Методика обработки данных воздушного лазерного сканирования для оценки освещённости леса

А. Б. Алексеев[1], А. С. Плотникова[1], Д. В. Ильясов[2], Ю. В. Куприянова[2]

[1] *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А. С. Исаева РАН*
Москва, 117997, Россия
E-mail: poxpox@mail.ru

[2] *Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, 628011, Россия*

Один из ключевых параметров фитоклимата леса — световой режим, характеризующийся величиной освещённости. Известны способы прямого инструментального измерения и косвенной оценки освещённости. Прямые измерения фиксируют лишь мгновенное состояние освещённости, зависят от погодных условий и времени суток. Косвенные оценки возможны на основе ряда параметров структуры полога леса — сомкнутости и полноты, сквозистости и ажурности, индекса листовой поверхности. В исследовании предложен способ косвенной оценки освещённости леса с помощью обобщённого понятия прозрачности древесного полога. Разработана методика обработки данных воздушного лазерного сканирования для пространственной оценки освещённости леса с помощью непрерывных растровых моделей прозрачности древесного полога. Основные блоки методики — планирование и выполнение лётно-съёмочных работ, первичная обработка данных воздушного лазерного сканирования, классификация точек лазерных отражений, определение прозрачности древесного полога. Сформулированы требования к полётным параметрам и аппаратным настройкам лазерного сканера. В рамках блока методики по определению прозрачности древесного полога разработан и программно реализован алгоритм расчёта прозрачности на основе данных воздушного лазерного сканирования. Алгоритм включает пять этапов: 1) предварительная подготовка, формирование виртуального пространства и тайлирование облака точек лазерных отражений; 2) формирование сети точек локальных измерений; 3) извлечение фрагмента точек лазерных отражений и вокселизация; 4) математическое моделирование сферической проекции; 5) агрегация локальных измерений и построение растровой модели. Разработанная методика апробирована на территории исследования в Тверской области и стационаре «Мухрино», Ханты-Мансийский автономный округ — Югра. Валидация полученных моделей выполнена в пределах заложенных на территориях исследования пробных площадях с помощью корреляционного анализа значений прозрачности и индексов освещённости по шкале Э. Ландольта и листовой поверхности. В результате валидации получено биологически обоснованное подтверждение корректности оценки освещённости леса с помощью созданных на основе разработанной методики растровых моделей прозрачности древесного полога.

Ключевые слова: воздушное лазерное сканирование, прозрачность древесного полога, освещённость леса, индекс листовой поверхности, экологическая шкала Э. Ландольта, международный стационар «Мухрино»

Одобрена к печати: 27.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-153-169

Введение

Фитоклимат, формируемый древесным пологом, представляет собой ключевой регулятор биоразнообразия, продуктивности и устойчивости лесной экосистемы (Лукина и др., 2019). К основным характеристикам фитоклимата леса относятся световой и температурный режимы, количество проникающих под полог леса осадков. Световой режим характеризуется величиной освещённости леса и оказывает влияние на видовое и структурное разнообразие, прирост биомассы, процессы лесовосстановления (Алексеев, 1975; Цельникер, 1969; Чумаченко, 2006). Количество света, проникающего под полог древостоя, считается ведущим экологическим фактором формирования подлеска и живого напочвенного покрова (Алексеев, 1975), онтогенеза широколиственных пород деревьев (Евстигнеев, 1996), оказывает влияние на урожайность ягодников (Колычева, Чумаченко, 2021) и почвенные процессы (Кузнецова и др., 2024).

Прямые измерения освещённости нижних ярусов лесных экосистем проводятся с помощью оптического прибора *люксметра* (Ипатов, Мирин, 2008). Помимо этого, измеряют *фотосинтетически активную радиацию* (ФАР) — часть солнечной радиации в диапазоне от 400 до 700 нм, используемую растениями для фотосинтеза. Для измерения ФАР применяются приборы *квантометры* или датчики ФАР. Прямые измерения освещённости зависят от погодных условий и времени суток. Ввиду того, что приборы фиксируют световой поток только в точке, где находятся их чувствительные элементы, даже синхронные измерения освещённости нижнего яруса одинаковых типов леса не дают сопоставимой информации о наличии или отсутствии различий в освещённости.

Косвенные оценки освещённости основаны на параметрах структуры древесного полога — сомкнутости (*англ.* canopy cover, canopy closure (Jennings et al., 1999; Korhonen, Morsdorf, 2014)), полноты, сквозистости (*англ.* gap fraction), ажурности. Под *сомкнутостью* полога понимается степень заполнения пространства участка древостоя леса кронами деревьев, определяемая по их общей проекции на горизонтальную плоскость (ОСТ..., 1998). Сомкнутость полога устанавливают опытные геоботаники и таксаторы глазомерным (визуальным) способом. Помимо этого, сомкнутость определяют по материалам космической (Князева и др., 2022; Ховратович, Барталев, 2020) и аэрофотосъёмки (Иванова и др., 2021), а также по данным воздушного лазерного сканирования (Korhonen, Morsdorf, 2014).

Сомкнутость полога можно вычислить на основе другого лесотаксационного параметра — *относительной полноты* древостоя. Степень заполнения древостоем пространства в горизонтальной плоскости определённой территории, выражаемая суммой поперечных сечений стволов деревьев, устанавливает его полноту (ОСТ..., 1998).

В отечественном лесоведении известен комплексный показатель, достоверно определяющий характеристики фитоклимата леса, — *сквозистость* древостоя (Ипатов, Кирикова, 2001; Ипатов и др., 1979). Под сквозистостью понимается суммарная проекция просветов в древостое на мысленную полусферу, ограниченную горизонтом, над любой точкой под пологом леса. Сквозистость древостоя зависит от просветов между кронами — сомкнутости и от просветов в самих кронах — ажурности (Цельникер, 1969). Измерение сквозистости проводится приборами — *сквозистометром* или *денситометром* (сферическим линзовидным фотометром). Измерения сквозистости полога посредством обоих приборов просты в выполнении и независимы от условий погоды, однако не лишены недостатков — субъективность оценки прозрачности в зависимости от остроты зрения наблюдателя, низкая разрешающая способность и трудоёмкость выполнения.

Альтернативным способом измерения сквозистости древостоя считается использование *цифрового фотоаппарата с объективом «рыбий глаз»* (Ипатов, Мирин, 2008). На основе фотоснимка вычисляются параметры: сквозистость или прозрачность (*англ.* canopy transparency), доля видимого неба SVF (*англ.* Sky View Factor), индексы открытости полога (*англ.* openness) и листовой поверхности LAI (*англ.* Leaf Area Index). К достоинствам способа относится объективность, получение результата в цифровом виде, к недостаткам — наличие дорогостоящей аппаратуры и навыков обработки фотографий.

Описанные выше способы оценки сквозистости позволяют получать единичные точечные измерения, рассматривая древесный полог как однородный плоскопараллельный слой без учёта пространственной структуры древостоя в целом. Применение этих способов для оценки освещённости значительных по площади лесных территорий представляется весьма трудоёмким и финансово затратным.

Индекс листовой поверхности LAI — комплексный показатель сомкнутости полога леса (White et al., 2016). Он вычисляется как суммарная односторонняя площадь всех листьев или хвои, приходящаяся на единицу площади почвы (Плотников и др., 2025; Шабанов и др., 2018, 2021). Так же используется плотность листовой поверхности LAD (*англ.* Leaf Area Density) — общая односторонняя площадь листьев на единицу объёма. Индекс LAI коррелирует с сомкнутостью и проективным покрытием — относительной площадью проекции крон (Шабанов и др., 2021). Известны прямые методы измерения LAI с помощью физического разрушения древесного полога и косвенные — с использованием оптических сенсоров, последовательно

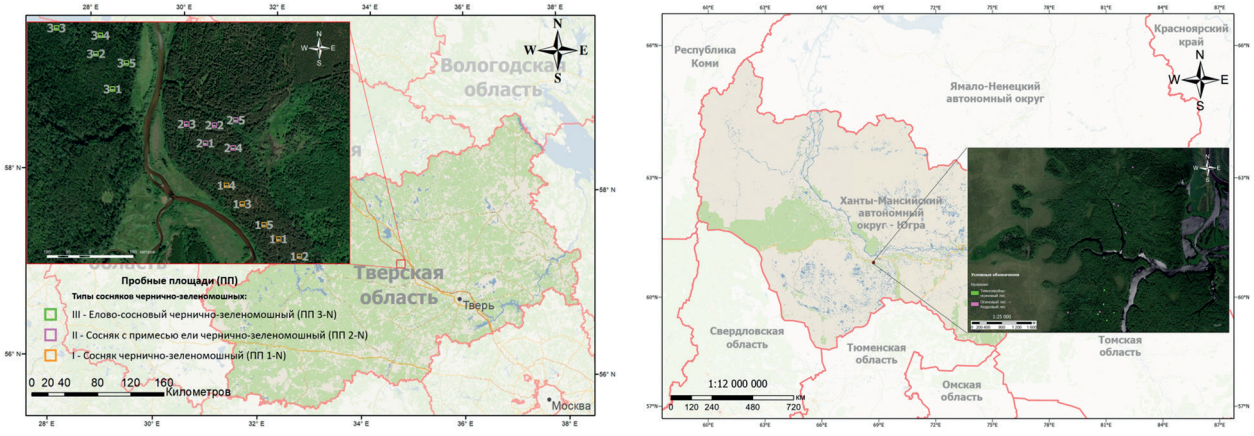
помещаемых под пологом растительности и над его поверхностью (Голубева и др., 2020). В настоящее время воздушное лазерное сканирование — основной метод получения данных для вычисления LAI и LAD (Almeida et al., 2019).

Обозначенные параметры структуры древесного полога леса взаимосвязаны. В настоящем исследовании предлагается способ косвенной оценки освещённости леса с помощью обобщённого понятия — **прозрачности древесного полога** — доли просветов в пологе леса, через которые солнечная радиация беспрепятственно проникает сквозь кроны деревьев к нижним ярусам фитоценоза. Количественно прозрачность выражается как часть площади полусферы над точкой наблюдения, не перекрытая элементами крон деревьев (листьями, ветвями, стволами), при взгляде из точки наблюдения вверх.

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС), выполненное посредством беспилотных воздушных судов (БВС), позволяет оперативно получать трёхмерные данные о лесных участках большого пространственного охвата с высокой степенью детализации и точности (Алексеев, Плотникова, 2023; Алтынцев, 2023; Ковязин и др., 2020). Технология ВЛС активно используется при определении ряда ключевых лесотаксационных показателей: высоты деревьев *H* (Бурдин и др., 2025; Иванова и др., 2021; Ильясов, Алексеев, 2025); диаметра на высоте груди DBH (*англ.* Diameter at Breast Height) (Iizuka et al., 2018); надземной биомассы AGB (*англ.* Above-ground biomass) (Tan et al., 2025); породного состава (Chen et al., 2023). Цель настоящего исследования — разработка и апробация методики обработки данных воздушного лазерного сканирования для оценки освещённости леса с помощью растровых моделей прозрачности древесного полога.

Объекты и методы

Объектами исследования выступили древостои соснового леса на территории Тверской области (*рис. 1а*), а также смешанного темнохвойно-осинового леса международного стационара «Мухрино» в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре (ХМАО-Югре) (см. *рис. 1б*). Выбор сосновых древостоев в качестве объекта исследования в Тверской области обусловлен их широким географическим распространением в умеренных широтах Северного полушария (Никитина и др., 2025; Рысин, Савельева, 2008).



а *б*

Рис. 1. Расположение объектов исследования: *а* — Тверская область; *б* — Ханты-Мансийский автономный округ — Югра

Зональная растительность стационара «Мухрино» представлена темнохвойными лесами в сочетании с их послепожарными стадиями восстановления и типичными для средней тайги Западной Сибири заболоченными лесами (Kupriianova et al., 2022). Экосистемы ста-

ционара «Мухрино», ввиду отсутствия прямого техногенного воздействия, признаны фоновыми. Выбор объекта исследования обусловлен тем, что в Западной Сибири господствующее положение принадлежит полидоминантным темнохвойным лесам. Коренные темнохвойные формации под воздействием антропогенных факторов — промышленных рубок и пожаров — замещаются вторичными мелколиственными лесами с доминированием берёзы и осины.

Методика обработки данных воздушного лазерного сканирования

В рамках исследования разработана методика обработки данных ВЛС для оценки освещённости леса (*рис. 2*): 1) планирование лётно-съёмочных работ; 2) выполнение лётно-съёмочных работ; 3) первичная обработка данных ВЛС; 4) классификация точек лазерных отражений (ТЛО); 5) определение прозрачности древесного полога.

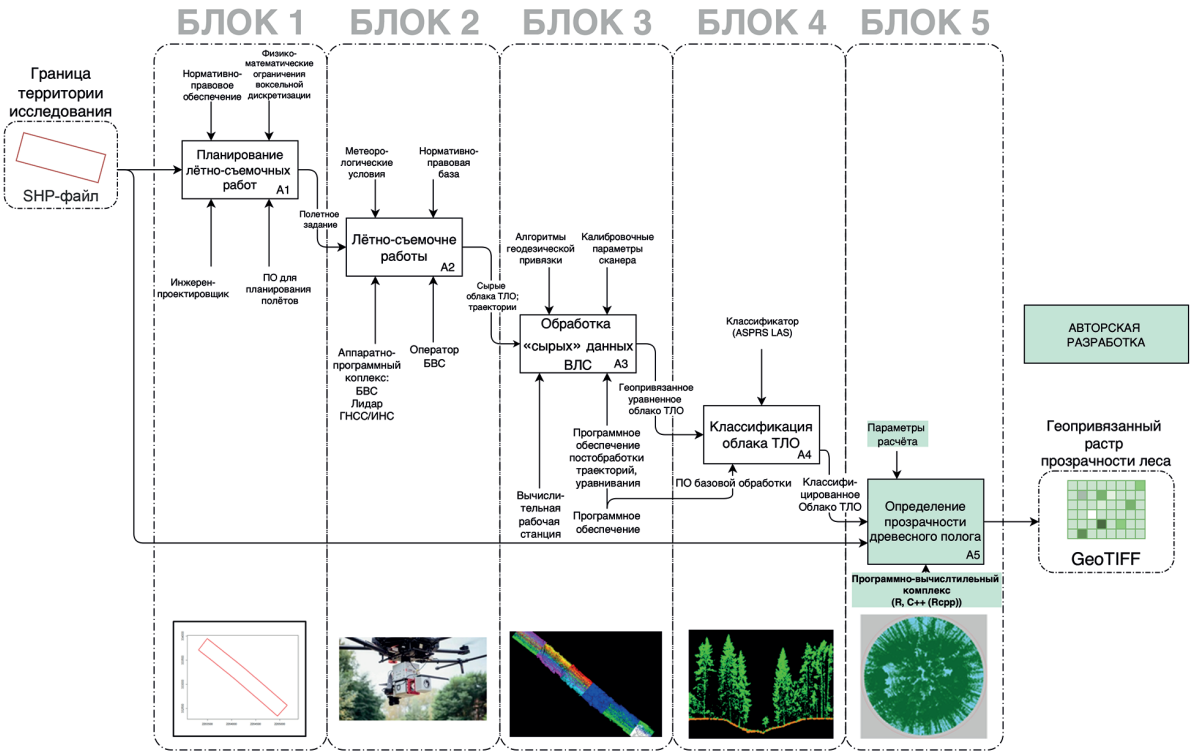


Рис. 2. Блок-схема методики обработки данных воздушного лазерного сканирования. ТЛО — точки лазерных отражений

Блок 1 — планирование лётно-съёмочных работ включает получение разрешений на использование воздушного пространства (согласно Воздушному кодексу РФ и Федеральным правилам), а также выбор условий съёмки. Для корректной оценки освещённости работы проводятся строго в период максимального развития листового аппарата (White et al., 2016) при отсутствии осадков, тумана, низкой облачности и скорости ветра не более 3–5 м/с.

Блок 2 — выполнение лётно-съёмочных работ включает три этапа: 1) развёртывание наземной базовой станции глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) (в радиусе 1–5 км) для непрерывной синхронизации и последующего вычисления траектории в режиме кинематики с постобработкой PPK (*англ.* Post-Processed Kinematic); 2) выполнение съёмочных полётов БВС по полётной программе с обязательным динамическим выравниванием бортовой инерциальной навигационной системы (ИНС) (Glennie, 2007); 3) полевой экспресс-контроль качества. На заключительном этапе проверяется полнота записанных логов, а также выполняется быстрая генерация «сырого» облака точек для оценки перекрытия маршрутов, отсутствия слепых зон и проницаемости лазера до поверхности земли.

Сформулированы требования к полётным параметрам и аппаратным настройкам лазерного сканера (*таблица*) на основе биологически обоснованного диапазона размеров вокселя (5–15 см) для моделирования прозрачности древесного полога.

Требования к полётным параметрам и настройкам лазерного сканера

Параметр ВЛС	БВС	Примечание
Размер вокселя V_{size}	0,05–0,15 м	Базовый масштаб дискретизации
Рабочая высота полёта H	50–120 м	Регулирует размер лазерного пятна и проникающую энергию импульса
Расходимость лазерного луча γ	1,0–3,0 мрад	Аппаратная константа
Диаметр лазерного пятна D	0,05–0,15 м	Пятно должно быть меньше размера вокселя
Скорость v	4–8 м/с	Определяет продольный шаг сканирования
Плотность отражений ρ	200–1000 точек/м^2	Выполнение теоремы Котельникова
Угол сканирования θ	±15° от надира	Узкий угол исключает эффект боковой окклюзии
Перекрытие маршрутов	70–80 % (ортогонально-параллельно)	Ортогональная сетка с избыточным перекрытием компенсирует сужение угла сканирования
Регистрация отражений	2–5 возвратов	Обеспечивает 3D-реконструкцию средних ярусов и поиск поверхности почвы для цифровой модели рельефа (ЦМР)

Блок 3 — первичная обработка данных ВЛС включает трансформацию сырых данных в облако ТЛО посредством четырёх этапов: 1) расчёт высокоточной траектории; 2) прямое геопозиционирование; 3) взаимное уравнивание съёмочных маршрутов; 4) фильтрация шумов и оценка точности. На первых двух этапах формируется траектория сканера SBET (*англ*. Smoothed Best Estimated Trajectory) с помощью комплексирования данных ГНСС и ИНС с применением фильтра Калмана (Glennie, 2007), после чего дальномерные измерения синхронизируются с ней по единой шкале времени TGPS (*англ*. GPS Time) для пересчёта координат в целевую геодезическую систему.

На третьем этапе выполняется автоматическое уравнивание маршрутов по геометрическим примитивам в зонах перекрытия до расхождений менее 3–5 см (Glennie, 2007). Финальный этап включает очистку облака точек от шумов и выбросов, а также оценку его точности.

Блок 4 — классификация облака ТЛО выполняется по стандарту ASPRS LAS (*англ*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing LASer) в два этапа: 1) выделение земной поверхности и 2) классификация антропогенных объектов (строения, линии электропередачи и др.). Для фильтрации рельефа применяются методы прогрессивного построения нерегулярной триангуляционной сети PTD (*англ*. Progressive TIN Densification), прогрессивного морфологического фильтра PMF (*англ*. Progressive Morphological Filter) и симуляции ткани CSF (*англ*. Cloth Simulation Filter), а для техногенных объектов — геометрический анализ кластеров точек. На территориях со сложной структурой леса, в том числе на сильно расчленённом рельефе (овраги, густой подлесок, валежник и вывалы корней), результаты обоих этапов требуют обязательного ручного контроля и редактирования.

Блок 5 — определение прозрачности древесного полога выполняет разработанный алгоритм, моделируя получение полусферических («рыбий глаз») снимков снизу вверх в пять этапов (*рис. 3*): 1) предобработка и тайлирование ТЛО; 2) формирование сети точек локальных наблюдений; 3) извлечение фрагмента ТЛО и вокселизация; 4) математическое моделирование сферической проекции; 5) агрегация измерений и построение растровой модели. На первом этапе исходные данные приводятся к единой системе координат, а для оптимизации работы с большими массивами данных выполняется виртуализация и разбиение облака ТЛО на тайлы.

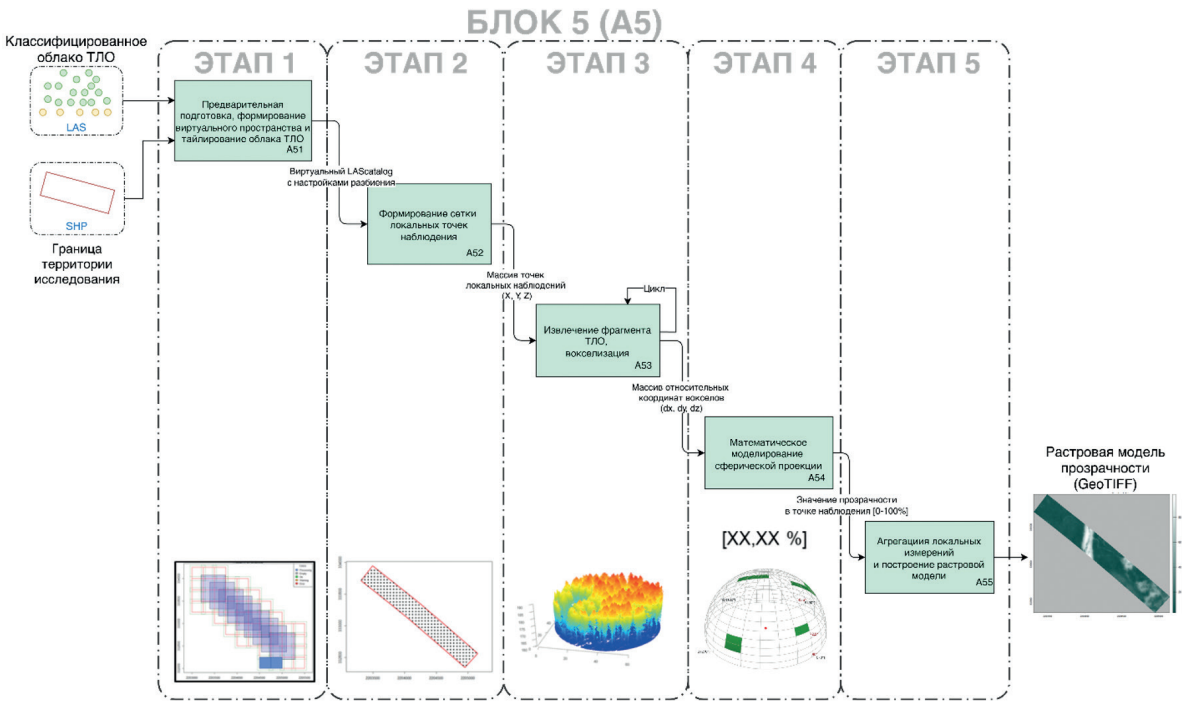
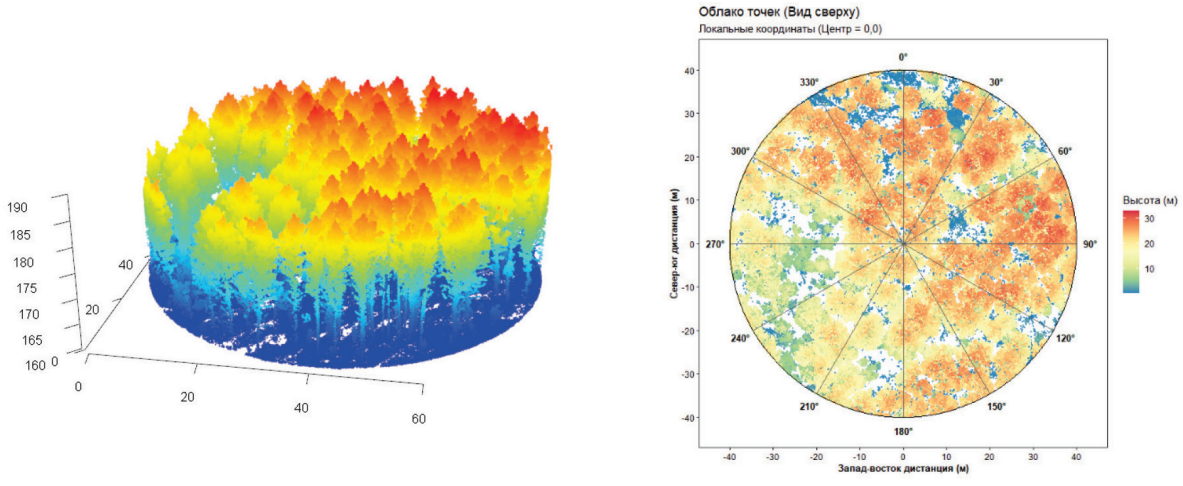


Рис. 3. Блок-схема алгоритма вычисления прозрачности древесного полога (блок 5)

На втором этапе формируется сеть точек наблюдения. Узлы сети располагаются на уровне земли с возможностью задания превышения — высоты инструмента, для которых будут выполняться последующие виртуальные измерения прозрачности древесного полога. Алгоритм динамически формирует поверхность земли (ЦМР) и извлекает из неё координаты для позиционирования виртуального наблюдателя. Вычисления на данном этапе проводятся изолированно в пределах каждого тайла и включают три операции: динамическое построение ЦМР, извлечение на её основе узлов точек наблюдения, двухэтапная пространственная фильтрация узлов сетки для минимизации вычислительных затрат. Результатом второго этапа является регулярный, отфильтрованный по границам территории и очищенный от дубликатов массив координат (*X*, *Y*, *Z*), определяющих пространственное положение точек наблюдения на уровне земли в текущем тайле.



а *б*

Рис. 4. Извлечённый фрагмент ТЛО для расчёта прозрачности в виртуальной точке наблюдения: *а* — 3D-вид; *б* — вид сверху

На третьем этапе для каждого узла сети извлекаются точки полога в цилиндрической окрестности с радиусом $R_{\max}$ (*рис. 4*) выше уровня виртуальной камеры. Массив преобразуется в воксельную модель для оптимизации расчётов, реалистичной имитации оптического перекрытия и вычисления относительных координат (*dx*, *dy*, *dz*).

Четвёртый этап представляет собой вычислительное ядро алгоритма оценки прозрачности древесного полога. На этом этапе физическое трёхмерное пространство в виде извлечённых на третьем этапе вокселей математически трансформируется в двумерную карту перекрытия небосвода элементами растительности — полусферическую проекцию. Главной научной и вычислительной задачей этапа становится исключение геометрических искажений. При классической равноугольной дискретизации полусферы ячейки у зенита имеют физическую площадь, стремящуюся к нулю, что приводит к математическому завышению вклада вершин крон в итоговое значение прозрачности. Для решения этой проблемы реализован алгоритм лучевого проецирования на основе азимутальной равновеликой проекции Ламберта.

Дискретизация зенитного угла θ осуществляется не с постоянным угловым шагом, а пропорционально изменению функции $(1-\cos\theta)$. Подход обеспечивает разделение полусферы на зенитные кольца равной площади одинакового угла. Разделение каждого кольца на идентичное число азимутальных секторов формирует расчётную матрицу, в которой каждая ячейка вносит строго равнозначный вклад в общий баланс перекрытия. Это позволяет вычислять значение прозрачности прямым отношением свободных ячеек к их общему числу без применения дополнительных тригонометрических весовых функций.

Каждый непрозрачный воксель проецируется на виртуальную полусферу неба, разделённую на угловую сетку с зенитными кольцами и азимутальными секторами (*рис. 5а*). Для сетки заданы параметры: максимальный зенитный угол, исключающий влияние шумов у самого горизонта ($\theta_{max}=85°$); количество зенитных колец ($N_{rings}=360$); количество азимутальных секторов ($N_{sectors}=1440$); общее количество ячеек небосвода $N_{total}=N_{rings}\times N_{sectors}=518400$. Изначально все сектора имеют признак 0 — прозрачный. Далее для каждого вокселя выполняются четыре процедуры:

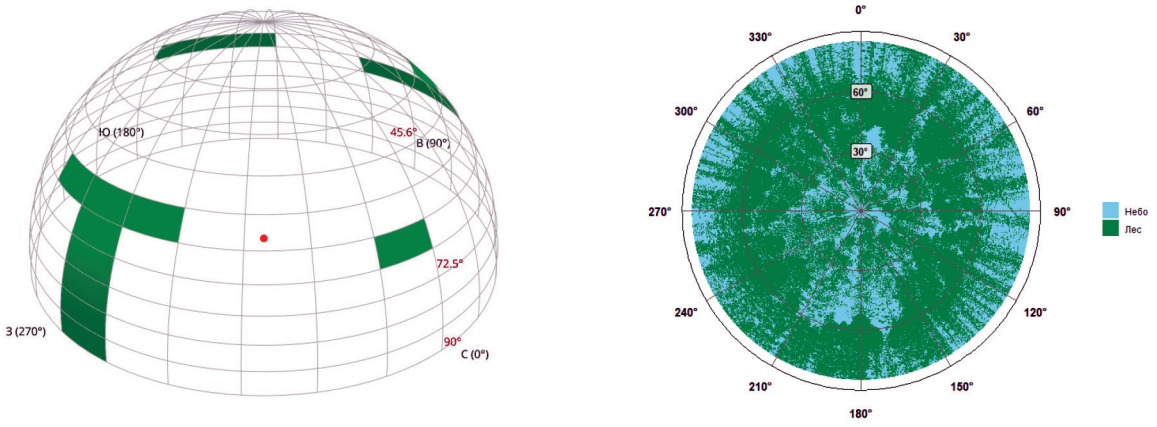
1. *Пространственная фильтрация по расстоянию.* Для каждого вокселя вычисляется квадрат горизонтального расстояния $(h_dist^2=dx^2+dy^2)$ и полный квадрат 3D-расстояния $(dist^2=h_dist^2+dz^2)$. Воксели, горизонтальное расстояние до которых превышает заданный радиус поиска (соответствующий R_{max}), отбрасываются. Воксели, находящиеся слишком близко к точке наблюдения (меньше *min_dist* — минимально допустимого расстояния до точки наблюдения), игнорируются. Выполнение этого условия исключает ситуацию, когда ствол дерева, рядом с которым случайно оказалась расчётная точка сетки, неестественно перекрывает всю полусферу, искажая показатель прозрачности всего участка.

2. *Расчёт сферических координат и углового радиуса вокселя.* Если воксель прошёл фильтры расстояния, вычисляется его точное 3D-расстояние $D=\sqrt{dist^2}$. Далее алгоритм переходит из декартовой системы координат в сферическую. Вычисляется зенитный угол центра вокселя $\theta=\arccos\left(dz/D\right)$. Определяется азимутальный угол $\alpha=arctan2(dy,dz)$. Значения нормализуются в диапазоне от 0 до 360°. Поскольку воксель имеет физический размер, его видимый с точки наблюдения угловой размер уменьшается обратно пропорционально расстоянию. Угловой радиус проекции вокселя α_i рассчитывается по формуле $R_{ang}=\arctan(V_{size}/2D)$, где $V_{size}/2$ — половина размера вокселя.

3. *Расчёт перекрытия* (*окклюзии*) *и доли просветов.* После вычисления углового размера R_{ang} воксель проецируется на матрицу небосвода. Зная центр вокселя (θ, α) и его угловой размер R_{ang}, алгоритм определяет угловые границы «тени» вокселя на матрице ячеек небосвода в зенитном $\left[\theta-R_{ang};\theta+R_{ang}\right]$ и азимутальном $\left[\alpha-R_{ang};\alpha+R_{ang}\right]$ диапазонах. Далее выполняется ключевое математическое преобразование — перевод зенитных углов в индексы строк матрицы *grid*. Индексы рассчитываются пропорционально площади полусферы по формуле $r_{index}=\left(1-\cos(t)/Step_v\right)$, где $Step_v=1-\cos(\theta_{max})/n_rings$. Далее запускается

двойной цикл — все ячейки матрицы, попавшие в эти границы, получают значение 1 (непрозрачно). Алгоритм корректно обрабатывает переход азимута через 360° — замыкание цилиндрической развёртки.

4. *Подсчёт итогового значения прозрачности древесного полога.* После завершения итераций по всем вокселям локального облака модуль C++ обходит весь массив *grid* и подсчитывает количество непрозрачных секторов, перекрытых элементами растительности $N_{blocked}$. Общая площадь полусферы выражается суммарным количеством ячеек ($N_{total} = n_rings \times n_secrors$). Итоговая доля просветов вычисляется по формуле $GF = \left(1 - \left(N_{blocked} / N_{total}\right)\right) \times 100\,\%$. Результатом четвёртого этапа становится числовое значение прозрачности (от 0 до 100 %) для конкретной координаты (X, Y) — виртуальной точки наблюдения (см. *рис. 5б*). Этот процесс повторяется в цикле для всех узлов сетки тайла, после чего формируется таблица атрибутов.



а *б*

Рис. 5. Прозрачность лесного полога в точке проведения измерения: *а* — схематичное представление вычислений на полусфере; *б* — проекция лесного полога на полусферу

На заключительном пятом этапе алгоритма значения прозрачности каждого тайла объединяются в единую непрерывную пространственную модель. Поскольку генерация координат виртуальных точек наблюдения на втором этапе производилась на основе регулярной сетки ЦМР, обратный переход от точечных координат (X, Y) к растровым пикселям осуществляется прямым проецированием. Процесс состоит из трёх последовательных преобразований: объединения результатов в единую таблицу, растеризации дискретного поля методом прямого присвоения, экспорта растровой модели прозрачности в геопривязанном формате GeoTIFF с заданным пространственным разрешением. Результатом пятого этапа и всего разработанного алгоритма является непрерывная растровая модель прозрачности древесного полога исследуемой территории.

Методы валидации оценки освещённости леса

Экологические шкалы освещённости. В лесной экологии известен достоверный метод определения долгосрочного светового режима леса — фитоиндикация. Метод подразумевает оценку параметров среды на основе видового состава растительности нижних ярусов. Травяно-кустарничковый ярус представляет собой естественный биоиндикатор, который интегрирует влияние освещённости на протяжении текущего и ряда прошлых вегетационных периодов. Для перевода флористических списков в количественные показатели освещённости применяются экологические шкалы Х. Элленберга (*нем.* Heinz Ellenberg), Э. Ландольта (*нем.* Elias Landolt), Л. Г. Раменского и Д. Н. Цыганова. В настоящем исследовании использована шкала

Ландольта, которая оценивает отношение видов к фактору освещённости по пяти баллам: 1 — полностью теневое растение (в условиях менее 3 % от полной освещённости); 2 — главным образом теневое растение (чаще при 10 % от полной освещённости); 3 — полутеневое растение (при относительной освещённости более 10 %); 4 — полусветовое растение (часто на полном свету, но иногда при некотором затенении); 5 — полностью световое растение, неспособное выносить затенение.

Метод валидации заключается в следующем: для каждой пробной площади (ПП) составляется геоботаническое описание с помощью общепринятых методик (Методические..., 2010). Индекс освещённости участка по Ландольту L_{mean} рассчитывается как среднее арифметическое (или средневзвешенное по покрытию) баллов всех зарегистрированных видов травяно-кустарничкового яруса (Алексеев и др., 2026). Полученный экологический индекс L_{mean} сопоставляется с вычисленным в пределах ПП значением прозрачности. Выполняется корреляционный анализ с помощью линейного коэффициента корреляции Пирсона в случае нормального распределения данных, в противоположном случае — с помощью рангового коэффициента Спирмена. Проверка выборок на соответствие закону нормального (гауссовского) распределения выполняется с помощью критерия Шапиро – Уилка. Интерпретация силы корреляционной связи проводится по применяемой в экологии шкале Чеддока. Наличие статистически значимой сильной положительной связи между этими показателями служит подтверждением корректности оценки освещённости леса с помощью созданных на основе разработанной методики растровых моделей прозрачности древесного полога.

Индекс листовой поверхности. Как известно, чем больше листовая поверхность на единицу площади, тем меньше света пропускается растительным покровом (Цельникер, 1969). Индекс LAI считается наиболее точным биометрическим показателем для оценки поглощения света, показывающим перехваченную пологом долю ФАР (Плотников и др., 2025; Уткин и др., 1997). Вычисление LAI по данным ВЛС доступно в среде R посредством пакета lidR (Roussel et al., 2020). Расчёт проводится с применением закона Бугера – Ламберта – Бера (*англ.* Beer–Lambert law) к данным лазерного сканирования (Weiss et al., 2004). Сначала первичное облако точек подвергается нормализации высот относительно поверхности земли методом триангуляции по классифицированным отражениям от земной поверхности. Далее значение LAI для каждого пикселя растрового изображения с заданным пространственным разрешением вычисляется по формуле $\mathrm{LAI} = -\ln(P_0)/k$, где P_0 — доля просветов в пологе; $k = 0{,}5$ — коэффициент экстинкции, соответствующий сферическому угловому распределению элементов полога (Weiss et al., 2004). Доля просветов в пологе определяется отношением количества откликов ниже пороговой высоты 1 м к общему числу откликов в пределах пикселя.

Метод валидации: для каждой ПП вычисляется среднее значение LAI методом зональной статистики. Далее выполняется корреляционный анализ, описанный для экологической шкалы освещённости. Наличие статистически значимой сильной отрицательной связи между анализируемыми показателями подтверждает возможность использования растровых моделей прозрачности для оценки освещённости леса.

Результаты и обсуждение

Тверская область. Лётно-съёмочные работы с БВС выполнены на всю территорию исследования площадью 6,1 км^2 в середине вегетационного сезона. Лидарная съёмка проведена с помощью малогабаритной системы лазерного сканирования *RIEGL miniVUX-2UAV*. Основные характеристики системы: частота повторения импульсов — 200 кГц; максимальное количество принятых отражённых сигналов одного импульса — 5; высота — 75 м; средняя плотность облака ТЛО — 200 точек/м^2.

Полевые исследования в Тверской области, включающие закладку пробных площадей и проведение геоботанических описаний, выполнены в вегетационный сезон 2024 г. Были выбраны три группы сообществ сосняков кустарничково-зеленомошных с разным участием ели в ярусах древостоя, подроста и подлеска: (I) сосняки чернично-зеленомошные — без ели

в ярусе древостоя и единичным подростом ели в ярусе подроста и подлеска; (II) сосняки чернично-зеленомошные с долей ели в нижнем подъярусе древостоя 5–10 % и в ярусе подроста и подлеска 20–30 % от общей сомкнутости яруса; (III) елово-сосновые чернично-зеленомошные с долей ели в верхнем подъярусе древостоя 15–20 %, в нижнем подъярусе 20 %, в ярусе подроста и подлеска 20–30 %. В каждой группе сообществ заложено пять ПП размером 20×20 м на расстоянии не менее 100 м друг от друга. На всех 15 ПП геоботаниками Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А. С. Исаева РАН выполнены геоботанические описания, составлен полный флористический список с учётом ярусной структуры леса.

Ханты-Мансийский автономный округ — Югра — стационар «Мухрино». Лётно-съёмочные работы выполнены на всю территорию исследования площадью 13,07 км^2 в середине вегетационного сезона. Лидарная съёмка проведена малогабаритной системой лазерного сканирования *DJI Zenmuse L1*. Характеристики системы: частота повторения импульсов — 240 кГц; максимальное количество принятых отражённых сигналов одного импульса — 2; высота — 120 м; средняя плотность облака ТЛО — 251 точек/м^2.

На территории лесной части стационара «Мухрино» сотрудниками Югорского государственного университета было заложено шесть ПП размером 20×20 м в следующих типах леса: средневозрастной осиновый; осинник с хвойным возобновлением; осиновый с темнохвойным вторым ярусом; смешанный темнохвойно-осиновый; темнохвойный с единичными крупными осинами; близкий к климаксному кедрово-мелкотравный. Пробные площади были подобраны таким образом, чтобы сформировать репрезентативный экологический ряд — от относительно светлых мелколиственных насаждений (осинников) до затенённых темнохвойных лесов, близких к климаксному кедрово-мелкотравному типу. Геоботанические описания выполнены по общепринятой методике во время вегетационного сезона 2023 г. сотрудниками Югорского государственного университета — доктором биологических наук Е. Д. Лапшиной и Ю. В. Куприяновой (Сабреков и др., 2025).

Моделирование прозрачности древесного полога

На территории исследования в Тверской области и ХМАО-Югре согласно разработанной методике выполнено моделирование прозрачности древесного полога со следующими параметрами: $R = 40$ м; $V_{size} = 0{,}10$ м; $N_{\text{rings}} = 360$; $N_{sectors} = 1440$; разрешение растровой модели равно 5 м. Визуализация фрагментов созданных моделей представлена на *рис. 6*.

Валидация растровых моделей прозрачности древесного полога

Экологические шкалы освещённости. Результаты корреляционного анализа выявили статистически значимую положительную связь между значениями прозрачности полога, вычисленными по данным ВЛС, и индексом освещённости по шкале Ландольта (*рис. 7*). Ранговая корреляция Спирмена составила для Тверской области $\rho = 0{,}679$ при уровне значимости $p = 0{,}0054$ (см. *рис. 7а*), для ХМАО-Югры $\rho = 0{,}928$ при $p = 0{,}0077$ (см. *рис. 7б*). Результат свидетельствует о наличии сильной (согласно шкале Чеддока) и статистически достоверной монотонной зависимости. Пробные площади с более высокими значениями расчётной прозрачности получают более высокий индекс освещённости по шкале Ландольта.

Проведённый статистический анализ подтверждает надёжность использования разработанного алгоритма вычисления прозрачности полога для оценки освещённости леса. Так, на пробных площадях стационара «Мухрино» методика обработки данных ВЛС фиксирует экранирующий эффект теневыносливого темнохвойного яруса по мере перехода от осинников (ПП1, ПП2) к смешанным (ПП4) и темнохвойным кедровым лесам (ПП5, ПП6). Полученная растровая модель реагирует на уплотнение фитомассы и показывает закономерное снижение освещённости леса. Это подтверждает высокую чувствительность алгоритма к пространственной структуре различных лесных формаций.

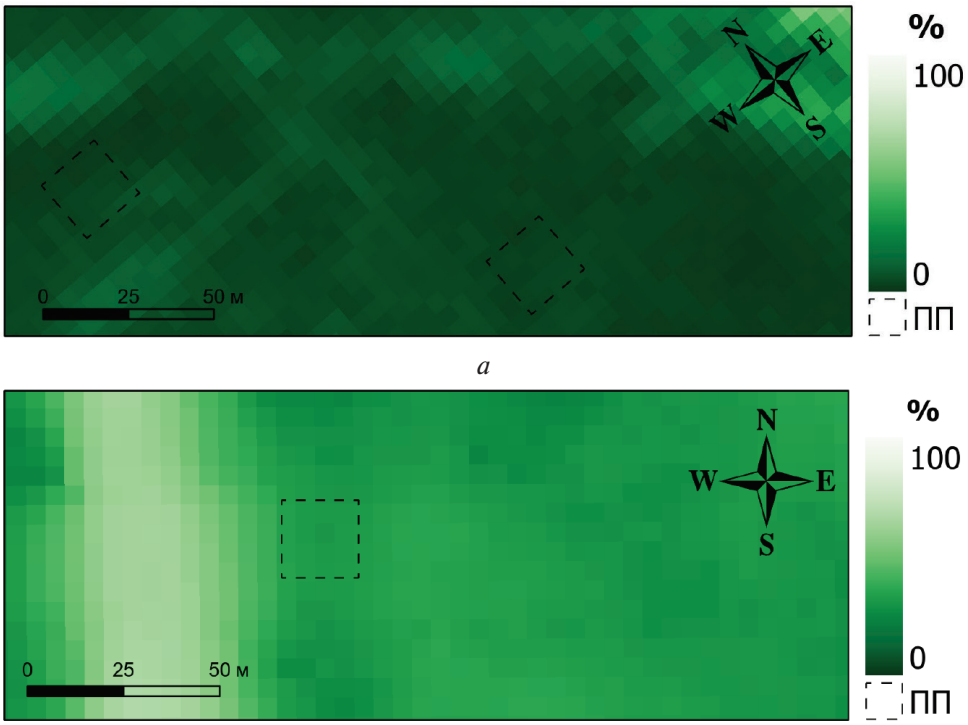


Рис. 6. Фрагменты растровых моделей прозрачности лесного полога на территории исследования: *а* — Тверская область; б — стационар «Мухрино», ХМАО-Югра

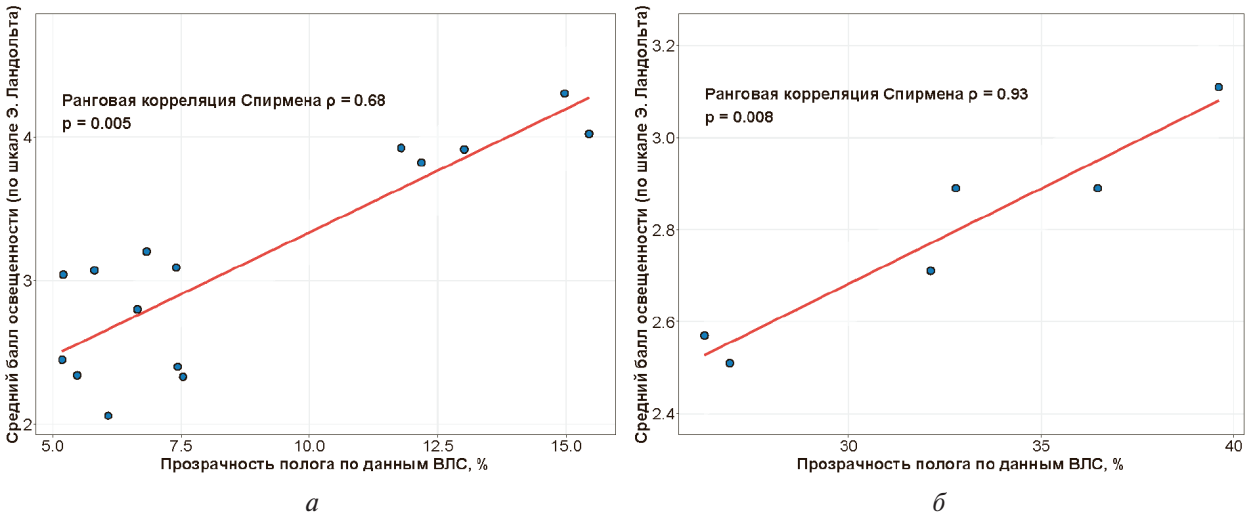
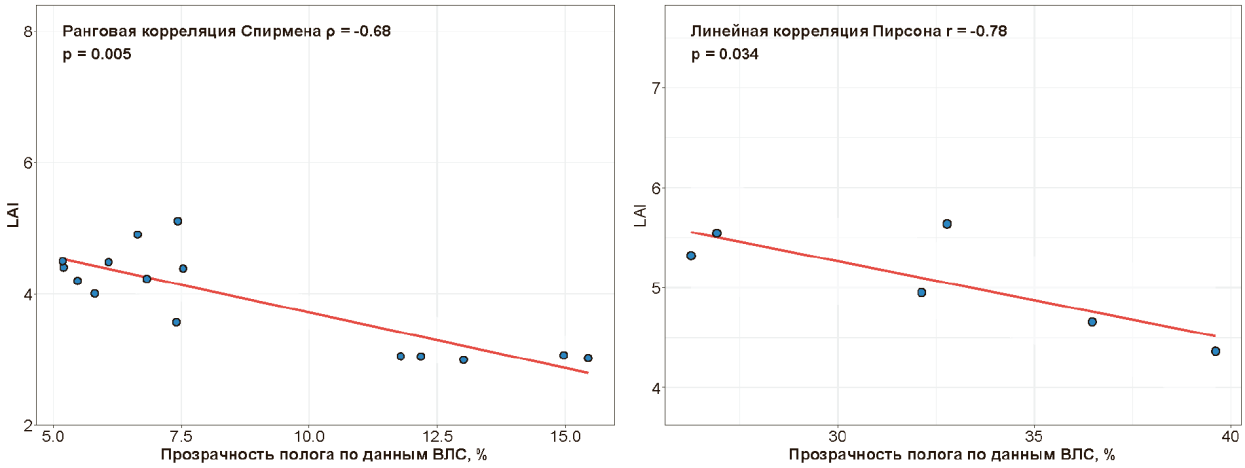


Рис. 7. Зависимость между прозрачностью полога и средним баллом освещённости по шкале Ландольта на ПП: *а* — Тверская область; *б* — стационар «Мухрино», ХМАО-Югра

Индекс листовой поверхности. Результаты корреляционного анализа выявили статистически значимую отрицательную связь между значениями прозрачности полога и индексом листовой поверхности, вычисленными по данным ВЛС (*рис. 8*). Ранговая корреляция Спирмена составила для Тверской области $\rho = -0{,}68$ при уровне значимости $p = 0{,}0054$ (см. *рис. 8а*). Для объекта в ХМАО-Югре предварительная проверка выборок по критерию Шапиро – Уилка (W — статистика критерия Шапиро – Уилка) подтвердила соответствие данных нормальному закону распределения ($W = 0{,}938$; $p = 0{,}639$). Ввиду этого, был использован параметрический коэффициент линейной корреляции Пирсона $r = -0{,}78$ при $p = 0{,}034$ (см. *рис. 8б*).



а *б*

Рис. 8. Зависимость между значениями прозрачности лесного полога и LAI на ПП:
а — Тверская область, *б* — стационар «Мухрино», ХМАО-Югра

Заключение

К настоящему времени существуют способы прямого инструментального измерения и косвенной оценки освещённости леса. Прямые измерения фиксируют лишь мгновенное состояние световой среды, зависят от погодных условий и времени суток, что делает их применение трудоёмким и подверженным случайным погрешностям. Косвенные оценки возможны на основе ряда параметров структуры полога леса — сомкнутость и полнота, сквозистость и ажурность, индекс листовой поверхности.

В исследовании предложен способ косвенной оценки освещённости леса с помощью обобщённого понятия прозрачности древесного полога — доли просветов в пологе леса, через которые солнечная радиация беспрепятственно проникает сквозь кроны деревьев к нижним ярусам фитоценоза. Количественно прозрачность выражается как часть площади полусферы над точкой наблюдения, не перекрытая элементами крон деревьев (листьями, ветвями, стволами), при взгляде из точки наблюдения вверх.

Разработана методика обработки данных ВЛС для пространственной оценки освещённости леса с помощью непрерывных растровых моделей прозрачности древесного полога. Основные блоки методики: планирование и выполнение лётно-съёмочных работ, первичная обработка данных ВЛС, классификация точек лазерных отражений, определение прозрачности древесного полога. Сформулированы требования к полётным параметрам и аппаратным настройкам лазерного сканера.

В рамках блока методики по определению прозрачности древесного полога разработан и программно реализован алгоритм расчёта прозрачности на основе данных воздушного лазерного сканирования. Алгоритм включает пять этапов: 1) предварительная подготовка, формирование виртуального пространства и тайлирование облака ТЛО; 2) формирование сети точек локальных измерений; 3) извлечение фрагмента ТЛО и вокселизация; 4) математическое моделирование сферической проекции; 5) агрегация локальных измерений и построение растровой модели.

Разработанная методика апробирована в Тверской области и стационаре «Мухрино», ХМАО-Югра. Валидация полученных моделей выполнена в пределах заложенных на территориях исследования пробных площадях с помощью корреляционного анализа значений прозрачности и индексов освещённости по шкале Э. Ландольта и листовой поверхности. В результате валидации получено биологически обоснованное подтверждение корректности оценки освещённости леса с помощью созданных на основе разработанной методики растровых моделей прозрачности древесного полога.

Разработка методики обработки данных ВЛС выполнена в рамках гранта Президентского фонда природы (ЭКО-26-2-000303), анализ современных способов оценки освещённости леса — в рамках темы государственного задания Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (НИОКТР 124013000750-1), сбор данных точек лазерных отражений для анализа морфологической структуры лесного массива на территории ХМАО-Югры — в рамках проекта Российского научного фонда 25-17-20042.

Литература

1. *Алексеев В. А.* Световой режим леса. Л.: Наука, 1975. 228 с.
2. *Алексеев А. Б.*, *Плотникова А. С.* Оценка структурной сложности древостоя хвойно-широколиственных лесов Тверской области по данным воздушного лазерного сканирования // Регион. проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы 10-й Междунар. науч. конф. Красноярск: Сибирский федер. ун-т, 2023. С. 152–155.
3. *Алексеев А. Б.*, *Плотникова А. С.*, *Подольская Е. С.* Оценка сквозистости древесного полога в сосновых лесах по данным воздушного лазерного сканирования // Лесоведение. 2026. № 3. С. 363–386.
4. *Алтынцев М. А.* Методика предварительной обработки данных воздушного лазерного сканирования, полученных с применением беспилотных воздушных судов // Геодезия и картография. 2023. № 6. С. 30–41. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-996-6-30-41.
5. *Бурдин А. А.*, *Богатырев Д. А.*, *Тарасов А. В.*, *Пьянков С. В.* Оценка параметров деревьев на основе данных воздушного лазерного сканирования в смешанных лесах Среднего Предуралья // Вестн. СГУГиТ. 2025. Т. 30. № 4. С. 32–41. DOI: 10.33764/2411-1759-2025-30-4-32-41.
6. *Голубева Е. И.*, *Зимин М. В.*, *Тутубалина О. В. и др.* Индекс листовой поверхности: методы полевых инструментальных измерений и использование материалов дистанционного зондирования // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Геоинформац. технологии и косм. мониторинг. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2020. Вып. 5. С. 70–74. DOI: 10.23885/2500-123X-2020-2-5-70-74.
7. *Евстигнеев О. И.* Отношение лиственных деревьев к свету и водообеспеченности в связи со структурой леса // Лесоведение. 1996. № 6. С. 26–35.
8. *Иванова Н. В.*, *Шашков М. П.*, *Шанин В. Н.* Исследование структуры древостоев сосновых лесов Приокско-Террасного биосферного заповедника (Россия) по материалам аэрофотосъемки с квадрокоптера // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2021. Т. 6. № 4. С. 1–14. https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2021.042.
9. *Ильясов Д. В.*, *Алексеев А. Б.* Сравнение методических подходов определения высот и проекций крон деревьев по материалам лазерного сканирования с беспилотного воздушного судна в среднетаежных лесах // Лесоведение. 2025. № 2. С. 275–289.
10. *Ипатов В. С.*, *Кирикова Л. А.* Использование показателя «сквозистость полого древостоя» для оценки экологических условий в лесу // Ботанический журн. 2001. Т. 86. № 4. С. 164–165.
11. *Ипатов В. С.*, *Мирин Д. М.* Описание фитоценоза: учебно-метод. пособие. СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т, 2008. 71 с.
12. *Ипатов В. С.*, *Кирикова Л. А.*, *Бибиков В. П.* Сквозистость древостоев (измерение и возможности использования в качестве показателя микроклиматических условий под пологом леса) // Ботанический журн. 1979. Т. 64. № 11. С. 1615–1624.
13. *Князева С. В.*, *Никитина А. Д.*, *Гаврилюк Е. А. и др.* Оценка биометрических параметров сосновых древостоев по спутниковым данным WorldView-3 и материалам беспилотной аэросъёмки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 93–107. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-93-107.
14. *Ковязин В. Ф.*, *Виноградов К. П.*, *Киценко А. А.*, *Васильева Е. А.* Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журн. 2020. № 6. С. 42–54. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-42-54.
15. *Колычева А. А.*, *Чумаченко С. И.* Оценка урожайности лесных ягод с учетом уровня освещенности напочвенного покрова методами имитационного моделирования // Вопросы лесной науки. 2021. Т. 4. № 3. С. 90. 26 с. DOI: 10.31509/2658-607x-202143-90.
16. *Кузнецова А. И.*, *Кузнецов В. А.*, *Тихонова Е. В.*, *Тебенькова Д. Н.* Температурный режим подстилки в разных типах леса Валуевского лесопарка г. Москвы // Вопросы лесной науки. 2024. Т. 7. № 3. С. 151. 16 с. DOI: 10.31509/2658-607x-202473-151.
17. *Лукина Н. В.*, *Орлова М. А.*, *Бахмет О. Н. и др.* Влияние растительности на характеристики лесных почв Республики Карелия // Почвоведение. 2019. № 7. С. 827–842. DOI: 10.1134/S0032180X19050071.

18. Методические подходы к экологической оценке лесного покрова в бассейне малой реки / под ред. Л. Б. Заугольновой, Т. Ю. Браславской. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2010. 383 с.
19. *Никитина А. Д.*, *Князева С. В.*, *Тихонова Е. В.*, *Горнов А. В.* Оценка согласованности структурно-биометрических характеристик сосновых лесов по данным наземных измерений и БПЛА-съёмки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 5. С. 195–206. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-195-206.
20. ОСТ 56-108-98. Лесоводство. Термины и определения. М.: ВНИИЦлесресурс, 1998. 56 с.
21. *Плотников Д. Е.*, *Чжоу Ц.*, *Колбудаев П. А. и др.* Разработка и оценка индекса листовой поверхности LAI растительного покрова России на основе разноугловых наблюдений КМСС (Метеор-М) и нейросетевой инверсии модели PROSAIL // Компьютер. оптика. 2025. Т. 49. № 3. С. 504–516. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1621.
22. *Рысин Л. П.*, *Савельева Л. И.* Сосновые леса России. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2008. 289 с.
23. *Сабреков А. Ф.*, *Куприянова Ю. В.*, *Коваль А. А. и др.* Анализ трансформации органического вещества подстилки на разных стадиях вторичной сукцессии среднетаежного леса методом ИК фурье-спектрометрии // Лесоведение. 2025. № 1. С. 50–64. DOI: 10.7868/s3034535980024114825010053.
24. *Уткин А. И.*, *Ермолова Л. С.*, *Замолодчиков Д. Г.* Конверсионные коэффициенты для определения площади листовой поверхности насаждений основных лесообразующих пород России // Лесоведение. 1997. № 3. С. 74–78.
25. *Ховратович Т. С.*, *Барталев С. А.* Методы дистанционной оценки показателей горизонтальной структуры древесного полога по данным спутниковой системы MODIS // Фундам. и приклад. косм. исслед.: сб. тр. 17-й Конф. молодых учёных. Сер. «Механика, управление, информатика» / под ред. А. М. Садовского. М.: ИКИ РАН, 2020. С. 149–154.
26. *Цельникер Ю. Л.* Радиационный режим под пологом леса. М.: Наука, 1969. 98 с.
27. *Чумаченко С. И.* Концепция построения биоэкологических моделей многовидовых разновозрастных лесных насаждений для зоны хвойно-широколиственных лесов и южной тайги // Лесной вестн. 2006. № 2. С. 7–13.
28. *Шабанов Н. В.*, *Барталев С. А.*, *Ерошенко Ф. В.*, *Плотников Д. Е.* Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 166–178. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
29. *Шабанов Н. В.*, *Михайлов Н. В.*, *Тихонов Д. Н. и др.* Валидация оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS для редкостойных лесов Кольского полуострова с использованием материалов съёмок беспилотных летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 156–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-156-170.
30. *Almeida D. R. A.*, *Broadbent E. N.*, *Zambrano A. M. A. et al.* Monitoring the structure of forest restoration plantations with a drone-lidar system // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2019. V. 79. P. 192–198. DOI: 10.1016/j.jag.2019.03.014.
31. *Chen X.*, *Shen X.*, *Cao L.* Tree species classification in subtropical natural forests using high-resolution UAV RGB and SuperView-1 multispectral imageries based on deep learning network approaches: A case study within the Baima Snow Mountain National Nature Reserve, China // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 10. Article 2697. DOI: 10.3390/rs15102697.
32. *Glennie C.* Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems // J. Applied Geodesy. 2007. V. 1. No. 3. P. 147–157. DOI: 10.1515/JAG.2007.017.
33. *Iizuka K.*, *Yonehara T.*, *Itoh M.*, *Kosugi Y.* Estimating tree height and diameter at breast height (DBH) from digital surface models and orthophotos obtained with an unmanned aerial system for a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forest // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 1. Article 13. DOI: 10.3390/rs10010013.
34. *Jennings S. B.*, *Brown N. D.*, *Sheil D.* Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures // Forestry. 1999. V. 72. No. 1. P. 59–74. DOI: 10.1093/forestry/72.1.59.
35. *Korhonen L.*, *Morsdorf F.* Estimation of canopy cover, gap fraction and leaf area index with airborne laser scanning // Forestry applications of airborne laser scanning: Concepts and case studies. Dordrecht: Springer, 2014. P. 397–417. DOI: 10.1007/978-94-017-8663-8_20.
36. *Kupriianova I. V.*, *Kaverin A. A.*, *Filippov I. V. et al.* The main physical and geographical characteristics of the Mukhrino field station area and its surroundings // Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2022. V. 13. No. 4. P. 215–252. DOI: 10.18822/edgcc240049.
37. *Roussel J.-R.*, *Auty D.*, *Coops N. C. et al.* lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 251. Article 112061. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112061.
38. *Tan H.*, *Kou W.*, *Xu W. et al.* Enhancing aboveground biomass estimation in rubber plantations using UAV multispectral data for satellite upscaling // Remote Sensing. 2025. V. 17. No. 17. Article 2955. DOI: 10.3390/rs17172955.

39. *Weiss M.*, *Baret F.*, *Smith G. J. et al.* Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Pt. II. Estimation of LAI, errors and sampling // Agricultural and Forest Meteorology. 2004. V. 121. No. 1–2. P. 37–53. DOI: 10.1016/j.agrformet.2003.08.001.
40. *White J. C.*, *Coops N. C.*, *Wulder M. A. et al.* Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review // Canadian J. Remote Sensing. 2016. V. 42. No. 5. P. 619–641. DOI: 10.1080/07038992.2016.1207484.

A methodology for processing airborne laser scanning data to evaluate the forest light regime

A. B. Alekseev[1], A. S. Plotnikova[1], D. V. Ilyasov[2], I. V. Kupriianova[2]

[1] *Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity RAS*, *Moscow 117997*, *Russia*
E-mail: poxpox@mail.ru
[2] *Ugra State University*, *Khanty-Mansiysk 628011*, *Russia*

One of the key parameters of forest phytoclimate is the light regime characterized by illumination levels. Both direct instrumental measurements and indirect methods are used to assess illumination. Direct measurements capture only instantaneous illumination conditions and strongly depend on weather and the time of the day. Indirect assessments are possible based on a range of forest canopy structural parameters, such as canopy closure and stand density, crown porosity and openness, and leaf area index (LAI). This study proposes a method for the indirect assessment of forest illumination using the generalized concept of tree canopy transparency. A methodology for processing airborne laser scanning (ALS) data is developed to spatially evaluate the forest light regime using continuous raster models of canopy transparency. The core stages of the methodology include: flight planning and airborne survey execution, primary ALS data processing, laser return point cloud classification, and canopy transparency determination. The requirements for flight parameters and laser scanner hardware settings are formulated. Within the framework of canopy transparency determination, an algorithm for calculating transparency from airborne laser scanning data is developed and implemented in software. The algorithm comprises five stages: (1) data preprocessing, virtual space generation, and point cloud tiling; (2) generation of a local measurement point grid; (3) laser return point subset extraction and voxelization; (4) mathematical modeling of spherical projection; and (5) aggregation of local measurements and raster model construction. The developed methodology is tested at study sites in Tver Region and at Mukhrino Field Station. Model validation is performed within sample plots established in the study areas using correlation analysis between transparency values, E. Landolt's light indicator values, and leaf area index. The validation provides biologically sound confirmation of the accuracy of forest light regime evaluation using raster canopy transparency models created on the basis of the developed methodology.

Keywords: airborne laser scanning, canopy closure, forest light regime, Leaf Area Index, LAI, E. Landolt's ecological scale, Mukhrino Field Station

Accepted: 27.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-153-169

References

1. Alekseev V. A., *Svetovoi rezhim lesa* (Light regime of the forest), Leningrad: Nauka, 1975, 228 p. (in Russian).
2. Alekseev A. B., Plotnikova A. S., Evaluation of structural complexity of forest stand of coniferous-deciduous forests of the Tver region based on airborne laser scanning data, *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: materialy 10-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Regional Problems of Earth Remote Sensing: Proc. 10th Intern. Scientific Conf.), Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2023, pp. 152–155 (in Russian).

3. Alekseev A. B., Plotnikova A. S., Podolskaya E. S., Estimation of canopy transparency using airborne laser scanning data, *Lesovedenie*, 2026, No. 3, pp. 363–386 (in Russian).
4. Altyntsev M. A., The technique of UAV-based airborne laser scanning data preliminary processing, *Geodeziya i kartografiya*, 2023, No. 6, pp. 30–41 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2023-996-6-30-41.
5. Burdin A. A., Bogatyrev D. A., Tarasov A. V., Pyankov S. V., Assessment of tree parameters based on aerial laser scanning data in mixed forests of the Middle Urals, *Vestnik SGUGiT*, 2025, V. 30, No. 4, pp. 32–41 (in Russian), DOI: 10.33764/2411-1759-2025-30-4-32-41.
6. Golubeva E. I., Zimin M. V., Tutubalina O. V. et al., Leaf area index: methods of field instrumental measurements and using remote sensing materials, In: *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Ser.: Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring* (Ecology. Economy. Informatics. Ser.: Geoinformation technologies and space monitoring), Rostov-on-Don: SSC RAS, 2020, Iss. 5, pp. 70–74 (in Russian), DOI: 10.23885/2500-123X-2020-2-5-70-74.
7. Evstigneev O. I., Relation of broadleaved trees to light and water availability in connection with forest structure, *Lesovedenie*, 1996, No. 6, pp. 26–35 (in Russian).
8. 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), https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2021.042.
9. Ilyasov D. V., Alekseev A. B., Comparison of methodological approaches to determining tree heights and crown projections from UAV laser scanning data in middle taiga forests, *Lesovedenie*, 2025, No. 2, pp. 275–289 (in Russian).
10. Ipatov V. S., Kirikova L. A., Using the "openness of forest canopy" index to assess environmental conditions in the forest, *Botanicheskii zhurnal*, 2001, V. 86, No. 4, pp. 164–165 (in Russian).
11. Ipatov V. S., Mirin D. M., *Opisanie fitotsenoza: uchebno-metodicheskoe posobie* (Phytocenosis description: Textbook), Saint Petersburg: Saint Petersburg State University, 2008, 71 p. (in Russian).
12. Ipatov V. S., Kirikova L. A., Bibikov V. P., Canopy openness of tree stands (measurement and possibilities of use as an indicator of microclimatic conditions under forest canopy), *Botanicheskii zhurnal*, 1979, V. 64, No. 11, pp. 1615–1624 (in Russian).
13. Knyazeva S. V., Nikitina A. D., Gavrilyuk E. A. et al., Biometric parameter determination of pine stands based on WorldView-3 imagery and UAV survey, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 6, pp. 93–107 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-93-107.
14. Kovyazin V. F., Vinogradov K. P., Kitsenko A. A., Vasil'eva E. A., Airborne laser scanning for clarification of the valuation indicators of forest stands, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, 2020, No. 6, pp. 42–54 (in Russian), DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-42-54.
15. Kolycheva A. A., Chumachenko S. I., Estimation of the yield of wild berries taking into account the level of illumination of the ground cover by simulation methods, *Forest Science Issues*, 2021, V. 4, No. 3, Article 90, 26 p. (in Russian), DOI: 10.31509/2658-607x-202143-90.
16. Kuznetsova A. I., Kuznetsov V. A., Tikhonova E. V., Teben'kova D. N., Temperature regime of litter in different forests types of the Valuevsky Moscow Forest Park, *Forest Science Issues*, 2024, V. 7, No. 3, Article 151, 16 p. (in Russian), DOI: 10.31509/2658-607x-202473-151.
17. Lukina N. V., Orlova M. A., Bakhmet O. N. et al., Influence of vegetation on forest soils properties in the Republic of Karelia, *Pochvovedenie*, 2019, No. 7, pp. 827–842 (in Russian), DOI: 10.1134/S0032180X19050071.
18. *Metodicheskie podkhody k ehkologicheskoi otsenke lesnogo pokrova v basseine maloi reki* (Methodological approaches to ecological assessment of forest cover in a small river basin), Zaugolnova L. B., Braslavskaya T. Yu. (eds.), Moscow: KMK Scientific Press, 2010, 383 p. (in Russian).
19. Nikitina A. D., Knyazeva S. V., Tikhonova E. V., Gornov A. V., Assessment of the consistency of structural and biometric characteristics of Scots pine forests based on field measurements and UAV imagery, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 5, pp. 195–206 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-195-206.
20. *OST 56-108-98. Lesovodstvo. Terminy i opredeleniya* (OST 56-108-98. Forestry. Terms and Definitions), Moscow: VNIITslesresurs, 1998, 56 p. (in Russian).
21. Plotnikov D. E., Zhou Q., Kolbudaev P. A. et al., Development and assessment of Leaf Area Index of Russia's vegetation cover based on multi-angular observations by KMSS (Meteor-M) and neural network inversion of PROSAIL model, *Computer Optics*, 2025, V. 49, No. 3, pp. 504–516 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1621.
22. Rysin L. P., Savel'eva L. I., *Sosnovye lesa Rossii* (Pine forests of Russia), Moscow: KMK Scientific Press, 2008, 289 p. (in Russian).
23. Sabrekov A. F., Kupriyanova Yu. V., Koval A. A. et al., Analysing the transformation of forest litter's organic matter on different stages of secondary succession of a middle taiga forest using the Fourier-transform infrared spectrometry, *Lesovedenie*, 2025, No. 1, pp. 50–64 (in Russian), DOI: 10.7868/s3034535980024114825010053.

24. Utkin A. I., Ermolova L. S., Zamolodchikov D. G., Conversion coefficients for determining leaf area of forest stands of major tree species in Russia, *Lesovedenie*, 1997, No. 3, pp. 74–78 (in Russian).
25. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Remote estimation methods for horizontal tree canopy structure parameters based on MODIS satellite system data, *Fundamental'nye i prikladnye kosmicheskie issledovaniya: sbornik trudov 17-i Konferentsii molodykh uchenykh. Ser. "Mekhanika, upravlenie, informatika"* (Fundamental and Applied Space Research: Proc. 17th Young Scientists Conf. Ser. "Mechanics, Control, Informatics"), Sadovsky A. M. (ed.), Moscow: IKI RAN, 2020, pp. 149–154 (in Russian).
26. Tsel'niker Yu. L., *Radiatsionnyi rezhim pod pologom lesa* (Radiation regime under forest canopy), Moscow: Nauka, 1969, 98 p. (in Russian).
27. Chumachenko S. I., Concept of building bioecological models of multi-species uneven-aged forest stands for coniferous-deciduous forests and southern taiga, *Lesnoi vestnik*, 2006, No. 2, pp. 7–13 (in Russian).
28. Shabanov N. V., Bartalev S. A., Eroshenko F. V., Plotnikov D. E., Development of capabilities for remote sensing estimate of Leaf Area Index from MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 4, pp. 166–178 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
29. Shabanov N. V., Mikhaylov N. V., Tikhonov D. N. et al., Validation of the MODIS LAI product over sparse boreal forest of the Kola Peninsula using UAV data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 2, pp. 156–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-156-170.
30. Almeida D. R. A., Broadbent E. N., Zambrano A. M. A. et al., Monitoring the structure of forest restoration plantations with a drone-lidar system, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, V. 79, pp. 192–198, DOI: 10.1016/j.jag.2019.03.014.
31. Chen X., Shen X., Cao L., Tree species classification in subtropical natural forests using high-resolution UAV RGB and SuperView-1 multispectral imageries based on deep learning network approaches: A case study within the Baima Snow Mountain National Nature Reserve, China, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 10, Article 2697, DOI: 10.3390/rs15102697.
32. Glennie C., Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems, *J. Applied Geodesy*, 2007, V. 1, No. 3, pp. 147–157, DOI: 10.1515/JAG.2007.017.
33. Iizuka K., Yonehara T., Itoh M., Kosugi Y., Estimating tree height and diameter at breast height (DBH) from digital surface models and orthophotos obtained with an unmanned aerial system for a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forest, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, No. 1, Article 13, DOI: 10.3390/rs10010013.
34. Jennings S. B., Brown N. D., Sheil D., Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures, *Forestry*, 1999, V. 72, No. 1, pp. 59–74, DOI: 10.1093/forestry/72.1.59.
35. Korhonen L., Morsdorf F., Estimation of canopy cover, gap fraction and leaf area index with airborne laser scanning, In: *Forestry applications of airborne laser scanning: Concepts and case studies*, Dordrecht: Springer, 2014, pp. 397–417, DOI: 10.1007/978-94-017-8663-8_20.
36. Kupriianova I. V., Kaverin A. A., Filippov I. V. et al., The main physical and geographical characteristics of the Mukhrino field station area and its surroundings, *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2022, V. 13, No. 4, pp. 215–252, DOI: 10.18822/edgcc240049.
37. Roussel J.-R., Auty D., Coops N. C. et al., lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data, *Remote Sensing of Environment*, 2020, V. 251, Article 112061, DOI: 10.1016/j.rse.2020.112061.
38. Tan H., Kou W., Xu W. et al., Enhancing aboveground biomass estimation in rubber plantations using UAV multispectral data for satellite upscaling, *Remote Sensing*, 2025, V. 17, No. 17, Article 2955, DOI: 10.3390/rs17172955.
39. Weiss M., Baret F., Smith G. J. et al., Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Pt. II. Estimation of LAI, errors and sampling, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, V. 121, No. 1–2, pp. 37–53, DOI: 10.1016/j.agrformet.2003.08.001.
40. White J. C., Coops N. C., Wulder M. A. et al., Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review, *Canadian J. Remote Sensing*, 2016, V. 42, No. 5, pp. 619–641, DOI: 10.1080/07038992.2016.1207484.