

Использование беспилотных летательных аппаратов для таксации лесных насаждений

П.Б. Рябухин^{1а}, Е.М. Рунова^{2б}

¹Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, Россия

²Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^а pryabukhin@mail.khstu.ru, ^б runova0710@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6178-4038>

Статья поступила 13.01.2025, принята 05.02.2025

Статья посвящена описанию методов, специализированного оборудования и программного обеспечения для проведения таксационных работ с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Проанализированы методы проведения таксационной съемки лесов с помощью БПЛА с указанием их преимуществ и недостатков. Дана информация об основных особенностях и возможностях БПЛА, а также специализированного оборудования для эффективного проведения таксации лесных ресурсов, предложены основные параметры рабочего полета БПЛА, являющиеся по рекомендациям производителей технологического оборудования наиболее подходящими для выполнения работ по лазерному сканированию, представлена последовательность выполнения работ по дешифрированию полученной с помощью новых технологий и оборудования информации при таксации лесов. Рассмотрен и проанализирован способ проведения полевой таксации при помощи беспилотных летательных аппаратов на примере конкретного лесного объекта и разработан алгоритм выполнения работ, включающий этапы съемки лесного участка с использованием GPS оборудования и камеральной обработки полученных данных таксации с использованием ПО Lidar 360.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; мультикоптер; квадрокоптер; таксация; лесное хозяйство; лидар; мультиспектральная съемка; камеральный анализ; алгоритм; облако точек.

The use of unmanned aerial vehicles for taxation of forest stands

P.B. Ryabukhin^{1а}, E.M. Runova^{2б}

¹Pacific National University; 136, Tikhookeanskaya St., Khabarovsk, Russia

²Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^а pryabukhin@mail.khstu.ru, ^б runova0710@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6178-4038>

Received 13.01.2025, accepted 05.02.2025

The article is devoted to the description of methods, specialized equipment and software for taxation using unmanned aerial vehicles (UAVs). The methods of conducting taxation survey of forests using an UAV indicating their advantages and disadvantages are analyzed. Information is given on the main features and capabilities of UAVs, as well as specialized equipment for effective taxation of forest resources, the main parameters of the UAVs operational flight are proposed, which, according to the recommendations of manufacturers of technological equipment, are the most suitable for performing laser scanning work, and the sequence of work on decrypting information obtained using new technologies and equipment during forest taxation is presented. The method of carrying out fiber taxation using unmanned aerial vehicles on the example of a particular forest object was considered and analyzed and an algorithm for performing work, including the stages of shooting a forest area using GPS equipment and desk processing of taxation data using Lidar 360.

Keywords: unmanned aerial vehicle; multicopter; quadcopter; taxation; forestry; Lidar; multispectral survey; camera analysis; algorithm; point cloud.

Введение. Одним из ключевых аспектов управления лесными ресурсами является таксация леса, т. е. оценка его количественных и качественных характеристик. Таксация позволяет оценить состояние лесных ресурсов, определить границы лесных насаждений, исследовать основные параметры насаждений: диаметр, высоту, объем, проанализировать полноту насаждений лесных участков и парковых зон, выявить преобладающие и сопутствующие древесные породы, контролировать заготовление древесины и оценить риски

при возможных решениях в лесопользовании [1].

В последнее время таксация леса все чаще проводится с использованием современного оборудования, позволяющего получать более точные и достоверные данные о лесных ресурсах, что в свою очередь способствует более эффективному управлению ими и сохранению их для будущих поколений.

Целью исследований является проведение анализа эффективности и точности таксации леса с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и лазер-

ного сканирования. Для реализации поставленной цели сформулированы следующие задачи исследований:

- изучить методы и оборудование для проведения таксации;
- дать таксационную характеристику насаждений в исследуемом объекте;
- проанализировать полученные данные лазерного сканирования;
- сформулировать выводы и рекомендации для повышения качества выполнения работ по таксации насаждений.

В настоящее время, для таксации леса все чаще используются БПЛА, которые обладают рядом преимуществ перед традиционными методами таксации. Благодаря использованию технологий дистанционного зондирования БПЛА позволяют получить точную информацию о количественных и качественных характеристиках лесных ресурсов с минимальными затратами времени и человеческих ресурсов.

Применение БПЛА представляет собой новое и перспективное направление в области лесного хозяйства, что дает возможность фиксировать данные с максимальной разрешающей способностью и получать более точные сведения о лесных массивах [2–4].

К основным преимуществам способа проведения таксационных исследований с применением БПЛА можно отнести следующие:

- экономия времени и снижение затрат (использование БПЛА позволяет проводить мониторинг лесных участков с большей скоростью в отличие от наземного метода таксации);
- повышение эффективности контроля (применение БПЛА позволяет быстро обнаруживать возможные проблемы в лесных массивах, такие как лесные пожары, браконьерство и незаконную вырубку леса, что позволяет принимать оперативные меры по их предотвращению и более эффективно контролировать состояние лесов);
- повышение эффективности управления лесами (использование БПЛА в таксации леса позволяет принимать более обоснованные решения на основе точной и актуальной информации о состоянии лесов).

Существуют и ограничения в использовании БПЛА, такие как погодные условия, которые могут повлиять на точность получаемых данных, а также лимитирование максимальной высоты полета.

Согласно лесоустроительной инструкции, существует четыре метода лесной таксации: глазомерный, измерительный, перечислительный и дешифровочный [5].

В современных условиях наиболее актуален и эффективен дешифровочный способ таксации лесов, который основан на стереоскопическом контурном и таксационном аналитическом и измерительном дешифрировании количественных и качественных характеристик лесных насаждений и других категорий земель по их изображению на материалах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [6].

Работы по дешифрированию полученной с помощью новых технологий и оборудования информации при таксации лесов включают в себя несколько этапов:

- камеральный анализ признаков дешифрирования лесных насаждений и других категорий земель с со-

ставлением таблиц вероятностных оценок признаков дешифрирования и поэтапного процесса распознавания древесных пород (элементов леса);

- камеральная таксационно – дешифровочная тренировка исполнителей;
- определение контуров (границ) выделов и таксационных показателей (контурное и таксационное дешифрирование).

Беспилотная съемка позволяет получать информацию в режиме реального времени и выгодно отличается от спутникового мониторинга. Наиболее широкое применение в различных направлениях деятельности органов лесного хозяйства, землеустройства, контроля качества в промышленных процессах нашли мультироторные машины с четырехвинтовой системой движения (квадрокоптеры) (рис. 1). [2].



Рис. 1. Комплектация оборудования для проведения таксационных исследований: а – беспилотный летательный аппарат квадрокоптерного типа; б – лидар

Для получения более точных и объективных параметров лесных насаждений при проведении таксационных исследований в комплексе с БПЛА систему необходимо дополнять активным дальнометром оптического диапазона (лидаром), представляющим собой прибор для создания 3D-моделей поверхностей объектов, основанный на использовании лазерного излучения (рис. 1, б) [7, 8].

С помощью этого прибора можно получить данные о геометрических параметрах отдельных деревьев в насаждении (высоте, диаметре кроны и др.), а также и о характеристиках насаждения в целом (полнота, структура леса и т. п.), которые могут быть использованы для принятия решений по управлению лесными ресурсами.

Кроме того, лидар может быть использован с целью создания подробных цифровых моделей рельефа, которые отображают точные высоты и формы рельефа земли, а также для мониторинга изменений в ландшафте и планирования работ по лесоуправлению. Одним из основных преимуществ лидара при его использовании в лесном хозяйстве является высокая точность информа-

ции о лесных ресурсах, и его применение должно рассматриваться как часть комплексной стратегии лесопользования, необходимой для оценки состояния лесов, определения объемов рубки и обеспечения экологической устойчивости лесных массивов в целом.

При этом существуют некоторые ограничения его применения по погодным условиям – сильный ветер или дождь может исказить данные и снизить их точность.

Для обработки собранной информации могут быть использованы различные методы таксации леса [9], краткое описание которых представлено ниже.

Фотограмметрический метод основан на обработке изображений, полученных с помощью БПЛА. Процесс таксации леса с использованием способа фотограмметрии начинается со съемки леса с помощью БПЛА, на борту которого установлена камера, способная фиксировать изображения с большим количеством деталей и точностью. После получения фотографий происходит их обработка с помощью программы Agisoft Metashape, которая позволяет создать 3D-модель леса с высокой точностью и детализацией. Созданная модель включает в себя точные данные о высоте деревьев, площади поперечного сечения кроны, полноте насаждения и других параметрах, необходимых для определения объема древесины и для нахождения оптимальных мест для создания лесных культур при проведении работ по лесовосстановлению. Кроме того, этот метод таксации леса относительно недорогой и может быть применен в промышленном масштабе.

Воздушное лазерное сканирование – это метод получения информации о лесной растительности с помощью лазерного сканирования (лидарирование) [10]. Лидар устанавливается на БПЛА и собирает точную информацию о плотности стояния деревьев в лесу, высоте и диаметре деревьев, а также о структуре крон деревьев. Процесс таксации леса с использованием лидара состоит из следующих шагов:

- сбор данных (лидарный сканер излучает лазерный луч, который отражается от объектов на земле и возвращается обратно к сканеру); полученные данные обрабатываются для создания точной трехмерной модели лесного покрова;

- обработка данных (с использованием программы LIDAR 360, которая проводит фильтрацию, классификацию и сегментацию данных с целью выделения границы крон, соответствующих деревьев, от других объектов на земле);

- установление параметров каждого из деревьев в насаждении (высота, диаметр, площадь кроны и объем древесины);

- анализ данных (для вычисления количественных и качественных характеристик лесных насаждений, на основе которых производится анализ структуры леса и состояния лесных насаждений в целом).

Данный метод может быть использован не только для проведения точной оценки объема древесины на участке, но и для оценки возможности лесовосстановления и выявления мест с нарушенной экосистемой.

Мультиспектральная съемка – метод таксации леса с использованием мультиспектральной съемки, основанный на использовании спектральных характеристик

растительности, которые могут быть измерены с помощью мультиспектральных камер на борту БПЛА, снимающих лесной покров в нескольких узких спектральных каналах, охватывающих диапазоны длин волн от видимой части спектра до инфракрасной (рис. 2) [11, 12].

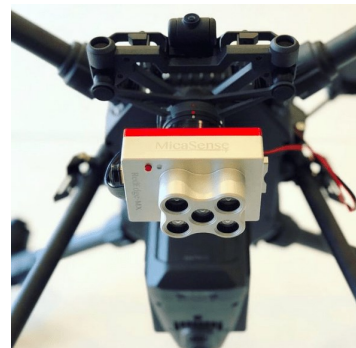


Рис. 2. Мультиспектральная камера

Данные, полученные с помощью этого оборудования, позволяют:

- определять породный состав и состояние лесных насаждений;
- контролировать места проведения рубок леса;
- выявлять состояние насаждений в лесу;
- прогнозировать прирост молодых саженцев;
- получать информацию о наличии вредителей и другие данные, которые помогают сохранить лесной фонд.

Для получения более точных результатов и устранения влияния освещенности, облачности и других факторов могут использоваться алгоритмы фильтрации внешних воздействий [13]. Метод таксации леса с использованием мультиспектральной съемки является достаточно точным и требует высокоточного оборудования и квалифицированных специалистов для обработки данных.

Методы проведения таксационной съемки лесов с помощью БПЛА с указанием их преимуществ и недостатков представлены в таблице [14].

Методы исследования и оборудование. Для проведения исследований по установлению оценки точности и качества лазерной съемки с использованием БПЛА был выбран лесной участок на территории горнолыжный курортной базы «Горный воздух» в г. Южно-Сахалинске.

Для оценки эффективности использования беспилотной системы в ходе выполнения работы по воздушному лазерному сканированию применялось следующее оборудование:

- БПЛА DJI Matrice 300 (флагманская полетная платформа в линейке промышленных дронов; время полета составляет 55 мин., полезная нагрузка — до 2,7 кг на трех точках подвески, имеет высокий уровень влагозащиты по стандарту IP45 и может выполнять задачи при температурах от -20 до +50 °C на высотах до 7000 м, оснащен дисплеем полетных данных для получения пилотом информации о полете, навигации и встречающихся препятствиях) (рис. 3, а) [15];

Таблица. Преимущества и недостатки методов таксационной съемки лесов с помощью БПЛА

Вид съемки	Мультиспектральная	RGB	Гиперспектральная	Тепловизионная	Воздушное лазерное сканирование
Преимущества	Высокоспектральное разрешение по доступной цене	Высокого качества контекстное и визуальное представление	Самое высокое спектральное разрешение	Определение очагов пожара, высоких температур	Дает представление о рельефе территории и пологе леса
Недостатки	Ограниченное спектральное разрешение для классификации видов растений	Низкое спектральное разрешение. Снимки только в видимом диапазоне светового спектра	Большое количество данных, которые сложно анализировать. Высокая стоимость.	Без визуального контекста сложно анализировать тепловизионные снимки	Трудности с интерпретацией данных. Высокая стоимость
Сферы применения	Составление карт состояния растительного покрова, диагностика заболеваний растений и т. д.	Быстрое создание снимков для управления лесным хозяйством. Подсчет густоты стояния растений	Научно-исследовательская деятельность	Контроль лесных пожаров и очагов возгорания	Анализ биомассы, высоты и вертикального распределения лесов, создание 3D-моделей



а)



б)



в)

Рис 3. Оборудование для воздушного лазерного сканирования лесных насаждений: а – БПЛА DJI Matrice 300; б – лазерный сканер Lidar Topodrone 100; в – GNSS-приемник PrinCe i90

– лазерный сканер Lidar Topodrone 100 (с использованием технологии подавления помех Hesai XT16, исключая включение в облако точек сигналов других лидаров; рабочая дальность 120 м; рабочая высота полета 100 м; двойное отражение до 640 000 точек в секунду; точность 3-5 см XYZ; угол обзора – 360°, встроенная IMU с частотой 200 Гц и точностью 0,07/0,01°) [16] (см. рис. 3, б).

– комплект геодезического спутникового приемника Prin Ce i90 (высокоточный прибор для определения координат и высот точек на местности с использованием глобальных навигационных спутниковых систем и радиоизмерительных технологий, имеет высокую точность измерения позиционных координат до 1 см и позволяет работать при отсутствии прямой видимости к спутникам) (см. рис. 3, в) [17].

Приемник PRINCe i90 оснащен несколькими GNSS-приемниками, включая GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou, благодаря чему может получать сигналы от большого числа спутников, что повышает точность определения координат.

Кроме того, PRIN i90 имеет функцию инерциальной навигации (IMU), что позволяет получать данные об изменениях положения и ориентации прибора в пространстве. Это также обеспечивает более точные измерения позиционных координат [17].

Для обработки полученной от лидара информации и создания точной 3D- модели поверхности исследуемого лесного участка была использована комплексная программа Lidar 360, которая позволяет визуализировать точки облака данных, создавать модели рельефа, классифицировать исследуемые объекты, генерировать пространственные данные и многое другое [18].

К основным функциям используемой программы относятся: генерация высотных показателей местности; создание цифровых моделей рельефа и цифровых моделей поверхности; классификация точек и объектов (земля, вода, растительность, здания и транспорт и т. д.); интерактивный анализ данных с использованием набора инструментов для улучшения качества данных и устранения шума; отображение данных в 2D и 3D режимах [18].

Для автоматической обработки данных лидарной съемки по выделению отдельных деревьев и расчетов лесного массива в целом с последующим анализом данных воздушного лазерного сканирования (ALS) и наземного лазерного сканирования (TLS) в рамках ПО Lidar 360 в данном исследовании использован лесной модуль Lidar forestry. Данный модуль выполняет следующие операции:

– распознавание деревьев на основе облака точек воздушных и наземных лазерных сканеров;

– автоматическое вычисление показателей лесного массива для получения параметров, которые не могут быть непосредственно извлечены из облаков точек, таких как биомасса и объем ствола;

– вычисление индивидуальных параметров дерева: местоположение дерева, высота дерева, диаметр на высоте груди, площадь кроны, диаметр кроны и др.;

– оперативные расчеты перспективных объемов заготовки леса и возможных к получению из него пиломатериалов.

В программном обеспечении заложены два алгоритма формирования отчетов, которые дают возможность автоматически распознавать и вычислять метрические характеристики деревьев: ALS (по данным воздушного лазерного сканирования); TLS (по данным наземных и мобильных лазерных сканеров).

Для построения полетного задания, планирования и управления полетами БПЛА и сбора данных была использована программа для подключения дронов серий M300 «UgCS» [18]. Она позволяет пользователю установить высоту и скорость полета, а также конкретизировать параметры для камеры и лидара на борту БПЛА. Использование UgCS для планирования полетов в таксации леса позволяет улучшить точность и эффективность съемки, а также обеспечить безопасность полетов.

Для обработки спутниковых геодезических измерений использован программный комплекс обработки инженерных изысканий, цифрового моделирования местности, проектирования генпланов CREDO GNSS, позволяющий обрабатывать базовые линии с использованием данных наблюдений по системам спутникового позиционирования ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BeiDou в режимах «статики», «кинематики» и «Stop&Go». CREDO GNSS может применяться как самостоятельный программный продукт, так и в составе технологической линейки комплекса CREDO (для обработки материалов инженерно-геодезических изысканий) [19].

Для создания трехмерных моделей лесного участка используется программное обеспечение Agisoft Metashape. Оно включает в себя технологии машинного обучения для анализа и постобработки, что позволяет получать результаты самой высокой точности [20, 21]. Agisoft Metashape дает возможность:

- обрабатывать изображения, получаемые с помощью RGB- или мультиспектральных камер, включая мультикамерные системы и лидары;
- преобразовывать снимки в плотные облака точек, в текстурированные полигональные модели, в геопривязанные ортофотопланы и в цифровые модели рельефа местности.

С помощью Agisoft Metashape можно получить точную информацию о высоте, плотности и объеме древесины на лесном участке.

Для проведения таксационных исследований с использованием ПО Agisoft Metashape разработан и реализован следующий алгоритм действий:

- сбор фотограмметрических данных с использованием БПЛА с камерой, снимающей лесной массив с разных углов и высот;
- импорт данных съемки лесного массива в ПО Agisoft Metashape для автоматического распознавания особенностей каждой фотографии и создания точки контроля на фотографиях;
- обработка данных после импорта фотографий и их объединения в ПО Agisoft Metashape в виде 3D модели лесного массива;
- анализ данных, полученных в результате таксации леса.

Результаты исследований. Целью проводимых исследований является проведение анализа эффективности и уровня точности таксации леса с использованием БПЛА и лазерного сканирования.

Для реализации поставленной цели сформулированы следующие задачи исследований:

- изучить методы и оборудование для проведения таксации;
- дать таксационную характеристику насаждений в исследуемом объекте;
- проанализировать полученные данные лазерного сканирования;
- сформулировать выводы и рекомендации для повышения качества выполнения работ по таксации насаждений.

Для реализации поставленной цели и задач исследований был составлен план выполнения работ по полевой таксации лесного участка с использованием БПЛА на территории горнолыжной базы «Горный воздух» в г. Южно-Сахалинске. Участок находится на одной из действующих горнолыжных трасс с двумя канатными дорогами. Основные риски при выполнении воздушного лазерного сканирования в данной местности – это высокие препятствия в виде деревьев, ЛЭП (линий электропередач), опор и трассы канатной дороги и опор связи.

Для обеспечения безопасности выполнения работ была спланирована регламентированная миссия, в рамках которой для использования БПЛА над территорией населенного пункта или в зоне действия аэропорта было получено разрешение на полеты, используемый БПЛА был застрахован, зарегистрирован в Росавиации, пилот БПЛА получил разрешение на полеты в администрации населенного пункта. Кроме того, для выполнения полетного задания для лазерной съемки была использована рекомендация производителя по высоте полета не более 60 м, при которой лидар имеет максимальную производительность и точность.

Для безопасного выполнения работ построение миссии выполнялось в специализированном программном комплексе UgCS, который позволяет выбрать из большого количества БПЛА модель, планируемую к использованию.

Для построения миссии были выбраны следующие параметры: скорость полета БПЛА 5 м/с, высота полета при возврате на базу 80 м, действия при потере связи с пультом управления «продолжать полет».

В границах объекта проведения работ было построено полетное задание (рис. 4).



Рис. 4. Полетное задание в программе UgCs

Рабочий полет БПЛА происходил по рельефу, т. е. программой выдерживалась высота во время полета не менее 60 м. График перепада высот представлен ниже (рис. 5).



Рис. 5. График перепада высот

Работы по проведению таксации насаждения исследуемого лесного участка выполнялись в два этапа. На первом из них проведена разработка полетного задания по параметрам, рекомендованным производителями оборудования, и реализация рабочего полета с получением топографической съемки, в результате которой были координированы и описаны все деревья, располагающиеся на обследуемой территории. На базе полученной информации составлена топографическая съемка масштаба 1:500 с условными обозначениями и нумерацией каждого дерева (рис. 6).

Вторым этапом в работе являлась камеральная обработка данных таксации с использованием ПО Lidar 360, которая выполнялась по следующему алгоритму: классификация облака точек в ПО Lidar 360, в ходе которой Lidar360 предоставляет несколько встроенных алгоритмов классификации. Обычно используется алгоритм, основанный на форме векторного произведения, что позволяет классифицировать точки, используя форму их кривизны, а также расстояния между ними и соседними точками [22].

Процесс классификации облака точек предполагает присвоение каждой точке в облаке одной из нескольких категорий, соответствующих различным объектам на поверхности земли, что помогает определить местоположение объектов на исследуемом лесном участке (деревья, здания и дороги и пр.). Для классификации облака точек в Lidar 360 необходимо совершить следующее действие: выравнивание наклона облака точек с помощью инструментов коррекции наклона, доступных в модуле Lidar 360 (наклон может быть вызван неправильным углом сканирования лидара или изменением поверхности земли во время сбора данных). Если облако точек неправильно выровнено, это может привести к некорректной классификации данных.

После выбора алгоритма классификации необходимо запустить процесс классификации для всего облака точек. При этом каждая точка будет прикреплена к одному из нескольких классов, таких как земля, вода, растительность, здания, дороги и т. д.

По завершению процесса классификации облака точек необходимо проверить результаты и убедиться в их правильности. Визуализация результатов выполняется в виде 3D-модели, в которой различные объекты на

поверхности земли окрашены в разные цвета, соответствующие своим классам.

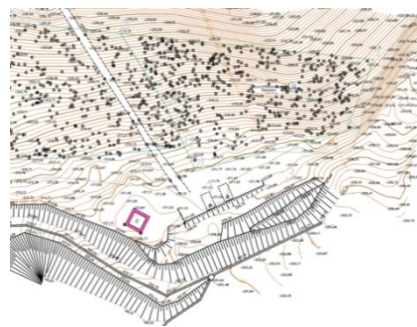


Рис. 6. Фрагмент топографической съемки

Если результаты классификации не полностью соответствуют ожиданиям, можно применить дополнительные методы обработки данных для уточнения классификации точек. Такими методами могут быть удаление выбросов и шумов, анализ формы кривизны, использование текстуры и т. д.

Результаты классификации облака точек можно использовать для различных целей, например, для создания 3D-моделей лесов, анализа экологических параметров, получение количественных и качественных характеристик насаждений.

Таким образом, классификация облака точек в Lidar360 является важным шагом при обработке лидарных данных и помогает получить точное местоположение объектов на поверхности земли.

Нормализация облака точек к земле, что означает выравнивание наклона поверхности исследуемого лесного участка и приведение его к значениям выше нулевой отметки.

Данная операция проводится в следующей последовательности:

- определение нижней границы облака точек, т. е. наименьшей высоты точек в базе данных;
- все значения высот точек в облаке точек вычитаются на нижнюю границу с целью, чтобы наименьшее значение в облаке точек было равно нулю;
- после вычитания нижней границы все значения высот в облаке точек делятся на максимальное значение; значение максимальной высоты точек в облаке будет равно единице, а все остальные значения будут приведены к относительным значениям от нуля до единицы.

После проведения нормализации облака точек, все точки на поверхности земли будут иметь относительные значения нуля. Это позволяет убрать наклон, который мог быть вызван неровностями поверхности земли, и улучшить качество данных при их последующей обработке.

Таким образом, нормализация облака точек к земле и приведение его к значению «ноль» является важным этапом при обработке лидарных данных, который позволяет убрать влияние неровностей поверхности земли и получить более точные результаты при последующей его обработке. За счет выполнения данного действия открываются возможности для сегментации.

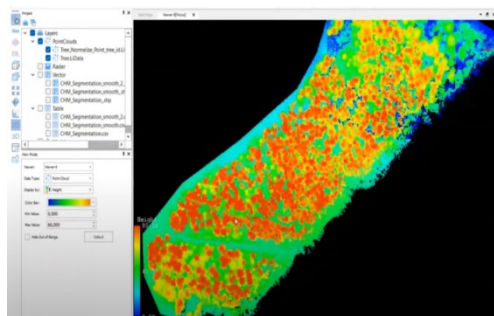
На полученном изображении (рис. 7, а) указаны границы крон деревьев после проведения сегментирования облака точек (данные сегментирования показывают диаметр и площадь кроны деревьев).

Для получения модели поверхности земли после создания точечного облака используется функция генерации DSM (Digital Surface Model), которая позволяет получить высотные данные об исследуемой местности, включая вершины, ущелья, реки и другие объекты [23, 24].

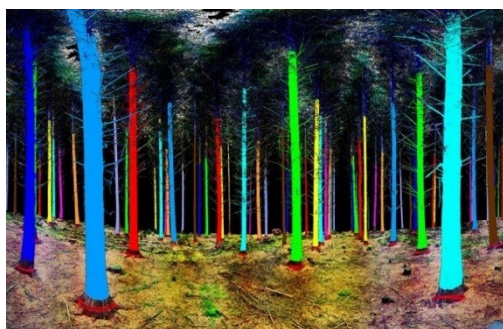
На последнем этапе работ происходит экспортирование результатов для дальнейшего их использования.

Если в ходе работы были обнаружены несоответствия в данных, например, наличие выбросов или ошибок, можно вернуться на предыдущие этапы и провести дополнительную обработку данных для уточнения моделей поверхности и рельефа.

Для присвоения номера каждому дереву в ПО Lidar 360 необходимо использовать функцию «очерчивание кистью» для выделения области, в которой находится дерево (см. рис. 7, б). Таким образом, каждое дерево будет представлено своим собственным номером и цветом в данных облака точек. Эти номера могут использоваться для выполнения различных анализов, таких как подсчет количества деревьев на участке и получение количественных и качественных характеристик.



а)



б)

Рис. 7. Результаты проведенных исследований лесных насаждений: а – нормализация облака точек; б – лидарное изображение стволов деревьев (качественное состояние каждого ствола дерева подкрашено своим цветом), полученное Lidar Topodrone 100

Для проведения сравнения данных о лесных насаждениях, классифицированных программой Lidar 360 и измеренных наземным способом сплошным перечислительным методом, на территории исследуемого лесного объекта был выбран участок площадью 0,28 га (рис. 8).



Рис. 8. Участок топографической съемки

В ходе проведения сравнения на топографическую съемку были нанесены координаты 78 объектов насаждения, классифицированных в программе Lidar 360. При этом было выполнено сравнение порядковых номеров по информации от лидара и наземной съемки. Анализ полученных данных показал, что программа Lidar 360 способна классифицировать насаждения диаметром не менее 13 см и высотой не менее 13 м и, следовательно, может быть использована для таксации лесных насаждений с использованием БПЛА при отводе их в рубку.

Заключение. В ходе проведения исследования были проанализированы методы и оборудование, применяемое в лесном хозяйстве для таксации леса, представлено различное программное обеспечение для обработки данных.

Был отобран участок, на котором было произведено сравнение результатов наземной съемки и съемки с применением БПЛА. На основании проведенного анализа полученных результатов выявлено, что наиболее точно классифицируются насаждения диаметром более 13 см и высотой 13 м. По данной технологии таксации не было классифицировано около 30 % насаждений из них 20 % – хвойная поросль и 10 % – насаждения, высота которых менее 13 м, а диаметр менее 13 см.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что данная технология подлежит использованию в лесах с полнотой не более 0,6, а также с дополнительным наземным лазерным сканированием с использованием оборудования Lidar TopoDrone 100 Lite, которое позволит получать более детальные данные, недоступные воздушному лазерному сканированию.

Использование Lidar TopoDrone 100 в лесном хозяйстве может привести к существенному повышению точности оценки лесных насаждений и эффективности управления лесными ресурсами при значительном снижении эксплуатационных расходов.

Результаты проведенных исследований показали, что технология применения БПЛА с установленным на нем лидаром и использованием программного обеспечения в виде ПО Lidar 360 позволяет получить высокую точность и надежность при проведении таксационных изысканий лесных территорий и может быть эффективно использована в различных сферах лесного хозяйства.

Литература

1. Минаев В. Н. Таксация леса: учебное пособие для вузов СПб.: Лань, 2022. 240 с.
2. БПЛА для лесного хозяйства. [Электронный ресурс]. <https://brlab.ru/scopes/lesnoe-khozyaystvo/> (дата обращения 17.05.2023).
3. БПЛА для пожарных и спасателей. [Электронный ресурс]. <https://brlab.ru/scopes/pozharotushenie/> (дата обращения 17.05.2023).
4. Беспилотный летательный аппарат. [Электронный ресурс]. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный летательный аппарат/](https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный_летательный_аппарат/) (дата обращения 17.04.2023).
5. Лесоустроительная инструкция. М. ЦЕНТРАГ, 2024 г. 150 с.
6. Толкач И.В. Методы оценки сосновых таксационно-дешифровочных показателей на цифровых снимках // Проблемы лесоведения и лесоводства. 2012. № 72. С. 354-362.
7. Комиссаров А.В. Лазерное сканирование и трехмерное моделирование: учеб.-методич. пособие. [Электронный ресурс]. <https://e.lanbook.com/book/157332> (дата обращения 14.04.2023).
8. Лазерный сканер Topodrone Lidar. [Электронный ресурс]. <https://topodrone.ru/product/Lidar/162/1576/> (дата обращения 07.03.2023).
9. Назаров А.С. Фотограмметрия: учебное пособие для студентов вузов. – Минск: Тетра Системс, 2006. 368 с.
10. Комиссаров А.В. Лазерное сканирование и трехмерное моделирование: учебно-методическое пособие. [Электронный ресурс]. <https://e.lanbook.com/book/157332> (дата обращения 14.04.2023).
11. Любимов А.В. Аэрокосмические методы и геоинформационные системы в лесоведении, лесоводстве, лесостроительстве и лесной таксации // Англо-русский словарь специальных терминов: учеб. пособие. [Электронный ресурс]. <https://e.lanbook.com/book/206654> (дата обращения 14.04.2023).
12. Akay A.E., Tas I. Using drone with a Lidar data capture systems in forestry applications // Internat. Academic Research Congress. INES, December, 18, 2018. Turkey, Alanya. P. 17-25.
13. Bhil K., Shindihatti R., Mirza S., Latkar S., Ingle Y. S., Shaikh N.F., Prabu I., Pardeshi S.N. Recent progress in object detection in satellite imagery: a review // Sustainable Advanced Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2022. Vol. 840. P. 209-218. DOI: 10.1007/978-981-16-9012-9_18
14. Таксация леса с применением БПЛА [Электронный ресурс]. <https://aeromotus.ru/taksacziya-lesa-s-primeneniem-bpla/> (дата обращения 20.04.2023).
15. БПЛА Matrice 300. [Электронный ресурс]. <https://4vision.ru/products/matrice-300-rtk.html> (дата обращения 07.02.2023).
16. Лазерный сканер Topodrone Lidar. [Электронный ресурс]. <https://topodrone.ru/product/Lidar/162/1576/> (дата обращения 07.03.2023).
17. ГНСС приемник Prin i90. [Электронный ресурс]. <https://www.prin.ru/gnss/prince/i90/gnss/> (дата обращения 07.06.2023).
18. Программное обеспечение Lidar 360. [Электронный ресурс]. <https://alfascaner.ru/catalog/programmnoe-obespechenie/proizvoditel-3/kopiya-liair-v.html> (дата обращения 01.05.2023).
19. Таксация леса с применением БПЛА. [Электронный ресурс]. <https://aeromotus.ru/taksacziya-lesa-s-primeneniem-bpla/> (дата обращения 20.04.2023).
20. Дементьев В. Е. Современная геодезическая техника и ее применения: Учеб. пособие для вузов. М.: Академический Проект, 2018. 591 с.
21. Программное обеспечение Agisoft metashape. [Электронный ресурс]. https://www.geoscan.aero/ru/software/agisoft/metashape_pro (дата обращения 12.05.2023).
22. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 555 с.
23. Fundamentals of Remote Sensing. Remote Sensing Tutorial. Canada Centre for Remote Sensing. Natural Resources of Canada. 2008. 258 p. [Электронный ресурс]. <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca> (дата обращения 12.05.2023).
24. Zegeye A. Road extraction from satellite imagery based on fully convolutional neural network // IOSR Journ. of Computer Engineering (IOSR-JCE). 2020. Vol. 22, Iss. 4, Ser. III. P. 59-72. DOI: 10.9790/0661-2204035972

References

1. Minaev V. N. Forest taxation: textbook for universities SPb.: Lan, 2022. 240 p.
2. UAVs for forestry. [Electronic resource]. <https://brlab.ru/scopes/lesnoe-khozyaystvo/> (date of address 17.05.2023).
3. UAVs for firefighters and rescuers. [Electronic resource]. <https://brlab.ru/scopes/pozharotushenie/> (date of address 17.05.2023).
4. Unmanned aerial vehicle. [Electronic resource]. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный aircraft/](https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный_аircraft/) (date of address 17.04.2023).
5. Forest management instruction. M. CENTRMAG, 2024. 150 p.
6. Tolkach I.V. Methods of estimation of pine taxation and interpretation indicators on digital images // Problems of forestry and silviculture. 2012. № 72. P. 354-362.
7. Komissarov A.V. Laser scanning and three-dimensional modeling: tutorial. [Electronic resource]. <https://e.lanbook.com/book/157332> (date of address 14.04.2023).
8. Laser scanner Topodrone Lidar. [Electronic resource]. <https://topodrone.ru/product/Lidar/162/1576/> (date of address 07.03.2023).
9. Nazarov A.S. Photogrammetry: textbook for university students. Minsk: Tetra Systems, 2006. 368 p.
10. Komissarov A.V. Laser scanning and three-dimensional modeling: textbook. [Electronic resource]. <https://e.lanbook.com/book/157332> (date of address 14.04.2023).
11. Lyubimov A.V. Aerospace methods and geoinformation systems in forest science, silviculture, forest inventory and forest taxation // English-Russian dictionary of special terms: textbook. [Electronic resource]. <https://e.lanbook.com/book/206654> (date of address 14.04.2023).
12. Akay A.E., Tas I. Using drone with a Lidar data capture systems in forestry applications // Internat. Academic Research Congress. INES, December, 18, 2018. Turkey, Alanya. P. 17-25.
13. Bhil K., Shindihatti R., Mirza S., Latkar S., Ingle Y. S., Shaikh N.F., Prabu I., Pardeshi S.N. Recent progress in object detection in satellite imagery: a review // Sustainable Advanced Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2022. Vol. 840. P. 209-218. DOI: 10.1007/978-981-16-9012-9_18
14. Forest inventory using UAVs [Electronic resource]. <https://aeromotus.ru/taksacziya-lesa-s-primeneniem-bpla/> (date of address 20.04.2023).
15. UAV Matrice 300. [Electronic resource]. <https://4vision.ru/products/matrice-300-rtk.html> (date of address 07.02.2023).
16. Topodrone Lidar laser scanner. [Electronic resource]. <https://topodrone.ru/product/Lidar/162/1576/> (date of address 07.03.2023).
17. GNSS receiver Prin i90. [Electronic resource]. <https://www.prin.ru/gnss/prince/i90/gnss/> (date of address 07.06.2023).

18. Lidar 360 software. [Electronic resource]. <https://alfascaner.ru/catalog/programmnoe-obespechenie/proizvoditel-3/kopiya-liar-v.html> (date of address 01.05.2023).
19. Forest inventory using UAVs. [Electronic resource]. <https://aeromotus.ru/taksacziya-lesa-s-primeneniem-bpla/> (date of address 20.04.2023).
20. Dementiev V. E. Modern geodesic technology and its applications: Study guide for universities. Moscow: Academic Project, 2018. 591 p.
21. Agisoft metashape software. [Electronic resource]. https://www.geoscan.aero/ru/software/agisoft/metashape_pro (date of address 12.05.2023).
22. Shovengerdt R.A. Remote Sensing. Models and methods of image processing. Moscow: Technosphere, 2010. 555 c.
23. Fundamentals of Remote Sensing. Remote Sensing Tutorial. Canada Center for Remote Sensing. Natural Resources of Canada. 2008. 258 p. [Electronic resource]. <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca> (date of address 12.05.2023).
24. Zegeye A. Road extraction from satellite imagery based on fully convolutional neural network // IOSR Journ. of Computer Engineering (IOSR-JCE). 2020. Vol. 22, Iss. 4, Ser. III. P. 59-72. DOI: 10.9790/0661-2204035972