходства атрибутов (в данном случае – высот) соседних пикселей. Сегментацию методом водоразделов выполняли при помощи алгоритма, реализованного в функции `watershed()` (Roussel et al., 2020). Были выполнены запуски функции с разными значениями аргумента `th_tree`, определяющего порог, ниже которого совокупность пикселей на цифровой модели высот не может быть выделена как отдельное дерево. Для сегментации методом расширяющихся областей использовали алгоритм, реализованный в функции `dalponte2016()` (Dalponte & Coomes, 2016). Были выполнены запуски функции для определения максимального размера кроны отдельного дерева (аргумент `max_cg`). Подбор оптимальных значений аргументов `th_tree` и `max_cg` для каждого участка осуществлялся исходя из визуального сопоставления результатов с ортофотопланом. Далее для каждого участка в QGIS рассчитывали сумму площадей крон, оцененную двумя методами.

На заключительном этапе проводили верификацию полученных результатов наземными методами. Для этого внутри каждого из трех участков 50×50 м выделяли по две пробных площади 20×20 м, на которых проводили учет всех деревьев. По результатам определяли: 1) число корректно детектированных алгоритмом деревьев (TP , true positive); 2) число ложных срабатываний алгоритма, когда дерево выделено автоматически, но отсутствует на местности (FP , false positive); 3) число пропущенных деревьев, которые существуют на местности, но не сегментированы алгоритмом (FN , false negative). При ложных срабатываниях алгоритма, когда в пределах кроны одного дерева автоматически детектировано несколько вершин, корректно найденной считали вершину с наибольшим значением высоты, вычисленным автоматически. На основе полученных полевых данных оценивали качество

результатов автоматического детектирования на основе общепринятых оценок (Goutte & Gaussier, 2005; Sokolova et al., 2008; Li et al., 2012).

Оценка r (recall) характеризует полноту обнаружения деревьев алгоритмом и рассчитывается как доля корректно найденных автоматически деревьев относительно учтенных наземными методами:

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

Оценка p (precision) показывает качество обнаружения деревьев и рассчитывается как доля корректно детектированных алгоритмом деревьев относительно всех найденных автоматически:

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

Оценка F (F-score) характеризует качество результатов в целом, с учетом r и p , и рассчитывается по формуле:

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

Чем меньше r , тем больше деревьев пропущено алгоритмом, низкие значения p указывают на большое число ложных срабатываний. Значение F будет высоким при высоких значениях r и p , т.е. когда автоматически найдено большинство имеющихся на местности деревьев, а число пропущенных деревьев и ложных срабатываний невелико.

Для всех корректно детектированных деревьев сравнивали высоты, предсказанные моделью, и полученные в результате наземных измерений. Высоты измеряли с помощью дальномера-угломера TruPulse 360V. Набор парных значений для каждого дерева (высота по данным аэрофотосъемки и высота по наземным измерениям) был аппроксимирован линейной функцией $y = k \times x$. Коэффициент детерминации R^2 в данном случае характеризует степень случайных отклонений ($R^2 = 1$ свидетельствует о полном отсутствии отклонений), а коэффициент наклона прямой k позволяет оценить систематические отклонения ($k = 1$ свидетельствует об отсутствии систематических отклонений).

Для верификации общей площади крон, оцененной автоматически, выполняли их ручную векторизацию (на участках 50×50 м) по ортофотопланам в среде QGIS. Далее проводили сравнение этих результатов с результатами автоматической обработки материалов аэрофотосъемки. Оценку методом ручной векторизации считали более надежной, т.к. согласно полученным нами ранее данным (Shashkov et al., 2019), такие оценки хорошо соотносятся с результатами наземных измерений.

Результаты

Результаты автоматического поиска вершин деревьев

В результате фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки для каждого участка получены нормализованные облака точек, цифровые модели высот древесного полога разрешением 30 см/пиксель и ортофотопланы. Технические характеристики материалов представлены в табл. 2. На основе сопоставления результатов автоматического поиска деревьев с ортофотопланом для каждого исследуемого участка экспертно подобраны оптимальные значения размера скользящего окна и минимальной высоты автоматически детектируемых деревьев (табл. 2). В результате запусков алгоритма с данными параметрами на участке 36а выделено 41 дерево, на участке 36 – 48 деревьев и на участке 34а – 110 деревьев (рис. 2).

Оценка качества полученных автоматически результатов по материалам полевой верификации (табл. 3) показала, что алгоритмом найдено от 46.7% до 87.5% деревьев, учтенных на пробных площадях наземными методами. Выяснено, что значение p на всех площадях было высоким, что свидетельствует о низком числе автоматически найденных ложных вершин, которые отмечены только на пробных площадях на участке 34а. Значение r было ниже, чем p , т.к. на всех пробных площадях в ходе наземных исследований учтены пропущенные алгоритмом деревья, которые потенциально могли быть обнаружены. На основании разницы между r и p можно заключить, что в исследованных древостоях вклад ошибки, связанной с недооценкой числа деревьев, был выше, чем ошибки его завышения. На разных участках общее число деревьев занижено в среднем на 17.4–38.2% по сравнению с наземными данными. Высокие (близкие к единице) значения F показывают, что в целом качество детектирования деревьев было хорошим на всех исследованных участках.

Соотношение высот деревьев, полученных наземными и автоматическими методами

Высоты, оцененные по данным аэрофотосъемки, хорошо согласовывались с высотами, измеренными наземными методами (табл. 4). Зависимость между высотами отдельных деревьев, полученными по данным аэрофотосъемки и по результатам наземных измерений, соответствовала линейной модели $y = k \times x$ ($R^2 = 0.99$) (рис. 3А). Для корректно детектированных деревьев значимых различий между высотами, оце-

ненными двумя методами, не обнаружено (парный критерий Стьюдента, $p < 0.0001$) (рис. 3Б).

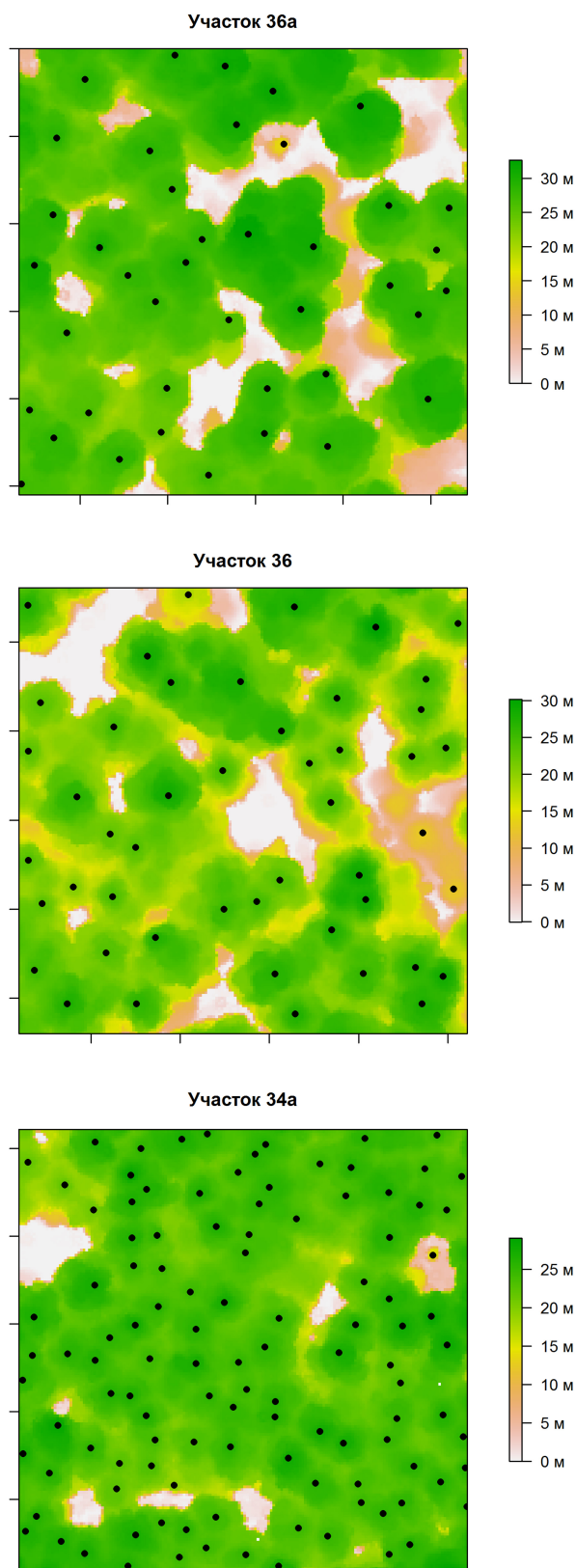


Рис. 2. Автоматически найденные вершины деревьев (обозначены точками) на цифровых моделях высот древесного полога.

Fig. 2. Automatically detected tree tops (black dots) on canopy height models.

Таблица 2. Параметры исходных материалов и обработки результатов аэрофотосъемки
Table 2. The parameters of source data and parameters of aerial photo processing

Параметры	Участок 36а	Участок 36	Участок 34а
Число полученных снимков, шт.	329	327	332
Разрешение ортофотоплана, см/пиксель	5.0	4.2	4.1
Число точек в плотном облаке, млн	6.59	6.39	5.71
Плотность облака точек, точек/м ²	1305.5	1307.3	1166.2
Число точек класса «земная поверхность», млн	1.0	0.7	0.8
Размер скользящего окна, м	5	5	3
Минимальная высота автоматически детектируемых деревьев, м	15	10	15

Таблица 3. Оценка качества результатов автоматического поиска вершин деревьев
Table 3. Assessment of automatically tree top detection quality

Участок-пробная площадь	Число автоматически найденных вершин	<i>FN</i>	<i>FP</i>	<i>TP</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>F</i>
36а-1	7	1	0	7	0.9	1	0.9
36а-2	7	2	0	7	0.8	1	0.9
36-1	7	8	0	7	0.5	1	0.7
36-2	10	3	0	10	0.8	1	0.9
34а-1	18	4	1	17	0.8	0.9	0.8
34а-2	17	5	1	16	0.8	0.9	0.8

Примечание: *FN* – число пропущенных деревьев, которые существуют на местности, но не сегментированы алгоритмом, *FP* – число ложных срабатываний алгоритма, когда дерево выделено автоматически, но отсутствует на местности, *TP* – число корректно детектированных алгоритмом деревьев, *r* – оценка полноты обнаружения деревьев алгоритмом, *p* – оценка качества обнаружения деревьев, *F* – оценка качества результатов в целом, с учетом *r* и *p*.

Таблица 4. Сопоставление высот деревьев, оцененных автоматически по дистанционным данным и измеренных наземными методами**Table 4.** Comparison of tree heights, obtained automatically from remote data and using ground surveys

Параметры	Участок 36а	Участок 36	Участок 34а
Число деревьев	14	17	33
Автоматически детектированные высоты на двух площадках 20 × 20 м внутри участка			
Максимальная высота, м	32.6	30.2	27.7
Минимальная высота, м	15.3	20.4	21.1
Средняя высота, м	28.1	24.7	25.3
Стандартное отклонение (SD)	4.4	2.3	1.6
Наземные измерения высот на двух площадках 20 × 20 м внутри участка			
Максимальная высота, м	32.3	29.1	28.5
Минимальная высота, м	15.8	20.8	22.0
Средняя высота, м	28.4	24.8	25.1
Стандартное отклонение (SD)	4.2	2.1	1.7

Оценка общей площади крон по материалам аэрофотосъемки

Автоматические оценки общей площади крон почти всегда были выше оценок, полученных по результатам ручной векторизации ортофотопланов (табл. 5). Наибольшие различия выявлены между оценкой по методу водоразделов и результатами ручной векторизации крон на участке 34а (+25.1%), наименьшие – между оценкой методом расширяющихся областей и данными ручной векторизации на участке 36 (-6.7%). В свою очередь, оценки, полученные двумя автоматическими методами, различались между собой на 3.7% на участке 36а, на 19.7% на участке 36 и на 0.2% на участке 34а.

Обсуждение

В результате проведенной работы по материалам аэрофотосъемки удалось автоматически детектировать большинство вершин деревьев в пологом леса. Среди исследованных объектов наиболее качественно деревья детектированы на участке 36а. Это связано с тем, что древостой здесь был одноярусным, доминировали крупные деревья. На участке 36 древостой был разрежен и состоял из двух ярусов. Полевая верификация показала, что качество определения вершин значительно различалось между двумя пробными площадями внутри этого участка. На площади 36-2 преобладали крупные деревья сосны и ели, качество работы алгоритма было сопоставимо с таковым на участ-

ке 36а. На пробной площади 36-1, напротив, отмечено только две крупных сосны, но был обильн подрост ели разного возраста. Большинство этих елей, а также деревья сосны второго яруса (53.3% от потенциально детектируемых на площади деревьев) не было обнаружено алгоритмом. По всей видимости, такой результат связан с использованием скользящего окна слишком большого размера (5 м), не позволившего выделить деревья с кронами небольших размеров. Однако уменьшение размера скользящего окна могло привести к обнаружению значительного числа ложных вершин среди деревьев первого яруса и, как следствие, к значительной переоценке их численности. Для

решения этой проблемы возможно применение скользящего окна переменного размера, зависящего от высоты дерева (Eysn et al., 2015). Тем не менее, для описания такой зависимости необходимы данные о размерах крон у деревьев разной высоты, что требует предварительных наземных исследований. Оценки качества детектирования деревьев на участке 34а были высокими. Алгоритмом пропущено девять деревьев (20.5%) и обнаружено два ложных. Выявленные ошибки можно объяснить высокой степенью перекрытия крон, из-за большой плотности деревьев, которая, в свою очередь, связана с относительно небольшим возрастом этого древостоя (табл. 1).

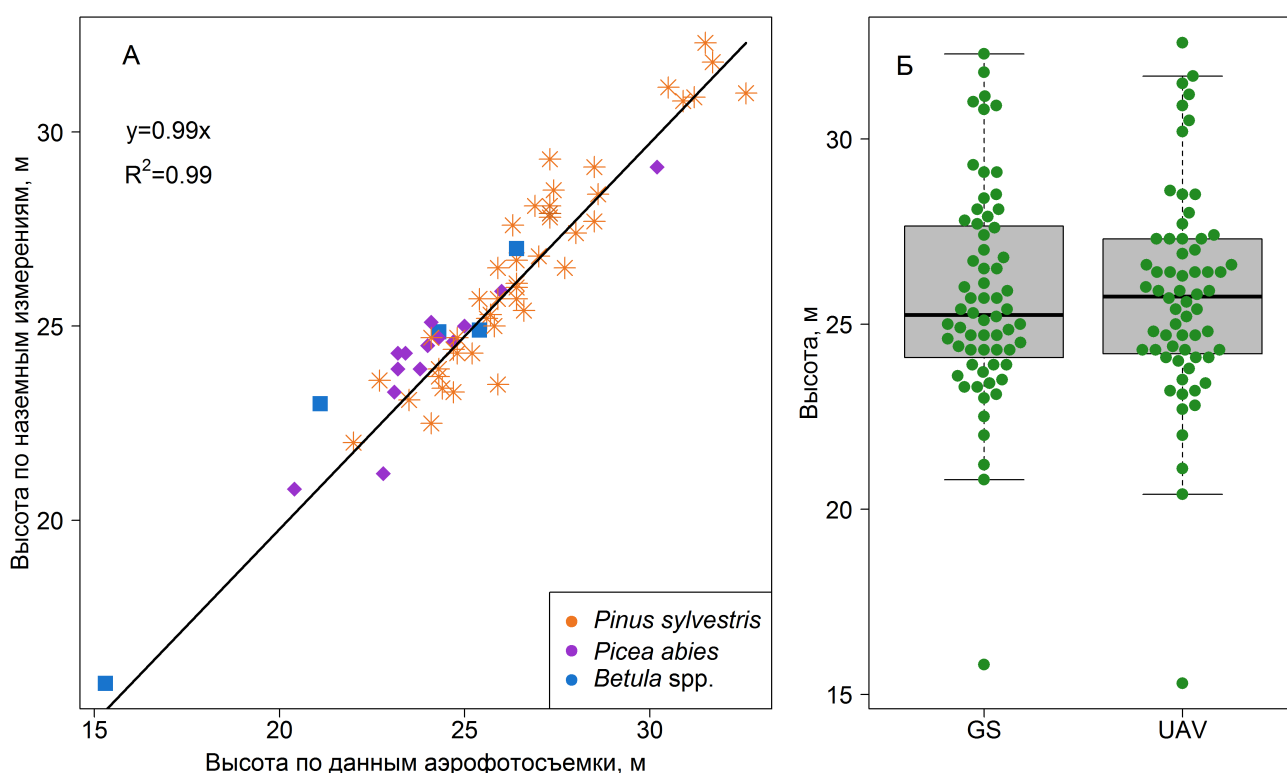


Рис. 3. Соотношение высот деревьев по данным аэрофотосъемки (UAV) и наземным измерениям (GS). Обозначения: А – диаграмма рассеяния значений высот деревьев разных пород; Б – «ящичковые» диаграммы и диаграммы «пчелиный рой», построенные для всех измеренных деревьев. На «ящичковых» диаграммах нижняя и верхняя границы прямоугольников соответствуют первому и третьему квартилям, линии внутри прямоугольников – медианы; длина вертикальных отрезков определяется расстоянием от границы прямоугольника до наименьшего/наибольшего значения, попадающего в полуторный межквартильный размах от нижней/верхней границы. На диаграммах «пчелиный рой» показаны распределения переменных с указанием каждого измерения.

Fig. 3. Comparison of tree heights, obtained automatically (UAV) and with ground surveys (GS). Designations: А – scatter plot for various tree species; Б – box plots and bee swarm plots for all measured trees. On box-plots, upper and lower rectangle borders correspond to the first and third quartiles; lines inside the rectangles are median values; length of the vertical segments is determined by the distance from the rectangle border to the lowest/highest value within the 1.5 interquartile ranges from the lower/upper border. Bee swarm plots shows distribution of variables as well as each individual data point.

Таблица 5. Общая площадь крон, оцененная разными методами

Table 5. Total crown projection area obtained using various methods

Метод оценки общей площади проекций крон	Участок 36а	Участок 36	Участок 34а
Автоматическая оценка по методу водоразделов, м ²	1973.0	2094.2	2374.1
Автоматическая оценка по методу с расширяющимися областями, м ²	2047.8	1680.9	2370.2
Ручная векторизация ортофотоплана, м ²	1621.3	1792.7	1779.2

В целом полученные нами результаты показывают, что алгоритмы автоматического детектирования наиболее эффективны для обработки данных аэрофотосъемки разновозрастных одновидовых древостоев старших классов возраста, что согласуется с литературными данными (Koch et al., 2006; Eysn et al., 2015; Silva et al., 2016; Alonzo et al., 2018; Bennett et al., 2020). Присутствие деревьев нескольких видов, выраженная ярусность или неоднородности в лесном пологе могут значительно снижать качество получаемых результатов и требуют верификации наземными методами.

Результаты сравнения высот деревьев, измеренных наземными методами и оцененных по материалам аэрофотосъемки, показали, что использованный нами метод позволил с высокой точностью оценить высоты деревьев по материалам аэрофотосъемки в исследованных лесах, что согласуется с известными из литературы данными. Так, в работе Birdal et al. (2017) для городских сосновых насаждений в Турции также не выявлено различий между оценками высот по наземным и дистанционным данным. В то же время, Bennet et al. (2020) на примере управляемых хвойных лесов в Великобритании показали, что оценки, полученные по цифровой модели высот, значимо выше по сравнению с полевыми измерениями. В предыдущих исследованиях в других лесах Приокско-Тerrasного заповедника (Иванова и др., 2020), напротив, наземные оценки были значимо выше полученных из модели высот древесного полога (в среднем на 1.4 м). Исследования, проведенные на двух участках хвойных лесов в Чехии (Panagiotidis et al., 2017), также выявили различия в оценках, полученных двумя методами, которые составили около 2 м. Во всех этих случаях выявленные различия объяснялись как особенностями исходных данных аэрофотосъемки и обработки полученных материалов, так особенностями проведения наземных измерений (Alonzo et al., 2018; Bennet et al., 2020; Иванова и др., 2020). Тем не менее, даже в тех случаях, когда различия в оценках высот были статистически значимы, они находились в пределах допустимой погрешности для таких измерений. Таким образом, современные алгоритмы позволяют получить надежные оценки высот деревьев по материалам аэрофотосъемки.

Результаты детектирования крон деревьев показали, что автоматические оценки могут значительно завышать их общую площадь. Сходные результаты получены ранее в исследовании хвойных лесов в Чехии (Panagiotidis et al., 2017), где площади крон, сегментированные автоматически, были выше, по сравнению с данными наземных измерений. В работе Koch et al. (2006) на примере хвойных и широколиственных лесов в Германии также выявлено, что метод водоразделов переоценивает площади крон по сравнению с наземными измерениями. Для коррекции избыточной сегментации ортофотопланов методом водоразделов Алешко и др. (2017) предложена оригинальная методика, позволяющая более точно выделять кроны отдельных деревьев. Метод основан на идее маркирования локальных максимумов яркости растра. Его использование позволило с допустимой погрешностью оценить площади проекций крон для участка сосняка сфагнового багульникового в Шенкурском лесничестве Архангельской области. Применение данного подхода для изучаемых нами объектов является предметом будущих исследований.

Также нами показано, что использованные методы сегментации лучше работают с более разреженными древостоями: наименьшие различия между автоматической оценкой и результатами ручной векторизации выявлены в наименее сомкнутом древостое на участке 36, наибольшие – на участке 34а, где плотность древостоя была максимальной. Этот результат хорошо согласуется с данными другими исследователями, которыми показано, что методы сегментации дают наилучшие оценки при обработке данных аэрофотосъемки хорошо отделяющихся друг от друга объектов. Так, методы водоразделов и расширяющихся областей были успешно апробированы для выделения отдельных деревьев и групп кустарников по данным аэрофотосъемки саванн в США (Chen et al., 2006) и в Ботсване (Kolarik et al., 2020), а также в городских зеленых насаждениях в США (Alonzo et al., 2014). Использование этих методов для сегментации деревьев в древостоях высокой плотности или со значительным перекрытием крон дали менее надежные результаты. Например, Alonzo et al. (2018) выявлена высокая доля несегментированных крон при работе с данными аэрофотосъемки бореальных лесов Аляски. Сход-

ные результаты получены Nunes et al. (2017) при сегментации крон в молодых плантациях масличной пальмы в Малайзии, для которых характерна высокая плотность древостоев.

Заключение

Проведенное исследование является одной из первых отечественных работ по применению фотограмметрических облаков точек и цифровых моделей высот, полученных по материалам аэрофотосъемки квадрокоптером, для исследования структуры древостоев и определения их таксационных характеристик. На территории Приокско-Террасного биосферного заповедника изучены три участка сосновых лесов, различных по составу и возрасту.

Полученные результаты показали, что, используя готовые алгоритмы, по фотограмметрическим облакам точек можно с уверенностью оценивать число деревьев в простых по структуре одноярусных одновидовых древостоях. При этом наилучшие результаты получены для более старых древостоев, с преобладанием крупных деревьев. Присутствие деревьев нескольких видов, выраженная ярусность или неоднородность в лесном пологе снижают качество получаемых результатов. Эти ограничения необходимо учитывать при обработке материалов съемки древостоев сложной структуры. Также показано, что по фотограмметрическим облакам точек можно получить качественные оценки высот деревьев. Таким образом, полученные результаты подтверждают перспективность применения аэрофотосъемки при помощи БПЛА для проведения инвентаризации лесов и мониторинга их естественного развития.

Готовые алгоритмы для сегментации крон деревьев пока не дают удовлетворительных результатов для древостоев сложной структуры. Полученные по цифровым моделям высот оценки при помощи метода водоразделов и метода с расширяющимися областями показали существенное завышение результатов по сравнению с ручной векторизацией ортофотопланов. Для широкого применения этих методов необходимо совершенствование алгоритмов и методик обработки данных.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №18-14-00362-П). Полевая

верификация результатов выполнена Н.В. Ивановой частично в рамках бюджетной темы ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

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
- Архипов В.Ю., Мурашев И.А., Буйволов Ю.А. 2020. Птицы Приокско-Террасного биосферного заповедника: (аннотированный список видов). М.: Товарищество научных изданий КМК. 80 с. (Флора и фауна заповедников. Вып. 135).
- Богданов А.П., Алешко Р.А., Ильинцев А.С. 2019. Выявление взаимосвязи диаметра крон деревьев с различными таксационными показателями в северо-таежном лесном районе // Вопросы лесной науки. Т. 2(4). С. 1–10. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-10
- Денисов С.А., Домрачев А.А., Елсуков А.С. 2016. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. №4(32). С. 34–46. DOI: 10.15350/2306-2827.2016.4.34
- Домнина Е.А., Тимонов А.С., Кантор Г.Я., Кислицына А.П., Савиных В.П. 2017. Опыт составления детальной карты растительности пойменного луга // Теоретическая и прикладная экология. №1. С. 42–49. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163
- Ершов Д.В., Гаврилюк Е.А., Белова Е.И., Никитина А.Д. 2020. Определение породной структуры лесного участка по ортофотопланам беспилотной аэрофотосъемки // Актуальные проблемы современного лесоводства. Симферополь: АРИАЛ. С. 141–152.
- Заугольнова Л.Б. (ред.). 2000. Оценка и сохранение биоразнообразия лесного покрова в заповедниках Европейской России. М.: Научный мир. 196 с.
- Иванова Н.В., Шашков М.П., Шанин В.Н., Грабарник П.Я. 2020. Оценка качества автоматического детектирования деревьев по материалам аэрофотосъемки с помощью квадрокоптера // Математическая биология и биоинформатика. Т. 8. Пушкино: ИМПБ РАН. Статья: e36. DOI: 10.17537/icmbb20.31
- Ковязин В.Ф., Виноградов К.П., Киценко А.А., Васильева Е.А. 2020. Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. №6. С. 42–54. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-42-54
- Медведев А.А., Тельнова Н.О., Кудиков А.В. 2019. Дистанционный высокодетальный мониторинг

- динамики зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель лесной растительностью // Вопросы лесной науки. №3. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-12
- Медведев А.А., Тельнова Н.О., Кудиков А.В., Алексеенко Н.А. 2020. Анализ и картографирование структурных параметров редкостойных северотаежных лесов на основе фотограмметрических облаков точек // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 17(1). С. 150–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163
- Санников П.Ю., Андреев Д.Н., Бузмаков С.А. 2018. Выявление и анализ сухостоя при помощи беспилотного летательного аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 15(3). С. 103–113. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-103-113
- Agisoft LLC. 2019. Agisoft Metashape (Version 1.5). Software. Available from: <https://www.agisoft.com/>
- Alonzo M., Bookhagen B., Roberts D.A. 2014. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion // Remote Sensing of Environment. Vol. 148. P. 70–83 DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.018
- 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
- Anderson K., Gaston K.J. 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology // Frontiers in Ecology and the Environment. Vol. 11(3). P. 138–146. DOI: 10.1890/120150
- 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
- Chen Q., Baldocchi D., Gong P., Kelly M. 2006. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 72(8). P. 923–932. DOI: 10.14358/PERS.72.8.923
- 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
- Dandois J., Ellis E.C. 2013. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision // Remote Sensing of Environment. Vol. 136. P. 259–276. DOI: 10.1016/j.rse.2013.04.005
- Eysn L., Hollaus M., Lindberg E., Berger F., Monnet J.M., Dalponte M., Kobal M., Pellegrini M., Lingua E., Mongus D., Pfeifer P. 2015. A benchmark of lidar-based single tree detection methods using heterogeneous forest data from the alpine space // Forests. Vol. 6(5). P. 1721–1747. DOI: 10.3390/f6051721
- Goutte C., Gaussier E. 2005. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation // Proceedings of the European Conference on Information Retrieval. Berlin/Heidelberg: Springer. P. 345–359.
- Hansen E.H., Gobakken T., Bollandsås O.M., Zahabu E., Næsset E. 2015. Modeling aboveground biomass in dense tropical submontane rainforest using airborne laser scanner data // Remote Sensing. Vol. 7(1). P. 788–807. DOI: 10.3390/rs70100788
- 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
- Khosravipour A., Skidmore A.K., Skidmore M., Wang T., Hussin Y. 2014. Generating Pit-free Canopy Height Models from Airborne Lidar // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 80(9). P. 863–872. DOI: 10.14358/PERS.80.9.863
- Koch B., Heyder U., Weinacker H. 2006. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 72(4). P. 357–363. DOI: 10.14358/PERS.72.4.357
- 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
- Krisanski S., Taskhiri M.S., Turner P. 2020. Enhancing Methods for Under-Canopy Unmanned Aircraft System Based Photogrammetry in Complex Forests for Tree Diameter Measurement // Remote Sensing. Vol. 12(10). Article: 1652. DOI: 10.3390/rs12101652
- 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
- Messinger M., Gregory P., Asner G.P., Silman M. 2016. Rapid assessments of Amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems // Remote Sensing. Vol. 8(8). Article: 615. DOI: 10.3390/rs8080615
- 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

- Mohan M., Silva C.A., Klauberg C., Jat P., Catts G., Cardil A., Hudak A.T., Dia M. 2017. Individual tree detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest // *Forests*. Vol. 8(9). Article: 340. DOI: 10.3390/f8090340
- Nunes M.H., Ewers R.M., Turner E.C., Comes D.A. 2017. Mapping Aboveground Carbon in Oil Palm Plantations Using LiDAR: A Comparison of Tree-Centric versus Area-Based Approaches // *Forests*. Vol. 9(8). Article: 816. DOI: 10.3390/rs9080816
- 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
- Pajares G. 2015. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs) // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 81(4). P. 281–330. DOI: 10.14358/PERS.81.4.281
- 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
- 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
- Popescu S., Wynne R. 2004. Seeing the Trees in the Forest: Using Lidar and Multispectral Data Fusion with Local Filtering and Variable Window Size for Estimating Tree Height // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 70(5). P. 589–604. DOI: 10.14358/PERS.70.5.589
- Puliti S., Ørka H.O., Gobakken T., Næsset E. 2015. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system // *Remote Sensing*. Vol. 7(8). P. 9632–9654. DOI: 10.3390/rs70809632
- QGIS Development Team. 2019. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Available from: <http://qgis.osgeo.org>
- 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/>
- Roussel J.R., Auty D., De Boissieu F., Meador A.S., Jean-François B. 2020. Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications. Package ‘lidR’. Version 2.2.2. Available from: <https://CRAN.R-project.org/package=lidR>
- Shashkov M., Ivanova N., Shanin V., Grabarnik P. 2019. Ground Surveys Versus UAV Photography: The Comparison of Two Tree Crown Mapping Techniques // *Information Technologies in the Research of Biodiversity / I. Bychkov, V. Voronin (Eds.)*. Cham: Springer. P. 48–56. DOI: 10.1007/978-3-030-11720-7_8
- Silva C.A., Hudak A.T., Vierling L.A., Loudermilk E.L., O’Brien J.J., Hiers J.K., Jack S.B., Gonzalez-Benecke C., Lee H., Falkowski M.J., Khosravipour A. 2016. Imputation of individual longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) tree attributes from field and LiDAR data // *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 42(5). P. 554–573. DOI: 10.1080/07038992.2016.1196582
- Sokolova M., Japkowicz N., Szpakowicz S. 2008. Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation // *Proceedings of the Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence*. Berlin/Heidelberg: Springer. P. 1015–1021.
- Zarco-Tejada P.J., Diaz-Varela R., Angileri V., Loudjani P. 2014. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods // *European Journal of Agronomy*. Vol. 55. P. 89–99. DOI: 10.1016/j.eja.2014.01.004
- 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

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., Bookhagen B., Roberts D.A. 2014. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. *Remote Sensing of Environment* 148: 70–83. DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.018
- 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
- Anderson K., Gaston K.J. 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology.

- Frontiers in Ecology and the Environment* 11(3): 138–146. DOI: 10.1890/120150
- Arkhipov V.Yu., Murashev I.A., Buyvolov Yu. A. 2020. *Birds of the Prioksko-Terrasnyi biosphere Reserve (the annotated species lists)*. Moscow: KMK Scientific Press Ltd. 80 p. (Flora and fauna of state nature reserves. Vol. 135). [In Russian]
- 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
- Bogdanov A.P., Aleshko R.A., Ilintsev A.S. 2019. Relationship between tree crown diameter and various taxation indicators in the North-taiga forest area. *Forest Science Issues* 2(4): 1–10. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-10 [In Russian]
- Chen Q., Baldocchi D., Gong P., Kelly M. 2006. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72(8): 923–932. DOI: 10.14358/PERS.72.8.923
- 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
- Dandois J., Ellis E.C. 2013. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment* 136: 259–276. DOI: 10.1016/j.rse.2013.04.005
- Denisov S.A., Domrachev A.A., Elsukov A.S. 2016. Quadcopter practical application for forest regeneration monitoring. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management* 4(32): 34–46. DOI: 10.15350/2306-2827.2016.4.34 [In Russian]
- Domnina E.A., Timonov A.S., Kantor G.Ya., Kislitsyna, A.P. Savinykh V.P. 2017. Experience of detailed mapping of floodplain meadow vegetation. *Theoretical and Applied Ecology* 1: 42–49. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163 [In Russian]
- Ershov D.V., Gavrilyuk E.A., Belova E.I., Nikitina A.D. 2020. Determination of the species structure of a forest area using orthophotoimages from unmanned aerial vehicles. In: *Actual Problems of Modern Forestry*. Simferopol: ARIAL. P. 141–152. [In Russian]
- Eysn L., Hollaus M., Lindberg E., Berger F., Monnet J.M., Dalponte M., Kobal M., Pellegrini M., Lingua E., Mongus D., Pfeifer P. 2015. A benchmark of lidar-based single tree detection methods using heterogeneous forest data from the alpine space. *Forests* 6(5): 1721–1747. DOI: 10.3390/f6051721
- Goutte C., Gaussier E. 2005. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation. In: *Proceedings of the European Conference on Information Retrieval*. Berlin/Heidelberg: Springer. P. 345–359.
- Hansen E.H., Gobakken T., Bollandsås O.M., Zahabu E., Næsset E. 2015. Modeling aboveground biomass in dense tropical submontane rainforest using airborne laser scanner data. *Remote Sensing* 7(1): 788–807. DOI: 10.3390/rs70100788
- 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
- Ivanova N.V., Shashkov M.P., Shanin V.N., Grabarnik P.Ya. 2020. Quality Assessment of Automatic Tree Detection Based on Aerial Photography Using a Quadcopter. In: *Mathematical Biology and Bioinformatics*. Pushchino: IMPB RAS. Article: e36. DOI: 10.17537/icmbb20.31 [In Russian]
- Khosravipour A., Skidmore A.K., Skidmore M., Wang T., Hussin Y. 2014. Generating Pit-free Canopy Height Models from Airborne Lidar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 80(9): 863–872. DOI: 10.14358/PERS.80.9.863
- Koch B., Heyder U., Weinacker H. 2006. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72(4): 357–363. DOI: 10.14358/PERS.72.4.357
- 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
- Kovyazin V.F., Vinogradov K.P., Kitcenko A.A., Vasilyeva E.A. 2020. Airborne laser scanning for clarification of the valuation indicators of forest stands. *Russian Forestry Journal* 6: 42–54. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-42-54 [In Russian]
- Krisanski S., Taskhiri M.S., Turner P. 2020. Enhancing Methods for Under-Canopy Unmanned Aircraft System Based Photogrammetry in Complex Forests for Tree Diameter Measurement. *Remote Sensing* 12(10): 1652. DOI: 10.3390/rs12101652
- Li W., Guo Q., Jakubowski M.K., Kelly M. 2012. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 78(1): 75–84. DOI: 10.14358/PERS.78.1.75
- 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 3: 1–12. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-12 [In Russian]
- Medvedev A.A., Telnova N.O., Kudikov A.V., Alekseenko N.A. 2020. Use of photogrammetric point clouds for the analysis and mapping of structural variables in sparse northern boreal forests. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* 17(1): 150–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163 [In Russian]
- Messinger M., Gregory P., Asner G.P., Silman M. 2016. Rapid assessment of Amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems. *Remote Sensing* 8(8): 615. DOI: 10.3390/rs8080615
- 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
- Mohan M., Silva C.A., Klauberg C., Jat P., Catts G., Cardil A., Hudak A.T., Dia M. 2017. Individual tree detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest. *Forests* 8(9): 340. DOI: 10.3390/f8090340
- Nunes M.H., Ewers R.M., Turner E.C., Comes D.A. 2017. Mapping Aboveground Carbon in Oil Palm Plantations Using LiDAR: A Comparison of Tree-Centric versus Area-Based Approaches. *Forests* 9(8): 816. DOI: 10.3390/rs9080816
- 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
- Pajares G. 2015. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 81(4): 281–330. DOI: 10.14358/PERS.81.4.281
- 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
- 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
- Popescu S., Wynne R. 2004. Seeing the Trees in the Forest: Using Lidar and Multispectral Data Fusion with Local Filtering and Variable Window Size for Estimating Tree Height. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70(5): 589–604. DOI: 10.14358/PERS.70.5.589
- Puliti S., Ørka H.O., Gobakken T., Næsset E. 2015. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing* 7(8): 9632–9654. DOI: 10.3390/rs70809632
- QGIS Development Team. 2019. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. Available from: <http://qgis.osgeo.org>
- 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/>
- Roussel J.R., Auty D., De Boissieu F., Meador A.S., Jean-François B. 2020. *Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications. Package 'lidR'. Version 2.2.2*. Available from: <https://CRAN.R-project.org/package=lidR>
- Sannikov P.Yu., Andreev D.N., Buzmakov S.A. 2018. Identification and analysis of deadwood using an unmanned aerial vehicle. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* 15(3): 103–113. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-103-113 [In Russian]
- Shashkov M., Ivanova N., Shanin V., Grabarnik P. 2019. Ground Surveys Versus UAV Photography: The Comparison of Two Tree Crown Mapping Techniques. In: I. Bychkov, V. Voronin (Eds.): *Information Technologies in the Research of Biodiversity*. Cham: Springer. P. 48–56. DOI: 10.1007/978-3-030-11720-7_8
- Silva C.A., Hudak A.T., Vierling L.A., Loudermilk E.L., O'Brien J.J., Hiers J.K., Jack S.B., Gonzalez-Benecke C., Lee H., Falkowski M.J., Khosravipour A. 2016. Imputation of individual longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) tree attributes from field and LiDAR data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 42(5): 554–573. DOI: 10.1080/07038992.2016.1196582
- Sokolova M., Japkowicz N., Szpakowicz S. 2008. Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation. *Proceedings of the Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence*. Berlin/Heidelberg: Springer. P. 1015–1021.
- Zarco-Tejada P.J., Diaz-Varela R., Angileri V., Loudjani P. 2014. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy* 55: 89–99. DOI: 10.1016/j.eja.2014.01.004
- Zaugolnova L.B. (Ed.). 2000. *Assessment and conservation of forest biodiversity in the reserves of European Russia*. Moscow: Nauchnyy Mir. 196 p. [In Russian]
- 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

STUDY OF PINE FOREST STAND STRUCTURE IN THE PRIOSKO-TERRASNY STATE NATURE BIOSPHERE RESERVE (RUSSIA) BASED ON AERIAL PHOTOGRAPHY BY QUADROCOPTER

Natalya V. Ivanova^{1,2,*} , Maxim P. Shashkov² , Vladimir N. Shanin² 

¹*Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Russia*

**e-mail: Natalya.dryomys@gmail.com*

²*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of RAS, Russia*

In this paper, we investigated three pine (*Pinus sylvestris*) forest plots (each of 50 × 50 m), different by age and composition, located in the Priosko-Terrasny State Nature Biosphere Reserve (Moscow Region, Russia). This study was aimed to evaluate the forest stand attributes based on the photogrammetric point clouds and canopy height models (CHM). For aerial photography, we used the unmanned aerial vehicle (UAV) quadcopter DJI Phantom 4. At the first step, we used Agisoft Metashape software for the building of dense photogrammetric point clouds and orthophotoplans. Then we used the *lidR* package in the R environment for processing of dense point clouds. We used a cloth simulation filter for classification of ground points, spatial interpolation algorithm *tin* for creating a normalised dataset, and the algorithm *lmf* (local maximum filter) for individual tree detection and tree height assessment. For accuracy assessment, we collected field-based data, and calculated recall (*r*), precision (*p*), and F-score (*F*). Finally, we calculated CHMs (30 cm/pixel) derived from dense point clouds using the pit-free algorithm. To address the value of UAV data for delineating tree crowns, we compared the outputs of CHM data using two common algorithms (watershed and region-growing), and the result of manual orthophotoplans vectorisation. We obtained a high accuracy of individual tree detection. The algorithm found 46.7% to 87.5% of trees accounted on the sample plots by the field-based surveys. The recall (*r*) value varied from 0.5 to 0.9. The value of *p* varied from 0.9 to 1.0. The *F*-score, considering both factors (*p* and *r*), varied from 0.7 to 0.9. The highest accuracy was obtained in the site with a single-layer stand, where large trees with well-distinct tree crowns dominated. Spatial heterogeneity of tree stands reduces the accuracy of tree detection. We also found that tree heights estimated on the dense clouds were well matched with tree heights measured in the field. This dependency was described by the linear regression of $y = 0.99x$, $R^2 = 0.99$. With both the watershed and region-growing algorithms, the total crown area estimation often exceeded the results of orthophotoplans manual vectorisation, where differences reached 25.1%. Differences between two delineation algorithms varied from 0.2% to 19.7% for the same sites. More accurate results were obtained for plots with lesser density of tree stands. Overall, our results have shown the potential of using photogrammetric point clouds for estimating tree attributes (heights and density) in single-layer pine stands. Widely used tree crown segmentation algorithms do not provide reliable estimates of the crown projection area, and more accurate results could be obtained after further improvement of the technique.

Key words: Agisoft Metashape, digital models of tree canopy heights, lidR, photogrammetry point clouds, UAV