

И.А. Рыльский¹, М.С. Малеванная², М.В. Грибок³, А.Н. Панин⁴

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Растительность является одним из наиболее важных компонентов географической среды. Создание карт растительности и определение ее характеристик — распространенная задача при ведении лесохозяйственной деятельности. При создании карт наиболее крупных масштабов возникает задача определения параметров отдельных деревьев — их высот, диаметров кроны, координат положения стволов в пространстве (т. наз. подеревная съемка). Существующие наземные технологии решения этой задачи дороги и малопроизводительны. Космические средства съемки не обеспечивают приемлемого результата. Аэрофотосъемка также мало подходит для решения данной задачи (по ряду причин). Наиболее перспективным является применение метода воздушного лазерного сканирования с использованием не слишком плотных облаков точек лазерных отражений (4–8 точек на 1 м²), что позволяет обеспечить подобными данными значительные (до нескольких млн га леса в год на одну систему) площади лесов. Выполнение съемок с большей плотностью (в т. ч. с применением беспилотных летательных средств) представляется нерациональным по причине невозможности прямых измерений стволов деревьев и низкой производительности. Исследование проведено на тестовой территории в регионе Северного Кавказа (Республика Адыгея) по данным съемочных работ 2022 г., осень). Данная работа посвящена разработке и оценке результатов использования методики определения параметров отдельных деревьев. Для этого предлагается использовать типовые функции анализа рельефа и гидрологического моделирования в сочетании с фильтрацией данных с использованием статистических функций в пределах скользящего окна. Анализ ведется с использованием регулярно-ячеистой модели относительных высот деревьев. Итоговым результатом работы является точечный векторный ГИС-слой, где плановое положение точки соответствует положению ствола дерева, а его высота и диаметр кроны записаны в таблице атрибутов. Итоговые результаты после сплошной визуальной проверки по регулярно-ячеистой модели данных и выборочной ручной проверки с использованием ортофотопланов и исходных точек лазерных отражений можно оценить как приемлемые, но нуждающиеся в дальнейшем совершенствовании методики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрофотосъемка, древесная растительность, лидар, ГИС, лесотаксация

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: rilskiy@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: malevannaya_m@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: gribok.marina@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: alex_panin@mail.ru

Илья А. Рыльский¹, Марина С. Малеванная², Марина В. Грибок³, Александр Н. Панин⁴

DETERMINATION OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF VEGETATION USING AIRBORNE LASER SCANNING DATA

ABSTRACT

Vegetation is one of the most important components of the geographic environment. Creating vegetation maps and characterizing vegetation is a common task in forest management. When creating maps of the largest scales, the problem arises of determining the parameters of individual trees — their heights, crown diameters, coordinates of the position of trunks in space (the so-called tree-by-tree survey). Existing ground-based technologies for solving this problem are expensive and inefficient. Satellite imagery do not provide an acceptable result. Aerial photography is also not very suitable for solving this problem (for a number of reasons). The most promising is the use of airborne laser scanning using not too dense clouds of points of laser reflections (4–8 points per 1 m²), which makes it possible to provide such data with significant (up to several million hectares of forest per year per system) forest areas. Performing surveys with a higher density (including using unmanned aerial vehicles) seems to be irrational due to the impossibility of direct measurements of tree trunks and low productivity. The study was conducted on a test area in the North Caucasus region (Republic of Adygea) according to survey data from 2022 (autumn). This work is devoted to the development and evaluation of the results of using the methodology for determining the parameters of individual trees. To do this, it is proposed to use typical functions of relief analysis and hydrological modeling in combination with data filtering using statistical functions within a sliding window. The analysis is carried out using a regular-cell model of relative tree heights. The final result of the work is a point vector GIS layer, where the planned position of the point corresponds to the position of the tree trunk, and its height and crown diameter are recorded in the attribute table. The final results after a complete visual check on a regular cell data model and a selective manual check using orthomosaics and initial points of laser reflections can be assessed as acceptable, but in need of further improvement of the methodology.

KEYWORDS: airborne imagery, remote sensing, GIS, LIDAR, forest inventory

ВВЕДЕНИЕ

Цели и проблематика определения геометрических параметров растительности

Растительность — один из важнейших компонентов географической среды. Картографирование растительности и ее свойств — одна из широко распространенных задач в картографии и топографии. Если на картах м-ба 1: 25 000 и мельче растительность и ее характеристики приводятся в обобщенном виде (контур растительности, состав), то на материалах более крупного масштаба возникает необходимость картографирования отдельных групп деревьев, отдельных деревьев и их параметров. Наиболее подробные сведения приводятся на материалах подеревной съемки (м-б 1: 500 или 1: 200), где наносятся сведения о центрах осей стволов, диаметре стволов, крон, высоте деревьев и пр. информация. При выполнении работ по лесотаксации, особенно лесотаксации 1 разряда,

¹ M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: rilskiy@mail.ru

² M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: malevannaya_m@mail.ru

³ M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: gribok.marina@gmail.com

⁴ M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: alex_panin@mail.ru

также необходим учет сведений о деревьях для оценки объемов деловой древесины, биомассы, планирования мероприятий по улучшению леса (осветляющие рубки и т. п. действия). Сведения о геометрических параметрах отдельных деревьев часто необходимы и при выполнении проектных работ в туристических районах. Наиболее частые виды деятельности с использованием этих материалов предполагают обустройство или реконструкцию парковых зон, вписывание новой застройки в существующую растительность (создание эко-отелей или экопоселений), планирование горнолыжных трасс, пешеходных маршрутов и пр.

Существующие традиционные методы измерений геометрических параметров деревьев и их недостатки

Поскольку вышеупомянутые задачи далеко не новы, исторически сложились несколько подходов к решению данной задачи. Тем не менее, каждый из них обладает рядом очень существенных недостатков.

Наиболее старым и точным традиционно считается **ручной метод**. Он применяется в настоящее время для целей лесотаксации на участках тестовых рубок или при эталонных замерах, он же используется и для подеревной съемки при выполнении топографических работ наивысшей детальности. Помимо очевидной трудоемкости метода (когда производительность работ одной бригады измеряется десятками долями гектара в день), метод обладает и рядом технологических недостатков. Среди них:

- невозможность применения высокоточного спутникового позиционирования в лесу;
- затрудненность привязки с помощью тахеометров в лесу ввиду плохого обзора;
- невозможность измерения высот деревьев в лесу при высокой сомкнутости крон;
- затрудненность наблюдения вершины дерева снизу в условиях леса;
- стволы деревьев могут быть не вертикальными;
- субъективность при измерении диаметра ствола (ствол никогда не имеет идеально круглого сечения, обладает выступами и наростами).

В лесотаксации распространенным подходом является **работа с использованием ортофотопланов** (получаемых по материалам воздушных или космических съемок) в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне. В этом случае наиболее распространенной проблемой является тот факт, что ортофотопланы строятся с использованием сведений о рельефе (радарная модель местности SRTM либо модели рельефа с топографических карт). При этом не учитывается смещение вершущек крон, возникающее из-за высоты самих деревьев. Например, при высоте дерева в 20 м и использовании фотокамеры с углом охвата 60° смещение вершущки дерева на краю кадра может составлять до 10 м.

Возможным вариантом решения этой проблемы является использование не одиночных снимков и модели рельефа, а стереоданных. В этом случае необходимо построить полноценный фотограмметрический блок, в стереорежиме создать цифровую модель видимой поверхности деревьев, и уже эту поверхность использовать для оценки планового положения дерева. Однако и в первом, и во втором случае вопрос определения собственно высоты дерева является открытым, т. к. в первом случае известна (причем с крайне невысокой точностью — около 5–7 м по высоте) отметка рельефа, но неизвестна высота дерева, а во втором случае нет модели рельефа. В случае совмещения и ЦМР (цифровая модель рельефа), и ЦМП (цифровая модель поверхности) получаемый результат в виде высот деревьев содержит в себе как погрешность рельефа, так и погрешность стереомоделирования. Так, при использовании топографической карты м-ба 1: 25 000 с шагом горизонталей в 10 м ожидаемая точность ЦМР составит около 1/2 сечения рельефа, т. е. 5 м. При использовании космической стереосъемки с детальностью 50 см ожидаемая

точность стереомодели составит около 1,5 м. Итоговая погрешность определения высот деревьев в данном примере составит в пределе до 6,5 м, что неприемлемо. Конечно, при использовании аэрофотосъемки качество стереомодели возрастает, однако проблема определения высот подстилающей поверхности не решается никак — в залесенной местности высота рельефа достоверно определена быть не может. Очевидно, что определить диаметр ствола с использованием подобных методов также невозможно ввиду его невидимости на данных съемок в видимом диапазоне.

Применяемый в лесотаксации метод осредненного измерения диаметров крон на основании визуальных оценок текстуры снимков и последующего районирования территории по этому параметру является крайне субъективным и допускает очень большой (в несколько раз) разброс параметров даже в пределах одного контура, заявленного как однородный.

Современные источники данных для определения геометрических параметров древесной растительности

В последние 20 лет в области изучения геометрических параметров древесной растительности произошли позитивные изменения, связанные с появлением метода воздушного лазерного сканирования. Метод лазерного сканирования (лидар, LIDAR) основан на измерении дальности по времени прохождения очень короткого лазерного импульса в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне и аппаратном измерении элементов внешнего ориентирования источника этого импульса в момент испускания [Haala, 1998]. Результатом измерения является одна или несколько трехмерных точек, соответствующих координатам некоторой поверхности, от которой отразился лазерный луч. В упрощенном понимании, лазерный сканер работает аналогично радару, но не в радио-, а в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне, и использует не широкое поле излучения, а узкий сфокусированный луч.

Принципиальным отличием данного метода от всех прочих является возможность проникновения сквозь несплошные объекты (например, кроны деревьев) испущенного импульса лазерного излучения с последующим формированием нескольких последовательно возвращающихся и регистрируемых отражений. Так, при попадании вертикального луча в крону дерева (сверху) первое отражение придет от видимой поверхности кроны, далее — по мере прохождения импульса сквозь крону — ряд отражений будут сформированы ветвями, и последним отражением будет отражение от земли (грунта). Это позволяет в рамках одного измерения получить как координаты внешней, так и подстилающей поверхности [Lohr, 1997]. При наличии значительного количества точек лазерных отражений, равномерно и часто распределенных по поверхности дерева, возможно достаточно детальное (на уровне первых дециметров) построение модели кроны, ее внутреннего строения (не всегда) и точное построение подстилающего рельефа.

Скорость современных лазерных сканеров составляет от десятков тысяч до миллионов точек лазерных измерений в секунду. Современные лазерные сканеры делятся на статические и кинематические системы. Первые по принципу действия схожи с роботизированными тахеометрами, превосходя их в скорости в сотни и даже тысячи раз. Дальность действия подобных приборов достигает нескольких км (например, для Riegl VZ4000 максимальная измеренная дальность составляет свыше 10 700 м), что, впрочем, в условиях леса является нереализуемым преимуществом. Работа всегда ведется со статической позиции [Рыльский, Малеванная, 2014], далее сканер переставляется (на штативе) на новую точку, и так — до полного покрытия территории данными. Использование лидарного сканирования систем для сканирования лесов возможно, но в большинстве случаев нерационально ввиду низкой производительности метода. Тем не менее, при работе в городских парках, лишенных подлеска, применение этих систем дает

наилучшие и наиболее точные результаты. Плотность подобных измерений доходит до 3000–5000 точек на 1 м², точность измерений — 3–6 мм. Подобные данные позволяют полностью описать сколь угодно сложную структуру дерева и сколь угодно кривой ствол.

Более производительным методом является кинематическое лазерное сканирование. Работа в этом случае ведется непрерывно, без остановок и пауз. Для определения элементов внешнего ориентирования используются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) на базе волоконно-оптических гироскопов и акселерометров. В зависимости от класса точности системы погрешность угловых измерений составляет от 0,003° до 0,05°. Для коррекции результатов измерений БИНС используются либо ГНСС-системы (ГЛОНАСС, GPS), либо SLAM-алгоритмы (в основном при работе в закрытых средах или в лесах). Скорость подобных систем также составляет от нескольких десятков тысяч до нескольких миллионов измерений в секунду, однако за счет непрерывности измерений и постоянной смены ракурса производительность оказывается в десятки и сотни раз выше, чем при использовании статического лазерного сканирования. Платой за это является более низкая точность (2–5 см) и плотность съемки. Она колеблется от 1–4 точек на 1 м² для низкоплотного авиационного сканирования до 100–500 точек на 1 м² для переносных мобильных лазерных сканеров для съемки пешком. Именно с помощью подобных систем и производится в настоящее время съемка лесов.

В качестве платформы-носителя для кинематической лазерной системы может выступать человек (несущий ее в руке, масса до 2–3 кг), автомобиль или квадроцикл (на который она ставится сверху), беспилотный летательный аппарат (мультикоптер, самолет, вертолет) или пилотируемое воздушное судно (самолет, вертолет, автожир, мотопараплан и им подобные). По мере роста скорости и высоты полета воздушного судна происходит падение плотности данных и рост производительности съемки. Так, БПЛА с высоты 80–90 м может обеспечить плотность до 50–150 точек на 1 м² с производительностью 300–500 га/сут., а тяжелая лазерная система с дальностью действия в 2000–3000 м, летящая со скоростью около 250 км/ч, может обеспечить плотность на уровне 10–15 т/м² при производительности около 150 000 га/сут. Отметим, что для картографирования кроны дерева и определения его геометрических параметров в целом достаточно плотности сканирования на уровне 2–3 точки на 1 м² [Рыльский, Тикунов, 2016].

Данные лазерного сканирования всегда сопровождаются одновременно производимой фотосъемкой (наземной или воздушной) [Allen, 2003]. Результатом этих съемок при работе с воздуха является ортофотоплан. При этом отметим, что поскольку лазерное сканирование позволяет получить с точностью лучше 10 см отметки высот как истинного рельефа, так и видимой поверхности кроны, то это дает возможность построить ортофотоплан, на котором плановое положение крон истинно. Кроме того, используя методы картографической алгебры [Капранов, 2004], возможно построить поверхность, представляющую собой разность высот между видимой поверхностью, включая кроны, и поверхностью рельефа. Полученная модель разностей высот будет фактически моделью относительных высот растительности, что позволяет определить и высоты отдельных деревьев. Габариты каждой кроны в трехмерном пространстве позволяют определить ее диаметр. Единственно, что по-прежнему не может быть определено при работе с воздуха — это диаметр ствола, поскольку гарантированной передачи формы ствола не дает ни один из вариантов съемки с использованием лазерного сканирования.

Предлагаемый подход к решению задачи и используемые для этого данные

Как уже было отмечено выше, авиационные методы лазерного сканирования являются наиболее производительными, при этом итоговая производительность напрямую зависит от итоговой плотности сканирования, скорости и высоты полета. В зарубежных и

отечественных источниках представлено большое число публикаций, где рассматривается возможность использования данных съемок с БПЛА с плотность 50–150 точек на 1 м² для решения вышеперечисленных задач. Несмотря на традиционные заявления об успешности достигнутых результатов, все они отличаются двумя недостатками:

- параметры ствола недоступны для прямых измерений при любых плотностях сканирования (ствол просто не виден, или видна его приблизительная ось);
- производительность съемок с такими параметрами крайне мала, а себестоимость съемок и моделирования деревьев на площади в 1 га — очень велика, и не может представлять практического интереса для целей лесотаксации или подеревной съемки на значительных (десятки и сотни километров) территориях.

На практике значимо низкая себестоимость работ наблюдается при использовании носителей со скоростями 160–280 км/ч и плотности сканирования 3–10 точек на 1 м², что обеспечивает возможность съемки до 20 тыс. га в день. Таким образом, практически значимый результат может представлять методика, основанная на использовании именно таких данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор участка и получение данных

В качестве тестового участка для отработки вышеописанной концепции была выбрана территория существующих и проектируемых горно-туристических комплексов в районе плато Лагонаки. Объект съемки расположен на территории Республики Адыгеи (рис. 1).

Район включает в себя предгорные ландшафты Кавказа. Для наполнения данными модели были использованы материалы залета 2022 г., съемка выполнена в начале ноября, после опадания листвы.

В настоящее время на территории создания модели наблюдается очень высокая активность в части развития горно-туристических кластеров и сопутствующей прилегающей селитебной инфраструктуры с целью увеличения потока отдыхающих во все сезоны года.

Климат региона — умеренный, со слабо выраженной высотной поясностью. Территория частично покрыта лесами смешанного типа, что хорошо видно на ортофото-плане. В ходе выполнения работ было отснято около 1700 га. Местность характеризуется высокорасчлененным рельефом, обилием крутых склонов и скальных сбросов (рис. 2). Работа традиционными наземными способами для определения параметров растительности весьма затруднена.

Лазерное сканирование выполнялось с использованием лазерного сканера Riegl Q560, использовалась цифровая фотокамера IGI DigiCam 60 (среднеформатная авиационная камера с разрешением матрицы в 60 Мп) в режиме RGB.

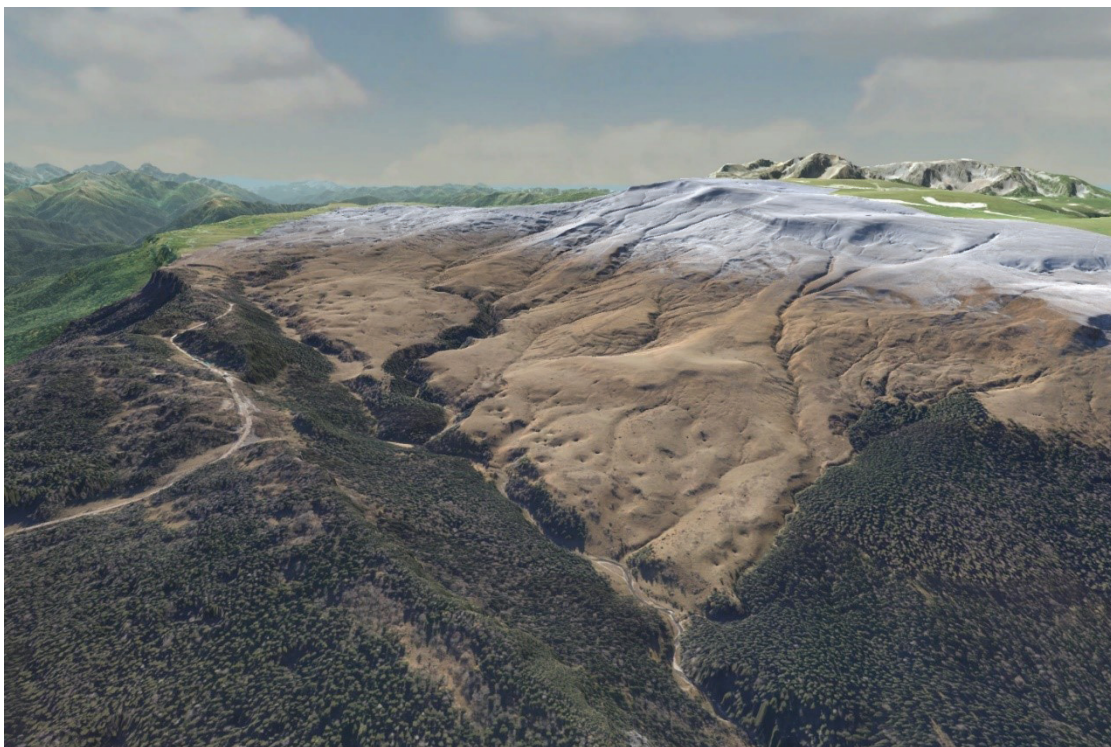
Залет производился по системе параллельных треков, продольное перекрытие фотоснимков составило 60 %, поперечное — от 30 до 55 % (аналогично и для лазерного сканирования).

Аэрофотосъемка и лидарное сканирование производились одновременно. Работа велась с высот 350–800 м над поверхностью рельефа. Разрешение фотоснимков составило от 5 до 10 см, плотность лазерного сканирования — 5,5 точек на 1 м². Это соответствует требованиям м-ба 1: 100 и 1: 2 000 с запасом по детальности и плотности сканирования.

Система координат и высот проекта — WGS 84, проекция UTM (зона 37), высоты — эллипсоидальные. В целом выбор системы координат не оказывает никакого влияния на конечные результаты классификации.



*Рис. 1. Районы выполнения съемок и моделирования деревьев (красный контур)
Fig. 1. Airborne laser scanning and tree modelling areas (red outline)*



*Рис. 2. Вид на территорию плато Лаго-Наки. Виртуальное моделирование
с использованием данных съемки 2022 г.
Fig. 2. Virtual model view on Lago-Naki plateau. Virtual model made
using airborne laser scanning data surveyed in 2022*

Отличительной и крайне важной для последующих рассуждений чертой лазерных сканеров Riegl начиная с 560-й модели является возможность обеспечения полностью равномерного распределения точек лазерных отражений при максимальной частоте сканирования. Подобной функцией не располагают сканеры с синусоидальной, пилообразной и круговой разверткой, что существенно ограничивает их возможности при выполнении работ, аналогичных описанным в данной статье. В данном проекте среднее расстояние между точками в строке сканирования и между строками сканирования (использовалось сканирование по параллельным строкам) было принято исходя из запланированной средней плотности сканирования 5 точек на 1 м², скорости носителя в 165 км/ч и составило 45 см как по оси залета, так и поперек нее.

Выбор программной среды для разработки методики определения геометрических параметров древесной растительности

Для оценки геометрических параметров деревьев в данной работе был использован подход, в котором не делается попыток описания конкретной формы кроны дерева какой-либо идеальной геометрической формой (конус, цилиндр, параболоид вращения и т. п.). Вместо этого предлагается вычислить поверхность относительных высот деревьев над землей, зеркально отразить ее (так, что вершины деревьев становятся котловинами, а границы их крон — водораздельными поверхностями). После этого задача сводится к определению областей замкнутого стока, которые соответствуют в плане и по высоте (с обратным знаком) плановым координатам центра ствола и высоте дерева. Водосборный бассейн в данном случае будет соответствовать проективной площади кроны, параметры его (площадь, ширина/высота) будут соответствовать аналогичным параметрам кроны. В качестве проверочной меры может быть использован либо метод визуального ручного дешифрирования этих же материалов аэросъемки специалистом, либо полевая проверка. И тот, и другой метод, несмотря на вышеописанную субъективность, считается полностью пригодным для решения этой задачи. В случае получения схожих или идентичных результатов это можно считать критерием правильности представленного подхода.

После выполнения залета, расчета траектории и вывода исходных фотоснимков точки лазерных отражений были координированы и выведены в систему координат и высот проекта с использованием программного комплекса Riprocess. Результатом данного процесса явилось облако точек в формате LAS, исходные снимки с элементами внутреннего и внешнего ориентирования (измерены аппаратно с помощью бортовой БИНС).

В дальнейшем в данной работе использовались два семейства программных продуктов. Первое — для работы с точками лазерных отражений и построения ортофотопланов, второе — для работы с ГИС-слоями данных и моделирования древесной растительности.

Для первой группы задач было принято решение об использовании пакета программных модулей TerraSolid — использованы модули TerraScan (классификация, сегментация точек), TerraPhoto (создание ортофотопланов и мозаик), TerraModel (для создания GRID-моделей по точкам лазерного сканирования). Для второй группы задач был использован пакет ArcView и дополнительные программные модули, написанные авторами на языке Avenue.

Полученное в ходе залета облако точек было классифицировано [Chen, 2007] автоматизированным способом (с использованием программного обеспечения TerraSolid) на классы «Земля», «Растительность», «Прочие точки». Классификация растительности производилась по критерию высоты относительно поверхности рельефа. В анализ принимались точки с относительной высотой выше 2 м над уровнем земли (растительность высотой менее 2 м не относится к деревьям и не является предметом анализа).

Полученные два класса точек — «Земля» и «Растительность» — были экспортированы в ГИС-формат ArcInfo GRID (далее — просто «грид»). Каждое облако точек экспортировалось в абсолютной системе координат и высот [Gorgens, 2017]. Для экспорта каждого класса точек использовались различные алгоритмы. Так, класс точек «Земля» был экспортирован как результат триангуляции Делоне, конвертированный в растровую форму. Класс точек «Растительность» был экспортирован как прямая растеризация точек по принципу: если в пиксел грида попадает одна или несколько точек — он экспортируется с высотой, максимальной из этих точек.

Учитывая, что шаг точек при съемке был равен 0,45 м, итоговое разрешение гридов было принято равным 0,5 м. При среднем диаметре кроны в 5 м это составляет около 80–100 ячеек грида, что достаточно для достоверного моделирования кроны дерева.

Разработка методики определения центров, высот и габаритов крон деревьев

Полученные две поверхности (по классам «Земля» и «Растительность») были вычтены друг из друга с использованием картографической алгебры (т. е. попиксельно в случае взаимного перекрытия) с образованием итоговой поверхности для анализа (формула 1):

$$A = B - C \quad (1),$$

где А — поверхность относительных высот деревьев,
В — поверхность растительности в абсолютных высотах,
С — поверхность земли в абсолютных высотах.

Далее была сделана попытка использовать инструментарий ГИС, предназначенный для гидрологического анализа рельефа, для целей поиска центров крон и прочих параметров деревьев на полученной поверхности относительных высот деревьев (далее — ПОВД).

Деревья в общем случае представляют собой совокупность выпуклых форм (конических, яйцеобразных и произвольных), описываемых точками лазерных отражений класса «Растительность». Вышеописанный метод экспорта данных класса «Растительность» (по высшей точке) обеспечивает достоверное описание внешней поверхности кроны дерева по всей ее площади (в случае отдельно стоящего дерева) или по ее вершинной [Korpela, 2008] части (при высокой сомкнутости деревьев).

Поскольку инструментарий ГИС для гидрологического анализа оперирует с отрицательными формами рельефа, то ПОВД была умножена на -1 , что зеркально отражает ее вниз, делая вершины деревьев низшими точками котловин.

При этом предполагается, что:

- глубина впадины * (-1) = высота дерева;
- координаты центра впадины = координаты ствола дерева (оси);
- площадь водосборного бассейна соответствует площади кроны;
- диаметр круга, равного по площади водосборному бассейну, соответствует диаметру кроны.

По итогам ряда проведенных экспериментов была разработана следующая схема работы, дающая наиболее оптимальные результаты с использованием принятого для данной работы набора данных лазерного сканирования.

Шаг 1. К полученному после умножения на -1 гриду применяем анализ статистики в пределах скользящего окна радиусом $R1$. В целом неплохие и сопоставимые по качеству результаты получаются при использовании круглых скользящих окон (рис. 3, 4) радиусом от 3 до 5 ячеек (в целом радиус анализа коррелирует с средним радиусом кроны). Используемая статистическая функция — либо математическое среднее, либо медиана.

Шаг 2. Применяем функцию, определяющую локальные понижения и районы внутреннего дренажа (Sink — входит в комплект функций Spatial Analyst). Выходные результаты данного инструмента — это целочисленный растр, в котором каждому локальному понижению присваивается уникальное значение. Локальные понижения нумеруются от единицы до числа, равного количеству локальных понижений.

Шаг 3. Для каждого местоположения Sink определяем максимальное значение в некоторой окрестности, равной примерно половине радиуса кроны. Применяем функцию расчета максимального значения ячеек для окрестности к полученному растру локальных понижений.

Шаг 4. Конвертируем полученный растр в ArcView Shape-файл (*.shp) и находим центры полученных полигонов. Центроидам присваиваются значения высоты дерева. Дополнительно с учетом площади каждого дерева рассчитывается радиус его кроны (как радиус окружности с площадью, равной площади кроны дерева).

Для отработки методики были использованы несколько тестовых полигонов площадью до 200 га (с визуальным контролем по ортофотопланам), до 3 га — с контролем по точкам лазерных отражений и ортофотопланам, до 0.5 га — предполагаемый объем контроля с использованием полевых работ в течение лета – осени 2023 г. Контроль по точкам лазерных отражений с использованием данных лазерных точек и ортофотопланов производился вручную. Оператор подгружал упомянутые массивы данных и в районе каждого из полученных центроидов дерева выполнял ручное профилирование и измерение параметров кроны как по данным лазерного сканирования, так и ортофотоплана (в случае сомнений). Также профилировались отдельные скопления точек, рядом с которыми по тем или иным причинам не были поставлены центроиды. Итоговые результаты сравнивались с результатами автоматизированного поиска.

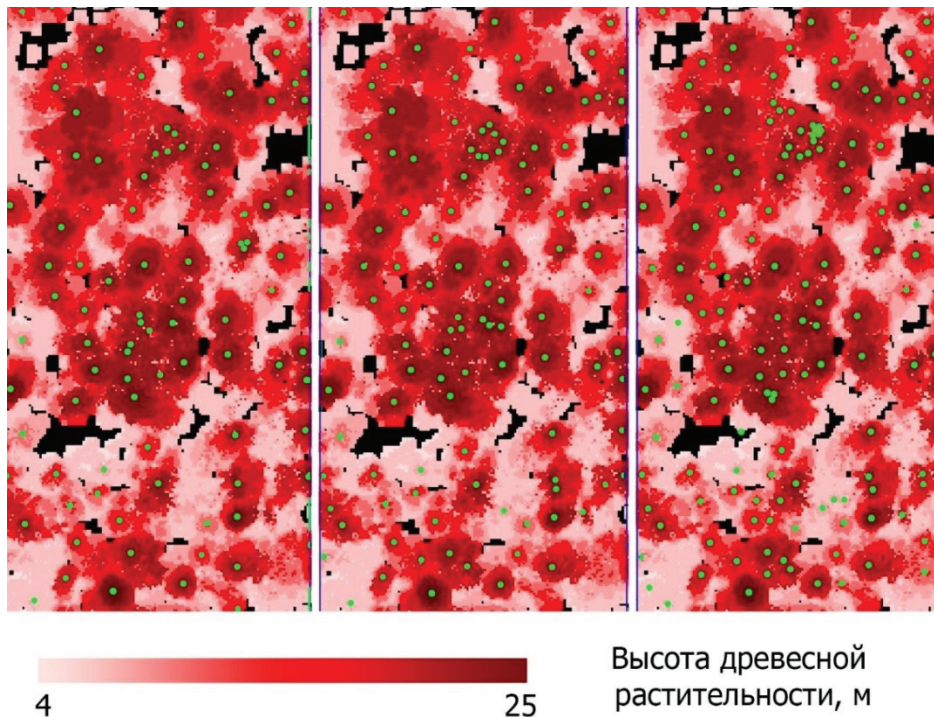


Рис. 3. Влияние выбора радиуса окна осреднения на итоговый результат (слева направо: 5 ячеек, 4 ячейки, 3 ячейки). Подложка — цифровая модель высот деревьев

Fig. 3. Influence of the choice of the averaging window radius on the final result (from left to right: 5 cells, 4 cells, 3 cells). Background — digital model of tree heights

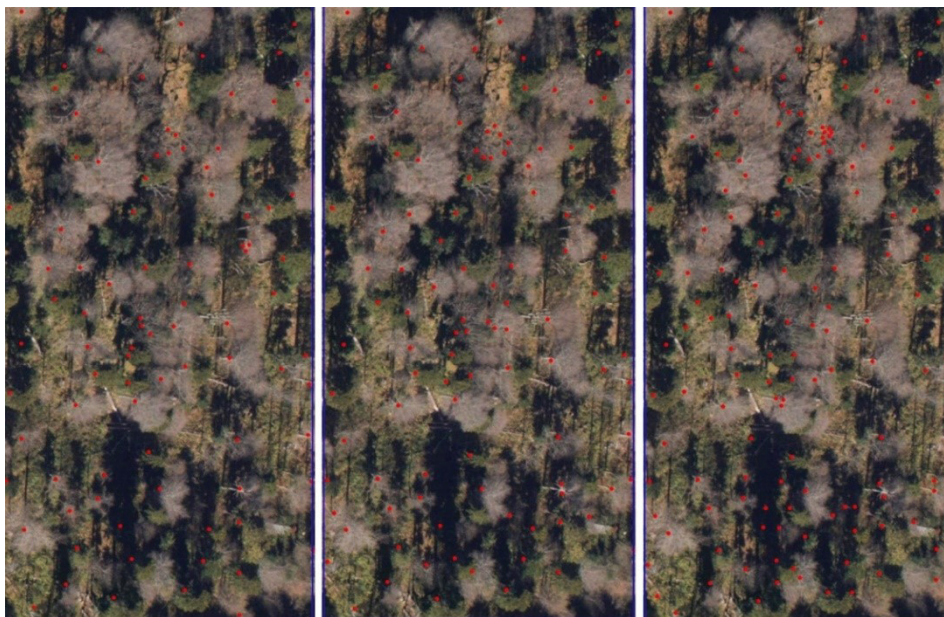


Рис. 4. Влияние выбора радиуса окна осреднения на итоговый результат (слева направо: 5 ячеек, 4 ячейки, 3 ячейки). Подложка — ортофотоплан
Fig. 4. Influence of the choice of the averaging window radius on the final result (from left to right: 5 cells, 4 cells, 3 cells). Background — orthomosaic

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По итогам тестовой обработки вышеописанным способом были достигнуты следующие результаты:

1. На территории до 200 га было проведено тестовое определение параметров деревьев. Для выбора наилучших параметров дешифрирования было отработано свыше 30 вариантов подходов к использованию статистических функций, форме скользящего окна, его радиусу и принципам фильтрации полученных результатов.
2. Итоговый контроль в первом приближении производился визуально (по цифровой модели деревьев и/или по ортофотопланам). Наиболее реалистичные результаты передавались для более подробного выборочного контроля.
3. Выборочный контроль предполагает оценку результатов с использованием исходных облаков точек и ортофотопланов на площади до 3 га.
4. Полученные результаты предполагается проверить в ходе полевого сезона 2023 г.

На текущем этапе исследований можно уже отметить, что предложенные подходы в подавляющем числе случаев верны для отдельно стоящих деревьев или для лесов с разомкнутыми кронами, когда между каждым из деревьев есть некоторое пустое пространство. Также нужно отметить, что наиболее точный результат получается в условиях хвойного леса (ель, пихта) с четко выраженной конической формой стволов. В условиях смешанного или лиственного леса (реже — хвойного) результат может обладать следующими недостатками:

- Плановые координаты вершины не соответствуют плановым координатам ствола на уровне земли (рис. 4). Причины: искривленные стволы, «пьяный лес» на оползневых склонах, раздваивание вершины и пр.
- Отдельные ветви широколиственных пород могут быть сопоставимы по размерам кроны с небольшим деревом, смыкаясь с основным стволом лишь на уровне земли, что снижает правильность дешифрирования.

На текущем этапе также можно говорить, что полученный подход дает уровень достоверности отдешифрованных характеристик деревьев на уровне около 80–85 % для хвойных пород и около 65–70 % для лиственных пород. Несомненно, подобный результат не является на данном этапе промышленно значимым, однако по мере совершенствования методики обработки данных и их фильтрации потенциально представляет интерес для использования при широкомасштабных исследованиях лесов.

Преимущества описанного подхода

Основными достоинствами подобного подхода являются:

- простота в использовании для специалистов, владеющих функционалом стандартных ГИС-пакетов без необходимости использования дорогостоящих программных продуктов;
- возможность работы с низкоплотными (менее 6 точек на 1 м²) данными воздушного лазерного сканирования, что открывает возможности выполнять такие работы в очень больших объемах с чрезвычайной быстротой, при этом уровень достоверности, достигнутый уже на данном этапе, может быть вполне пригоден для задач лесотаксации и схожих с ними;
- возможность легкой перенастройки параметров методики в зависимости от характера залесенности и породного состава при смене региона работы.

ВЫВОДЫ

По итогам проделанной работы можно утверждать, что описанная в работе концепция создания точечных векторных слоев с центрами каждого отдельного дерева и его характеристиками, определяемыми по данным низкоплотного (ниже 6 точек на 1 м²) воздушного лазерного сканирования, реализуема с достаточно высоким уровнем достоверности. В то же время полученные результаты не являются окончательными — методика нуждается в дополнительной полевой проверке и доработке параметров дешифрирования и фильтрации полученных результатов.

Полученные по результатам применения вышеописанного подхода материалы (векторные ГИС-слои с параметрами отдельных деревьев) могут быть использованы для:

- лесотаксационных работ (включая определение объемов запасов древесины, биомассы и т. п.) при условии использования дополнительных материалов;
- подеревной съемки (при неполной сомкнутости крон и/или в чисто хвойных лесах);
- уточнения статистических параметров лесопокрытых площадей;
- расчетов проходимости территории по категориям;
- использования в виртуальных моделях местности.

Несмотря на ряд недостатков, предложенный метод является быстрым и недорогим решением, использующим данные воздушного лазерного сканирования с низкой плотностью и невысокой стоимостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 352 с.; 480 с.

Рыльский И.А., Малеванная М.С. Наземные лазерные методы — новые подходы к информационному обеспечению географических исследований. Геодезия и картография, 2014. № 8. С. 38–48. DOI: 10.22389/0016-7126-2014-890-8-38-48.

Рыльский И.А., Тикунов В.С. Перспективы использования комплексов воздушного лазерного сканирования для картографирования лесов. Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2016. Т. 15. С. 104–113.

Allen P.K., Stamos I., Troccoli A.A., Smith B., Leordeanu M., Hsu Y. 3D modeling of historic sites using range and image data. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. V. 1. P. 145–150.

Chen Q. Airborne lidar data processing and information extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007. V. 73. No. 2. P. 109–112.

Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L. A method for optimizing height threshold when computing airborne laser scanning metrics. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2017. V. 1. P. 343–350.

Haala N., Brenner C., Anders K.-H. 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. P. 339–346.

Korpela I. Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 2008. P. 3891–3897.

Lohr U. Digital elevation models by laser scanning: Principle and applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

REFERENCES

Allen P.K., Stamos I., Troccoli A. A., Smith B., Leordeanu M., Hsu Y. 3D modeling of historic sites using range and image data. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. V. 1. P. 145–150.

Chen Q. Airborne lidar data processing and information extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007. V. 73. No. 2. P. 109–112.

Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L. A method for optimizing height threshold when computing airborne laser scanning metrics. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2017. V. 1. P. 343–350.

Haala N., Brenner C., Anders K.-H. 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, P. 339–346.

Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S. Fundamentals of geoinformatics. Moscow: Academy, 2004. P. 480.

Korpela I. Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 2008. P. 3891–3897.

Lohr U. Digital elevation models by laser scanning: Principle and applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

Rylskiy I.A., Malevannaya M.S. Terrestrial laser scanning methods — new approaches to the information supply for geographic researches. Geodesy and Cartography, 2014. No. 8. С. 38–48 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2014-890-8-38-48.

Rylskiy I.A., Tikunov V.S. Perspectives of using airborne laser scanning systems for forest mapping. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Nauki o Zemle” (The Bulletin of Irkutsk State University. Series “Earth Sciences”), 2016. V. 15. P. 104–113 (in Russian).