



УДК 528.854:630*5

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22

ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ И АЭРОФОТОСЪЕМКА С БПЛА В ИССЛЕДОВАНИИ СТРУКТУРЫ ЛЕСОТУНДРОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ ХИБИН

Н.Ф. Низаметдинов, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; *ResearcherID*: [AAI-3961-2020](https://orcid.org/0000-0001-9410-6807),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9410-6807>

П.А. Моисеев, д-р биол. наук; *ResearcherID*: [M-9132-2013](https://orcid.org/0000-0003-4808-295X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-295X>

И.Б. Воробьев, науч. сотр.; *ResearcherID*: [AAK-3957-2021](https://orcid.org/0000-0002-2563-585X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2563-585X>

Институт экологии растений и животных УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202, г. Екатеринбург,
Россия, 620144; e-mail: niznail@yandex.ru

Аннотация. Изучение структуры древостоев является ключевым моментом в оценке роли деревьев в депонировании углерода. Информация о пространственной структуре напочвенного покрова на верхней границе леса, особенно чувствительной к изменениям климата, представлена в современных исследованиях недостаточно. Детальное дистанционное зондирование может стать источником данных, которые помогут понять свойства и динамику растительности в этих условиях. Проверена применимость наземного мобильного лазерного сканирования местности и аэрофотосъемки для быстрой и высокоточной оценки показателей насаждений в лесотундровом экотоне. При помощи этого метода получены цифровые модели лесного полога, дополненные впоследствии материалами аэросъемки исследовательского полигона на юго-восточном склоне Хибинских гор. На основе данных моделей определены границы крон деревьев. Для каждого из них найдены высота и площадь проекции кроны. Для верификации первый показатель, полученный лазерным сканированием, сопоставлен с высотами этих же деревьев, оцененными натурными измерениями. Сравнение выявило, что данные лазерного сканирования позволяют устанавливать значения высот, наиболее близкие к данным натурных измерений, если высоты определяются по максимальным показателям яркости пикселей цифровых моделей лесного полога с ручной корректировкой значений при обнаружении выбросов ($R^2 = 0,84$). Поскольку ручная корректировка требует большого времени, предложен способ автоматизации измерений путем определения высот деревьев по сумме среднего значения яркости пикселей и стандартного отклонения, умноженного на 2,5 ($R^2 = 0,79$). Площадные характеристики древостоев, определенные лазерным сканированием, были сопоставлены с данными фотосъемки с беспилотного летательного аппарата. Исследования дали подробную информацию о пространственном расположении и размерах 4424 деревьев на площади около 10 га и позволили сравнить результаты измерения характеристик деревьев, полученных разными методами. Также выявлено, что с увеличением высоты от 290 до 425 м над ур. м. на изученном склоне средняя высота древостоев снижается постепенно от 4,5–5,0 до 1,1–1,6 м с небольшими флуктуациями (0,2–0,4 м), в то время как сомкнутость древостоев изменяется от 4620–5860 до 145 м²/га нелинейным образом.

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

Финансирование: Сбор и анализ данных выполнен за счет средств гранта Российского научного фонда № 17-14-01112, подготовка текста и рисунков – за счет средств гранта Российского научного фонда № 21-14-00137.

Ключевые слова: лазерное сканирование, аэрофотосъемка, цифровая модель рельефа, цифровая модель местности, цифровая модель лесного полога, сегментация, верхняя граница леса, Хибины.

Введение

Многие исследователи, изучавшие древесную растительность на верхнем пределе ее распространения в различных горных регионах мира, отмечают интенсивное лесовозобновление и существенное смещение вверх по склонам границ редколесий и сомкнутых лесов в течение последних 60–80 лет на фоне глобального потепления [4, 10]. При оценке параметров отдельных деревьев и древостоев в таких работах использовались в основном натурные измерения, которые, как правило, требовали больших временных затрат [1, 2, 9]. В условиях короткого лета и плохой транспортной доступности в горных районах трудно рассчитывать на значительный охват измерений и репрезентативность получаемых сведений. Ставшее традиционным в последние десятилетия широкомасштабное использование материалов спутниковой съемки для изучения структуры древостоев ограничивается пространственным (максимум 0,3–0,5 Мп) и временным разрешением аппаратов, а в горах еще и высокой облачностью района [12, 17]. Относительно недавно для исследования древесной растительности в условиях полярной и верхней границы леса (ВГЛ) стали применяться материалы фотосъемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [5] и наземного лазерного сканирования местности [16].

Данные съемки с БПЛА обладают очень высоким пространственным разрешением (0,05–0,20 Мп) по сравнению с материалами спутниковой съемки и могут быть доступны достаточно быстро (в течение нескольких дней). Автоматизированная фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков позволяет получать детальные ортофотопланы и трехмерные облака точек изучаемой местности [3]. Благодаря этому можно иметь сравнительно точную информацию о размерах наземных объектов. Однако фотограмметрическая обработка применяется только при достаточно низкой сомкнутости древостоев, так как при их высокой густоте не просматриваются основания объектов и земная поверхность, что не позволяет создать высокоточную цифровую модель рельефа (ЦМР) [15].

В ряде подобных исследований в последние годы стал применяться анализ результатов наземного лазерного сканирования [7, 14]. Эта технология основана на получении при помощи специальных устройств (лидаров) большого количества точек-отражений с высоким пространственным разрешением (0,01–0,03 м), что позволяет достаточно точно определять взаиморасположение объектов и оценивать морфометрические параметры отдельных деревьев, даже

при высокой сомкнутости древостоев. Но несмотря на все преимущества описанных выше методов, результаты наблюдений требуют верификации по данным прямых измерений в полевых условиях [14].

Цель работы – исследование применимости методов наземного мобильного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с БПЛА для ускоренного получения точных размерных характеристик отдельных деревьев и древостоев, произрастающих на верхнем пределе распространения, а также верификация этих характеристик по натурным измерениям.

Объекты и методы исследования

Район исследований – юго-восточный макросклон горного массива Хибин (рис. 1), расположенный в полосе наиболее высоких центральных возвышенностей Кольского п-ова, максимальные отметки которого находятся в пределах 900...1200 м над ур. м. Для данной местности характерны большие перепады высот (до 800 м), сложная геологическая структура, влажный климат (до 1200 мм осадков в год), ярко выраженная высотная ландшафтная поясность. Экотон ВГЛ в Хибинах располагается на высоте 300...600 м над ур. м. Произрастающие в его пределах древостои в основном сформированы березой извилистой (*Betula pubescens* ssp. *tortuosa* (Ledeb.) Nyman) с примесью ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

В июле 2017 г. для изучения структуры древостоев в экотоне ВГЛ на юго-восточном склоне г. Китчепакк были заложены пробные площадки размером 20 × 20 м – по 2 в верхней (410–450 м над ур. м.), средней (350–380 м над ур. м.) и нижней (320–340 м над ур. м.) его частях.

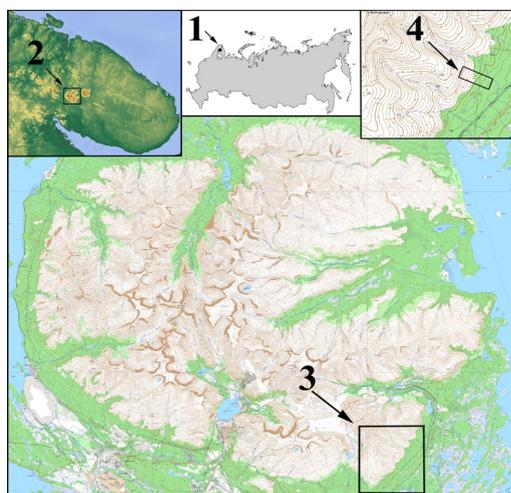


Рис. 1. Местоположение района исследований в пределах Российской Федерации (1), Кольского п-ва (2), массива Хибин (3), юго-восточного склона г. Китчепакк (4)

Fig. 1. Location of the research area within the Russian Federation (1), the Kola Peninsula (2), the Khibiny Mountains (3), and the southeastern slope of Kitchepakhk Mountain (4)

Для каждого произрастающего на них отдельного дерева (одноствольной и многоствольной форм роста) устанавливали: вид, местоположение на площадке, высоту (градуированным 6-метровым шестом) и диаметр – у основания и на высоте груди – ствола (через периметр, определенный измерительной лентой), а также диаметр проекции кроны по двум направлениям и жизненное состояние.

В июле 2018 г. осуществлялось наземное лазерное сканирование древостоев с помощью мобильного комплекса Л-СКАН-1 (Geomatics Ltd.). Входящий в его состав лазерный 3D-сканер Velodyne VLP-16 имеет следующие характеристики: длина волны луча – 905 нм, скорость измерений – 0,3 млн точек в секунду, дальность сканирования до 100 м. Комплекс устройств позволил получить только локальные (X, Y, Z) координаты изучаемых объектов в метрических величинах, без географической привязки. Материалы съемки представляли собой набор файлов в формате *pcap*. В каждом из них содержалась информация, соответствующая 1 мин сканирования. Для последующей обработки весь объем данных сгруппировали в 5-минутные *pcap*-файлы в программе WireShark 3.0.1. Далее в программе VeloView 3.5.3-317-gafd3ffe 64-bit они были преобразованы методом SLAM (simultaneous localization and mapping – одновременная локализация и построение карты) в единое облако точек-отражений в формат LAS [8].

Постобработка результатов сканирования производилась в программе Lidar360 Version 3.2 (Green Valley International Ltd). На 1-м этапе каждый 5-минутный фрагмент был очищен от точек, расположенных вне пределов основной области сканирования («выбросов»). Далее выполнена процедура классификации множества точек-отражений лазера на 2 типа: точки поверхности земли и остальные вышерасположенные точки [7]. По точкам первого типа построена ЦМР (DEM – digital elevation model, или по-другому DTM – digital terrain model). На следующем этапе создана цифровая модель местности (ЦММ, DSM – digital surface model), содержащая пространственную информацию о положении поверхности всех объектов и участков земли между ними. Посредством исключения данных ЦМР из ЦММ была получена цифровая модель лесного полога (ЦМЛП, СНМ – canopy height model), представляющая собой изображение крон деревьев в растровом формате TIFF (рис. 2). При разработке всех трех моделей использован размер ячейки растра 0,01 м.

На 3-м этапе камеральной обработки создан ортофотоплан на основе сделанных в июле 2018 г. с высоты 50–100 м камерой квадрокоптеров DJI Phantom 4 и DJI MavicPro (с разрешением 20 Мп) фотографий с известными географическими координатами центров съемки. Для этого в среде программы Agisoft PhotoScan Pro 1.2. [3] последовательно осуществлены следующие операции: поиск на аэрофотоснимках одинаковых по конфигурации объектов (соответствий) и выравнивание фотографий относительно друг друга; генерирование на основе отдельных изображений плотного облака точек, для каждой из которых рассчитаны географические координаты [20]; создание ортофотоплана и карты высот (рис. 3) с пространственным разрешением 0,02–0,05 Мп и точной привязкой к местности.

Высокая четкость изображений на ортофотоплане и ЦМЛП позволили на основе программы «Квантум-ГИС» (QGIS 3.6.1) визуально определить идентичные объекты, что было использовано для геопривязки ЦМЛП (рис. 2 и 3). Далее в среде программы Lidar360 Version 3.2 выполнена сегментация геопривязанных растров ЦМЛП.

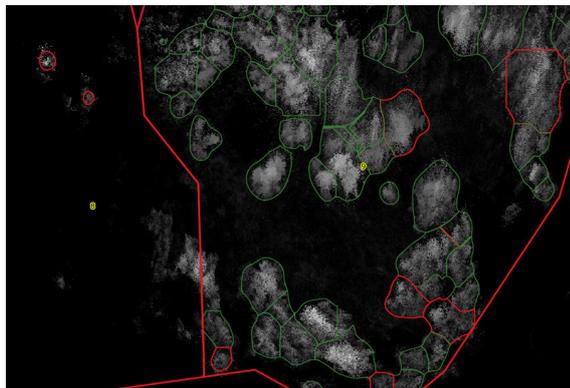


Рис. 2. ЦМЛП, привязанная к местности, и контуры крон деревьев, полученные в результате ее сегментации. Зеленая граница – максимальное значение яркости пикселей меньше порогового значения; красная граница – выше порогового значения

Fig. 2. CHM referenced to the terrain and the tree crown delineation obtained as a result of its segmentation. The green border of the polygons – the maximum value of the brightness of the pixels is less than the threshold value; the red border – the maximum value of the pixels brightness is higher than the threshold value



Рис. 3. Фрагмент ортофотоплана

Fig. 3. Fragment of the orthomosaic

В результате из общей поверхности точек сканирования выделены контуры крон деревьев на высоте 0,5 м от поверхности земли [7]. При этом использованы следующие параметры: размер ячейки раstra – 0,01 м, радиус при гауссовом размывании – 205,00 ед., параметр сигма – 40,00 ед., минимальная высота деревьев – 0,30 м, максимальная – 80,00 м, высота основания кроны – 0,50 м. Результаты сегментации представлены в виде векторного полигонального слоя в формате SHP (см. рис. 5). Нахождение контуров крон деревьев позволило определить их площадь. Для оценки высоты объектов внутри каждого контура кроны рассчитаны статистики распределения яркости пикселей ЦМЛП

(среднее значение, стандартное отклонение, максимальное значение). Яркость пикселя в данном случае соответствовала высоте отсканированной точки над поверхностью земли.

В программе QGIS 3.6.1 по ортофотопланам визуально оцифрованы контуры крон отдельных деревьев и определена их видовая принадлежность (ель или береза), а также рассчитаны площади проекций крон (рис. 4).

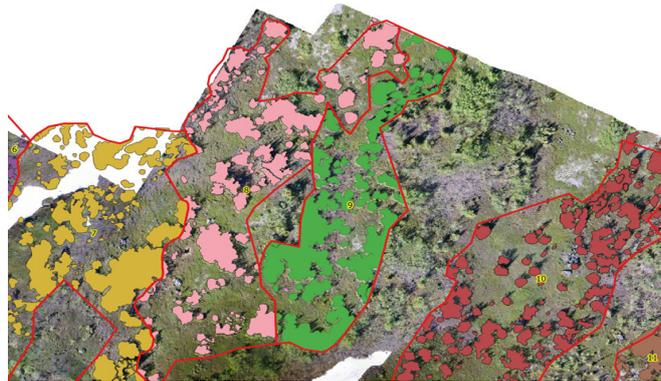


Рис. 4. Векторные слои проекций крон деревьев на высотных уровнях 1–13, использованные для расчета площадей проекций крон деревьев

Fig. 4. Vector layers of tree crown projections at altitude levels 1–13 used for calculation of the area of tree crown projections

В верхней части профиля (в тундре с отдельными деревьями) объединение материалов сканирования в единую поверхность точек программой VeloView было произведено некорректно, поэтому использование инструментария LiDAR360 для сегментирования объектов не представлялось возможным.

На данной территории отбор отдельных деревьев и фиксация их параметров выполнены на основе только ортофотопланов, созданных по аэрофотоснимкам. Для этого в программе QGIS 3.6.1 векторизованы контуры крон. Их диаметр определяли по площади проекции кроны; высоту каждого дерева – по длине тени, времени съемки и ее географическим координатам [18] (рис. 5).



Рис. 5. Фрагмент аэроснимка с выделенным контуром кроны и изображением тени дерева

Fig. 5. A fragment of the aerial photograph with a selected outline of the tree crown and the image of the tree shadow

Результаты исследования и их обсуждение

В пределах обследованного склона на площади около 10 га произведено картирование 4424 деревьев и определение их высот и площадей крон. Для оценки изменений пространственных характеристик древостоев территория была разделена на 19 высотных уровней (рис. 6). Их границы проходили через каждые 10 м высоты по изолиниям созданной на основе материалов аэрофотосъемки карты высот.



Рис. 6. Расположение границ высотных уровней

Fig. 6. Location of the boundaries of altitude levels

На уровнях 1–5 площади проекций крон деревьев и их высоты определены по аэрофотоснимкам. На уровнях 6–19 характеристики деревьев получены по данным лазерного сканирования. В итоге для каждого высотного уровня рассчитаны средняя высота над уровнем моря и площадь, а также сумма площадей проекций крон отдельных деревьев по данным аэрофотосъемки и/или результатам лазерного сканирования, средняя высота и густота древостоев.

Сравнение сумм площадей проекций крон деревьев, полученных разными методами (рис. 7), обнаружило тесную связь ($R^2 = 0,93$) указанных значений. Однако выявлено также определенное занижение величин в случае лазерной съемки по отношению к результатам визуального дешифрирования.

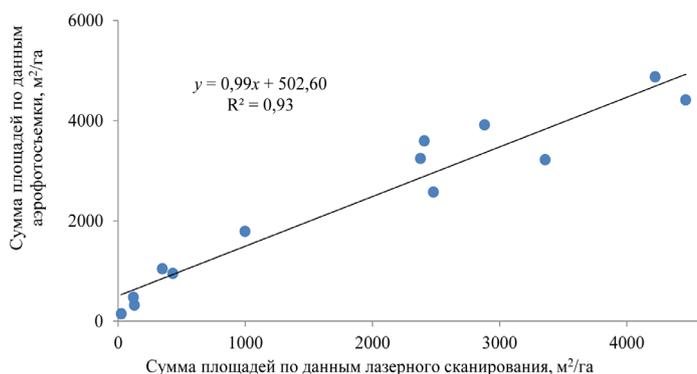


Рис. 7. Сравнение сумм площадей проекций крон деревьев на различных высотных уровнях, полученных разными методами

Fig. 7. Comparison of the sums of projection areas of tree crowns at different altitude levels obtained via laser scanning and aerial photographs

Это объясняется меньшей точностью определения площадей крон при автоматической сегментации и указывает на необходимость верификации результатов лазерной съемки другими данными (анализ аэрофотоснимков высокого разрешения, натурные измерения).

Для проверки точности определения высот по данным лазерного сканирования использована информация о высоте этих же деревьев, полученная натурными измерениями, сделанными на пробных площадках в 2017 г. Для этого предварительно в разных слоях в среде программы QGIS 3.6.1 сопоставлены изображения крон деревьев на картосхемах пробных площадок, полученные лазерным сканированием (рис. 8).

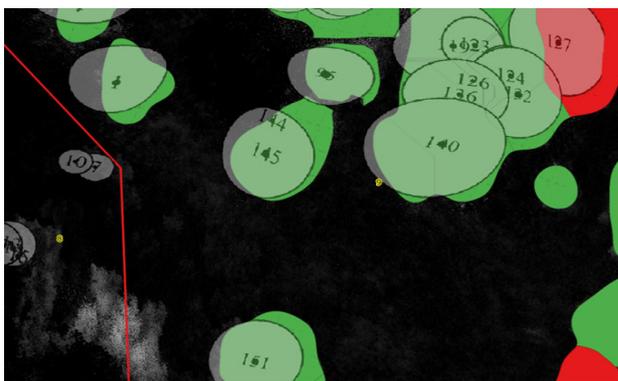


Рис. 8. Контуры крон деревьев, полученные натурными полевыми измерениями и привязанные к данным лазерного сканирования

Fig. 8. Tree crown delineation obtained by field measurements and referenced to laser scanning data

На первом этапе за высоту принималось значение пикселя, максимальное в распределении яркостей в растре ЦМЛП внутри контура кроны отдельного дерева (рис. 9). Этот подход обнаружил завышение высот у части деревьев в сравнении с данными натурных измерений, что объяснялось наличием «выбросов» вблизи крон, связанных с несовершенством алгоритма (программа VeloView3.5.3-317-gafd3ffe 64-bit) сборки материалов лазерной съемки в единый LAS-файл.

На последующем этапе выбросы были исключены из анализа путем расчета порогового значения высоты дерева на основании суммы среднего значения и стандартного отклонения, умноженного на 3:

$$P = M + 3Sdev, \quad (1)$$

где P – пороговое значение высоты дерева; M – среднее значение яркости пикселя; $Sdev$ – стандартное отклонение значений яркости пикселей.

Если максимальное значение яркости пикселя для дерева было выше порогового, то высота такого дерева признавалась завышенной и находилась путем визуального определения положения вершины раstra по самому яркому пикселю и «ручного снятия» значения высоты дерева в данном месте (рис. 9). В случае, когда максимальное значение яркости пикселя для дерева оказывалось ниже порогового, высота соответствовала максимальному значению яркости пикселя.

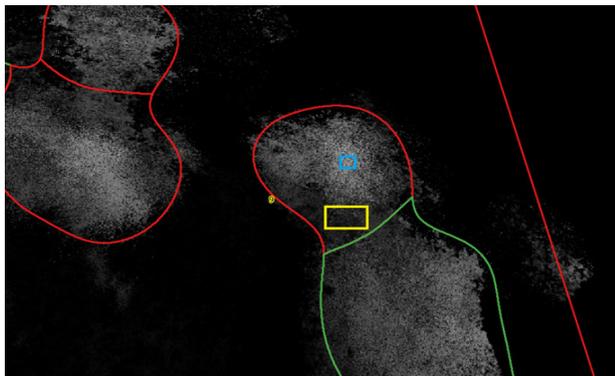


Рис. 9. Пример выбросов пикселей в пределах контура кроны дерева – желтый прямоугольник. Синий прямоугольник – значение яркости пикселя, принятое за высоту дерева, взято вручную

Fig. 9. An example of outliers in the distribution of pixel brightness within the crown outline of a tree (a yellow rectangle). The blue rectangle marks the area where the pixel brightness value, taken as the height of this tree, was manually taken

Этот способ дал возможность довольно точно определять высоты деревьев, но потребовал большого количества времени.

В итоге за высоту дерева принята величина, равная сумме среднего значения яркости пикселей и стандартного отклонения, умноженного на 2,5:

$$H = M + 2,5Sdev. \quad (2)$$

Так высота деревьев была определена достаточно точно, а временные затраты стали минимальными. Сравнение высот деревьев по натурным измерениям и высот, определенных по данным наземной лидарной съемки, представлено на рис. 10. Показаны ряды измерений, выполненных для березы на трех пробных площадках.

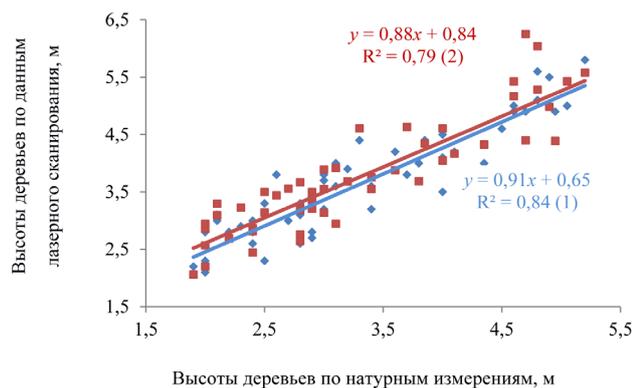


Рис. 10. Сравнение высот деревьев, полученных различными методами: H равно максимальным значениям яркости с ручной коррекцией (голубые отметки) и $M + 2,5Sdev$ (красные отметки)

Fig. 10. Comparison of tree heights obtained by different methods: height H equals maximum brightness values with manual correction (blue markers) and $M + 2.5Sdev$ (red markers)

На графиках видно, что показатели, найденные с помощью лазерной съемки, коррелируют с результатами натуральных измерений. По данным рисунка, измерения высот деревьев по максимальным значениям яркости пикселей с ручной корректировкой больше соответствуют результатам натуральных наблюдений ($R^2 = 0,844$) в сравнении с автоматизированным методом определения высот деревьев по сумме среднего значения и стандартного отклонения. Однако этот метод требует большого количества времени.

В результате установлено, что высоты, определенные автоматически по значениям статистик распределения яркостей пикселей по формуле (2), наиболее соответствуют высотам, найденным по максимальным значениям яркости пикселей с ручной корректировкой (рис. 10, 11). Это подтверждает пригодность метода для автоматизации измерений высот деревьев при помощи лидарной съемки. На рис. 11 видно, что средняя высота древостоев на изученном склоне снижается постепенно от 4,5–5,0 до 1,1–1,6 м (в среднем 0,26 м на 10 м высоты) с определенными флуктуациями (0,2–0,4 м) по мере увеличения высоты от 290 до 425 м над ур. м.

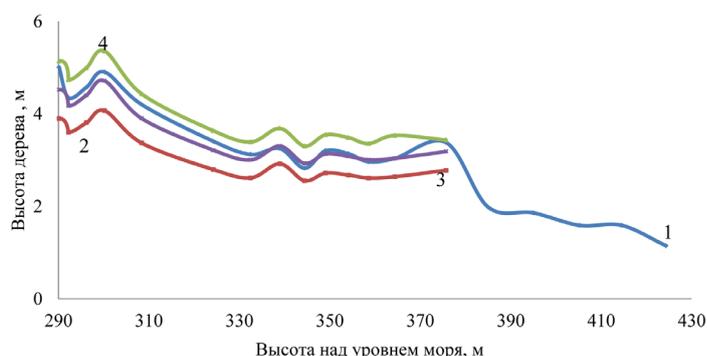


Рис. 11. Зависимость средних высот деревьев (их значения равны: 1 – максимальным значениям яркости с ручной корректировкой; 2 – $M + 2Sdev$; 3 – $M + 2,5Sdev$; 4 – $M + 3Sdev$), полученных лазерным сканированием, от высоты над уровнем моря

Fig. 11. Dependence of average tree heights (their values are equal to: 1 – maximum brightness values with manual correction; 2 – $M + 2Sdev$; 3 – $M + 2.5Sdev$; 4 – $M + 3Sdev$) obtained by laser scanning from the altitude above sea level

Анализ варьирования сомкнутости древостоев (суммы площадей проекций крон деревьев) по мере увеличения высоты над уровнем моря выявил, что этот показатель изменяется нелинейным образом (рис. 12). Так, в нижней части профиля (290...325 м над ур. м.) он сначала повышается от 4620–4890 до 5860 м²/га, а потом (350 м над ур. м.) резко снижается более чем в 2 раза – до 2570 м²/га. На 5 м выше по склону он опять увеличивается до 4870 м²/га и лишь в интервале 355...425 м над ур. м. уменьшается до 145 м²/га почти по экспоненте без резких колебаний. Такой характер изменения сомкнутости древостоев не соответствует выявленному нами постепенному снижению температуры воздуха – 0,5–0,7 °С на каждые 100 м высоты, – которую традиционно считают главным фактором, определяющим рост и выживание древесных растений [2].

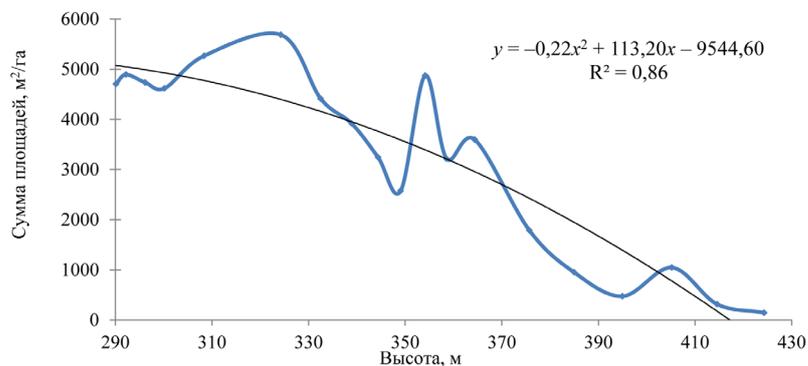


Рис. 12. Изменение с высотой над уровнем моря определенных по данным аэрофотосъемки сумм площадей проекций крон деревьев на юго-восточном склоне г. Китчепакхк

Fig. 12. Change with altitude above sea level of the sums of the areas of tree crown projections on the southeastern slope of Kitchepakhk Mountain determined by aerial survey data

Мы предполагаем, что это связано с резким ухудшением по мере увеличения высоты почвенных условий (снижение температуры почвы; уменьшение количества доступных минеральных веществ и др.) [11, 19] и условий выживания в зимний период для частей растений, находящихся выше снега (скорость ветра возрастает с высотой в 5–6 раз) [6], а также, в локальном плане, с сокращением вегетационного периода (на 4–7 дн.) из-за накопления больших масс снега (до 3–5 м) в нижней части ступеней горных террас, повсеместно встречающихся на склонах Хибинских гор [13].

Заключение

Данные мобильного наземного лазерного сканирования могут быть успешно использованы для картирования древостоев и определения их характеристик (высоты отдельных деревьев, площади проекций крон, средней суммы площадей проекций крон, средней высоты, количества деревьев) в условиях лесотундрового экотона горных территорий Кольского полуострова. Объединение материалов лазерного сканирования, аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата и натурных измерений позволяет оперативно получать точные данные об основных параметрах большого количества деревьев, произрастающих на значительных площадях труднодоступных горных районов субарктики России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Григорьев А.А., Дэви Н.М., Кукарских В.В., Вьюхин С.О., Галимова А.А., Моисеев П.А., Фомин В.В. Структура и динамика древостоев верхней границы леса в западной части плато Путорана // Экология. 2019. № 4. С. 243–254.

Grigor'ev A.A., Devi N.M., Kukarskikh V.V., V'yukhin S.O., Galimova A.A., Moiseev P.A., Fomin V.V. Structure and Dynamics of Tree Stands at the Upper Timberline in the Western Part of the Putorana Plateau. *Ekologiya* [Russian Journal Ecology], 2019, no. 4, pp. 243–254. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0367059719040073>

2. Моисеев П.А., Галимова А.А., Бубнов М.О., Дэви Н.М., Фомин В.В. Динамика древостоев и их продуктивности на верхнем пределе произрастания в Хибинах на фоне современных изменений климата // *Экология*. 2019. № 5. С. 341–355.

Moiseev P.A., Galimova A.A., Bubnov M.O., Devi N.M., Fomin V.V. Tree Stands and Their Productivity Dynamics at the Upper Growing Limit in Khibiny on the Background of Modern Climate Changes. *Ekologiya* [Russian Journal Ecology], 2019, no. 5, pp. 341–355. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0367059719050081>

3. *Agisoft PhotoScan User Manual*. Professional Edition, Version 0.9.0. Agisoft LLC, 2012. 49 p. Available at: http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro_0_9_0_en.pdf (accessed 07.02.20).

4. Bonan G.B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 2008, vol. 320, iss. 5882, pp. 1444–1449. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1155121>

5. Brieger F., Herzsuh U., Pestyakova L.A., Bookhagen B., Zakharov E.S., Kruse S. Advances in the Derivation of Northeast Siberian Forest Metrics Using High-Resolution UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, iss. 12, art. 1447. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11121447>

6. Cairns D.M. Patterns of Winter Desiccation in Krummholz Forms of *Abies lasiocarpa* at Treeline Sites in Glacier National Park, Montana, USA. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2001, vol. 83, iss. 3, pp. 157–168. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2001.00151.x>

7. Chen Q., Baldocchi D., Gong P., Kelly M. Isolating Individual Trees in a Savanna Woodland Using Small Footprint Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2006, vol. 72, no. 8, pp. 923–932. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.72.8.923>

8. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous Localization and Mapping: Part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, vol. 13, iss. 2, pp. 99–110. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1638022>

9. Hagedorn F., Shiyatov S.G., Mazepa V.S., Devi N.M., Grigor'ev A.A., Bartysh A.A., Fomin V.V., Kapralov D.S., Terent'ev M., Bugman H., Rigling A., Moiseev P.A. Treeline Advances along the Urals Mountain Range – Driven by Improved Winter Conditions? *Global Change Biology*, 2014, vol. 20, iss. 11, pp. 3530–3543. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12613>

10. Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S., Duncan R.P. Are Treelines Advancing? A Global Meta-Analysis of Treeline Response to Climate Warming. *Ecology Letters*, 2009, vol. 12, iss. 10, pp. 1040–1049. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x>

11. Kammer A., Hagedorn F., Shevchenko I., Leifeld J., Guggenberger G., Goryacheva T., Rigling A., Moiseev P. Treeline Shifts in the Ural Mountains Affect Soil Organic Matter Dynamics. *Global Change Biology*, 2009, vol. 15, iss. 6, pp. 1570–1583. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01856.x>

12. Kulha N., Pasanen L., Aakala T. How to Calibrate Historical Aerial Photographs: A Change Analysis of Naturally Dynamic Boreal Forest Landscapes. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 10, art. 631. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9100631>

13. Kullman L. Climate Change and Primary Birch Forest (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*) Succession in the Treeline Ecotone of the Swedish Scandes. *International Journal of Research in Geography*, 2016, vol. 2, iss. 2, pp. 36–47. DOI: <https://doi.org/10.20431/2454-8685.0202004>

14. Liang X., Kukko A., Hyypä J., Lehtomäki M., Pyörälä J., Yu X., Kaartinen H., Jaakkola A., Wang Y. In-situ Measurements from Mobile Platforms: An Emerging Approach to Address the Old Challenges Associated with Forest Inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, vol. 143, pp. 97–107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.04.019>

15. Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P. A Photogrammetric Workflow for the Creation of a Forest Canopy Height Model from Small Unmanned Aerial System Imagery. *Forests*, 2013, vol. 4, iss. 4, pp. 922–944. DOI: <https://doi.org/10.3390/f4040922>

16. Maguire A.J., Eitel J.U.H., Vierling L.A., Johnson D.M., Griffin K.L., Boelman N.T., Jensen J.E., Greaves H.E., Meddens A.J.H. Terrestrial Lidar Scanning Reveals Fine-Scale Linkages between Microstructure and Photosynthetic Functioning of Small-Stature Spruce Trees at the Forest-Tundra Ecotone. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, vol. 269–270, pp. 157–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.019>

17. Ranson K.J., Montesano P.M., Nelson R. Object-Based Mapping of the Circumpolar Taiga-Tundra Ecotone with MODIS Tree Cover. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115, iss. 12, pp. 3670–3680. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.006>

18. Shettigara V.K., Sumerling G.M. Height Determination of Extended Objects Using Shadows in SPOT Images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1998, vol. 64, iss. 1, pp. 35–44.

19. Solly E.F., Djukic I., Moiseev P.A., Andreyashkina N.I., Devi N.M., Göransson H., Mazepa V.S., Shiyatov S.G., Trubina M.R., Schweingruber F.H., Wilmking M., Hagedorn F. Treeline Advances and Associated Shifts in the Ground Vegetation Alter Fine Root Dynamics and Mycelia Production in the South and Polar Urals. *Oecologia*, 2017, vol. 183, iss. 2, pp. 571–586. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-016-3785-0>

20. Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. ‘Structure-from-Motion’ Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications. *Geomorphology*, 2012, vol. 179, pp. 300–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

LASER SCANNING AND AERIAL PHOTOGRAPHY WITH UAV IN STUDYING THE STRUCTURE OF FOREST-TUNDRA STANDS IN THE Khibiny Mountains

Nail F. Nisametdinov, Candidate of Agriculture, Research Scientist;

ResearcherID: [AAI-3961-2020](https://orcid.org/0000-0001-9410-6807), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9410-6807>

Pavel A. Moiseev, Doctor of Biology; ResearcherID: [M-9132-2013](https://orcid.org/0000-0003-4808-295X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-295X>

Ivan B. Vorobiev, Research Scientist; ResearcherID: [AAK-3957-2021](https://orcid.org/0000-0002-2563-585X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2563-585X>

Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; e-mail: niznail@yandex.ru

Abstract. Studying the structure of stands is a key point in assessing the role of trees in carbon deposition. Information on the spatial structure of ground vegetation at the upper treeline is still insufficiently presented in modern studies. High resolution remote sensing can provide important data to understand the properties and dynamics of vegetation in these conditions. We test the applicability of ground-based mobile laser scanning of the terrain and aerial photography for the rapid and high-precision assessment of the characteristics of tree stands in the forest-tundra ecotone. We obtained canopy height models (CHMs) of the forest and supplemented them with aerial photographs of the research area on the southeastern slope of the Khibiny Mountains. Using CHMs we have delineated boundaries of tree crowns. The height and projection area were determined for each tree. The first characteristic obtained by

laser scanning was compared to the heights of the same trees estimated by field measurements. This was done for the purposes of verification. The comparison revealed that laser scanning data allow to set heights closest to field measurements in case the heights are determined by the maximum values of brightness of pixels of CHMs with manual correction of values when outliers are detected ($R^2 = 0.84$). Since manual correction of outliers is time-consuming, we proposed a way to automate the measurements by determining tree heights using the sum of the average value of pixel brightness and the standard deviation multiplied by 2.5 ($R^2 = 0.79$). We compared the area characteristics of the stands obtained by laser scanning and the unmanned aerial vehicle (UAV) photography. Thus, we obtained detailed information on the spatial location and size of 4424 trees in an area of about 10 ha and compared the results of measuring tree characteristics obtained by different methods. It was also found that with increasing height from 290 to 425 m above sea level on the studied slope, the average height of stands decreases gradually from 4.5–5.0 to 1.1–1.6 m with small fluctuations (0.2–0.4 m), while the density of stands changes from 4620–5860 to 145 m²/ha in a non-linear way.

For citation: Nisametdinow N.F., Moiseev P.A., Vorobiev I.B. Laser Scanning and Aerial Photography with UAV in Studying the Structure of Forest-Tundra Stands in the Khibiny Mountains. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 9–22. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22

Funding: Data collection and analysis were funded by the Russian Science Foundation, grant No. 17-14-01112; preparation of the text and figures was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 21-14-00137.

Keywords: laser scanning, aerial photography, digital elevation model, digital surface model, canopy height model, segmentation, upper treeline, Khibiny Mountains.