

Научная статья

УДК 630.232:630.587:528.88

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАМЕТРОВ КРОН СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

Алексей Евгеньевич Осипенко¹, Регина Александровна Осипенко²,
Артем Игоревич Чермных³, Семен Александрович Медведев⁴

¹⁻⁴ Уральский государственный лесотехнический университет,

Екатеринбург, Россия

¹ osipenkoae@m.usfeu.ru

² osipenkora@m.usfeu.ru

³ chermnyhai@m.usfeu.ru

⁴ sema.medvedev.22@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты измерения диаметров кроны деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) искусственного происхождения, произрастающих в условиях ленточных боров. Данные получены как в ходе наземных исследований, так и с использованием беспилотного летательного аппарата. Проведено сравнение точности и применимости этих методов.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, лесные культуры, диаметр кроны, беспилотный летательный аппарат

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-76-00009, <https://rscf.ru/project/24-76-00009/>.

Для цитирования: Применение беспилотного летательного аппарата для определения диаметров кроны сосны обыкновенной / А. Е. Осипенко, Р. А. Осипенко, А. И. Чермных, С. А. Медведев // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий = Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies : материалы XVII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. С. 135–141.

Original article

APPLICATION OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE FOR DETERMINING CROWN DIAMETERS OF SCOTS PINE

Alexey E. Osipenko¹, Regina A. Osipenko², Artyom I. Chermnykh³, Semyon A. Medvedev⁴

¹⁻⁴ Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia

¹ osipenkoae@m.usfeu.ru

² osipenkora@m.usfeu.ru

³ chermnyhai@m.usfeu.ru

⁴ sema.medvedev.22@mail.ru

Abstract. The research presents the results of measuring the crown diameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of artificial origin growing in ribbon pine forests. Data were obtained both through ground-based surveys and by using an unmanned aerial vehicle. The accuracy and applicability of these methods were compared.

Keywords: scots pine, forest crops, crown diameter, unmanned aerial vehicle

Funding: the research was supported by grant No. 24-76-00009 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/24-76-00009/>.

For citation: Primenenie bespilotnogo letatel'nogo apparata dlya opredele-niya diametrov kron sosny` oby`knovennoj [Application of an unmanned aerial vehicle for determining crown diameters of scots pine] (2026) A. E. Osipenko, R. A. Osipenko, A. I. Chermnykh, S. A. Medvedev. Effektivnyi otvet na sovremennye vyzovy s uchetom vzaimodeistviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii [Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies : materials of the XVII International Scientific and Technical Conference]. Ekaterinburg : USFEU, 2025. P. 135–141. (In Russ).

Классическим методом оценки успешности лесовосстановления является наземная таксация, однако она трудоемка и малоэффективна на больших площадях. Дистанционные технологии позволяют оптимизировать процесс, но космические снимки часто не обеспечивают требуемого пространственного разрешения. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) предоставляют изображения высокого качества и позволяют быстро получать данные о состоянии лесных культур [1, 2]. При соответствующих условиях съемки и фотограмметрической обработке снимки БПЛА могут использоваться для определения таксационных характеристик, включая диаметр крон деревьев, что важно для оценки структуры и продуктивности насаждений [3, 4]. Данные о диаметрах крон могут служить основой для

картирования биомассы и запасов углерода, а применение БПЛА повышает точность и оперативность мониторинга лесовосстановления [5].

Исследование проводилось в июле 2024 г. Объектом исследования являлся участок лесных культур Ракитовского лесничества Алтайского края. На обследованной территории посадка лесных культур выполнялась трижды: в 2007, 2016 и 2019 гг. Первые две посадки осуществлялись сеянцами сосны обыкновенной с открытой корневой системой (ОКС), третья – сеянцами сосны с закрытой корневой системой (ЗКС). Возраст посадочного материала (как с ОКС, так и с ЗКС) составлял два года. После каждой посадки проводилось дополнение лесных культур. Средний биологический возраст растений на момент обследования составлял 20, 10 и 6 лет. Деревья естественного происхождения на пробной площади отсутствовали. Участок расположен на склоне пологого холма. Более подробная характеристика исследуемых лесных культур представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика исследуемых лесных культур

Год посадки	Шаг посадки, м	Средняя ширина междурядья, м	Густота посадки, тыс. шт./га	Корневая система сеянцев	Применяемый лесопосадочный инструмент
2019	0,91	5,4	2,0	ЗКС	Поттипутки
2016	0,91	9,17	1,2	ОКС	Меч Колесова
2007	1,09	9,8	0,9	ОКС	Меч Колесова

Модель применяемого БПЛА – DJI Phantom 4 Pro+. Управление полетом выполнялось при помощи приложения PIX4Dcapture Pro. Площадь полетного задания составляла 1,35 га. Суммарное время полета – 7 мин 17 с. Съемка участка выполнялась дважды – на высотах 50 и 85 м. Используемая камера – DJI FC6310 с фокусным расстоянием 9 см. Перекрытие снимков – 80 %, угол наклона камеры – 90°. Средняя скорость полета дрона – 3,8 и 4,6 м/с соответственно. Всего было сделано 130 фотографий. Снимки сохранялись в формате JPEG с разрешением 5472×3648 пикселей. Размер пикселя на местности (GSD) составил 1,36 и 2,32 см/пикс.

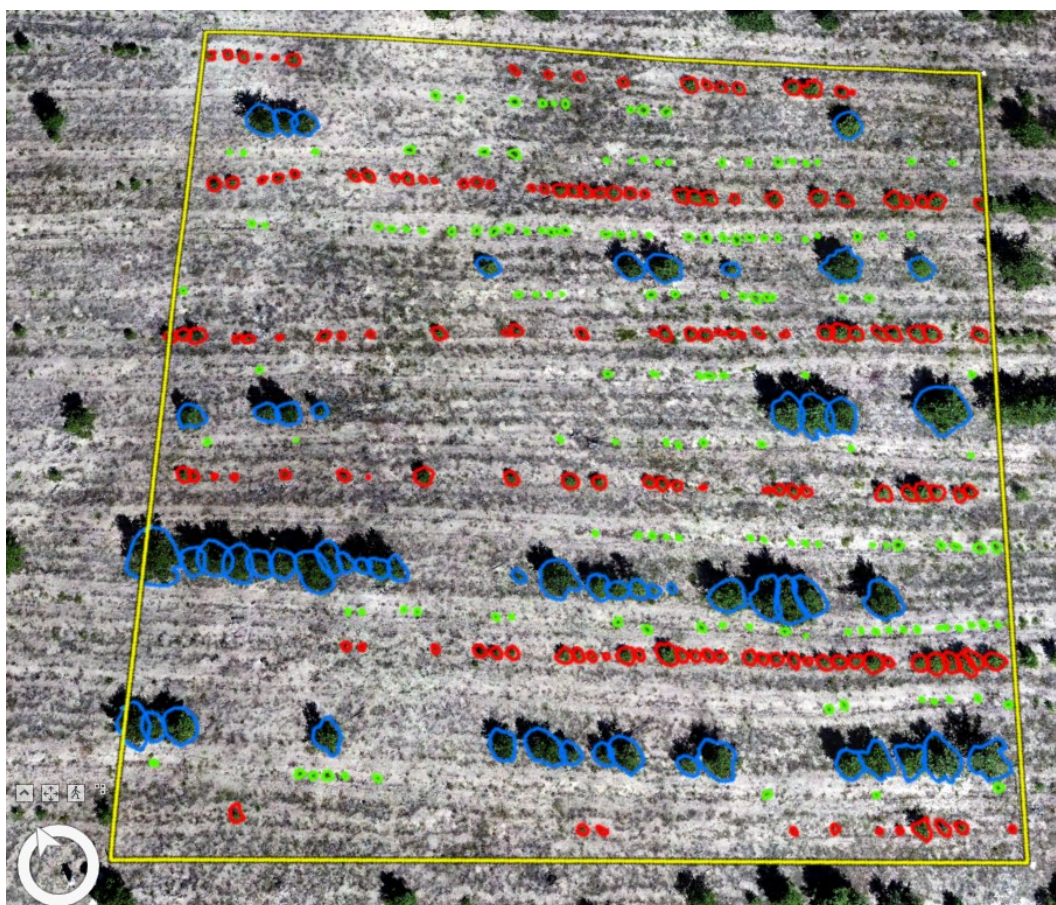
Размер пробной площади (ПП) – 0,255 га (50×51 м). На местности она была обозначена кольями и цветными тканевыми сигнальными знаками. При наземном обследовании на ПП было обмерено по 20–30 деревьев каждого возраста. Диаметр крон измеряли рулеткой. Характеристики крон, определенные по данным БПЛА, измерялись для всех деревьев, выявленных при дешифрировании снимков. Ортофотоплан (приведен на рисунке) создавался в программе Agisoft PhotoScan Professional 1.4.3.6488.

Средний диаметр кроны при наземных измерениях вычислялся как среднее арифметическое между промерами кроны вдоль ряда лесных культур и поперек него. Средний диаметр кроны по данным с дрона определялся

в программе ArcGIS Pro 3.5.3 через площадь проекции кроны. Сначала выделялся контур кроны (периметр), затем программными средствами рассчитывались площадь и длина периметра кроны. После этого в программе Excel вычислялся эквивалентный диаметр по площади (d_A) по формуле:

$$d_A = 2\sqrt{(S/\pi)}, \quad (1)$$

где S – площадь проекции кроны; π – математическая константа.



Ортофотоплан участка культур сосны обыкновенной (желтым цветом обозначена граница пробной площади, синим – периметр кроны 20-летних деревьев, красным – 10-летних деревьев, светло-зеленым – 6-летних деревьев)

На рисунке видно, что сомкнувшиеся кроны деревьев вытянуты в южном направлении. Это может быть связано с гелиотропизмом растений, а также с затрудненным определением границ кроны при их плотном расположении.

Трудозатраты при наземных измерениях диаметров кроны значительно выше, чем при использовании данных БПЛА. Однако при дешифрировании материалов аэрофотосъемки часть культивируемых растений может быть не выявлена: при плотном размещении крупные деревья могут учитываться как одно, а мелкие экземпляры – сливаться с травянистой растительностью либо теряться при создании ортофотоплана.

Средние значения диаметров и площадей проекций крон, а также статистические характеристики этих показателей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические показатели периметров и площадей крон деревьев сосны различного возраста

Показатель	Периметр кроны, м			Площадь кроны, м ²		
	6 лет	10 лет	20 лет	6 лет	10 лет	20 лет
Среднее значение	1,20	2,36	5,74	0,10	0,43	2,45
Минимум	0,54	0,54	1,61	0,02	0,02	0,19
Максимум	2,09	6,05	11,04	0,31	2,12	7,87
Стандартная ошибка	0,03	0,07	0,26	0,01	0,02	0,20
Стандартное отклонение	0,33	0,86	1,95	0,06	0,31	1,53
Коэффициент вариации, %	28	37	34	58	71	63
Точность, %	2,3	2,9	4,5	4,8	5,6	8,2

Статистические показатели диаметров крон деревьев, определенные различными методами, оказались довольно близки по значениям (табл. 3).

Таблица 3

Статистические показатели диаметров крон деревьев сосны различного возраста, измеренных наземным способом и с использованием БПЛА

Показатель	Наземное обследование			Обследование с применением БПЛА		
	6 лет	10 лет	20 лет	6 лет	10 лет	20 лет
Количество растений на ПП, шт.	204	168	62	150	162	58
Количество обмерянных растений, шт.	30	30	20	150	162	58
Среднее значение, м	0,30	0,73	1,70	0,35	0,70	1,68
Минимум, м	0,16	0,29	0,62	0,16	0,16	0,49
Максимум, м	0,49	1,41	2,64	0,63	1,64	3,17
Стандартная ошибка, м	0,02	0,06	0,13	0,01	0,02	0,07
Стандартное отклонение, м	0,08	0,30	0,58	0,10	0,25	0,54
Коэффициент вариации, %	28	41	34	29	36	32
Точность, %	5,0	7,5	7,6	2,3	2,8	4,3

Для проверки нормальности распределения данных о среднем диаметре крон в программе IBM SPSS Statistics 27 были выполнены тесты Колмогорова – Смирнова (с коррекцией значимости Лильефорса) и Шапиро – Уилка (табл. 4). Количество обмерянных деревьев соответствует данным, приведенным в табл. 3.

Таблица 4

Результаты проверки нормальности распределения диаметров крон деревьев по методам сбора данных и возрасту культивируемых растений

Метод сбора данных	Возраст культивируемых растений, лет	Критерий Колмогорова – Смирнова			Критерий Шапиро – Уилка		
		Показатель	p	Нормальность	Показатель	p	Нормальность
Наземный	6	0,100	0,200*	да	0,971	0,575	да
	10	0,124	0,200*	да	0,938	0,079	да
	20	0,107	0,200*	да	0,965	0,643	да
С БПЛА	6	0,112	0,000	нет	0,958	0,000	нет
	10	0,051	0,200*	да	0,980	0,017	нет
	20	0,088	0,200*	да	0,972	0,198	да

Примечание. * – нижняя граница истинной значимости

В связи с ненормальным распределением данных, полученных с помощью БПЛА для 6-летних и 10-летних деревьев, была применена непараметрическая статистика (U -критерий), а для данных по 20-летним деревьям – параметрический критерий (t -тест).

По результатам U -критерия Манна – Уитни распределения диаметров крон 6-летних деревьев, измеренных по ортофотоплану и наземным способом, различаются статистически значимо ($U = 1675,0$; $p = 0,027$), что указывает на возможное системное смещение между методами.

Для 10-летних деревьев распределения диаметров крон, измеренные с использованием БПЛА и наземным способом, статистически не различаются ($U = 2505,5$; $p = 0,787$). Результаты t -критерия Стьюдента также не выявили значимой разницы ($t = -0,698$; $p = 0,486$), что свидетельствует о сопоставимости методов при оценке средних значений.

Сравнение среднего диаметра крон 20-летних деревьев с применением БПЛА и наземного метода показало отсутствие статистически значимой разницы (t -тест: $p = 0,888$ при равных дисперсиях; $p = 0,891$ при неравных дисперсиях), что подтверждает сопоставимость методов для оценки средних значений.

Таким образом, при определении диаметров крон 6-летних деревьев по данным аэрофотосъемки результаты существенно отличаются от наземных измерений, что указывает на необходимость корректировки методики проведения замеров с БПЛА. Вероятно, следует снизить высоту полета дрона при обследовании 6-летних и более молодых культур. При этом применение апробированной методики для обследования 10–20-летних культур представляется оправданным.

Список источников

5. Assessing the success of forest crops using UAVs / A. Kabonen, A. Gryazkin, O. Gavrilova [et al.] // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2023. Vol. 458. P. 7. DOI: 10.1051/e3sconf/202345808028.
6. Interpretation and mapping tree crown diameter using spatial heterogeneity in relation to the radiative transfer model extracted from GF-2 images in planted boreal forest ecosystems / Z. Liu, J. Long, H. Lin [et al.] // Remote Sensing, 2023. Vol. 15, № 7. P. 1806. DOI: 10.3390/rs15071806.
7. Ольхин Ю. В., Гаврилова О. И., Грязькин А. В. Использование беспилотного летательного аппарата для оценки процесса формирования молодняков на вырубках // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 3. С. 60–75. DOI: 10.15393/j2.art.2023.7163.
8. Опыт применения квадрокоптера для создания трехмерной модели лесных насаждений / А. Е. Осипенко, Я. Коукал, И. А. Панин [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2017. № 4 (63). С. 16–22.
9. Перевод лесных культур в покрытую лесом площадь с использованием беспилотных летательных аппаратов / Ю. В. Ольхин, О. И. Гаврилова, А. В. Грязькин [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 89–103. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.89-103.

References

1. Assessing the success of forest crops using UAVs / A. Kabonen, A. Gryazkin, O. Gavrilova [et al.] // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2023. Vol. 458. P. 7. DOI: 10.1051/e3sconf/202345808028.
2. Interpretation and mapping tree crown diameter using spatial heterogeneity in relation to the radiative transfer model extracted from GF-2 images in planted boreal forest ecosystems / Z. Liu, J. Long, H. Lin [et al.] // Remote Sensing, 2023. Vol. 15, No. 7. P. 1806. DOI: 10.3390/rs15071806.
3. Olkhin Yu. V., Gavrilova O. I., Gryazkin A. V. Using an unmanned aerial vehicles to assess young forests formation in clean cutting areas // Resources and Technology. 2023. Vol. 20, No. 3. P. 60–75. DOI: 10.15393/j2.art.2023.7163.
4. The experience of quadrupter using for three dimentional modelof forest growing stocus / A. E. Osipenko, J. Koukal, I. A. Panin [et al.] // Forests of Russia and economy in them. 2017. No. 4(63). P. 16–22.
5. Conversion of forest crops into forested area using unmanned aerial vehicles / Yu. V. Olkhin, O. I. Gavrilova, A. V. Gryazkin [et al.] // News of the St. Petersburg Forest Engineering Academy. 2022. Vol. 239. P. 89–103. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.89-103.