

УДК 004.93

**Саута Олег Иванович,**  
Доктор технических наук, профессор,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

**Филонов Олег Михайлович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

**Окин Павел Александрович,**  
старший преподаватель,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

**Наймитенко Николай Владимирович,**  
старший преподаватель,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

**АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОДСЧЕТ И КЛАССИФИКАЦИЯ  
ДЕРЕВЬЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИДАРНЫХ ДАННЫХ  
ДЛЯ АНАЛИЗА ЛЕСНЫХ МАССИВОВ  
AUTOMATIC TREE COUNTING AND CLASSIFICATION  
USING LIDAR DATA FOR FOREST ANALYSIS**

**Аннотация:** В статье рассматриваются методы автоматического подсчета и классификации деревьев на основе лидарных данных. Приведены этапы предобработки облаков точек, алгоритмы выделения крон деревьев и методы классификации с использованием машинного обучения. Описаны результаты применения алгоритмов на лесных массивах различной плотности и рельефа. Полученные данные позволяют оценивать состояние лесов, прогнозировать изменения и автоматизировать задачи мониторинга.

**Ключевые слова:** LiDAR, лесные массивы, подсчет деревьев, классификация, облака точек, машинное обучение.

**Abstract:** The article discusses methods of automatic counting and classification of trees based on lidar data. The stages of point cloud preprocessing, tree crown extraction algorithms, and classification methods using machine learning are presented. The results of applying algorithms on woodlands of various densities and topography are described. The data obtained makes it possible to assess the state of forests, predict changes, and automate monitoring tasks.

**Ключевые слова:** LiDAR, лесные массивы, подсчет деревьев, классификация, облака точек, машинное обучение.

**Keywords:** LiDAR, LiDAR, woodlands, tree counting, classification, point clouds, machine learning.

**Введение**

Мониторинг лесных массивов является важной задачей для оценки состояния экосистем, предотвращения вырубки и управления природными ресурсами. Традиционные методы подсчета и классификации деревьев требуют значительных временных и человеческих



ресурсов, что ограничивает их применение на больших территориях. Использование лидарных технологий позволяет автоматизировать процессы подсчета деревьев, определять их размеры и классифицировать по типам. В данной статье представлены методы анализа лидарных данных, алгоритмы выделения и классификации деревьев, а также результаты их применения на исследуемых территориях.

#### **Методы исследования**

Современные исследования показывают, что применение лидарных данных открывает возможности для точного и оперативного анализа структуры лесных массивов. Основное преимущество лидара заключается в возможности получения пространственной информации высокой точности, позволяющей идентифицировать отдельные объекты, включая деревья, даже в условиях густой растительности. Одним из ключевых этапов работы с такими данными является выбор алгоритмов обработки, которые учитывают особенности ландшафта и плотности растительности [1].

В данной работе использовались лидарные данные, собранные с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) Zenmuse L1. Сбор данных производился летом, в условиях высокой плотности листвы, что позволяет проверить эффективность алгоритмов в сложных условиях.

Съемка велась на высоте 100 метров с плотностью сканирования 50 точек на квадратный метр. Формат данных был представлен в сжатом формате LAZ для последующей обработки [2-4]. Предварительная обработка включала удаление шумов методом ближайших соседей, нормализацию координат для устранения смещений и создание цифровой модели поверхности (DSM) и цифровой модели рельефа (DTM), которые позволили выделить кроны деревьев путем вычисления разности этих моделей.

Анализ данных проводился с использованием кластерных и нейронных методов. DBSCAN, основанный на плотности распределения точек, использовался для выделения отдельных деревьев, что оказалось особенно эффективным на участках с низкой и средней плотностью. Алгоритм K-средних, в свою очередь, применялся для равномерных территорий, обеспечивая разбиение облака точек на кластеры с минимальным расхождением. Для более сложных условий использовалась модель PointNet++, которая обеспечила высокую точность классификации объектов в трехмерном пространстве.

#### **Эксперимент по подсчету и классификации деревьев с использованием лидарных данных**

Для проведения эксперимента была выбрана территория, представляющая собой смешанный лес площадью 10 гектаров [5]. Данный участок был разделен на три зоны с различной плотностью растительности: густой лес, смешанная зона с умеренной плотностью и открытая территория с редкими деревьями. Ландшафт участка характеризуется наличием холмов и низин, что позволяет оценить влияние рельефа на точность работы алгоритмов.

Данные были собраны с использованием БПЛА на высоте 100 метров. Высокая плотность точек сканирования обеспечила детализацию крон деревьев, а формат LAZ позволил эффективно хранить большие объемы данных. После фильтрации шумов и нормализации координат была создана цифровая модель поверхности (DSM) и цифровая модель рельефа (DTM). Разность между этими моделями использовалась для выделения высот крон деревьев (рисунок 1).



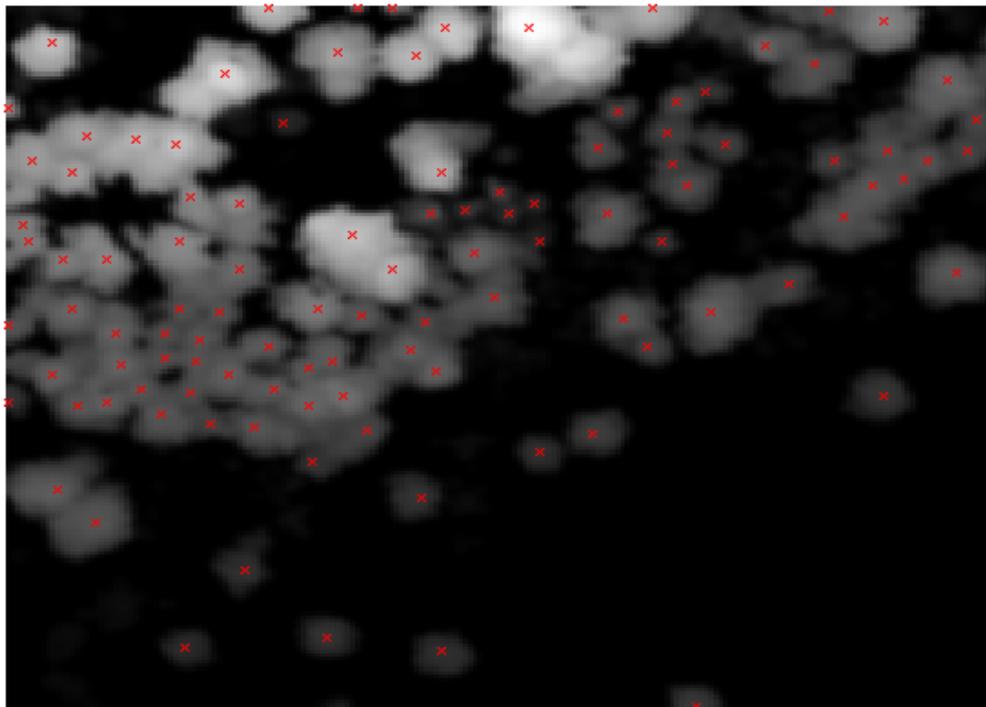


Рисунок 1 – Обнаружение крон деревьев

Для анализа применялись три метода: DBSCAN, K-средние и PointNet++. DBSCAN показал хорошую точность на участках с низкой плотностью растительности. На густо заросших территориях алгоритм допускал ошибки в идентификации отдельных деревьев, так как кроны иногда сливались в единый кластер. Алгоритм K-средних обеспечил более стабильные результаты на равномерных участках, однако требовал точной настройки параметров и предварительной инициализации центроидов. PointNet++ показал наибольшую точность и гибкость, успешно справляясь с классификацией деревьев в условиях сложного рельефа и пересекающихся крон [6-7].

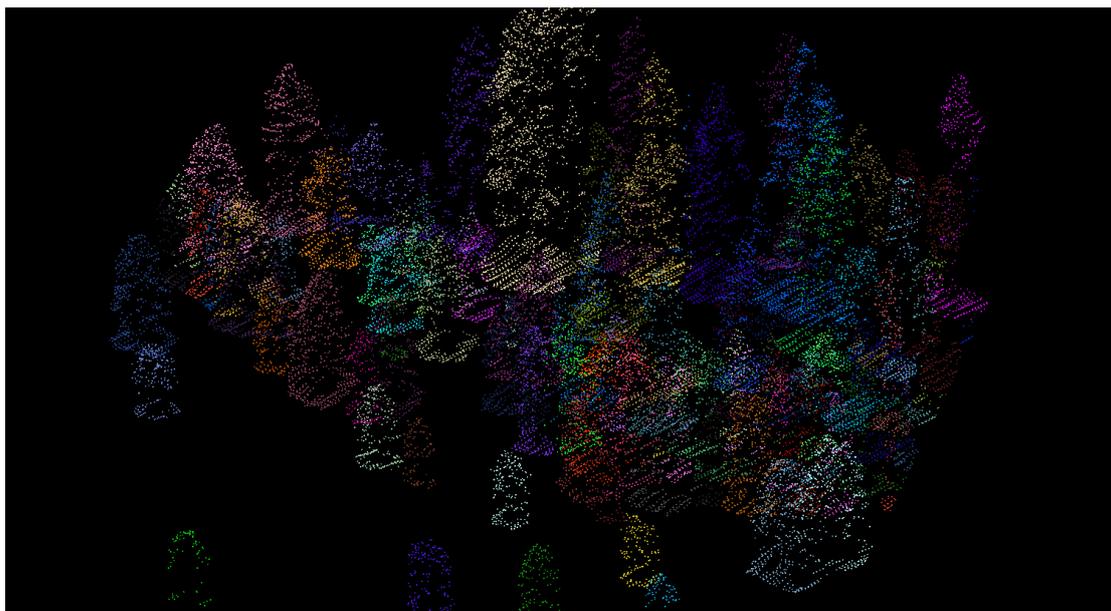


Рисунок 2 – Обнаружение крон деревьев



Таблица 1

Результаты исследования			
Зона	Алгоритм	Точность подсчета (%)	Средняя ошибка (%)
Густой лес	DBSCAN	82	18
	К-средние	88	12
	PointNet++	94	6
Смешанная зона	DBSCAN	85	15
	К-средние	89	11
	PointNet++	95	5
Открытая территория	DBSCAN	90	10
	К-средние	91	9
	PointNet++	97	3

Алгоритмы также применялись для классификации деревьев на хвойные и лиственные. Модель PointNet++ продемонстрировала высокую точность даже на участках с пересекающимися кронами. Результаты классификации представлены на карте, где каждый тип дерева обозначен отдельным цветом.

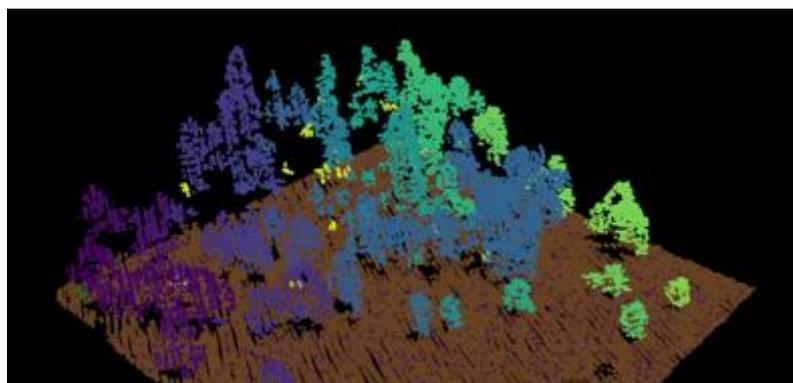


Рисунок 2 – Карта классификации деревьев с использованием PointNet++.

Полученные данные демонстрируют эффективность алгоритмов автоматического подсчета и классификации деревьев. Наиболее высокую точность показала модель PointNet++, что делает её перспективной для задач контроля крупных лесных массивов. Однако использование модели требует значительных вычислительных ресурсов. Алгоритмы кластеризации, такие как DBSCAN и К-средние, могут быть применены для анализа территорий с однородной структурой.

Также выявлены ограничения: DBSCAN менее устойчив к сложным условиям, таким как пересечение крон деревьев, в то время как К-средние требуют точной настройки параметров для достижения максимальной точности. Эти ограничения могут быть устранены с помощью гибридных подходов.

### Заключение

Исследование демонстрирует значительный потенциал использования лидарных данных для задач автоматизированного анализа лесных массивов. Применение современных методов обработки облаков точек позволило достичь высокой точности в подсчете и классификации деревьев, учитывая сложные условия, такие как пересекающиеся кроны и неоднородный рельеф. Полученные результаты подтверждают возможность адаптации выбранных алгоритмов для анализа территорий различной плотности растительности и



топографических особенностей. Научная и практическая значимость работы заключается в интеграции алгоритмов машинного обучения и методов кластеризации для повышения точности и универсальности анализа. Разработанные подходы могут быть использованы для оценки состояния лесных массивов, контроля их изменений и планирования природоохранных мероприятий.

*Список литературы:*

1. Ненашев В. А., Афанасьева В. И., Залищук А. А. Формирование трехмерных моделей местности на основе лидарной съемки для выявления структурных изменений земной поверхности // Труды МАИ. – 2023. – № 131. DOI 10.34759/trd-2023-131-15
2. Afanaseva V. I. Creation of 3D terrain models based on lidar survey // Bulletin of the UNESCO department “Distance education in engineering” of the SUAI. – St. Petersburg, Issue 8. – 2023. – 23 p. ISBN 978-5-8088-1825-5
3. Рыжков К. А., Горина А. В., Нестеренко И. В. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов в геодезических работах // Геодезия и картография. – 2019. – № 1. – С. 83-87
4. Чибуничев А. Г., Гук А. П. Фотограмметрия: вчера, сегодня, завтра // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 2. – С. 3-9
5. Алексеев Е. П. Построение 3D-модели растений // Научно-образовательная среда как основа развития интеллектуального потенциала сельского хозяйства регионов России: Материалы II Международной научно-практической конференции. – Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2022. – С. 303-305
6. Крючкова Т. Н., Ефимов А. И. Совмещение трехмерных облаков точек: итеративный алгоритм ближайших точек // Методы и средства обработки и хранения информации: Межвузовский сборник научных трудов. – Рязань, 2022. – С. 123-128
7. Афанасьева В. И., Залищук А. А., Ненашев В. А. Эксперименты по контролю количества объектов на поверхности на основе обработки лазерных данных и методов распознавания с борта малых летательных аппаратов // Инновационное приборостроение. – 2024. – Т. 3, № 1. – С. 28-35. DOI 10.31799/2949-0693-2024-1-28-35

