

Оценка согласованности структурно-биометрических характеристик сосновых лесов по данным наземных измерений и БПЛА-съёмки

А. Д. Никитина, С. В. Князева, Е. В. Тихонова, А. В. Горнов

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А. С. Исаева РАН
Москва, 117997, Россия
E-mail: nikitina.al.dm@gmail.com*

Представлены результаты исследования согласованности характеристик сосновых лесов, полученных по данным наземных измерений и высокодетальной RGB-съёмки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Оценка проводилась: между диаметрами стволов деревьев, измеренными при наземных обследованиях, и площадями их крон, определёнными по данным БПЛА; средней высотой по наземным обследованиям и высотой, полученной с использованием цифровой модели местности; числом деревьев и сомкнутостью по результатам наземной таксации и по ортофотопланам БПЛА как при визуальном дешифрировании, так и с применением автоматической сегментации. С использованием коэффициента корреляции Спирмена r_s установлена высокая согласованность между наземными измерениями и визуальным дешифрированием: $r_s = 0,71$ для числа деревьев, $r_s = 0,75$ для средней высоты. Умеренная согласованность по сомкнутости ($r_s = 0,59$) может быть связана не столько с ограничениями RGB-съёмки, сколько с неопределённостью самой наземной глазомерной оценки; при этом данные БПЛА могут обеспечивать более объективную интерпретацию. Связь между диаметром ствола и площадью кроны, полученной по ортофотоплану, в старовозрастных сосновых лесах достигала 0,96. Дополнительно рассмотрена согласованность визуального дешифрирования с результатами автоматической сегментации ортофотопланов с использованием нейронной сети Mask R-CNN: $r_s = 0,93...0,97$ для числа деревьев, площади и периметра крон; $r_s = 0,73$ для сомкнутости — в последнем случае сниженная согласованность обусловлена вкладом пропущенных крон в общую сомкнутость древостоя. Работа демонстрирует потенциал использования данных RGB-съёмки и методов автоматической сегментации для надёжного дополнения традиционных наземных подходов в мониторинге лесов.

Ключевые слова: БПЛА, RGB-съёмка, корреляционный анализ, сосновые древостои, визуальное дешифрирование, автоматическая сегментация, Mask R-CNN, мониторинг лесов

Одобрена к печати: 16.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-195-206

Введение

Использование методов дистанционного зондирования становится всё более востребованным инструментом при изучении лесных экосистем и мониторинге их состояния. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащённые RGB-камерами, стали экономически эффективными инструментами для мониторинга лесов, предоставляя данные высокого разрешения (Ball et al., 2023; Diez et al., 2021). Особую значимость дистанционные методы приобретают в условиях изменения климата и необходимости постоянного контроля за состоянием и динамикой лесов (Tang, Shao, 2015), а также находят применение в задачах лесной таксации (Torresan et al., 2017). Использование высокодетальной съёмки значительно повышает качество данных, позволяя проводить точный и глубокий анализ структуры древостоев, их биометрических характеристик, важных для оценки пулов углерода, и способствует переходу от точечных наземных измерений к непрерывным пространственным оценкам.

Леса с преобладанием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) — широко распространённые экосистемы в умеренных широтах Северного полушария (Огуреева и др., 2020; Рысин, 2012). На особо охраняемых природных территориях (ООПТ), таких как национальные парки «Куршская коса», «Смоленское Поозерье» и биосферный заповедник «Брянский лес», эти леса характеризуются возрастным и структурным разнообразием (Аккумуляция...,

2018; Березина и др., 2003; Герасименко, Козьминская, 2002; Губарева, 2009; Евстигнеев, Коротков, 2013; Немирова, Мартынов, 2010; Тихонова, 2021), что делает их подходящими модельными объектами для исследования возможностей современных дистанционных методов.

Цель исследования заключается в оценке согласованности данных наземных измерений и дистанционных данных, полученных при съёмке БПЛА, а также в оценке возможностей автоматической сегментации для определения структурно-биометрических характеристик сосновых древостоев. Результаты исследования позволят определить надёжность и точность использования данных БПЛА-съёмки и алгоритма автоматической сегментации с использованием нейронной сети в практических задачах мониторинга и управления лесными ресурсами.

Материалы и методы

Объекты исследования

Исследования проводились на территории трёх ООПТ западной части Русской равнины: национальных парков (НП) «Куршская коса», «Смоленское Поозерье» и государственного природного биосферного заповедника «Брянский лес». В качестве объектов исследования выбраны сосняки дренированных местообитаний разного возраста (молодые — до 40 лет, средневозрастные — от 40 до 80 лет, старовозрастные — от 80 лет). Всего на территории НП «Куршская коса» были заложены 24 пробные площади (ПП) с преобладанием сосняков ксерофитно-зеленомошных. Практически все древостои имеют одновидовой состав с формулой древостоя 10С, однако на отдельных ПП отмечена незначительная примесь берёзы и ели. Пробные площади НП «Смоленское Поозерье» включают 13 участков с преобладанием сосняков кустарничково-зеленомошных; в составе древостоя отмечены также ель и берёза. В государственном природном биосферном заповеднике «Брянский лес» заложено 6 ПП, представленных сосняками кустарничково-зеленомошными с единичными деревьями ели и берёзы и сосняками сложными с липой и дубом. Подбор модельных участков охватывает разнообразие сосняков дренированных местообитаний в подзоне хвойно-широколиственных лесов западной части Русской равнины, что позволяет всесторонне оценить согласованность данных БПЛА с результатами наземных обследований при различной структуре древостоев.

Методика сбора и обработки данных наземных обследований

Размер заложенных ПП варьировал от 20×20 м в молодых до 50×50 м в средневозрастных и старовозрастных древостоях. На каждой ПП проводились таксационные измерения с использованием стандартных методик: сплошной пересчёт деревьев для определения общего числа деревьев, измерение диаметра стволов (>5 см) на высоте 1,3 м, измерение высоты деревьев лазерным высотомером Nikon Forestry Pro, определение календарного возраста с использованием бурава для отбора керн и подсчётом годичных колец, а также глазомерная оценка сомкнутости крон. Географические координаты фиксировались с помощью навигатора Garmin GPSmap 64st (точность ±3,65 м).

Исследуемые характеристики по данным наземных обследований рассчитывались для каждой ПП. Средний диаметр стволов на высоте 1,3 м определялся как среднее значение по всем деревьям на ПП. Поскольку высота измерялась не для каждого дерева, недостающие значения рассчитывались по диаметрам с использованием логарифмической функции, параметры которой подбирались индивидуально для каждого вида. Средняя высота на ПП вычислялась как среднее по измеренным и рассчитанным значениям. Отдельно рассчитывались средние значения диаметра, высоты и числа деревьев для *Pinus sylvestris*. Для анализа связи между диаметром и площадью кроны, определённой по визуальному дешифрированию, использовались данные семи ПП сосновых древостоев разного возраста в НП «Смоленское

Поозерье», где для отдельных деревьев были получены точные GPS-координаты и зафиксированы ориентиры для сопоставления с сегментами крон на ортофотоплане.

Методика сбора и обработки данных БПЛА-съёмки

Для сбора дистанционных данных использовались БПЛА массового сегмента DJI Phantom 3 Advanced и DJI Mavic Pro, оснащённые RGB-камерами. Для точного сопоставления с координатами ПП при съёмке применялись постоянные или временные реперные точки. Полёты проводились на высоте 100–200 м с продольным и поперечным перекрытием снимков 90 % с использованием программного обеспечения DroneDeploy (<https://www.dronedeploy.com/app.html>). Из обработанных в программном обеспечении Agisoft Metashape (<https://www.agisoft.com>) изображений были созданы цифровые модели местности (ЦММ) с разрешением до 30 см/пиксель и ортофотопланы с разрешением до 8 см/пиксель.

Характеристики, определённые по данным БПЛА, рассчитывались по результатам визуального дешифрирования и автоматической сегментации ортофотопланов (сомкнутость и число деревьев древостоев, средняя площадь и периметр крон), а также анализа ЦММ (высота древостоев). Автоматическое выделение крон деревьев осуществлялось с использованием обученной модели (F_1 -мера = 0,83) нейронной сети архитектуры Mask R-CNN (Nikitina, 2024). Для оценки согласованности параметров, полученных по данным БПЛА и наземных измерений, использовался коэффициент корреляции Спирмена r_s .

Высота. Средняя высота древесного полога на пробных площадях рассчитывалась по ЦММ, полученной на основе вычитания цифровой модели рельефа из ЦММ. Цифровая модель рельефа формировалась путём ручной классификации плотного облака точек в программном обеспечении Agisoft с выделением поверхности земли. Из анализа исключались точки ниже 5 м в древостоях старше 40 лет для устранения влияния подлеска и открытых пространств. Такой подход показал высокую устойчивость к вариациям рельефа на всей сцене съёмки.

Число деревьев. Для определения числа деревьев по данным БПЛА апробированы два метода: анализ ЦММ и визуальная разметка с автоматической сегментацией. В первом случае деревья идентифицировались как локальные максимумы ЦММ с использованием метода водораздела и окна 3×3 пикселя (реализация на языке *Python*, библиотека *OpenCV*). Метод окна позволял минимизировать пропуски и избежать переоценки при плотном размещении максимумов. Однако точность оказалась низкой: средняя абсолютная ошибка MAPE (англ. Mean Absolute Percentage Error) составила 50,6 %, что указывает на необходимость повышения пространственного разрешения данных и совершенствования алгоритма. Во втором подходе использовались данные визуальной разметки и автоматической сегментации. При прямом подсчёте сегментированных крон внутри границ ПП возникала переоценка, особенно на малых участках. Для её корректировки применялся сглаженный подсчёт: кроны на границах учитывались пропорционально площади, попадающей в пределы ПП. Это позволило сократить погрешности и получить более точную оценку.

Сомкнутость. Сомкнутость на рассматриваемых участках по данным сегментации рассчитана как отношение суммы площадей горизонтальных проекций выделенных крон к общей площади ПП и выражена в процентах.

Площадь и периметр крон. Расчёт средних площади и периметра крон проводился с учётом всех сегментов, входящих в границы ПП, независимо от того, входит сегмент на площадку полностью или частично.

Результаты и обсуждение

Соответствие характеристик сосновых лесов, определённых по данным наземных измерений и визуального дешифрирования ортофотопланов

Характеристики отдельных деревьев. При определении связи диаметра ствола, полученного при наземных измерениях, с площадью кроны отдельных деревьев, полученной при визуальном дешифрировании ортофотопланов, наиболее тесная взаимосвязь параметров отмечена в старовозрастных сосновых лесах с наименьшей густотой деревьев, коэффициент корреляции на всех ПП варьировал от 0,53 до 0,96 со средним значением 0,8 (рис. 1).

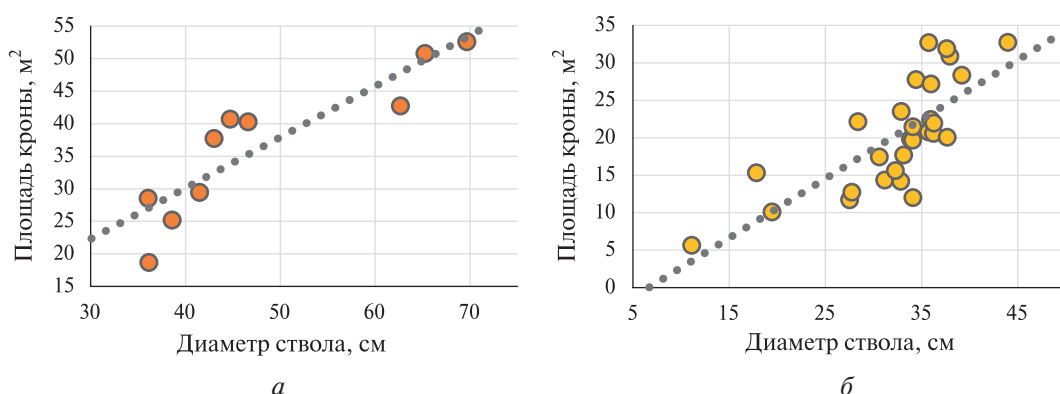


Рис. 1. Зависимость площади кроны от диаметра ствола на примере старовозрастного ($r_s = 0,96$) (а) и средневозрастного ($r_s = 0,76$) (б) соснового леса; r_s — коэффициент корреляции Спирмена

Высокая точность подобной оценки подтверждается рядом работ. Так, М.В. Мохта с соавторами (Mohta et al., 2024) показали, что диаметр ствола на высоте груди может быть успешно аппроксимирован на основе диаметра кроны, полученного с ортофотоснимков БПЛА. В плантациях эвкалипта (*Eucalyptus pellita*) наилучшую точность обеспечивала полиномиальная модель, при этом коэффициент детерминации R^2 достигал 0,9, а коэффициент корреляции $r = 0,95$. Схожие результаты представлены и в работе Ф.В. Виджая с соавторами (Wijaya et al., 2024), где на основе сегментированных крон и регрессионного анализа был получен $R^2 = 0,74$ между диаметром кроны и диаметром ствола по данным нескольких древесных пород. Несмотря на отличия в породном составе и условиях произрастания, исследование демонстрирует универсальность подхода к моделированию диаметра ствола через параметры кроны, извлечённые с БПЛА-изображений.

Число деревьев. Для всех деревьев на ПП общий коэффициент корреляции Спирмена между числом деревьев, определённым по визуальной разметке БПЛА-съёмки, и натурными измерениями составил 0,71, а для *Pinus sylvestris* — 0,84 (табл. 1). Высокая корреляция для сосны может отражать её доминирование в верхнем ярусе и морфологическую однородность, но не обязательно свидетельствует о лучшей распознаваемости по данным БПЛА.

Таблица 1. Коэффициент корреляции Спирмена r_s между данными БПЛА визуальной разметки и разными показателями числа деревьев при натурных измерениях

Возрастная категория	БПЛА/Число деревьев	БПЛА/Число деревьев <i>Pinus sylvestris</i>
Общие	0,71	0,84
Молодые сосновые леса	0,52	0,63
Средневозрастные сосновые леса	0,87	0,93
Старовозрастные сосновые леса	0,68	0,78

По возрастным категориям наибольшая согласованность наблюдается в средневозрастных лесах (0,87 для всех деревьев и 0,93 для сосны), тогда как в молодых древостоях значения ниже, вероятно, из-за сложности выделения крон при высокой сомкнутости и низкой высоте (рис. 2). Уменьшение высоты полёта для получения данных более детального разрешения возможно позволит уменьшить ошибки при детектировании крон молодняков. В старовозрастных насаждениях снижение точности может быть связано с более сложной вертикальной и видовой структурой. В целом число деревьев на ПП, полученных при сегментации ортофотоплана, хорошо коррелирует с данными наземных измерений.

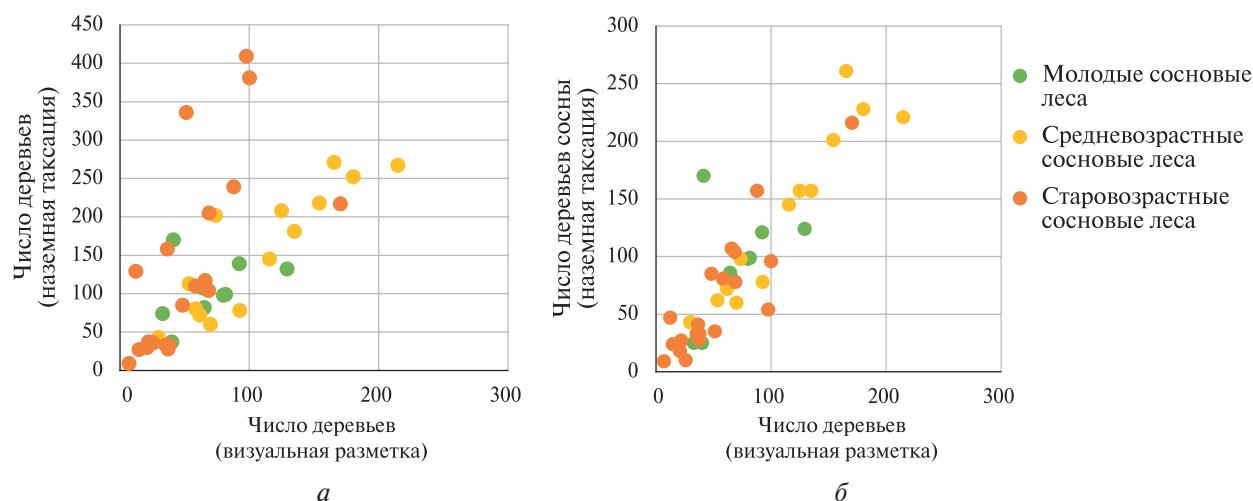


Рис. 2. Общее число деревьев (а) и число деревьев сосны обыкновенной (б) на ПП, определённые с использованием БПЛА-съёмки и наземной таксации

Согласно данным Н. В. Ивановой и соавторов (2021), наибольшая точность определения числа деревьев по данным БПЛА достигается в древостоях с относительно однородной структурой, при малой густоте и крупных кронах деревьев, тогда как наличие сложной ярусности и высокого видового разнообразия затрудняет идентификацию и снижает точность оценки. Сопоставимые выводы делает Ч. Хао с соавторами (Hao et al., 2021), указывая на трудности при детекции в условиях плотной посадки и перекрытия крон. Особенности выделения деревьев в молодняках остаются менее проработанными: большинство работ сосредоточено либо на плантационных, либо на разреженных древостоях (Hao et al., 2021; Zhou et al., 2023). Тем не менее даже в них подчёркивается, что высокая сомкнутость и низкая абсолютная высота деревьев препятствуют надёжному определению вершин крон, что влечёт за собой снижение точности в расчёте числа деревьев (Zhou et al., 2023).

Высота древостоя. Сопоставление средней высоты по данным БПЛА и натурным измерениям показывает сильную положительную корреляцию: общий коэффициент составил 0,75, а для *Pinus sylvestris* — 0,85 (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициент корреляции Спирмена r_s между данными средней высоты по БПЛА и разными показателями средней высоты при натурных измерениях

Возрастная категория	БПЛА/Средняя высота, м	БПЛА/Средняя высота <i>Pinus sylvestris</i> , м
Общее	0,75	0,85
Молодые сосновые леса	0,94	0,95
Средневозрастные сосновые леса	0,70	0,89
Старовозрастные сосновые леса	0,37	0,61

На рис. 3 показано соответствие между высотами по ЦММ и наземной таксации. Высокие значения наблюдаются в молодых сосняках (0,94 и 0,95 соответственно), что связано с их более однородной структурой. Для средневозрастных лесов коэффициенты также высокие — 0,70 и 0,89. В старовозрастных древостоях показатели снижаются (0,37 и 0,61), что может быть обусловлено увеличением сложности породной и вертикальной структуры. Кроме того, детализация ЦММ может влиять на результаты при интерполяции данных, что приводит к сглаживанию высотных различий в старовозрастных лесах по сравнению с более однородными по высоте молодыми древостоями.

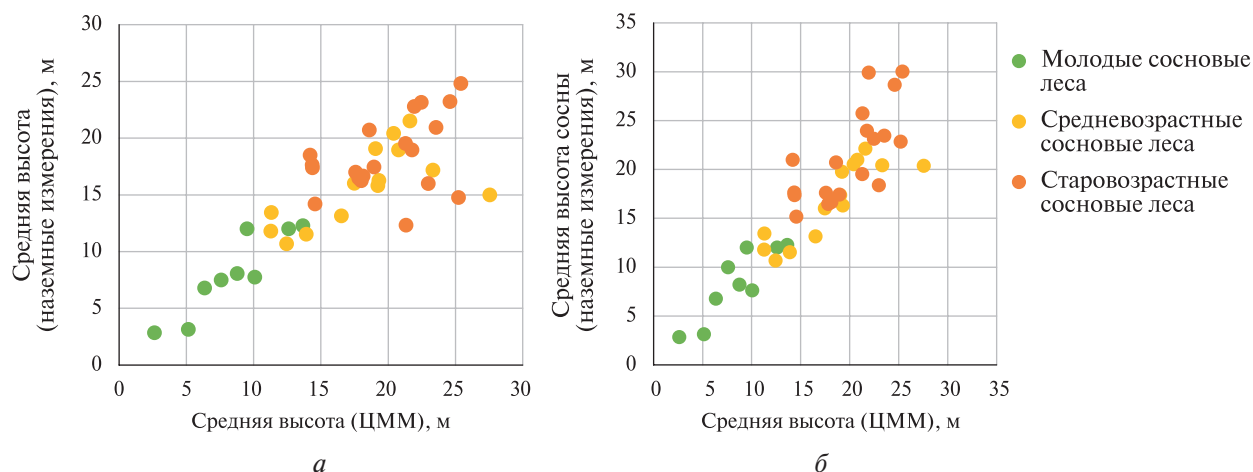


Рис. 3. Средняя высота всех деревьев (а) и средняя высота сосны обыкновенной (б) на ПП, определённые с использованием ЦММ и данных наземной таксации

Сопоставимые результаты получены А.Дж. Чедвиком и соавторами (Chadwick et al., 2020), где в молодых древостоях на основе RGB-изображений достигнута высокая точность оценки высоты ($R^2 = 0,93$). В работе В. Насири и соавторов (Nasiri et al., 2021) получены оценки $R^2 = 0,81$ при среднеквадратичной ошибке 3,22 м в смешанных лесах на основе ЦММ. М. Маймайтджян и соавторы (Maimaitijiang et al., 2020) показали, что LiDAR (англ. Light Detection and Ranging) обеспечивает лучшую точность в плотных насаждениях. Тем не менее в разреженных или равномерных древостоях RGB-фотограмметрия показывает удовлетворительные результаты и остаётся более доступным инструментом в условиях ограниченного бюджета. Из полученных результатов можно сделать вывод, что по мере увеличения возраста лесных насаждений и возрастания сложности их структуры точность определения средней высоты по данным БПЛА уменьшается.

Сомкнутость. Общий коэффициент корреляции между сомкнутостью древостоев, оценённой по данным БПЛА, и сомкнутостью, оценённой при наземной таксации, для всех возрастных категорий составляет 0,59, что указывает на умеренную связь. Для молодых сосновых лесов коэффициент составляет 0,48, для средневозрастных — значительно выше, равен 0,78, а для старовозрастных сосновых лесов — 0,52.

При интерпретации результатов важно учитывать различия в методах оценки сомкнутости. Визуальная разметка по БПЛА формирует двумерное представление на основе наличия кроны в каждом пикселе, тогда как наземная оценка зависит от угла обзора и субъективного восприятия. Кроме того, в полевых данных шаг измерения составляет 5 %, тогда как по БПЛА сомкнутость рассчитывается как непрерывная величина (0–100 %), что также влияет на уровень корреляции между методами.

При рассмотрении данных сомкнутости по возрастным грациям (рис. 4, см. с. 201) наблюдается значительная вариабельность в пределах каждой группы, что сказывается на точности определения данного параметра. В целом прослеживается увеличение коэффициента корреляции для средневозрастных лесов.

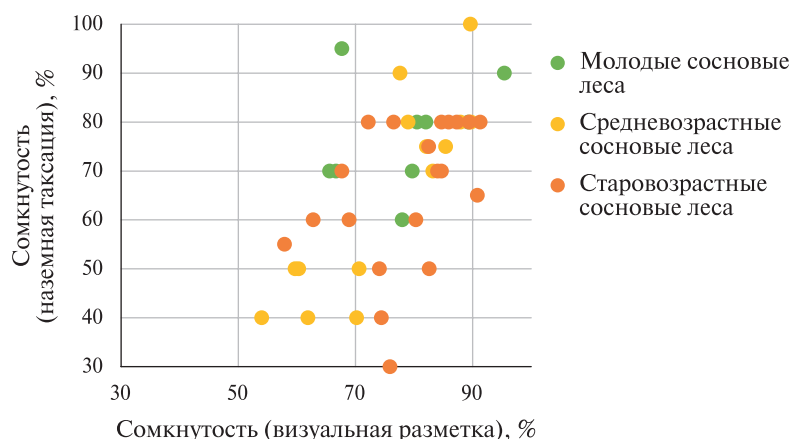


Рис. 4. Сомкнутость на ПП, определённая с использованием БПЛА-съемки и данных наземной таксации

Исследование Т. Гао с соавторами (Gao et al., 2022) подчёркивает, что точность оценки сомкнутости в сложных древостоях зависит как от породного состава, так и от пространственной структуры. В этом исследовании выбор алгоритма (например, алгоритм водораздела, диаграмма Вороного, метод роста областей) существенно влиял на результат — особенно в условиях высокой плотности или смешанного состава. В нашем исследовании большая вариабельность по сомкнутости наблюдается даже внутри одной возрастной категории, что, вероятно, отражает как естественное разнообразие структур крон, так и ограничения метода выделения по RGB-изображениям. Это согласуется с выводами Ц. Чень и соавторов (Chen et al., 2023), согласно которым в условиях сложного рельефа и при увеличении видового разнообразия выделение крон по RGB-съемке сопряжено с трудностями из-за теней, текстурной неоднородности и ограниченной спектральной информации.

Информация о сомкнутости древостоя по БПЛА-съемке может дополнять наземные таксационные данные, но необходимо принимать в расчёт ограничения при интерпретации и сравнении с наземными данными. Использование сомкнутости, определённой по данным БПЛА, в качестве предиктора при построении регрессионных моделей характеристик древостоев представляется перспективным направлением для последующих исследований и будет предметом дальнейшего анализа.

Согласованность результатов визуального дешифрирования и автоматической сегментации Mask R-CNN

Значения коэффициента корреляции Спирмена r_s иллюстрируют высокую степень согласованности между данными, полученными посредством ручного дешифрирования и автоматической сегментации с использованием алгоритма Mask R-CNN, по ключевым морфометрическим параметрам древостоя (рис. 5, см. с. 202).

Средняя площадь кроны, определённая по результатам визуального дешифрирования, показывает высокую степень согласованности с данными, полученными в результате автоматической сегментации методом Mask R-CNN ($r_s = 0,96$). Среднее значение площади по визуальной разметке составляет $14,16 \text{ м}^2$, тогда как по данным Mask R-CNN — $15,71 \text{ м}^2$. Сходный уровень согласованности наблюдается и для периметра кроны ($r_s = 0,93$): среднее значение, определённое вручную, составляет $15,94 \text{ м}$, а при автоматической обработке — $14,32 \text{ м}$. Наблюдаемое расхождение может быть связано с особенностями методик — визуальное дешифрирование позволяет учитывать более тонкие и нерегулярные элементы контура, тогда как автоматическая сегментация склонна к сглаживанию границ. Тем не менее полученные значения свидетельствуют о высокой точности воспроизведения размерных характеристик крон при использовании Mask R-CNN.

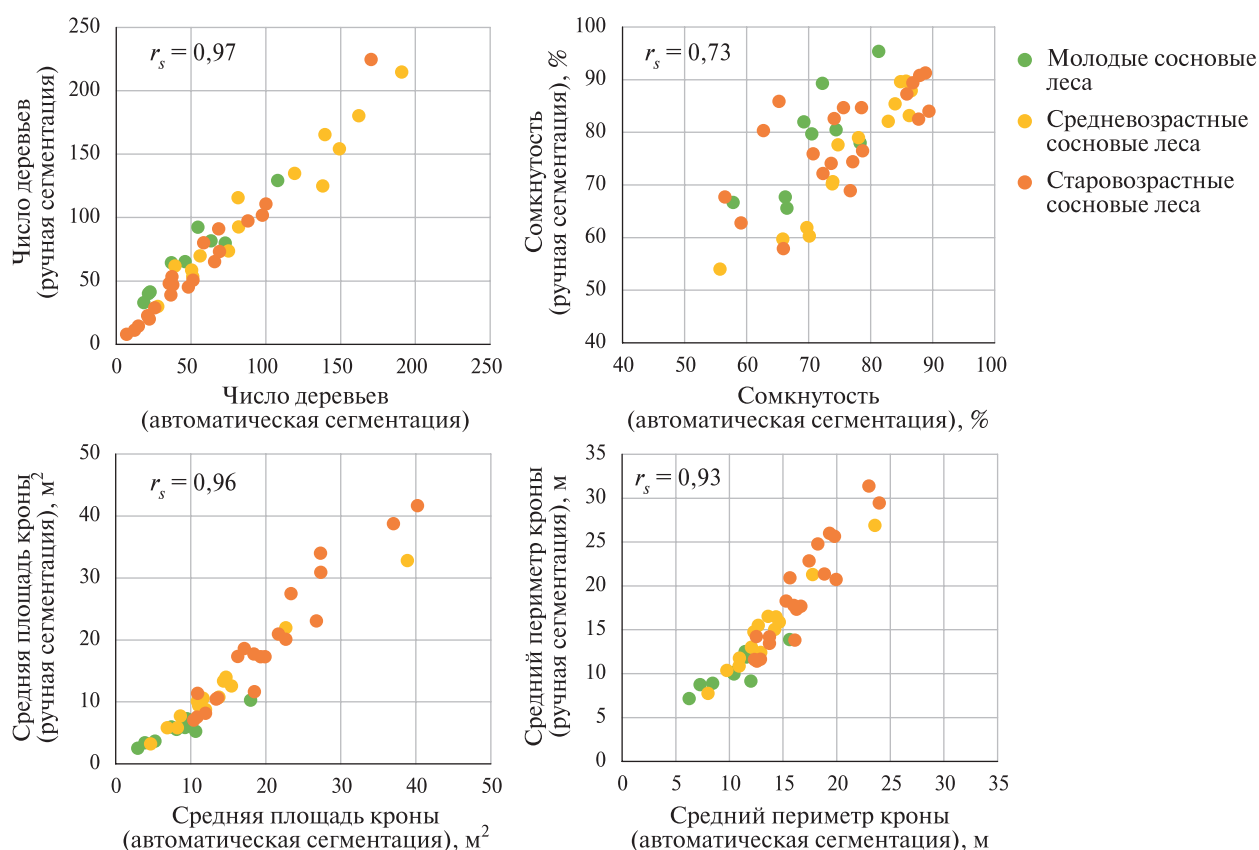


Рис. 5. Характеристики древостоя на ПП по данным визуального дешифрирования и сегментации крон с использованием Mask R-CNN

Хорошая согласованность выявлена также по числу деревьев: $r_s = 0,97$. Среднее значение по визуальной разметке составило 78,7 шт./ПП, а по данным Mask R-CNN — 66,7 шт./ПП. Снижение оценок при автоматической сегментации, вероятно, связано с трудностями разделения близко расположенных деревьев и возможным объединением или пропуском крон, не имеющих ярко выраженной пространственной изоляции.

Показатель сомкнутости демонстрирует умеренно высокую корреляцию между методами ($r_s = 0,73$). При этом средняя сомкнутость по визуальной разметке составляет 77,4 %, тогда как по результатам автоматической сегментации — 74,9 %. Несмотря на то, что площадь отдельных крон по данным автоматической сегментации несколько выше, это не компенсирует влияние недоучёта части деревьев, вследствие чего сомкнутость показывает меньшую степень согласованности с визуальной оценкой.

В исследовании М. Переса-Карраско с соавторами (Pérez-Carrasco et al., 2022) сравнивались алгоритмы YOLO и Mask R-CNN для задач сегментации крон деревьев на БПЛА-снимках сосновых лесов. Mask R-CNN показал более высокую точность как по площади сегментированных объектов (средняя ошибка 9,2 %), так и по числу деревьев, при этом недооценка количества деревьев составила лишь 4,7 %. Это согласуется с нашими данными, где Mask R-CNN также воспроизводит морфометрию крон с высокой точностью. Результаты З. Шпекенвирта и соавторов (Speckenwirth et al., 2024) показывают, что автоматическая сегментация, выполненная с использованием Mask R-CNN и Faster R-CNN, может с высокой точностью воспроизводить геометрию крон.

Таким образом, автоматическая сегментация изображений с использованием алгоритма Mask R-CNN может рассматриваться как надёжный инструмент для количественной оценки морфометрических характеристик сосновых древостоев. Высокая степень согласованности с результатами визуального дешифрирования подтверждает применимость метода для задач мониторинга, особенно при необходимости обработки больших объёмов данных, где ручная разметка становится затруднительной.

Заключение

Результаты исследования подтверждают, что характеристики древостоев, полученные с использованием данных высокодетаальной съёмки БПЛА, в значительной степени согласуются с наземными измерениями. Степень согласованности варьирует в зависимости от параметра и структуры древостоя: наибольшая согласованность демонстрируется при оценке средней высоты для молодых лесов, числа деревьев — для средневозрастных сосняков, а при анализе связи диаметра ствола с площадью кроны — в старовозрастных древостоях. Коэффициент Спирмена между числом деревьев, определённым по данным визуального дешифрирования, и данными наземных измерений составил 0,71 в целом и 0,84 для сосны обыкновенной. Для средней высоты древостоя соответствующие коэффициенты достигали 0,75 и 0,85 соответственно, с максимальными значениями (до 0,95) в молодых древостоях с однородной структурой. Связь между диаметром ствола и площадью кроны по данным отдельных деревьев, выявленная в старовозрастных разреженных лесах, оказалась сильной ($r_s = 0,96$), однако значения варьировали по площадкам (от 0,53 до 0,96), что указывает на зависимость точности от структуры древостоя.

Автоматическая сегментация изображений с использованием Mask R-CNN позволила эффективно извлекать параметры, такие как площадь и периметр крон, число деревьев и сомкнутость, демонстрируя высокую степень согласованности с результатами ручной разметки ($r_s = 0,73...0,97$). Это делает данный подход перспективным инструментом для пространственно непрерывной оценки структуры древостоев на больших территориях. При этом сомкнутость, определённая по данным БПЛА, показала умеренную корреляцию с наземными оценками ($r_s = 0,59$), что может быть связано с различиями в методах измерения, субъективностью глазомерной оценки и ограничениями RGB-съёмки в сложных условиях — при наличии многоярусности и разнообразия видового состава.

Таким образом, полученные результаты подтверждают применимость данных БПЛА для оценки ключевых морфометрических характеристик сосновых древостоев, в том числе с использованием методов автоматической сегментации. Это подчёркивает потенциал использования дистанционных данных в качестве предикторов при построении регрессионных моделей структурно-биометрических характеристик и запасов углерода стволовой древесины.

Полевые работы и предварительная подготовка данных проведены в рамках темы государственного задания Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А. С. Исаева Российской академии наук (ЦЭПЛ РАН) «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1). Обработка и анализ данных выполнены в рамках деятельности молодёжной лаборатории климаторегулирующих функций лесов ЦЭПЛ РАН (регистрационный номер 1024100700084-5-1.6.19).

Литература

1. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов: монография / под ред. Н. В. Лукиной. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2018. 232 с.
2. Березина Н. А., Вахрамеева М. Г., Шведчикова Н. К. Растительность национального парка «Смоленское Поозерье» // Науч. исслед. в Нац. парке «Смоленское Поозерье». Вып. 1. М.: НИА-Природа, 2003. С. 121–149.
3. Герасименко Г. Г., Козьминская Т. Л. Состояние и разнообразие сосновых насаждений Куршской косы // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 3. 2002. Вып. 1. № 3. С. 41–45.
4. Губарева И. Ю. Ботанические объекты // Особо ценные природные и культурные объекты нац. парка «Куршская коса»: сб. науч. ст. Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2009. С. 9–36.
5. Евстигнеев О. И., Коротков В. Н. Сукцессии сосновых лесов зандровой местности в Неруссо-Деснянском полесье // Разнообразие растительного мира. 2013. № 1 (1). С. 31–41.
6. Иванова Н. В., Шашков М. П., Шанин В. Н. Исследование структуры древостоев сосновых лесов Приокско-Тerrasного биосферного заповедника (Россия) по материалам аэрофотосъёмки

- с квадрокоптера // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2021. Т. 6. № 4. С. 1–14. DOI: 10.24189/ncr.2021.042.
7. *Немирова Е. С., Мартынов Б. И.* К изучению растительности Смоленской области // Геогр. среда и живые системы. 2010. № 2. С. 74–79.
8. *Огуреева Г. Н., Леонова Н. Б., Микляева И. М., Бочарников М. В., Федосов В. Э., Мучник Е. Э., Урбанавичюс Г. П., Емельянова Л. Г., Хляп Л. А., Румянцев В. Ю., Кузиков И. В., Липка О. Н., Архипова М. В., Булдакова Е. В., Кадетов Н. Г.* Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы / под ред. Г. Н. Огуреевой. М.: ФГБУ «ИГКЭ», 2020. 623 с.
9. *Рысин Л. П.* Хвойные леса России // Изв. Самарского науч. центра Российской акад. наук. 2012. Т. 14. № 1(4). С. 1106–1109.
10. *Тихонова Е. В.* Инвентаризация и классификация современного ценотического разнообразия лесной растительности НП «Смоленское Поозерье» // Биоразнообразие и функционирование лесных экосистем. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2021. С. 118–130.
11. *Ball J. G. C., Hickman S. H. M., Jackson T. D. et al.* Accurate delineation of individual tree crowns in tropical forests from aerial RGB imagery using Mask R-CNN // Remote Sensing in Ecology and Conservation. 2023. V. 9. No. 5. P. 641–655. DOI: 10.1002/rse2.332.
12. *Chadwick A. J., Goodbody T. R. H., Coops N. C. et al.* Automatic delineation and height measurement of regenerating conifer crowns under leaf-off conditions using UAV imagery // Remote Sensing. 2020. V. 12. Iss. 24. Article 4104. DOI: 10.3390/rs12244104.
13. *Chen J., Wang L., Jucker T. et al.* Detecting forest canopy gaps using unoccupied aerial vehicle RGB imagery in a species-rich subtropical forest // Remote Sensing in Ecology and Conservation. 2023. V. 9. No. 5. P. 671–686. DOI: 10.1002/rse2.336.
14. *Diez Y., Kentsch S., Fukuda M. et al.* Deep learning in forestry using UAV-acquired RGB data: A practical review // Remote Sensing. 2021. V. 13. Iss. 14. Article 2837. DOI: 10.3390/rs13142837.
15. *Gao T., Gao Z., Sun B. et al.* An integrated method for estimating forest-canopy closure based on UAV LiDAR data // Remote Sensing. 2022. V. 14. Iss. 17. Article 4317. DOI: 10.3390/rs14174317.
16. *Hao Z., Lin L., Post C. J. et al.* Assessing tree height and density of a young forest using a consumer unmanned aerial vehicle (UAV) // New Forests. 2021. V. 52. P. 843–862. DOI: 10.1007/s11056-020-09827-w.
17. *Maimaitijiang M., Sagan V., Erkbol H. et al.* UAV-based sorghum growth monitoring: A comparative analysis of LiDAR and photogrammetry // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2020. V. 3. P. 489–496. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-3-2020-489-2020.
18. *Mohta M. V., Azwin A., Ikhwan M.* Model Pendugaan diameter pohon *Eucalyptus pellita* Clone EP0077AA Berbasis Citra foto (Unmanned Aerial Vehicle) // Wahana Forestra: Jurnal Kehutanan. 2024. V. 19. No. 1. P. 111–123. DOI: 10.31849/forestra.v19i1.17592.
19. *Nasiri V., Darvishsefat A. A., Arefi H. et al.* UAV-based canopy height modeling under leaf-on and leaf-off conditions for determining tree height and crown diameter (case study: Hyrcanian mixed forest) // Canadian J. Forest Research. 2021. V. 51. No. 7. P. 962–971. DOI: 10.1139/cjfr-2020-0125.
20. *Nikitina A. D.* Automatic segmentation of tree crowns in pine forests using Mask R-CNN on RGB imagery from UAVs // Forest Science Issues. 2024. V. 7. No. 3. Article 150. 18 p. DOI: 10.31509/2658-607x-202473-150.
21. *Pérez-Carrasco M., Karelovic B., Molina R. et al.* Precision silviculture: Use of UAVs and comparison of deep learning models for the identification and segmentation of tree crowns in pine crops // Intern. J. Digital Earth. 2022. V. 15. No. 1. P. 2223–2238. DOI: 10.1080/17538947.2022.2152882.
22. *Speckenwirth S., Brandmeier M., Paczkowski S.* A toolbox for fully automated tree crown segmentation based on high-resolution multispectral UAV data // Remote Sensing. 2024. V. 16. Iss. 19. Article 3660. DOI: 10.3390/rs16193660.
23. *Tang L., Shao G.* Drone remote sensing for forestry research and practices // J. Forestry Research. 2015. V. 26. No. 4. P. 791–797. DOI: 10.1007/s11676-015-0088-y.
24. *Torresan C., Berton A., Carotenuto F. et al.* Forestry applications of UAVs in Europe: A review // Intern. J. Remote Sensing. 2017. V. 38. No. 8–10. P. 2427–2447. DOI: 10.1080/01431161.2016.1252477.
25. *Wijaya F. W., Kurniawan I. F., Asyhari A. T.* Automated biomass estimation leveraging instance segmentation and regression models with UAV aerial imagery and forest inventory data // 2024 IEEE Intern. Conf. on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT). IEEE, 2024. P. 521–528. DOI: 10.1109/COMNETSAT63286.2024.10862819.
26. *Zhou X., Wang H., Chen C. et al.* Detection of growth change of young forest based on UAV RGB images at single-tree level // Forests. 2023. V. 14. No. 1. Article 141. DOI: 10.3390/f14010141.

Assessment of the consistency of structural and biometric characteristics of Scots pine forests based on field measurements and UAV imagery

A. D. Nikitina, S. V. Knyazeva, E. V. Tikhonova, A. V. Gornov

Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: nikitina.al.dm@gmail.com

The paper presents the results of a study evaluating the consistency between structural and biometric characteristics of Scots pine forests derived from ground-based measurements and high-resolution UAV-based RGB imagery. The evaluation included: tree stem diameters obtained from field surveys and corresponding crown areas delineated from UAV imagery; mean tree height measured in the field and height derived from digital surface models; and tree count and canopy cover assessed through ground-based methods versus UAV-based orthomosaics, using both visual interpretation and automatic segmentation approaches. A high Spearman's correlation (r_s) was found between ground measurements and visual interpretation: $r_s = 0.71$ for tree count and $r_s = 0.75$ for mean height. Moderate agreement in canopy cover ($r_s = 0.59$) may reflect not so much the limitations of RGB imagery as the uncertainty of subjective visual assessments in the field, meanwhile UAV-derived data may provide a more objective interpretation. The relationship between stem diameter and crown area derived from orthomosaics reached $r_s = 0.96$ in old-growth sparse pine forests. Additionally, the agreement between visual interpretation and automatic crown segmentation using the Mask R-CNN neural network was assessed: $r_s = 0.93...0.97$ for tree count, crown area, and perimeter; $r_s = 0.73$ for canopy cover, with lower consistency explained by the contribution of undetected crowns to total canopy closure. The study highlights the potential of UAV-based RGB data and automatic segmentation techniques to complement traditional field-based approaches in forest monitoring.

Keywords: UAV, RGB imagery, Spearman correlation, Scots pine, crown delineation, automatic segmentation, Mask R-CNN, forest monitoring

Accepted: 16.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-195-206

References

1. *Akkumulyatsiya ugleroda v lesnykh pochvakh i suksessionnyi status lesov: monografiya* (Carbon accumulation in forest soils and successional status of forests), N. V. Lukina (ed.), Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2018, 232 p. (in Russian).
2. Berezina N. A., Vakhrameeva M. G., Shvedchikova N. K., Vegetation of the National Park "Smolenskoe Poozer'e", In: *Nauchnye issledovaniya v Natsional'nom parke "Smolenskoe Poozer'e"* (Research in the National Park "Smolenskoye Poozer'ye"), Iss. 1, Moscow: NIA-Priroda, 2003, pp. 121–149 (in Russian).
3. Gerasimenko G. G., Koz'minskaya T. L., Condition and diversity of pine stands of the Curonian Spit, *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 3*, 2002, Iss. 1, No. 3, pp. 41–45 (in Russian).
4. Gubareva I. Yu., Botanical objects, In: *Osobo tsennyye prirodnye i kul'turnye ob'ekty natsional'nogo parka "Kurshskaya kosa": sbornik nauchnykh statei* (Particularly valuable natural and cultural objects of the Curonian Spit National Park: collection of scientific articles), Kaliningrad: Izd. RGU im. I. Kanta, 2009, pp. 9–36 (in Russian).
5. Evstigneev O. I., Korotkov V. N., Successions of pine forests within outwash plains (sandurs) in Nerussa-Desna Polesye, *Raznoobrazie rastitel'nogo mira*, 2013, No. 1(1), pp. 31–41 (in Russian).
6. Ivanova N. V., Shashkov M. P., Shanin V. N., Study of pine forest stand structure in the Priosko-terrasny state nature biosphere reserve (Russia) based on aerial photography by quadrocopter, *Nature Conservation Research*, 2021, V. 6, No. 4, pp. 1–14 (in Russian), DOI: 10.24189/ncr.2021.042.
7. Nemirova E. S., Martynov B. I., By studying the vegetation of Smolensk region, *Geograficheskaya sreda i zhivyye sistemy*, 2010, No. 2, pp. 74–79 (in Russian).
8. Ogureeva G. N., Leonova N. B., Miklyaeva I. M., Bocharnikov M. V., Fedosov V. E., Muchnik E. E., Urbanavichyus G. P., Emelyanova L. G., Khlyap L. A., Rummyantsev V. Yu., Kuzikov I. V., Lipka O. N., Arkhipova M. V., Buldakova E. V., Kadetov N. G., *Bioraznoobrazie biomov Rossii. Ravninnye biomy* (Biodiversity of Russia's Biomes. Plain Biomes), Moscow: IGKE, 2020, 623 p. (in Russian).

9. Rysin L. P., Coniferous forests of Russia, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, V. 14, No. 1(4), pp. 1106–1109 (in Russian).
10. Tikhonova E. V., Inventory and classification of modern cenotic diversity of forest vegetation in the Smolenskoe Poozer'e National Park, In: *Bioraznoobrazie i funktsionirovanie lesnykh ekosistem* (Biodiversity and functioning of forest ecosystems), Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2021, pp. 118–130 (in Russian).
11. Ball J. G. C., Hickman S. H. M., Jackson T. D. et al., Accurate delineation of individual tree crowns in tropical forests from aerial RGB imagery using Mask R-CNN, *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2023, V. 9, No. 5, pp. 641–655, DOI: 10.1002/rse2.332.
12. Chadwick A. J., Goodbody T. R. H., Coops N. C. et al., Automatic delineation and height measurement of regenerating conifer crowns under leaf-off conditions using UAV imagery, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, Iss. 24, Article 4104, DOI: 10.3390/rs12244104.
13. Chen J., Wang L., Jucker T. et al., Detecting forest canopy gaps using unoccupied aerial vehicle RGB imagery in a species-rich subtropical forest, *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2023, V. 9, No. 5, pp. 671–686, DOI: 10.1002/rse2.336.
14. Diez Y., Kentsch S., Fukuda M. et al., Deep learning in forestry using UAV-acquired RGB data: A practical review, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, Iss. 14, Article 2837, DOI: 10.3390/rs13142837.
15. Gao T., Gao Z., Sun B. et al., An integrated method for estimating forest-canopy closure based on UAV LiDAR data, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, Iss. 17, Article 4317, DOI: 10.3390/rs14174317.
16. Hao Z., Lin L., Post C. J. et al., Assessing tree height and density of a young forest using a consumer unmanned aerial vehicle (UAV), *New Forests*, 2021, V. 52, pp. 843–862, DOI: 10.1007/s11056-020-09827-w.
17. Maimaitijiang M., Sagan V., Erkbol H. et al., UAV-based sorghum growth monitoring: A comparative analysis of LiDAR and photogrammetry, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, V. 3, pp. 489–496, DOI: 10.5194/isprs-annals-V-3-2020-489-2020.
18. Mohta M. V., Azwin A., Ikhwan M., Model Pendugaan diameter pohon *Eucalyptus pellita* Clone EP0077AA Berbasis Citra foto (Unmanned Aerial Vehicle), *Wahana Forestra: Jurnal Kehutanan*, 2024, V. 19, No. 1, pp. 111–123, DOI: 10.31849/forestra.v19i1.17592.
19. Nasiri V., Darvishsefat A. A., Arefi H. et al., UAV-based canopy height modeling under leaf-on and leaf-off conditions for determining tree height and crown diameter (case study: Hyrcanian mixed forest), *Canadian J. Forest Research*, 2021, V. 51, No. 7, pp. 962–971, DOI: 10.1139/cjfr-2020-0125.
20. Nikitina A. D., Automatic segmentation of tree crowns in pine forests using Mask R-CNN on RGB imagery from UAVs, *Forest Science Issues*, 2024, V. 7, No. 3, Article 150, 18 p., DOI: 10.31509/2658-607x-202473-150.
21. Pérez-Carrasco M., Karelavic B., Molina R. et al., Precision silviculture: Use of UAVs and comparison of deep learning models for the identification and segmentation of tree crowns in pine crops, *Intern. J. Digital Earth*, 2022, V. 15, No. 1, pp. 2223–2238, DOI: 10.1080/17538947.2022.2152882.
22. Speckenwirth S., Brandmeier M., Paczkowski S., A toolbox for fully automated tree crown segmentation based on high-resolution multispectral UAV data, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, Iss. 19, Article 3660, DOI: 10.3390/rs16193660.
23. Tang L., Shao G., Drone remote sensing for forestry research and practices, *J. Forestry Research*, 2015, V. 26, No. 4, pp. 791–797, DOI: 10.3390/rs16193660.
24. Torresan C., Berton A., Carotenuto F. et al., Forestry applications of UAVs in Europe: A review, *Intern. J. Remote Sensing*, 2017, V. 38, No. 8–10, pp. 2427–2447, DOI: 10.1080/01431161.2016.1252477.
25. Wijaya F. W., Kurniawan I. F., Asyhari A. T., Automated biomass estimation leveraging instance segmentation and regression models with UAV aerial imagery and forest inventory data, *2024 IEEE Intern. Conf. on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*, IEEE, 2024, pp. 521–528, DOI: 10.1109/COMNETSAT63286.2024.10862819.
26. Zhou X., Wang H., Chen C. et al., Detection of growth change of young forest based on UAV RGB images at single-tree level, *Forests*, 2023, V. 14, No. 1, Article 141, DOI: 10.3390/f14010141.