

УДК 528.88: 504.062
doi: 10.17223/19988591/54/8

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

¹ Институт математических проблем биологии РАН – филиал
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Пуцзино, Россия

² Институт физико-химических и биологических проблем
почвоведения ФИЦ ПНЦБИ РАН, г. Пуцзино, Россия

Определение характеристик смешанных древостоев по данным аэрофотосъёмки с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда
(проект № 18-14-00362-П). Анализ данных выполнен Н.В. Ивановой частично
в рамках бюджетной темы ИМПБ РАН – филиала ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

*Оценены характеристики смешанного древостоя по данным, полученным с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) – квадрокоптера. Исследования проведены на постоянной пробной площади 100×100 м в Приокско-Тerrasном биосферном заповеднике (Московская обл.), где ранее наземными методами картографировано расположение деревьев и проекций их крон. По цифровой модели высот древесного полога, построенной на основе данных аэрофотосъёмки, выполнен автоматический поиск деревьев и получены оценки их высот. Сопоставление результатов с данными наземных исследований и ортофотопланом показало, что из 241 найденного алгоритмом дерева 175 обнаружены корректно (72,6%). Использованный метод позволил автоматически выделить большинство деревьев в пологе леса. Определение положения хвойных деревьев (сосны и ели) почти всегда являлось корректным. При детектировании лиственных деревьев (в основном берёзы) в пределах одной кроны алгоритм часто находил несколько вершин, соответствующих на самом деле крупным скелетным ветвям. Высоты деревьев, оцененные автоматически по данным аэрофотосъёмки, хорошо согласовывались с высотами, измеренными наземными методами. Для корректно детектированных деревьев среднее значение высоты, полученное по данным аэрофотосъёмки, составило 25,0±4,8 м, по данным наземных исследований – 25,3±5,2 м. Зависимость между данными аэрофотосъёмки и полевыми измерениями соответствовала линейной модели ($y=k*x$, $R^2=0,99$, $k=0,98$). Полученные результаты показывают перспективность использования данных БПЛА для оценки таксационных характеристик древостоев, тем не менее для получения надежных оценок требуется верификация полученных автоматически данных.*

Ключевые слова: БПЛА; цифровая модель высот древесного полога; автоматическое детектирование деревьев; смешанные леса

Для цитирования: Иванова Н.В., Шашков М.П., Шанин В.Н. Определение характеристик смешанных древостоев по данным аэрофотосъёмки с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2021. № 54. С. 158–175. doi: 10.17223/19988591/54/8

Введение

Важное направление развития методов дистанционного зондирования Земли – использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В последние годы эта технология все шире применяется в исследованиях лесных экосистем [1, 2]. Востребованность данных БПЛА в этой области обусловлена несколькими причинами. Во-первых, такой подход позволяет быстро получить информацию для больших площадей (в десятки и более га) при низких трудозатратах, что делает данные БПЛА важным дополнением к традиционным наземным методам исследований [3–5]. Во-вторых, двухмерные изображения (ортофотопланы), являющиеся результатом обработки данных аэрофотосъемки, имеют высокое пространственное разрешение (до 1–3 см на местности), что делает их важным источником для визуального и автоматического дешифрирования. Фотограмметрическая обработка изображений позволяет строить трехмерные модели местности, которые являются основой для дальнейшего анализа данных.

Трехмерные цифровые модели и ортофотопланы широко применяются для изучения механизмов лесных сукцессий [6–9], исследования структуры древостоев [10–12], оценки наземной биомассы лесной растительности [5, 13], определения характеристик отдельных деревьев [4, 14–21]. Важно отметить, что большинство отечественных исследователей в данной предметной области работает с ортофотопланами (иногда с привлечением мультиспектральной съемки) [6, 12, 14, 21, 22], тогда как полученные на основе фотограмметрической обработки изображений [7, 12, 23, 24] или методом воздушного лазерного сканирования [25] трехмерные облака точек используются реже. В то же время зарубежными исследователями широко применяются методы анализа облаков точек и трехмерных цифровых моделей. Значительная часть подобных исследований выполнена в управляемых лесах с одноярусными одновидовыми древостоями, часто с регулярной схемой посадки [19, 26–31]. Показана перспективность использования такого подхода для оценки характеристик отдельных деревьев и древостоев в целом.

Цель исследования – определение некоторых характеристик смешанных древостоев по данным аэрофотосъемки при помощи БПЛА и оценка качества результатов по данным наземных измерений.

Материалы и методики исследования

В работе использованы данные наземного картографирования и результаты аэрофотосъемки постоянной пробной площади (ППП), расположенной на территории Приокско-Террасного государственного природного биосферного заповедника (г. о. Серпухов, Московская обл.). ППП размером 100×100 м (1 га) заложена в 2016 г., координаты центра 54,88876° с.ш., 37,56273° в.д. (WGS84). Методика наземных исследований подробно описана в работе В.Н. Шанина с соавт. [32] и заключалась в следующем: при за-

кладке ППП картографировано положение всех деревьев с диаметром ствола >6 см с помощью дальномера-угломера TruPulse 360В, для каждого живого дерева измерены высота и 4 радиуса проекции кроны от ствола по сторонам света, оценены принадлежность к одному из классов Крафта, а также некоторые другие характеристики. Для деревьев разных видов, относящихся к разным классам Крафта, выборочно определен возраст при помощи возрастного бура. По данным наземных исследований установлено, что древостой на ППП смешанный, в первом ярусе преобладают сосна (*Pinus sylvestris* L.) и берёза (*Betula* spp.), единично участвует осина (*Populus tremula* L.). Второй ярус образован елью (*Picea abies* (L.) Н.Karst.), липой (*Tilia cordata* Mill.) и дубом (*Quercus robur* L.). В пологе леса имеются крупные окна, возникшие в результате усыхания ели (последствия засухи 2010 г. и повреждения короедом-типографом *Ips typographus* (Linnaeus, 1758)). Средний возраст сосны в древостое 113 лет, берёзы – 100 лет, ели – 78 лет. План-схема проекций крон учетных деревьев представлена на рис. 1, число деревьев разных классов Крафта в табл. 1.

Аэрофотосъёмка ППП проведена 12 октября 2017 г. Выбор такого срока обусловлен тем, чтобы, с одной стороны, получить достаточное для дальнейшей обработки число точек класса «земная поверхность», так как в это время большинство растений уже не вегетирует, а с другой – контрастный растровый ортофотоплан с деревьями в осенней окраске для минимизации ошибок при визуальном дешифрировании. Съёмка проведена БПЛА – квадрокоптером DJI Phantom 4 в режиме mosaic flight mode с 90% перекрытием фотографий с высоты 68 м. Технические характеристики камеры квадрокоптера представлены в табл. 2. Для предотвращения краевого эффекта съёмка выполнена с буферной зоной шириной около 50 м.

Плотное облако точек и ортофотоплан построены в программе фотограмметрической обработки Agisoft Metashape [33] – отечественном продукте, который широко применяется в мире [9, 24, 27, 29]. Затем облако точек обработано в среде статистического программирования R [34] для получения модели высот древесного полога (canopy height model, СНМ). Используются специализированные пакеты, предназначенные для анализа данных воздушного лазерного сканирования, для которых используются те же методы, что и для обработки фотограмметрических облаков точек. Последовательность этапов работы с плотными облаками точек для получения СНМ подробно описана в литературе [29, 35].

На первом этапе использованы функции пакета lidR. Сначала выделены точки, относящиеся к классу «земная поверхность», с помощью функции *lasground()* по алгоритму cloth simulation filtering [36].

Этот алгоритм разработан специально для обработки данных природных (не городских) территорий и позволяет учесть особенности микрорельефа за счет разной эластичности виртуальной ткани, которая опускается на перевернутое облако точек.

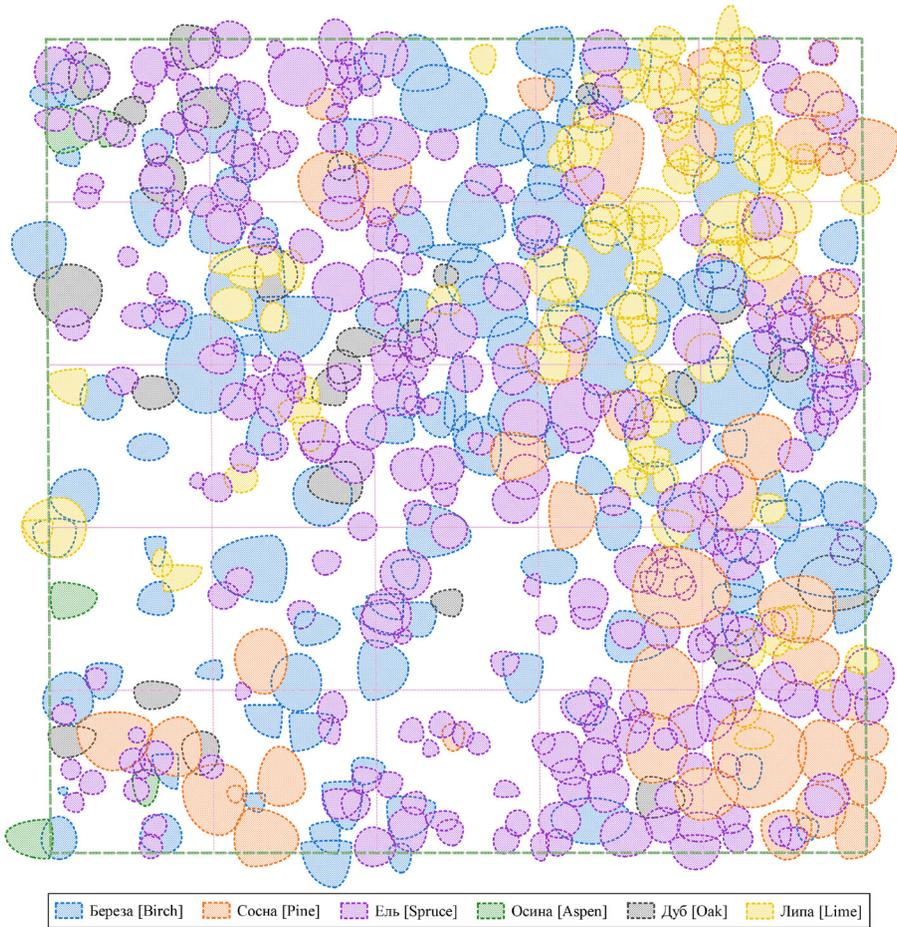


Рис. 1. План-схема проекций крон на постоянной пробной площадке (ППП)
Fig 1. The scheme of tree crown projections on the permanent sampling plot

Таблица 1 [Table 1]

Число деревьев разных классов Крафта, учтенных на ППП
[Number of trees of each Kraft's class observed on the permanent sampling plot]

Деревья [Trees]	Классы Крафта [Kraft's classes]				
	I	II	III	IV	V
Береза [Birch]	12	74	35	13	0
Сосна [Pine]	21	21	3	2	0
Ель [Spruce]	2	19	61	180	5
Осина [Aspen]	1	3	1	0	0
Дуб [Oak]	0	2	15	11	0
Липа [Lime]	0	2	12	76	12
Всего [Total]	36	121	127	282	17

Таблица 2 [Table 2]

Технические характеристики камеры квадрокоптера DJI Phantom 4
[Technical parameters of DJI Phantom 4 camera]

Характеристика [Parameter]	Значение [Value]
Камера [Camera]	FC 330
Матрица [Image sensor]	1 / 2.3" CMOS
Объектив [Camera lens]	FOV 94° 20 мм
Диафрагма [Aperture]	f / 2.8
Диапазон ISO [ISO range]	100–1600
Цветовое пространство [RGB color space]	sRGB
Скорость затвора [Shutter speed]	1 / 8000 s
Размер изображения, пикселей [Photo size]	12 Мп, 4000 × 3000
Формат изображений [Image format]	JPEG, RAW

Затем выполнена нормализация набора данных с помощью функции *lasnormalize()* по алгоритму tin, в процессе которой значения высот нормированы на уровень земной поверхности. Этот алгоритм пространственной интерполяции на основе триангуляции Делоне выполняет линейную интерполяцию внутри каждого треугольника. Далее построена CHM по алгоритму pit-free [37] с помощью функции *grid_canopy()*. Этот алгоритм основан на вычислении триангуляций на разных высотах и позволяет избежать пикселей с неинтерпретированной высотой. На следующем этапе по цифровой модели высот выделены отдельные деревья. Для поиска вершин деревьев и определения их высот использован алгоритм, реализованный в функции *FindTreesCHM()* пакета rLiDAR [35]. Алгоритм основан на поиске локальных максимумов при помощи скользящего окна заданного размера с учетом минимальной возможной высоты дерева. В результате предварительных запусков функции с разными сочетаниями этих аргументов минимальная высота для выделения отдельных деревьев принята в 1,37 м, размер окна 5×5 пикселей.

Полученные автоматически координаты вершин конвертированы в точечный векторный файл. Далее в среде QGIS [38] при визуальном сопоставлении полученного слоя с ортофотопланом и данными наземной съемки экспертно оценены результаты автоматического поиска вершин деревьев. Дерево считалось найденным корректно, если автоматически найденная вершина лежала в пределах кроны соответствующего дерева на ортофотоплане. Если в пределах кроны детектировано несколько вершин, дерево считалось найденным корректно, но для дальнейшего анализа оставляли маркер только одной вершины с наибольшим значением высоты (вычисленным автоматически), другие вершины учтены как ложные, и соответствующие точки удалены вручную.

Затем рассчитана доля корректно детектированных алгоритмом деревьев относительно всех найденных автоматически. Для деревьев I–II классов Крафта рассчитана доля корректно найденных алгоритмом деревьев относительно учтенных наземными методами. Для всех корректно детектированных алгоритмом живых деревьев выполнено сравнение высот, оцененных по цифровой модели высот, и полученных в результате наземных измерений.

Результаты исследования и обсуждение

В ходе работы выполнена фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки, на основе которой построены плотное облако точек и ортофотоплан, затем рассчитана цифровая модель высот древесного полога, по которой выполнен автоматический поиск деревьев и оценены их высоты, после чего проведена верификация результатов по данным наземных исследований.

Для построения плотного облака точек и ортофотоплана использовано 501 изображение. Получено плотное облако точек, содержащее 3,57 млн точек плотностью 163,7 точки/м². После его обработки получены цифровая модель высот с разрешением 50 см/пиксель и ортофотоплан (3 см/пиксель). По модели высот в пределах ППП автоматически детектировано 241 дерево (рис. 2, А).

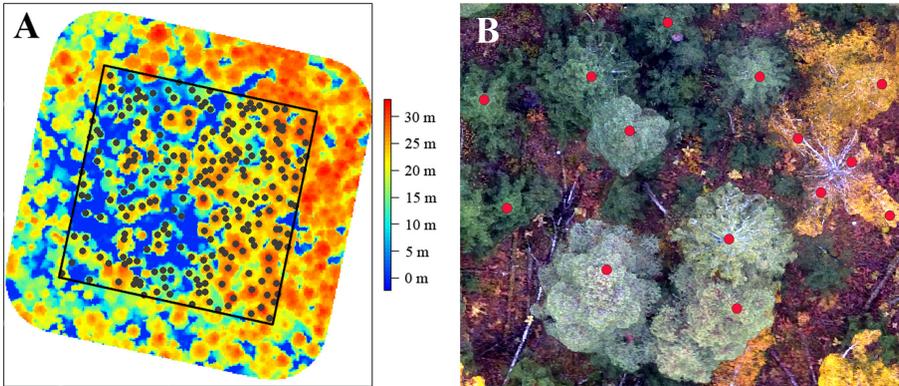


Рис. 2. Результаты автоматического поиска деревьев по алгоритму [18].

А – найденные алгоритмом деревья на цифровой модели высот. Рамка – границы ППП;

В – найденные алгоритмом деревья на фрагменте ортофотоплана

[Fig 2. Trees detected by algorithm [18].

A - Detected trees in the CHM. Frame - Borders of the permanent sampling plot;

B - Detected trees in the orthophoto mosaic image]

Сопоставление полученных результатов с ортофотопланом показало лишь частичное соответствие вершин, найденных автоматически, и деревьев, визуально детектируемых на ортофотоплане (рис. 2, В, табл. 3). Доля корректно детектированных деревьев (от всех найденных алгоритмом) составила 72,6% (175 деревьев). Выяснено, что автоматическое определение положения вершин хвойных деревьев почти всегда выполнено корректно. Все найденные автоматически вершины, соответствующие деревьям ели, найдены алгоритмом правильно. Число ложных срабатываний для сосны невелико. При поиске вершин лиственных деревьев (в основном берёзы) в пределах одной кроны алгоритм, как правило, находил несколько ложных вершин, соответствующих на самом деле крупным скелетным ветвям, в ре-

зультате чего одно дерево учитывалось как несколько (рис. 2, В). Вершины других лиственных деревьев (осины, липы и дуба) определены алгоритмом с разной степенью корректности, но небольшое число этих деревьев не позволило сделать выводы о качестве их обнаружения. Сухостойные деревья успешно детектированы по цифровой модели высот. Единственное ложное срабатывание соответствовало крупной скелетной ветви сухостойного дуба.

Таблица 3 [Table 3]

Качество автоматического поиска вершин деревьев
[The quality of automatic detection of trees]

Деревья [Trees]	Общее число автоматически детектированных деревьев, шт. [Total number of trees detected by algorithm, ind.]	Число корректно детектированных деревьев, шт. [Number of correctly detected trees, ind.]	Доля корректно детектированных деревьев [Percentage of correctly detected trees], %
Живые деревья [Living trees]			
Береза [Birch]	134	78	58,2
Сосна [Pine]	50	43	86,0
Ель [Spruce]	30	30	100
Осина [Aspen]	3	3	100
Дуб [Oak]	4	2	50,0
Липа [Lime]	2	2	100
Всего [Total]	223	158	70,9
Сухостойные деревья [Dead trees]			
Ель [Spruce]	16	16	100
Другие деревья [Other trees]	2	1	50,0
Всего [Total]	18	17	94,4

На следующем этапе выполнено сравнение полученных автоматически результатов поиска вершин деревьев с фактическим числом деревьев на ППП, учтенных наземными методами. В данном случае рассмотрены только деревья, относящиеся к пологу древостоя (I и II классы Крафта), так как они визуально могли быть выделены на ортофотоплане. На момент проведения аэрофотосъемки на ППП насчитывалось 157 деревьев I и II классов Крафта. Из них алгоритмом корректно детектированы 128 (81,5%), т.е. использованный нами метод позволяет учесть большинство деревьев в пологе древостоя. Более низкие деревья детектированы автоматически только в тех случаях, когда они росли в окнах в пологе и их кроны не перекрывались с другими деревьями. В частности, из 127 деревьев III класса Крафта автоматически найдено только 30. Алгоритмом также обнаружены 17 из 22 учтенных наземными методами сухостойных деревьев.

Таким образом, использованный нами метод автоматического поиска вершин позволяет выделить большинство деревьев в пологе, но наиболее надежные оценки дает при детектировании хвойных деревьев. Эти результаты согласуются с выводами других исследователей [5, 7, 29, 35]. Присутствие в древостое старых лиственных деревьев приводит к завышению получа-

емых автоматически оценок и требует дополнительной верификации. При этом известно, что молодые лиственные деревья, для которых характерна одна, хорошо выраженная вершина, по цифровой модели высот можно детектировать с высокой точностью. Согласно литературным данным [7], точность автоматического распознавания вершин в молодых березовых лесах (до 20 лет) составляет 70–90%. Для успешного детектирования лиственных деревьев старших классов возраста по данными аэрофотосъемки, вероятно, более эффективно использовать ортофотопланы (т.е. растровые изображения цветовой модели RGB (red, green, blue)) и алгоритмы неконтролируемой классификации, такие как метод *k*-средних и ISODATA [39, 40].

Высоты, полученные алгоритмом по данным аэрофотосъемки, хорошо согласовывались с высотами, измеренными наземными методами. Для выборки всех корректно детектированных автоматически деревьев среднее значение высоты по данным аэрофотосъемки составило $25,0 \pm 4,8$ м (мин. 8,2 м, макс. 32,9 м), по данным наземных исследований – $25,3 \pm 5,2$ м (мин. 5,9 м, макс. 34,0 м). Значимых различий между средними значениями высот, полученных обоими методами, не выявлено (парный критерий Стьюдента, $p=0,049$). Зависимость между данными аэрофотосъемки и полевыми измерениями соответствовала линейной модели $y=k*x$ ($R^2=0,99$, $k=0,98$) (см. рис. 2). Высоты, полученные по данным аэрофотосъемки, в среднем на 1,5% ниже полученных при наземных измерениях.

Сравнения на уровне отдельных видов деревьев показали, что наибольшие различия высот, измеренных двумя методами, характерны для березы, наименьшие – для ели, сосна занимает промежуточное положение (рис. 3, А). Данный результат можно объяснить особенностями морфологии крон деревьев разных видов. Наличие крупных скелетных ветвей у березы не только приводит к ложным срабатываниям алгоритма, но и затрудняет визуальное выделение вершины при наземных измерениях, что может вносить ошибку в определение высоты. Как видно из рис. 3, В, результаты наземных измерений высот березы и сосны более вариабельны по сравнению с оценками, полученными автоматически. Расчет коэффициентов вариации (табл. 4) также показал, что высоты березы и сосны, измеренные наземными методами, варьируют несколько больше, чем высоты, оцененные автоматически.

Крона ели, как правило, имеет хорошо распознаваемую вершину. Значения коэффициентов вариации высот ели, оцененных двумя методами, практически совпадают. Это означает, что наземные измерения высот, выполненные по одной методике, имеют разную точность для деревьев разных видов, что важно учитывать при оценке данных аэрофотосъемки.

В то же время значения высот, полученные автоматически по цифровой модели, по всей видимости, также имеют погрешности. Например, неизвестно, насколько полно учитываются особенности микрорельефа при определении точек класса «земная поверхность» и последующей нормализации облака точек. Для изучения этих вопросов требуются дополнительные исследования.

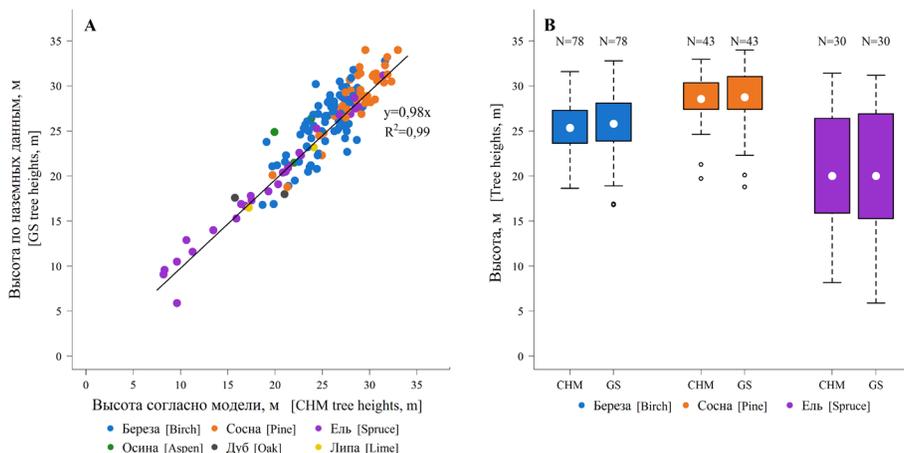


Рис. 3. Соотношение высот деревьев по данным аэрофотосъемки (CHM) и наземным измерениям (GS). N – число измерений
[Fig. 3. Relationship between estimated (CHM) tree heights and the ground survey (GS), N - Number of measurements]

Таблица 4 [Table 4]

Коэффициенты вариации высот деревьев разных видов, оцененных по данным аэрофотосъемки и наземным измерениям
[Coefficient of variation of tree heights obtained by CHM and ground survey]

Коэффициенты вариации [Coefficients of variation]	Береза [Birch]	Сосна [Pine]	Ель [Spruce]
Коэффициент вариации высоты, оцененной автоматически по данным аэрофотосъемки [Coefficient of variation for tree height obtained by CHM]	10,1% (N = 78)	9,4% (N = 43)	34,5% (N = 30)
Коэффициент вариации высоты, измеренной наземными методами [Coefficient of variation for tree height obtained by ground survey]	12,9% (N = 78)	11,2% (N = 43)	34,3% (N = 30)

Заключение

Данное исследование – одно из первых в России по применению цифровых моделей высот древесного полога, полученных на основе данных аэрофотосъемки квадрокоптером, для изучения структуры древостоев в смешанных лесах. На основе сопоставления данных наземных исследований и результатов анализа материалов аэрофотосъемки постоянной пробной площади в Приокско-Тerrasном биосферном заповеднике выяснено, что по дистанционным данным получены приемлемые оценки численности деревьев и их высот. Автоматические методы поиска вершин позволяют выявить большинство деревьев в пологе леса. При этом качество детектирования вершин различается для деревьев разных видов. Вершины хвойных (ель и сосна) обнаружены с высокой точностью. При детектировании ли-

ственных деревьев (березы) в пределах одной кроны алгоритмом часто выделяются ложные вершины, соответствующие крупным скелетным ветвям. Результаты свидетельствуют о необходимости верификации получаемых автоматически данных при работе с материалами аэрофотосъемки многовидовых древостоев. Установлено хорошее соответствие между высотами деревьев, измеренными наземными методами и полученными по данным аэрофотосъёмки. Сделаны предварительные выводы о различиях в качестве оценки высот деревьев разных видов. Показано, что наземные измерения высот крупных деревьев березы и сосны, у которых часто сложно визуально определить вершину, более вариабельны по сравнению с дистанционными оценками. Для ели, крона которой имеет хорошо распознаваемую вершину, подобных различий не выявлено.

В целом полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования аэрофотосъемки при помощи квадрокоптера для оценки таксационных характеристик древостоев. Тем не менее существующие алгоритмы поиска вершин деревьев пока не дают высококачественных результатов при обработке данных съемки смешанных древостоев. Для широкого применения этих методов в лесоведении и лесном хозяйстве необходимо совершенствование алгоритмов и методов обработки данных.

Литература

1. Anderson K., Gaston K.J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013. Vol. 11, № 3. PP. 138–146. doi: [10.1890/120150](https://doi.org/10.1890/120150)
2. Pajares G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAV) // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2015. Vol. 81, № 4. PP. 281–330. doi: [10.14358/PERS.81.4.281](https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281)
3. Dandois J., Ellis E.C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 136. PP. 259–276. doi: [10.1016/j.rse.2013.04.005](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.005)
4. Puliti S., Ole Orka H., Gobakken T., Naesset E. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7, № 8. PP. 9632–9654. doi: [10.3390/rs70809632](https://doi.org/10.3390/rs70809632)
5. Messinger M., Gregory P., Asner G.P., Silman M. Rapid assessment of Amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8, № 8. PP. 1–15. doi: [10.3390/rs8080615](https://doi.org/10.3390/rs8080615)
6. Денисов С.А., Домрачев А.А., Елсуков А.С. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*. 2016. № 4(32). С. 34–46. doi: [10.15350/2306-2827.2016.4.34](https://doi.org/10.15350/2306-2827.2016.4.34)
7. Медведев А.А., Тельнова Н.О., Кудиков А.В. Дистанционный высокодетальный мониторинг динамики зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель лесной растительностью // *Вопросы лесной науки*. 2019. № 3. С. 1–12. doi: [10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-12](https://doi.org/10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-12)
8. Jaskierniak D., Kuczera G., Benyon R.G., Lucieir A. Estimating tree and stand sapwood area in spatially heterogeneous southeastern Australian forests // *Journal of Plant Ecology*. 2016. Vol. 9, № 3. PP. 272–284. doi: [10.1093/jpe/rtv056](https://doi.org/10.1093/jpe/rtv056)

9. Zhang J., Hud J., Liane J., Fan Z., Ouyang X., Ye W. Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring // *Seeing the forest*. 2016. Vol. 198. PP. 60–69. doi: [10.1016/j.biocon.2016.03.027](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.03.027)
10. Hudak A.T., Haren A.T., Crookston N.L., Liebermann R.J., Ohmann J.L. Imputing forest structure attributes from stand inventory and remotely sensed data in western Oregon, USA // *Forest Science*. 2014. Vol. 60. PP. 253–269. doi: [10.5849/forsci.12-101](https://doi.org/10.5849/forsci.12-101)
11. Hansen E.H., Gobakken T., Bollandsås O.M., Zahabu E., Næsset E. Modeling aboveground biomass in dense tropical submontane rainforest using airborne laser scanner data // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7, № 1. PP. 788–807. doi: [10.3390/rs70100788](https://doi.org/10.3390/rs70100788)
12. Ершов Д.В., Гаврилюк Е.А., Белова Е.И., Никитина А.Д. Определение породной структуры лесного участка по ортофотопланам беспилотной аэрофотосъемки // *Актуальные проблемы современного лесоводства. Вторые Международные чтения памяти Г.Ф. Морозова. Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2020. С. 141–152.*
13. Li W., Niu Z., Chen H., Li D., Wu M., Zhao W. Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system // *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 67. PP. 637–648. doi: [10.1016/j.ecolind.2016.03.036](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.036)
14. Богданов А.П., Алешко Р.А., Ильинцев А.С. Выявление взаимосвязи диаметра крон деревьев с различными таксационными показателями в северо-таежном лесном районе // *Вопросы лесной науки*. 2019. Т. 2, № 4. С. 1–10. doi: [10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-10](https://doi.org/10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-10)
15. Данилов М.С., Никитина А.Д., Тихонова Е.В. Использование аэрофотосъемки беспилотными летательными аппаратами для определения характеристик древостоя // *Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник научных трудов XXI Международной научно-практической конференции: в 3 т. Т. 1. М. : РУДН, 2020. С. 89–94.*
16. Zarco-Tejada P.J., Diaz-Varela R., Angileri V., Loudjani P. 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*. 2014. Vol. 55. PP. 89–99. doi: [10.1016/j.eja.2014.01.004](https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.01.004)
17. Mohan M., Silva C.A., Klauber C., Jat P., Catts G., Cardil A., Hudak A.T., Dia M. Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest // *Forests*. 2017. Vol. 8, № 9. PP. 1–17. doi: [10.3390/f8090340](https://doi.org/10.3390/f8090340)
18. Birdal A.C., Avdan U., Türk T. Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2017. Vol. 8. PP. 1144–1156. doi: [10.1080/19475705.2017.1300608](https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1300608)
19. Bennett G., Hardy A., Bunting P., Morgan P., Fricker A. A transferable and effective method for monitoring continuous cover forestry at the individual tree level using UAVs // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, № 13. PP. 1–21. doi: [10.3390/rs12132115](https://doi.org/10.3390/rs12132115)
20. Krisanski S., Taskhiri M.S., Turner P. Enhancing methods for under-canopy unmanned aircraft system based photogrammetry in complex forests for tree diameter measurement // *Remote Sensing*. 2020. Vol 12, № 10. PP. 1–21. doi: [10.3390/rs12101652](https://doi.org/10.3390/rs12101652)
21. Домнина Е.А., Тимонов А.С., Кантор Г.Я., Кислицына А.П., Савиных В.П. Опыт составления детальной карты растительности пойменного луга // *Теоретическая и прикладная экология*. 2017. № 1. С. 42–49. doi: [10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163)
22. Санников П.Ю., Андреев Д.Н., Бузмаков С.А. Выявление и анализ сухостоя при помощи беспилотного летательного аппарата // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 3. С. 103–113. doi: [10.21046/2070-7401-2018-15-3-103-113](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-103-113)
23. Медведев А.А., Тельнова Н.О., Кудиков А.В., Алексеенко Н.А. Анализ и картографирование структурных параметров редкостойных северотаежных

- лесов на основе фотограмметрических облаков точек // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 1. С. 150–163. doi: [10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163)
24. Алешко Р.А., Алексеева А.А., Шошина К.В., Богданов А.П., Гурьев А.Т. Разработка методики актуализации информации о лесном участке с использованием снимков со спутников и малых БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 87–99. doi: [10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99)
 25. Ковязин В.Ф., Виноградов К.П., Васильева Е.А., Киценко А.А. Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев // Известия вузов. Лесной журнал. 2020. № 6. С. 42–54. doi: [10.37482/0536-1036-2020-6-42-54](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-42-54)
 26. Zhou J., Proisy C., Descombes X., Le Maire G., Nouvellon Y., Stape J.L., Viennois G., Zerubia J., Couteron P. Mapping local density of young *Eucalyptus* plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 301. PP. 129–141. doi: [10.1016/j.foreco.2012.10.007](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.007)
 27. Zahawi R.A., Dandois J.P., Holl K.D., Nadwodny D., Reid J.L., Ellis E.C. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery // Biological Conservation. 2015. Vol. 186. PP. 287–295. doi: [10.1016/j.biocon.2015.03.031](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.03.031)
 28. Miller E., Dandois J.P., Detto M., Hall J.S. Drones as a tool for monoculture plantation assessment in the stepland tropics // Forests. 2017. Vol. 8, № 5. PP. 1–14. doi: [10.3390/f8050168](https://doi.org/10.3390/f8050168)
 29. Otero V., Van De Kerchove R., Satyanarayana B., Martínez-Espinosa C., Amir Bin Fisol M., Rodila Bin Ibrahim M., Sulong I., Mohd-Lokman H., Lucas R., Dahdouh-Guebas F. 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. 2018. Vol. 411. PP. 35–45. doi: [10.1016/j.foreco.2017.12.049](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.049)
 30. Eysn L., Hollaus M., Lindberg E., Berger F., Monnet J.-M., Dalponte M., Kobal M., Pellegrini M., Lingua E., Mongus D., Pfeifer P. A benchmark of LiDAR-based single tree detection methods using heterogeneous forest data from the alpine space // Forests. 2015. Vol. 6, № 5. PP. 1721–1747. doi: [10.3390/f6051721](https://doi.org/10.3390/f6051721)
 31. Picos J., Bastos G., Míguez D., Alonso L., Armesto J. Individual tree detection in a *Eucalyptus* plantation using unmanned aerial vehicle (UAV)-LiDAR // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. PP. 1–17. doi: [10.3390/rs12050885](https://doi.org/10.3390/rs12050885)
 32. Шанин В.Н., Шашков М.П., Иванова Н.В., Быховец С.С., Грабарник П.Я. Исследование структуры древостоев и микроклиматических условий под пологом леса на постоянной пробной площади в Приокско-Тerrasном заповеднике // Труды Приокско-Тerrasного заповедника. Вып. 7. М. : КМК, 2018. С. 68–80.
 33. Agisoft LLC. Agisoft Metashape (Version 1.5). Software. 2019. Available at: <https://www.agisoft.com/> (дата обращения: 17.01.2021).
 34. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria. 2019. Available at: <https://www.R-project.org/> (дата обращения: 17.01.2021).
 35. Silva C.A., Hudak A.T., Vierling L.A., Loudermilk E.L., O'Brien J.J., Hiers J.K., Khosravipour A. Imputation of individual Longleaf Pine (*Pinus palustris* Mill.) tree attributes from field and LiDAR Data // Canadian Journal of Remote Sensing. 2016. Vol. 42, № 5. PP. 554–573. doi: [10.1080/07038992.2016.1196582](https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1196582)
 36. Zhang W., Qi J., Wan P., Wang H., Xie D., Wang X., Yan G. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation // Remote Sensing. 2016. Vol. 8, № 6. PP. 1–22. doi: [10.3390/rs8060501](https://doi.org/10.3390/rs8060501)
 37. Khosravipour A., Skidmore A.K., Skidmore M., Wang T., Hussin Y. Generating pit-free canopy height models from airborne LiDAR // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2014. № 9. PP. 863–872. doi: [10.14358/PERS.80.9.863](https://doi.org/10.14358/PERS.80.9.863)

38. QGIS development team. QGIS geographic information system. Open source geospatial foundation project. 2019. Available at: <http://qgis.osgeo.org> (дата обращения 17.01.2021).
39. Dhodhi M.K., Saghri J.A., Ahmad I., Ul-Mustafa R. D-ISODATA: a distributed algorithm for unsupervised classification of remotely sensed data on network of workstations // Journal of Parallel and Distributed Computing. 1999. Vol. 59, № 2. PP. 280–301. doi: [10.1006/jpdc.1999.1573](https://doi.org/10.1006/jpdc.1999.1573)
40. Jin Y., Sung S., Lee D.K., Biging G.S., Jeong S. Mapping deforestation in North Korea using phenology-based multi-index and Random forest // Remote Sensing. 2016. Vol. 8, № 12. PP. 1–15. doi: [10.3390/rs8120997](https://doi.org/10.3390/rs8120997)

Поступила в редакцию 10.09.2020 г.; повторно 19.01.2021 г. и 15.04.2021 г.;
принята 27.05.2021 г.; опубликована 29.06.2021 г.

Авторский коллектив:

Иванова Наталья Владимировна, канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории вычислительной экологии, Институт математических проблем биологии РАН – филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (Россия, 142290, Московская область, г. Пушкино, ул. Проф. Виткевича, д. 1).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4199-5924>

E-mail: Natalya.dryomys@gmail.com

Шашков Максим Петрович, н.с. лаборатории моделирования экосистем, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения ФИЦ ПНЦБИ РАН (Россия, 142290, Московская область, г. Пушкино, ул. Институтская, д. 2).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1328-8758>

E-mail: Max.carabus@gmail.com

Шанин Владимир Николаевич, канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории моделирования экосистем, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения ФИЦ ПНЦБИ РАН (Россия, 142290, Московская область, г. Пушкино, ул. Институтская, д. 2).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8294-7796>

E-mail: Shaninvn@gmail.com

For citation: Ivanova NV, Shashkov MP, Shanin VN. Obtaining tree stand attributes from unmanned aerial vehicle (UAV) data: the case of mixed forests. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2021;54:158-175. doi: [10.17223/19988591/54/8](https://doi.org/10.17223/19988591/54/8)
In Russian, English Summary

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

¹*Institute of Mathematical Problems of Biology, Russian Academy of Sciences – The Branch of Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russian Federation*

²*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russian Federation*

Obtaining tree stand attributes from unmanned aerial vehicle (UAV) data: the case of mixed forests

Nowadays, due to the rapid development of lightweight unmanned aerial vehicles (UAV), remote sensing systems of ultra-high resolution have become available to many researchers. Conventional ground-based measurements for assessing tree stand attributes can be expensive, as well as time- and labor-consuming. Here, we assess whether remote sensing measurements with lightweight UAV can be more effective in comparison to ground survey methods in the case of temperate mixed forests.

The study was carried out at the Prioksko-Terrasny Biosphere Nature Reserve (Moscow region, Russia). This area belongs to a coniferous-broad-leaved forest zone. Our field works were carried out on the permanent sampling plot of 1 ha (100×100 m) established in 2016. The coordinates of the plot center are N 54.88876°, E 37.56273°

in the WGS 84 datum. All trees with DBH (diameter at breast height) of at least 6 cm (779 trees) were mapped and measured during the ground survey in 2016 (See Fig. 1 and Table 1). Mapping was performed with Laser Technology TruPulse 360B angle and a distance meter. First, polar coordinates of each tree trunk were measured, and then, after conversion to the cartesian coordinates, the scheme of the stand was validated on-site. Species and DBH were determined for each tree. For each living tree, we detected a social status class (according to Kraft). Also for living trees, we measured the tree height and the radii of the crown horizontal projection in four cardinal directions.

A lightweight UAV Phantom 4 (DJI-Innovations, Shenzhen, China) equipped with an integrated camera of 12Mp sensor was used for aerial photography in this study. Technical parameters of the camera are available in Table 2. The aerial photography was conducted on October 12, 2017, from an altitude of 68 m. The commonly used mosaic flight mode was used with 90% overlapping both for side and front directions. We applied Agisoft Metashape software for orthophoto mosaic image and dense point cloud building. The canopy height model (CHM) was generated with lidR package in R. We used *lasground()* function and cloth simulation filter for classification of ground points. To create a normalized dataset with the ground at 0, we used spatial interpolation algorithm *tin* based on a Delaunay triangulation, which performs a linear interpolation within each triangle, implemented in the *lasnormlise()* function. CHM was generated according to the pit-free algorithm based on the computation of a set of classical triangulations at different heights. The location and height of individual trees were automatically detected by the function *FindTreesCHM()* from the package rLIDAR in R. The algorithm implemented in this function is local maximum with fixed window size. Accuracy assessment of automatically detected trees (in QGIS software) was performed through visual interpretation of orthophoto mosaic and comparison with ground survey data. The number of correctly detected trees, omitted by the algorithm and not existing but detected trees were counted. As a result of aerial photography, 501 images were obtained. During these data processing with the Metashape, dense point cloud of 163.7 points / m² was generated. CHM with 0.5 m resolution was calculated.

According to the individual-tree detection algorithm, 241 trees were found automatically (See Fig. 2A). The total accuracy of individual tree detection was 73.9%. Coniferous trees (*Pinus sylvestris* and *Picea abies*) were successfully detected (86.0% and 100%, respectively), while results for birch (*Betula* spp.) required additional treatment. The algorithm correctly detected only 58.2% of birch trees due to false-positive trees (See Fig. 2B and Table 3). These results confirm the published literature data obtained for managed tree stands. Tree heights retrieved from the UAV were well-matched to ground-based method results. The mean tree heights retrieved from the UAV and ground surveys were 25.0±4.8 m (min 8.2 m, max 32.9 m) and 25.3±5.2 m (min 5.9 m, max 34.0 m), respectively (no significant difference, p-value=0.049). Linear regression confirmed a strong relationship between the estimated and measured heights ($y=k*x$, $R^2=0.99$, $k=0.98$) (See Fig. 3A). Slightly larger differences in heights estimated by the two methods were found for birch and pine; for spruce, the differences were smaller (See Fig. 3B and Table 4). We believe that ground measurements of birch and pine height are less accurate than for spruce due to different crown shapes of these trees. So, our results suggested that UAV data can be used for tree stand attributes estimation, but automatically obtained data require validation.

The paper contains 3 Figures, 4 Tables and 40 References.

Key words: UAV; canopy height model; tree detection; mixed forests.

Funding: This study was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 18-14-00362-P). The work of Natalya Ivanova was partly done in the framework of the Basic Scientific Research theme of the Institute of Mathematical Problems of

Biology, Russian Academy of Sciences – the Branch of Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences.

The Authors declare no conflict of interest.

References

1. Anderson K, Gaston K. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013;11(3):138-146. doi: [10.1890/120150](https://doi.org/10.1890/120150)
2. Pajares G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAV). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2015;81(4):281-330. doi: [10.14358/PERS.81.4.281](https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281)
3. Dandois J, Ellis EC. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*. 2013;136:259-276. doi: [10.1016/j.rse.2013.04.005](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.005)
4. Puliti S, Ole Orka H, Gobakken T, Naesset E. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing*. 2015;7(8):9632-9654. doi: [10.3390/rs70809632](https://doi.org/10.3390/rs70809632)
5. Messinger M, Gregory P, Asner GP, Silman M. Rapid assessment of Amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems. *Remote Sensing*. 2016;8(8):1-15. doi: [10.3390/rs8080615](https://doi.org/10.3390/rs8080615)
6. Denisov SA, Domrachev AA, Elsukov AS. Quadcopter practical application for forest regeneration monitoring. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature management*. 2016;4(32):34-46. doi: [10.15350/2306-2827.2016.4.34](https://doi.org/10.15350/2306-2827.2016.4.34) In Russian
7. Medvedev AA, Telnova NO, Kudikov AV. Highly detailed remote sensing monitoring of tree overgrowth on abandoned agricultural lands. *Voprosy lesnoy nauki = Forest Science Issues*. 2019;3:1-12. doi: [10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-12](https://doi.org/10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-12) In Russian
8. Jaskierniak D, Kuczera G, Benyon RG, Lucieer A. Estimating tree and stand sapwood area in spatially heterogeneous southeastern Australian forests. *J Plant Ecology*. 2016;9(3):272-284. doi: [10.1093/jpe/rtv056](https://doi.org/10.1093/jpe/rtv056)
9. Zhang J, Hud J, Liane J, Fan Z, Ouyang X, Ye W. Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. *Seeing the Forest*. 2016;198:60-69. doi: [10.1016/j.biocon.2016.03.027](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.03.027)
10. Hudak AT, Haren AT, Crookston NL, Liebermann RJ, Ohmann JL. Imputing forest structure attributes from stand inventory and remotely sensed data in western Oregon, USA. *Forest Science*. 2014;60:253-269. doi: [10.5849/forsci.12-101](https://doi.org/10.5849/forsci.12-101)
11. Hansen EH, Gobakken T, Bollandsås OM, Zahabu E, Næsset E. Modeling aboveground biomass in dense tropical submontane rainforest using airborne laser scanner data. *Remote Sensing*. 2015;7(1):788-807. doi: [10.3390/rs70100788](https://doi.org/10.3390/rs70100788)
12. Ershov DV, Gavriluk EA, Belova EI, Nikitina AD. Opredelenie porodnoy struktury lesnogo uchastka po ortofotoplanam bespilotnoy aerofotos"emki [Determination of the species structure of a forest area using orthophotoimages from unmanned aerial vehicles]. In: *Aktual'nye problemy sovremennogo lesovodstva. Vtorye mezhdunarodnye chteniya pamyati G. F. Morozova* [Actual problems of modern forestry. Second international readings in memory of G.F. Morozov (Republic of Crimea, Russia, 23-27 September, 2020)]. Saltykov AN, Boyko GE and Rogovoy VI, editors. Simferopol': IT «ARIAL» Publ.; 2020. pp. 141-152. In Russian
13. Li W, Niu Z, Chen H, Li D, Wu M, Zhao W. Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Ecological Indicators*. 2016;67:637-648. doi: [10.1016/j.ecolind.2016.03.036](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.036)

14. Bogdanov AP, Aleshko RA, Iltsev AS. Relationship between tree crown diameter and various taxation indicators in the North-taiga forest area. *Voprosy lesnoy nauki – Forest Science Issues*. 2019;2(4):1-10. doi: [10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-10](https://doi.org/10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-10) In Russian
15. Danilov MS, Nikitina AD, Tikhonova EV Use of aerial photography by unmanned aerial vehicles to determine stand characteristics. In: *Aktual'nye problemy ekologii i prirodopol'zovaniya: sbornik nauchnykh trudov xxi mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of ecology and nature management: proceedings of the XXI int. sci. and prac. conf.: in 3 volumes. Vol. 1 (Russia, Moscow, 24-26 September, 2020)]. Ledasheva TN, editor. Moscow: RUDN Publ.; 2020. pp. 89-94. In Russian
16. Zarco-Tejada PJ, Diaz-Varela R, Angileri V, Loudjani P. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European J Agronomy*. 2014;55:89-99. doi: [10.1016/j.eja.2014.01.004](https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.01.004)
17. Mohan M, Silva CA, Klauberg C, Jat P, Catts G, Cardil A, Hudak AT, Dia M. Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest. *Forests*. 2017;8(9):1-17. doi: [10.3390/f8090340](https://doi.org/10.3390/f8090340)
18. Birdal AC, Avdan U, Türk T. Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2017;8:1144-1156. doi: [10.1080/19475705.2017.1300608](https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1300608)
19. Bennett G, Hardy A, Bunting P, Morgan P, Fricker A. A transferable and effective method for monitoring continuous cover forestry at the individual tree level using UAVs. *Remote Sensing*. 2020;12(13):1-21. doi: [10.3390/rs12132115](https://doi.org/10.3390/rs12132115)
20. Krisanski S, Taskhiri MS, Turner P. Enhancing Methods for Under-Canopy Unmanned Aircraft System Based Photogrammetry in Complex Forests for Tree Diameter Measurement. *Remote Sensing*. 2020;12(10):1-21. doi: [10.3390/rs12101652](https://doi.org/10.3390/rs12101652)
21. Domnina EA, Timonov AS, Kantor GYa, Kislitsyna, AP Savinykh VP. Experience of detailed mapping of floodplain meadow vegetation. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2017;1:42-49. doi: [10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163) In Russian
22. Sannikov PYu, Andreev DN, Buzmakov SA. Identification and analysis of deadwood using an unmanned aerial vehicle. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2018;15(3):103-113. doi: [10.21046/2070-7401-2018-15-3-103-113](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-103-113) In Russian
23. Medvedev AA, Telnova, NO, Kudikov, AV, Alekseenko NA. 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 = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2020;17(1):150-163. doi: [10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163) In Russian
24. Aleshko RA, Alekseeva, AA, Shoshina KV, Bogdanov AP, Guriev. AT. 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 = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2017;14(5):87-99. doi: [10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99) In Russian
25. Kovyazin VF, Vinogradov KP, Vasilyeva EA, Kitcenko AA. Airborne laser scanning for clarification of the valuation indicators of forest stands. *Izvestiya VUZov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2020;6:42-54. doi: [10.37482/0536-1036-2020-6-42-54](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-42-54) In Russian
26. Zhou J, Proisy C, Descombes X, Le Maire G, Nouvellon Y, Stape JL, Viennois G, Zerubia J, Couteron P. Mapping local density of young *Eucalyptus* plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images. *Forest Ecology and Management*. 2013;301:129-141. doi: [10.1016/j.foreco.2012.10.007](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.007)

27. Zahawi RA, Dandois JP, Holl KD, Nadwodny D, Reid JL, Ellis EC. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biological Conservation*. 2015;186:287-295. doi: [10.1016/j.biocon.2015.03.031](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.03.031)
28. Miller E, Dandois JP, Detto M, Hall JS. Drones as a tool for monoculture plantation assessment in the steepland tropics. *Forests*. 2017;8(5):1-14. doi: [10.3390/f8050168](https://doi.org/10.3390/f8050168)
29. Otero V, Van De Kerchove R, Satyanarayana B, Martínez-Espinosa C, Amir Bin Fisol M, Rodila Bin Ibrahim M, Sulong I, Mohd-Lokman H, Lucas R, Dahdouh-Guebas F. 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*. 2018;411:35-45. doi: [10.1016/j.foreco.2017.12.049](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.049)
30. Eysn L, Hollaus M, Lindberg E, Berger F, Monnet J-M, Dalponte M, Kobal M, Pellegrini M, Lingua E, Mongus D, Pfeifer P. A benchmark of LiDAR-based single tree detection methods using heterogeneous forest data from the alpine space. *Forests*. 2015;6(5):1721-1747. doi: [10.3390/f6051721](https://doi.org/10.3390/f6051721)
31. Picos J, Bastos G, Míguez D, Alonso L, Armesto J. Individual tree detection in a *Eucalyptus* plantation using unmanned aerial vehicle (UAV)-LiDAR. *Remote Sensing*. 2020;12:1-17. doi: [10.3390/rs12050885](https://doi.org/10.3390/rs12050885)
32. Shanin VN, Shashkov MP, Ivanova NV, Bykhovets SS, Grabarnik PYa. The study of stand structure and microclimatic conditions under the forest canopy on permanent sampling plot in Prioksko-Terrasny Reserve. In: *Trudy Prioksko-Terrasnogo zapovednika* [Proceedings of the Prioksko-Terrasny Nature Reserve]. Iss. 7. Moscow: KMK Publ.; 2018. pp. 68-80. In Russian
33. Agisoft LLC. Agisoft Metashape (Version 1.5). Software. 2019. Available at: <https://www.agisoft.com/> (accessed 17.01.2021)
34. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria. 2019. Available at: <https://www.R-project.org/> (accessed 17.01.2021)
35. Silva CA, Hudak AT, Vierling LA, Loudermilk EL, O'Brien JJ, Hiers JK, Khosravipour A. Imputation of individual Longleaf Pine (*Pinus palustris* Mill.) tree attributes from field and LiDAR data. *Canadian J Remote Sensing*. 2016;42(5):554-573. doi: [10.1080/07038992.2016.1196582](https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1196582)
36. Zhang W, Qi J, Wan P, Wang H, Xie D, Wang X, Yan G. An Easy-to-Use Airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*. 2016;8(6):1-22. doi: [10.3390/rs8060501](https://doi.org/10.3390/rs8060501)
37. Khosravipour A, Skidmore AK, Skidmore M, Wang T, Hussin Y. Generating pit-free canopy height models from airborne LiDAR. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2014;9:863-872. doi: [10.14358/PERS.80.9.863](https://doi.org/10.14358/PERS.80.9.863)
38. QGIS Development Team. QGIS geographic information system. Open source geospatial foundation project. 2019 Available at: <http://qgis.osgeo.org> (accessed 17.01.2021).
39. Dhodhi MK, Saghri JA, Ahmad I, Ul-Mustafa R. D-ISODATA: A distributed algorithm for unsupervised classification of remotely sensed data on network of workstations. *J Parallel and Distributed Computing*. 1999;59(2):280-301. doi: [10.1006/jpdc.1999.1573](https://doi.org/10.1006/jpdc.1999.1573)
40. Jin Y, Sung S, Lee DK, Biging GS, Jeong S. Mapping deforestation in North Korea using phenology-based multi-index and Random forest. *Remote Sensing*. 2016;8(12):1-15. doi: [10.3390/rs8120997](https://doi.org/10.3390/rs8120997)

Received 10 September 2020; Revised 19 January and 15 April 2021;

Accepted 27 May 2021; Published 29 June 2021.

Author info:

Ivanova Natalya V, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Computational Ecology, Institute of Mathematical Problems of Biology, Russian Academy of Sciences – The Branch of Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, 1 Professor Vitkevich St., Pushchino, Moscow Region 142290, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4199-5924>

E-mail: Natalya.dryomys@gmail.com

Shashkov Maxim P, Researcher, Laboratory of Ecological Modelling, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences, 2 Institutskaya Str., Pushchino, Moscow Region 142290, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1328-8758>

E-mail: Max.carabus@gmail.com

Shanin Vladimir N, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Ecological Modelling, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences, 2 Institutskaya Str., Pushchino, Moscow Region 142290, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8294-7796>

E-mail: Shaninvn@gmail.com