

УДК 630*181.351:551.521.37:502.057

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО РЕЖИМА ПОД ПОЛОГОМ ДРЕВОСТОЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА ERA5-LAND И ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

П. С. Широких^{1, 2}, И. Р. Туктамышев^{1, 2*}, С. Н. Жигунова^{1, 2}, И. Г. Бикбаев^{1, 2},
В. Д. Гимазетдинов^{1, 2}, В. Б. Мартыненко¹, Д. М. Гулов^{1, 2},
Э. З. Баишева¹, Д. Т. Габбасова^{1, 2}, М. Р. Ахметова¹, Д. Р. Харисов^{1, 2}

¹ Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН
(пр. Октября, 69, Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 450054),
*ishatik@yandex.ru

² Уфимский государственный нефтяной технический университет
(ул. Космонавтов, 1, Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 450064)

В работе предложен подход к оценке радиационного режима под пологом лесного древостоя, основанный на сочетании данных глобального реанализа ERA5-Land и полевых измерений индекса листовой поверхности (LAI). Ослабление входящей солнечной радиации описывалось экспоненциальной зависимостью, вытекающей из закона Бугера–Ламберта–Бера, с использованием коэффициента экстинкции полога (k), рассчитанного по результатам наземных наблюдений. Коэффициент экстинкции определялся для каждого сочетания «пробная площадь – дата наблюдений» путем сопоставления измеренной радиации под пологом и репрезентативных дневных значений радиации над пологом, полученных по данным ERA5-Land и приведенных к уровню наземных измерений. Для каждого экспериментального варианта (фон и различные дозы минеральных удобрений) в расчетах использовалось медианное значение k , что позволило снизить влияние отдельных экстремальных значений и получить устойчивую характеристику светового режима. Валидация модели выполнена по данным автоматической метеостанции САМУ, установленной на фоновой пробной площади, для дневных часов. Получено удовлетворительное согласование временной динамики радиации под пологом ($r = 0,73$; $RMSE = 14,18$ Вт/м²). Низкие значения коэффициента детерминации связаны с высокой изменчивостью почасовой освещенности под пологом, обусловленной переменной облачностью и локальными колебаниями доли прямой радиации, и не свидетельствуют о несостоятельности модели при оценке интегральных характеристик радиационного режима. Сценарный анализ показал, что расчетные значения радиации под пологом существенно зависят от величины коэффициента экстинкции. Различия между вариантами в рамках сценарного анализа отражают чувствительность модели к изменению коэффициента экстинкции и не рассматриваются как независимая валидация пробных площадей (ПП) с различными концентрациями минеральных удобрений. Предложенный подход обеспечивает физически обоснованное и устойчивое описание радиационного режима под пологом леса и может применяться для оценки светового режима и продукционного потенциала лесных экосистем в условиях ограниченного объема полевых данных.

Ключевые слова: экспоненциальная модель ослабления излучения Бугера–Ламберта–Бера; индекс листовой поверхности (LAI); ERA5-Land; коэффициент экстинкции; солнечная радиация; моделирование; Башкирское Предуралье

Для цитирования: Широких П. С., Туктамышев И. Р., Жигунова С. Н., Бикбаев И. Г., Гимазетдинов В. Д., Мартыненко В. Б., Гулов Д. М., Баишева Э. З., Габбасова Д. Т., Ахметова М. Р., Харисов Д. Р. Моделирование радиационного режима под пологом древостоя на основе данных реанализа ERA5-Land и полевых измерений // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 7. С. 5–23. doi: 10.17076/eco2325

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на тему «Оценка объема эмиссии и поглощения парниковых газов репрезентативными типами экосистем на участках Евразийского карбонового полигона и поиск оптимальных технологических решений для декарбонизации Республики Башкортостан» (номер для публикаций: FEUR-2024-0007).

P. S. Shirokikh^{1,2}, I. R. Tuktamyshev^{1,2*}, S. N. Zhigunova^{1,2}, I. G. Bikbaev^{1,2}, V. D. Gimazetdinov^{1,2}, V. B. Martynenko¹, D. M. Gulov^{1,2}, E. Z. Baisheva¹, D. T. Gabbasova¹, M. R. Akhmetova¹, D. R. Kharisov^{1,2}. MODELING THE RADIATION REGIME UNDER FOREST CANOPY BASED ON ERA5-LAND REANALYSIS DATA AND FIELD MEASUREMENTS

¹ Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences (69 Oktyabrya Ave., 450054 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia), *ishatik@yandex.ru

² Ufa State Petroleum Technological University (1 Kosmonavtov St., 450064 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia)

An approach to assessing the radiation regime under forest canopy is proposed, based on the integration of ERA5-Land global reanalysis data and field measurements of the leaf area index (LAI). The attenuation of incoming solar radiation was described by an exponential relationship derived from the Beer-Lambert-Bouguer law, using the canopy extinction coefficient (k) calculated from ground-based observations. The extinction coefficient was determined for each “sample plot – observation date” combination by comparing measured under-canopy radiation with representative daily radiation values above the canopy obtained from ERA5-Land data and adjusted to the level of ground measurements. For each experimental treatment (control and different doses of mineral fertilizers), the median value of k was used in the calculations, which reduced the influence of extreme values and provided a robust characterization of the light regime. Model validation was performed using data from the SAMU automatic weather station installed in the control sample plot for daytime hours. A satisfactory agreement in the temporal dynamics of under-canopy radiation was found ($r = 0.73$; $RMSE = 14.18 \text{ W/m}^2$). The low values of the coefficient of determination are associated with the high variability of hourly illumination under the canopy caused by variable cloudiness and local fluctuations in the proportion of direct radiation and do not imply model inadequacy when assessing integral characteristics of the radiation regime. Scenario analysis showed that the calculated under-canopy radiation values strongly depended on the magnitude of the extinction coefficient. Differences between treatments within the scenario analysis reflect the sensitivity of the model to changes in the extinction coefficient and are not considered as independent validation of sample plots with different concentrations of mineral fertilizers. The proposed approach provides a physically grounded and robust description of the under-canopy radiation regime and can be applied to assess the light regime and productivity potential of forest ecosystems where field data availability is limited.

Keywords: exponential attenuation model based on the Beer-Lambert-Bouguer law; leaf area index (LAI); ERA5-Land; extinction coefficient; solar radiation; modeling; Bashkir Cis-Urals

For citation: Shirokikh P. S., Tuktamyshev I. R., Zhigunova S. N., Bikbaev I. G., Gimazetdinov V. D., Martynenko V. B., Gulov D. M., Baisheva E. Z., Gabbasova D. T., Akhmetova M. R., Kharisov D. R. Modeling the radiation regime under forest canopy based on ERA5-Land reanalysis data and field measurements. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 7. P. 5–23. doi: 10.17076/eco2325

Funding. This research was performed under the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation "Assessment of greenhouse gas balance in the Eurasian carbon test ground for developing optimal technologies to increase carbon stocks by ecosystems of the Republic of Bashkortostan for 2024–2026" (Publication ID: FEUR-2024-0007).

Введение

Солнечное излучение под пологом леса традиционно рассматривается как один из базовых факторов, определяющих функционирование лесных экосистем [Smith et al., 1992; Sipe, Bazzaz, 1995; Martens et al., 2000]. Количество солнечной радиации, достигающей поверхности почвы, оказывает прямое влияние на структуру растительности [Leuchner et al., 2012; Peng et al., 2014], развитие древостоя [Oliver et al., 1997], рост леса [Grant, 1997; Leuchner et al., 2012] и эффективность производства [Englund et al., 2000], на углеродный баланс лесных экосистем [Gutschick, 1991; Parker et al., 2001]. Интенсивность света в лесу в основном определяется структурой полога, характеристиками участка, атмосферными условиями и высотой Солнца над горизонтом [Jennings et al., 1999; Mücke et al., 2011; Bode et al., 2014]. Совокупность этих факторов формирует сложные световые режимы под пологом, характеризующиеся не только горизонтальной неоднородностью, но и вертикальной изменчивостью в каждый момент времени [Clark et al., 1996; Connell et al., 1997; Peng et al., 2014]. Характер пропускания света в пологе отражает распределение радиации и связан с энергетическим балансом и микроклиматом древостоя, однако высокая пространственно-временная изменчивость освещенности и методические ограничения прямых измерений существенно затрудняют ее количественную оценку [Monsi, Saeki, 1953; Campbell, Norman, 1998; Niinemets, 2015].

Классическим подходом к описанию ослабления солнечной радиации в растительном пологе является использование моделей, основанных на законе Бугера–Ламберта–Бера [Wigmosta et al., 1994; Nijssen, Lettenmaier, 1999; Hellstrom, 2000]. В рамках этого подхода ключевыми параметрами выступают индекс листовой поверхности (LAI) [Watson, 1947] и коэффициент экстинкции (k) [Nilson, 1971], который отражает интегральные свойства полога по поглощению и рассеянию излучения. Несмотря на очевидную упрощенность, такие модели широко применяются в лесной экологии, агрометеорологии и экосистемном моделировании, поскольку позволяют получить

интерпретируемые оценки при минимальном объеме входных данных [Campbell, Norman, 1998; Jonckheere et al., 2004; Yan et al., 2019].

В то же время накопленные за последние десятилетия данные указывают на то, что LAI как интегральная характеристика не всегда адекватно отражает реальные условия прохождения радиации под полог [Chen et al., 1997; Breda, 2003]. Древостои с близкими значениями LAI могут существенно различаться по архитектуре крон, угловому распределению листьев и доле прямой и рассеянной радиации, достигающей нижних ярусов [Campbell, Norman, 1998; Ross, 2012]. В результате коэффициент экстинкции демонстрирует значительную вариабельность даже в пределах одного типа леса и может существенно изменяться в зависимости от возраста насаждений, породного состава и лесохозяйственных мероприятий [Niinemets, 2015; Calders et al., 2018; Fang et al., 2019].

Оценка LAI в полевых условиях традиционно выполняется с использованием оптических методов, основанных на анализе полусферических фотографий, сделанных снизу вверх через сверхширокоугольный объектив [Rich, 1990; Chen et al., 1997; Jonckheere et al., 2004]. Как правило, угол обзора приближается к 180° или равен ему. Полученные фотографии служат полупостоянными записями о геометрии просветов в пологе леса и используются в исследованиях динамики лесного полога для определения таких параметров, как LAI , доля просветов и оценка световых индексов [Whitford et al., 1995; Lin, Chiang, 2002]. Приборы типа CI-110 Plant canopy imager (CID Bio-Science, Camas, WA, USA) позволяют получать локальные оценки LAI с достаточно высокой точностью и широко применяются в лесных экосистемах [Fang et al., 2019]. Однако такие измерения, как правило, выполняются эпизодически и не обеспечивают непрерывного описания сезонной динамики листовой поверхности [Jonckheere et al., 2004; Fang et al., 2019]. Спутниковые продукты LAI , напротив, обеспечивают регулярное временное покрытие и возможность масштабирования на ландшафтный уровень, однако при использовании в лесных экосистемах сталкиваются с эффектами насыщения сигнала и значительными неопределенностями [Fang et al., 2019; Yan et al., 2019].

Для получения непрерывных временных рядов радиации все чаще используются данные климатических реанализов, в частности ERA5 и ERA5-Land, которые предоставляют часовые значения суммарной солнечной радиации и сопутствующих метеорологических параметров [Hersbach et al., 2020]. Эти данные обладают высокой временной согласованностью и широко применяются в экосистемных и климатических исследованиях [Boilley, Wald, 2015; Beck et al., 2017]. Вместе с тем радиация в реанализах относится к идеализированной поверхности открытого пространства, что требует дополнительной корректировки при использовании в условиях лесного полога [Hersbach et al., 2020; Urraca et al., 2023; Wilczak et al., 2024]. По литературным данным без дополнительной локальной корректировки реанализы ERA5-Land могут содержать систематические смещения в оценке приходящей солнечной радиации относительно наземных измерений, что проявляется в обусловленной переоценке или недооценке радиационного потока [Urraca et al., 2018; Hersbach et al., 2020].

В последние годы возрастает интерес к гибридным подходам, сочетающим данные реанализов, локальные наземные наблюдения и простые физически обоснованные модели ослабления радиации растительным пологом [Ryu et al., 2011]. Подобные подходы позволяют сохранить баланс между физической интерпретируемостью модели и устойчивостью

результатов при ограниченном количестве входных данных, что особенно важно для исследований на уровне отдельных экспериментальных площадок [Gupta et al., 2009; Willmott et al., 2012; Bonan, 2019]. Такой подход оказывается особенно полезным при интеграции разнородных источников данных и может быть использован для оценки светового режима и продукционного потенциала лесных экосистем в условиях ограниченного объема полевых данных.

Таким образом, целью работы является количественная оценка параметров ослабления солнечной радиации под пологом древостоя на основе комбинации данных реанализа ERA5-Land и полевых измерений и создание на их основе модели радиационного режима, обеспечивающей возможность последующего моделирования баланса углерода и потоков парниковых газов в напочвенном покрове залежных земель с лесовозобновлением (на примере участка «Мишкино» Евразийского карбонового полигона).

Материалы и методы

Исследование выполнено на модельном участке «Мишкино» Евразийского карбонового полигона, расположенного в широколиственно-лесной зоне Башкирского Предуралья (Мишкинский район Республики Башкортостан) на 10 круговых ПП, заложенных на залежах, зарастающих *Betula pendula* Roth (рис. 1).

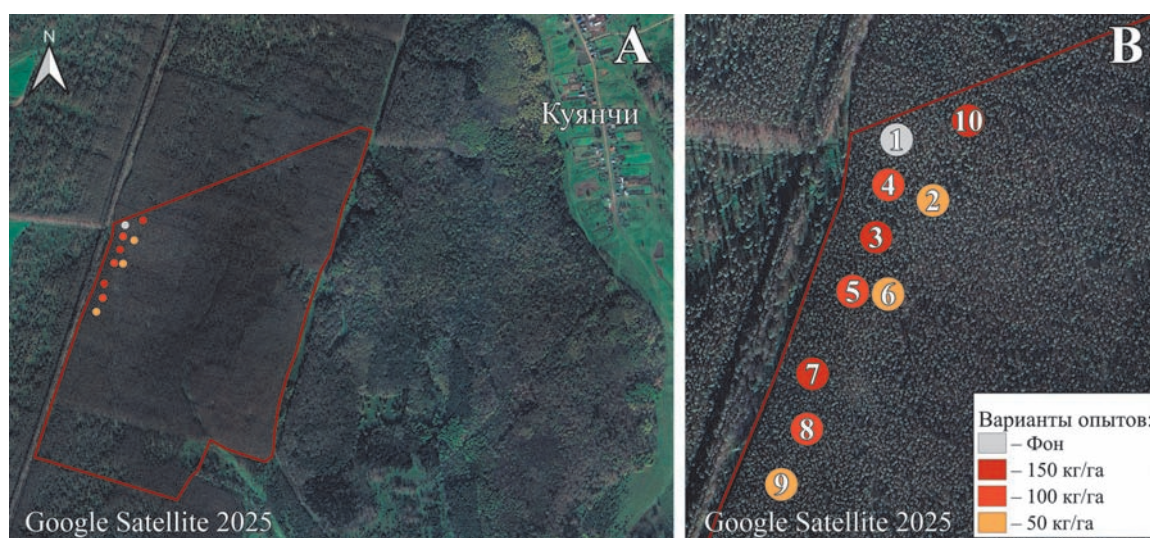


Рис. 1. Модельная карбоновая ферма:

А – местонахождение карбоновой фермы; В – размещение круговых площадок на территории модельной карбоновой фермы. Источник спутниковых данных: Google Satellite, 2025 (Google Maps, <https://www.google.com/maps>)

Fig. 1. Model carbon farm:

A – location of the carbon farm; B – arrangement of circular plots within the model carbon farm. Satellite imagery source: Google Satellite view, 2025 (Google Maps, <https://www.google.com/maps>)



Рис. 2. Пробные площади модельной карбоновой фермы в июне 2025 г.:

А – контрольная пробная площадь; Б – с нормой внесения удобрений 150 кг/га; В – с нормой внесения удобрений 100 кг/га; Г – с нормой внесения удобрений 50 кг/га

Fig. 2. Sample plots of the model carbon farm in June 2025:

А – control sample plot; Б – plot with a fertilizer application rate of 150 kg/ha; В – plot with a fertilizer application rate of 100 kg/ha; Г – plot with a fertilizer application rate of 50 kg/ha

Климат в районе исследований умеренно континентальный [Абдрахманов и др., 2005]. Среднегодовая температура воздуха изменяется от +0,1 °C на севере до +0,3 °C на юге. Средняя месячная температура самого холодного месяца (январь) за последние десятилетия составляет –20,9 °C, самого теплого (июль) +25 °C по данным реанализа ERA5 (Copernicus Climate Change Service). Рельеф участка выровненный, максимальный перепад высот составляет 16 м (от 235 до 251 м н. у. м.), что рассчитано на основе цифровой модели рельефа SRTM-2, полученной из архива USGS EarthExplorer. Угол наклона поверхности участка определен по данным ЦМР SRTM-2 с использованием инструмента расчета крутизны (slope) в программном обеспечении QGIS версии 3.44 (QGIS Development Team, 2026) и составляет в среднем 0,4°. Почвы участка представлены преимущественно темно-серыми лесными среднесуглинистыми среднесильными почвами. По содержанию подвижного фосфора почвы в основном относятся к категории «очень низкая» обеспеченность.

На ПП проводились мероприятия по повышению секвестрационного потенциала березняков и почвы на заброшенной пашне путем внесения различных концентраций минеральных удобрений по три повторности каждой концентрации. Диаметр каждой пробной площади составляет 30 м (площадь около 707 м²) с высокой плотностью древостоя 2500–3700 шт., высотой 14–16 м и средним диаметром стволов 8–12 см (рис. 2, табл. 1). Подобная структура древесного яруса характерна для большинства залежей региона.

Нормы внесения удобрений разработаны с учетом литературных данных [Frey et al., 2014]. Три варианта в трех концентрациях действующего вещества: N50 – P50 – K50; N100 – P100 – K100; N150 – P150 – K150 кг/га. Осенью 2023 г. были внесены аммофос (моноаммонийфосфат) (NH₄H₂PO₄) и хлористый калий – KCl, а мочевины (NH₂)₂CO вносилась весной 2024 г., так как осенью ее внесение могло спровоцировать распускание почек в оттепель в осенний период.

Таблица 1. Варианты опытов на круговых площадках по повышению секвестрационного потенциала березняков и почвы на залежах

Table 1. Experimental treatments on circular plots aimed at enhancing the sequestration potential of birch stands and soils on fallow lands

№ пробной площади Sample plot number	Количество деревьев, шт. Number of trees	Средняя высота деревьев, м Average height of trees, m	Проективное покрытие, % Projective coverage, %	
			древостоя of the stand	травянистого яруса of the grassy layer
1 Фон Control	2916	15,5	80	2–5
2	2645	16,4	85	40
3	2730	16,6	90	65
4	3663	15,2	80	55
5	3098	16,6	85	55
6	2419	17,0	80	40
7	3706	15,7	90	70
8	2914	16,2	85	50
9	2843	16,3	85	40
10	3607	15,5	90	65

Для всех ПП определены точные географические координаты, что обеспечило корректную пространственную привязку наземных измерений и метеорологических данных реанализа ERA5-Land.

Для получения непрерывных временных рядов метеорологических параметров использовались данные глобального климатического реанализа ERA5-Land, предоставляемого Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Повторный анализ ERA5-Land сочетает в себе численное моделирование атмосферы и ассимиляцию наблюдательных данных, обеспечивая пространственно и временно согласованные оценки метеорологических параметров с часовым временным шагом и с более высоким пространственным разрешением ($0,1^\circ \times 0,1^\circ$, что соответствует приблизительно 9 км на средних широтах), по сравнению с другими глобальными реанализами. Из архива ERA5-Land для района исследования была получена суммарная приходящая солнечная радиация (SSRD) с часовым интервалом. Параметр SSRD из ERA5-Land представляет собой накопленную сумму солнечной радиации, поступившей на горизонтальную поверхность за расчетный интервал времени, и выражается в Дж/м². Данная радиация соответствует условиям открытого пространства и не учитывает влияние растительного покрова, рельефа и затенения [Hersbach et al., 2020]. Изначально параметр SSRD в ERA5-Land хранится в виде накопленной суммы энергии, для последующего использования в расчетах радиационного режима под пологом был преобразован в почасовые значения потока радиации следующим образом.

Для каждого временного шага t определялась разность накопленных значений SSRD между соседними часовыми данными:

$$\Delta SSRD_t = SSRD_t - SSRD_{t-1},$$

где $SSRD_t$ – накопленная радиация на текущий момент времени, $SSRD_{t-1}$ – накопленная радиация на предыдущий час. Полученное значение $\Delta SSRD_t$ интерпретировалось как суммарная энергия солнечного излучения, поступившая за один час.

Для перехода от энергетических единиц (Дж/м²) к часовому потоку радиации Q_{above} (Вт/м²) использовалось стандартное соотношение:

$$Q_{above,t}(t) = \Delta SSRD(t) / \Delta_t,$$

где $Q_{above,t}$ – средняя приходящая солнечная радиация за час, Вт/м², $\Delta_t = 3600$ сек для почасового шага. Таким образом, для каждого часа формировалось значение приходящей солнечной радиации на уровне верхней границы полога, которое далее уже использовалось в моделировании.

В условиях низкого положения солнца над горизонтом и в ночные часы значения Q_{above} , полученные из данных реанализа ERA5-Land, могут содержать остаточные численные величины, не имеющие физического смысла для оценки радиационного режима под пологом древостоя. Следовательно, для исключения подобных артефактов вводился порог отсечения:

$$Q_{above} < 10 \text{ Вт/м}^2 \Rightarrow Q_{under} = 0,$$

где Q_{under} – средняя за час солнечная радиация под пологом древостоя, Вт/м².

Это позволило нам корректно разделить дневные и ночные периоды и избежать завышения расчетной подпологовой радиации в сумеречные часы.

Для калибровки и валидации модельных расчетов использовались данные наземных измерений солнечной радиации с автоматической метеорологической станции (АМС) CAMU (Россия, Томск), которая была установлена на фоновой площадке под пологом древостоя. Измерения проводились с часовым разрешением с использованием пиранометров, регистрирующих суммарную солнечную радиацию у поверхности. Следует отметить, что временные метки данных повторного анализа ERA5-Land и наземных измерений АМС CAMU радиации изначально заданы в различных временных системах. Все параметры ERA5-Land, включая SSRD, предоставляются во всемирном времени (UTC), тогда как данные АМС CAMU регистрируются в локальном времени (UTC+05:00). Поэтому к значениям ERA5-land прибавляли +5 часов, чтобы у обоих почасовые данные были идентичны по времени. После данного преобразования временные ряды реанализа ERA5-Land и наземных измерений с АМС CAMU имели идентичную часовую разметку, что исключило систематические ошибки, связанные с рассинхронизацией суточного хода солнечной радиации. Солнечная радиация с реанализа ERA5-Land относится к идеализированной горизонтальной поверхности открытого пространства и может переоценивать фактические значения радиационного потока на поверхности по сравнению с наземными измерениями. Поэтому перед расчетами радиации под пологом древостоя вводили эмпирический масштабный коэффициент α , который приводит радиацию реанализа ERA5-Land к уровню наземных измерений АМС CAMU:

$$Q_{\text{above, scaled}}(t) = \alpha \cdot Q_{\text{above}}(t).$$

Масштабный коэффициент α – это агрегированная поправка, учитывающая систематическое отличие между радиацией реанализа ERA5-Land и радиацией, регистрируемой датчиком с АМС CAMU в наших локальных условиях (включая особенности установки, частичное затенение растительностью и т.д.). Коэффициент α оценивался по совпадающим по времени парам значений радиации $Q_{\text{above}}(t)$ и $Q_{\text{obs}}(t)$ – радиация по наземному датчику (АМС CAMU). Для каждого часа t вычисляли индивидуальное отношение:

$$\alpha_{(t)} = Q_{\text{obs}}(t)/Q_{\text{above}}(t).$$

Распределение α_t характеризуется наличием выбросов, обусловленных переменной облачностью, краевыми эффектами в утренние и вечерние часы, а также кратковременными локальными затенениями датчика. В связи с этим в качестве итоговой оценки масштабного коэффициента использовалась робастная статистика – медиана распределения:

$$\alpha^* = \text{median}(\alpha_i),$$

а неопределенность оценивали межквартильным размахом:

$$IQR_{\alpha} = Q_{0,75}(\alpha_t) - Q_{0,25}(\alpha_t),$$

где $Q_{0,25}$ и $Q_{0,75}$ – соответственно 25-й и 75-й процентиля распределения. Использование медианы и IQR позволяет снизить влияние редких экстремальных значений и получить устойчивую оценку масштабного коэффициента, что соответствует общепринятой практике анализа радиационных и метеорологических данных [Yan et al., 2021].

LAI определялся в отдельные даты вегетационного периода (июнь и август 2024 г., август 2025 г.) с использованием оптического устройства CI-110 Plant Canopy Imager (CID Bio-Science, Camas, WA, USA), основанного на методе цифровой полусферической фотографии [Rich, 1990; Chen et al., 1997; Jonckheere et al., 2004]. Прибор CI-110 оснащен сверхширокоугольным полусферическим объективом (угол обзора 150°) с разрешением изображения 768×494 пикселя, время измерения составляет 0,5–1 сек, диапазон измерений равен 0–2500 мкмоль·м²·сек с точностью 5 мкмоль·м²·сек и спектральным откликом 400–700 нм, что позволяет регистрировать распределение световых проемов в пологе леса. Измерения LAI с использованием прибора CI-110 проводились синхронно на всех пробных площадях в пределах каждой даты наблюдений, что обеспечивало сопоставимость значений между вариантами. Оценку LAI выполняли по доле пропускания излучения через полог и геометрическим характеристикам крон с использованием встроенного программного обеспечения производителя (CID Bio-Science). На каждой пробной площадке выполняли серию из 9–12 снимков, что позволяло учитывать пространственную неоднородность структуры полога. Съемку проводили в центральной части площадки и равномерно распределяли по ее площади при одинаковой ориентации прибора на север и постоянной высоте

установки 20–30 см от поверхности почвы. Для каждого снимка регистрировались следующие параметры LAI ; $PAR\ LAI$ – эффективный индекс листовой поверхности, рассчитанный на основе фотосинтетически активной радиации; PAR transmission / gap fraction – доля пропускания излучения через полог и дополнительные служебные параметры (углы обзора, количество срабатываний, качество съемки). Использование как LAI , так и параметра $PAR\ LAI$ обусловлено тем, что последний отражает вклад листьев, эффективно участвующих в поглощении фотосинтетически активной радиации, и широко применяется при анализе светового режима и продукционных процессов [Fang et al., 2019]. После выполнения полевых измерений данные экспортировались в табличный формат и проходили предварительную фильтрацию для исключения некорректных значений, связанных с низкой освещенностью, попаданием прямого солнечного света в объектив, частичным перекрытием изображения посторонними объектами. Для каждой ПП и даты наблюдений рассчитывались средние значения LAI и $PAR\ LAI$:

$$LAI_{mean} = (1/n) \cdot \sum (LAI_i), i = 1..n,$$

$$PAR\ LAI_{mean} = (1/n) \cdot \sum (PAR\ LAI_i), i = 1..n,$$

где n – число повторных измерений (9–12). Использование среднего значения на уровне площадки позволяет снизить влияние локальных просветов, отдельных крупных ветвей и других мелкомасштабных элементов структуры полога, обеспечивая репрезентативную характеристику листовой поверхности на уровне ПП [Fang et al., 2019]. В дальнейших расчетах радиационного режима в качестве входного параметра использовался усредненный LAI по каждой ПП.

Поскольку полевые измерения LAI выполнялись в отдельные даты вегетационного периода, мы не могли их использовать напрямую для непрерывных расчетов радиационного режима под пологом древостоя. В связи с этим для каждой ПП формировался непрерывный временной ряд LAI путем линейной интерполяции во времени между датами полевых наблюдений. Для произвольного дня t , расположенного между двумя датами измерений t_1 и t_2 , значение LAI оценивалось по выражению:

$$LAI(t) = LAI(t_1) + (LAI(t_2) - LAI(t_1)) / (t_2 - t_1) \cdot (t - t_1).$$

Полученные суточные значения LAI использовались в дальнейшем для расчета почасовой радиации под пологом древостоя в экспоненциальной модели ослабления излучения.

Коэффициент экстинкции полога k характеризует эффективность ослабления проходящей коротковолновой (или фотосинтетически

активной) радиации пологом древостоя при заданном индексе листовой поверхности LAI , который описывается экспоненциальной зависимостью, вытекающей из закона Бугера–Ламберта–Бера [Wigmosta et al., 1994; Nijssen, Lettenmaier, 1999; Hellstrom, 2000], где доля прошедшего через полог излучения экспоненциально убывает с ростом LAI :

$$\tau(t) = \exp(-k \cdot LAI),$$

где $\tau(t)$ – доля радиации, прошедшая через древесный полог в момент времени t (доля радиации, дошедшая до уровня датчика под пологом), LAI – индекс листовой поверхности, k – коэффициент экстинкции, отражающий суммарное влияние архитектуры крон, углового распределения листьев и пространственной неоднородности растительного покрова. Из данного выражения k для каждой площадки и даты определялся путем логарифмического преобразования:

$$k = -(1/LAI) \cdot \ln(Q_{under} / Q_{above, sel}),$$

где k – коэффициент экстинкции полога, безразмерная величина; LAI – средний индекс листовой поверхности соответствующей пробной площади; Q_{under} – средняя величина проходящей солнечной радиации под пологом древостоя, зарегистрированная наземным датчиком (AMC CAMU), Вт/м²; $Q_{above, sel}$ – репрезентативное дневное значение радиации над пологом древостоя, усредненное по интервалу 10:00–16:00, уже после масштабирования.

Число индивидуальных оценок коэффициента экстинкции (n) для каждого варианта определялось количеством независимых сочетаний «ПП – дата наблюдений», удовлетворяющих критериям отбора данных (наличие одновременных измерений LAI и радиации, корректность диапазона значений). Каждое такое сочетание формировало самостоятельную оценку коэффициента экстинкции, использованную при расчете медианного значения для соответствующего варианта. Для фоновой ПП число наблюдений составило $n = 3$, для ПП с нормой внесения удобрений 150 кг/га – $n = 8$, 100 кг/га – $n = 9$, 50 кг/га – $n = 7$.

Поскольку LAI имели интегральный характер и не были привязаны к конкретному часу суток, а только к дате замера, то для сопоставления с данными реанализа ERA5-Land использовался усредненный дневной показатель радиации над пологом древостоя, где для каждой даты значение $Q_{above, sel}$ рассчитывалось как среднее значение проходящей солнечной радиации в интервале с 10:00 до 16:00 по местному времени:

$$Q_{\text{above, sel}} = (1/N) \cdot \sum (Q_{\text{above, scaled}}(t)), t = 10..16,$$

где $Q_{\text{above, scaled}}(t)$ – почасовая приходящая солнечная радиация над пологом древостоя, полученная из ERA5-Land и приведенная к уровню наземных измерений с помощью масштабного коэффициента α , а N – число часов в выбранном интервале.

Выбор временного окна 10–16 часов обусловлен тем, что данный интервал соответствует периоду максимальной солнечной высоты и наиболее стабильным условиям освещенности, при которых минимизируется влияние сумеречных эффектов, резких изменений доли рассеянной радиации.

Для оценки возможного влияния геометрии падения солнечного излучения на величину коэффициента экстинкции дополнительно рассматривался вариант расчета с учетом солнечной высоты. В таком случае коэффициент экстинкции корректировался с использованием синуса средней солнечной высоты (h), соответствующей выбранному дневному окну:

$$k_{\text{corr}} = -(1/LAI) \cdot \ln(Q_{\text{under}}/Q_{\text{above, sel}}) \cdot \sin(h),$$

где h – средняя солнечная высота за интервал 10:00–16:00, рассчитанная по географическим координатам пробной площади.

В расчетах использовались значения коэффициента экстинкции, скорректированные с учетом солнечной высоты. Полученные индивидуальные значения коэффициента экстинкции демонстрировали существенную вариабельность, связанную со структурой освещенности под пологом древостоя, изменчивостью доли рассеянной радиации и пространственной неоднородностью крон. В связи с этим для получения репрезентативных параметров применялась робастная статистическая агрегация. Для каждого варианта (v) итоговый коэффициент определялся как медиана всех значений, относящихся к данному варианту:

$$k_v^* = \text{median}(k),$$

где k_v^* – медианное значение коэффициента экстинкции для экспериментального варианта v ; k – индивидуальные оценки коэффициента экстинкции, полученные для всех пробных площадей, относящихся к варианту v , и всех дат наблюдений, включенных в расчет.

В дальнейшем моделировании радиации под пологом древостоя использовались медианные значения k_v^* , что обеспечивало устойчивость параметризации модели. Для оценки внутривариантной неоднородности структуры полога и устойчивости полученных оценок

дополнительно рассчитывались следующие статистические показатели:

среднее значение коэффициента экстинкции

$$\bar{k} = (1/n) \sum(k_i), i = 1..n;$$

стандартное отклонение

$$\sigma_k;$$

коэффициент вариации

$$CV = \sigma_k / \bar{k};$$

межквартильный размах

$$IQR_k = Q_{0,75}(k) - Q_{0,25}(k).$$

После определения непрерывных временных рядов индекса листовой поверхности $LAI(t)$, масштабного коэффициента α и медианных значений коэффициента экстинкции полога k_v^* выполнялся расчет почасовой солнечной радиации под пологом древостоя $Q_{\text{under}}(t)$ для периода с июня по август. В основе расчета лежит экспоненциальная модель ослабления коротковолнового излучения растительным пологом, вытекающая из закона Бугера–Ламберта–Бера и широко применяемая в экосистемных исследованиях [Wigmosta et al., 1994; Nijssen, Lettenmaier, 1999; Hellstrom, 2000]. Данная модель радиации под пологом древостоя определялась по формуле:

$$Q_{\text{under}}(t) = \alpha^* \cdot Q_{\text{above}}(t) \cdot \exp(-k_v^* \cdot LAI(t)),$$

где $Q_{\text{above}}(t)$ – приходящая солнечная радиация на уровне верхней границы кроны деревьев, полученная из данных ERA5-Land и приведенная к локальному времени, Вт · м⁻²; α^* – медианный масштабный коэффициент, корректирующий радиацию реанализа ERA5-Land до уровня наземных измерений; k_v^* – медианный коэффициент экстинкции полога, агрегированный на уровне экспериментального варианта v ; $LAI(t)$ – суточное значение индекса листовой поверхности, полученное методом линейной интерполяции между датами полевых измерений.

Использование коэффициента экстинкции, агрегированного на уровне вариантов внесения различных концентраций минеральных удобрений, позволило сохранить различия в структуре древесного полога между вариантами и одновременно обеспечить устойчивость расчетов при ограниченном числе дат полевых измерений LAI .

Таким образом, для каждой пробной площади и каждого часа вегетационного периода формировался непрерывный временной ряд расчетной радиации под пологом древостоя, согласованный по времени, масштабам с наземными измерениями и параметрами структуры полога.

Для оценки корректности параметризации коэффициента экстинкции была выполнена валидация модельных значений радиации под пологом древостоя $Q_{\text{under}}(t)$, которые сопоставлялись с независимыми наземными измерениями солнечной радиации, выполненными с использованием AMC CAMU, установленными под пологом древостоя. Сопоставление выполнялось по совпадающим по времени почасовым значениям при условии дневной освещенности ($Q_{\text{above}} \geq 10 \text{ Вт/м}^2$). Для оценки точности модели рассчитывались смещение (Bias), средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратичная ошибка (RMSE) и коэффициент детерминации R^2 .

Дополнительно выполнен расчет радиации под пологом древостоя для различных концентраций внесения минеральных удобрений (50, 100 и 150 кг/га) с использованием медианных значений коэффициента экстинкции, полученных для соответствующих вариантов.

Поскольку наземные наблюдения радиации под пологом древостоя проводились только на фоновой ПП, сопоставление расчетных значений для вариантов внесения норм минеральных удобрений с данными AMC CAMU носит характер сценарного анализа и отражает чувствительность модели к изменению параметра k . Данный подход позволяет оценить влияние различий в коэффициенте экстинкции на величину смещения модели относительно фактически наблюдаемого радиационного режима.

Результаты и обсуждение

В результате обработки полевых измерений индекса листовой поверхности (LAI), данных реанализа ERA5-Land и наземных наблюдений радиации под пологом были получены оценки коэффициента экстинкции полога (k) для фоновой площадки и ПП с внесением норм минеральных удобрений (50, 100 и 150 кг/га). Для дальнейшего анализа использовались медианные значения коэффициента экстинкции, агрегированные на уровне вариантов, что обеспечивало устойчивость параметризации.

Распределение значений коэффициента экстинкции по вариантам представлено на рис. 3.

В табл. 2 представлены медианные значения коэффициента экстинкции и показатели разброса индивидуальных оценок для исследованных вариантов.

В силу ограниченного объема выборок, особенно для фоновых вариантов, а также выраженной вариативности индивидуальных оценок представленные описательные статистики не могут рассматриваться как достаточное основание для строгих выводов о статистически значимых различиях между вариантами внесения удобрений. Дополнительно для оценки различий коэффициента экстинкции k между вариантами был применен непараметрический критерий Крускала–Уоллиса, который также не выявил статистически значимых различий ($H = 2,90$; $p = 0,41$).

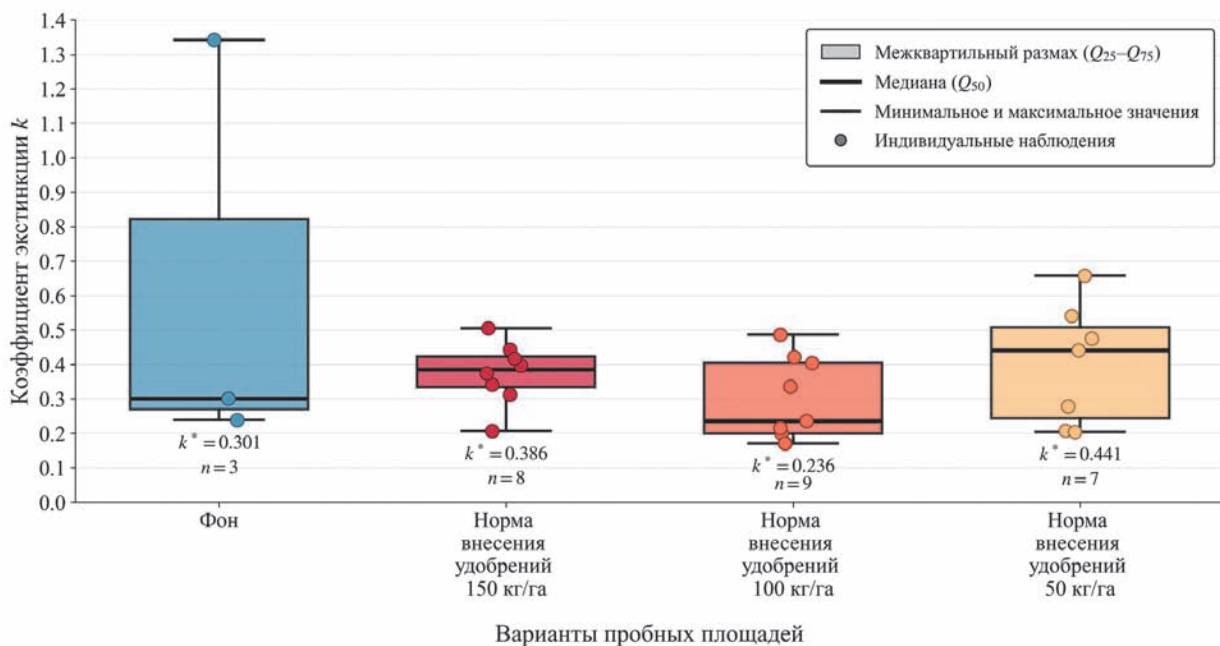


Рис. 3. Распределение коэффициента экстинкции света (k) по вариантам норм внесения минеральных удобрений

Fig. 3. Distribution of the light extinction coefficient (k) across mineral fertilizer application rate treatments

Таблица 2. Распределение коэффициента экстинкции света (k) по вариантам норм внесения минеральных удобрений

Table 2. Distribution of the light extinction coefficient (k) across mineral fertilizer application rate treatments

Вариант Option	n	k^* (медиана) k^* (median)	$\bar{k}$ (среднее) $\bar{k}$ (average)	σ (std)	Q25	Q75	IQR
Фон Control	3	0,301	0,627	0,620	0,270	0,821	0,552
150 кг/га 150 kg/ha	8	0,386	0,375	0,090	0,334	0,423	0,089
100 кг/га 100 kg/ha	9	0,236	0,293	0,121	0,199	0,405	0,205
50 кг/га 50 kg/ha	7	0,441	0,401	0,175	0,243	0,508	0,265

Для фонового варианта медианное значение коэффициента экстинкции составило $k^* = 0,301$ при $IQR = 0,552$ и $CV \approx 0,99$. Для варианта с дозой минеральных удобрений 50 кг/га медианное значение коэффициента экстинкции составило $k^* = 0,441$, $IQR = 0,265$, $CV \approx 0,44$. Для варианта с дозой 100 кг/га медианное значение коэффициента экстинкции составило $k^* = 0,236$, $IQR = 0,205$, $CV \approx 0,41$. Для варианта с дозой 150 кг/га медианное значение коэффициента экстинкции составило $k^* = 0,386$, $IQR = 0,089$, $CV \approx 0,24$.

Полученные диапазоны значений коэффициента экстинкции (0,236–0,441) хорошо согласуются с литературными данными для сомкнутых древостоев умеренной зоны и подтверждают применимость экспоненциальных моделей ослабления радиации для описания светового режима под пологом древостоя [Jarvis, Leverenz, 1983].

Важно отметить, что коэффициент экстинкции в нашей работе выступает не как универсальная константа для типа леса, а интерпретируется как интегральный параметр, учитывающий совокупное влияние структуры полога на ослабление радиации. Именно поэтому использование медианных значений k , агрегированных на уровне экспериментальных вариантов, представляется обоснованным компромиссом между физической интерпретируемостью модели и устойчивостью оценок при ограниченном количестве полевых дат LAI .

Для проверки достоверности полученных значений коэффициента экстинкции и применяемой экспоненциальной модели ослабления радиации была выполнена валидация расчетных значений радиации под пологом леса ($Q_{\text{under, model}}$) по данным наземных наблюдений АМС САМУ, установленной на фоновой ПП. Сравнение проводилось для почасовых значений радиации под пологом в дневные часы при уровне приходящей радиации над пологом $Q_{\text{above}} \geq 10$ Вт/м², что позволило исключить

сумеречные периоды с повышенной относительной погрешностью измерений и нестабильным соотношением прямой и рассеянной радиации. В расчетах использовались модельные значения $Q_{\text{under, model}}$, полученные с применением медианного коэффициента экстинкции, агрегированного на уровне варианта внесения различных доз минеральных удобрений.

Результат валидации модели по совокупности всех дневных часов фоновой ПП ($n = 79$) показал удовлетворительное воспроизведение суточной динамики радиации под пологом древостоя (рис. 4). Следует отметить, что данная выборка представляет собой почасовые значения радиации в дневные часы, использованные для валидации модели по данным АМС САМУ, и не соответствует напрямую условиям проведения полевых измерений LAI и расчета коэффициента экстинкции, использованных при параметризации модели, поскольку радиационные данные имеют высокое временное разрешение, тогда как LAI и соответствующие оценки k определялись как дискретные значения без учета внутрисуточной изменчивости.

Коэффициент корреляции Пирсона составил $r = 0,73$, что свидетельствует о хорошем согласовании временной структуры изменчивости. Среднее систематическое смещение составило $\text{Bias} = 8,75$ Вт/м² при $\text{RMSE} = 14,18$ Вт/м². Низкое значение $R^2 = 0,03$ не свидетельствует о некорректности модели, а обусловлено высокой стохастичностью почасовой освещенности под пологом древостоя, связанной с кратковременными локальными всплесками прямой солнечной радиации, переменной облачностью и пространственной неоднородностью структуры крон. Указанные процессы принципиально не могут быть воспроизведены экспоненциальной моделью, основанной на интегральных характеристиках LAI и медианных значениях коэффициента экстинкции [Nilson, 1971; Pearcy, 1990; Knyazikhin et al., 2005]. При этом величины Bias , MAE и RMSE , полученные

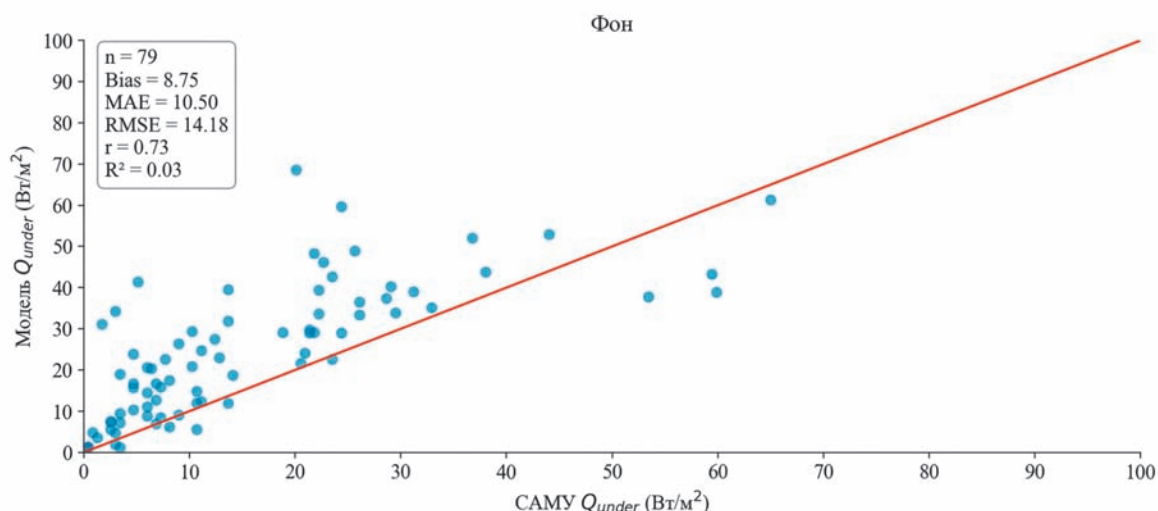


Рис. 4. Сопоставление расчетных и наблюдаемых значений радиации под пологом древостоя для фоновой пробной площади

Fig. 4. Comparison of calculated and observed under-canopy radiation values for the control sample plot

для почасовых значений радиации под пологом, остаются достаточно малыми по сравнению с суточными и сезонными суммами, так что даже при низких значениях R^2 модель обеспечивает приемлемую точность интегральных оценок, необходимых для последующих расчетов потоков климатически активных газов под пологом леса.

Вместе с тем полученные значения MAE и высокая корреляция подтверждают, что модель корректно воспроизводит интегральный радиационный режим под пологом леса и может быть использована для оценки среднесуточных и сезонных характеристик освещенности. На таких

временных масштабах влияние кратковременных вариаций освещенности, связанных с локальными всплесками прямой радиации и изменчивостью облачности, существенно ослабляется за счет временной агрегации, что позволяет использовать модель для корректного воспроизведения интегральных характеристик радиационного режима под пологом, несмотря на неизбежную стохастичность почасовой освещенности.

Пример воспроизведения внутрисуточного хода радиации под пологом представлен на рис. 5.

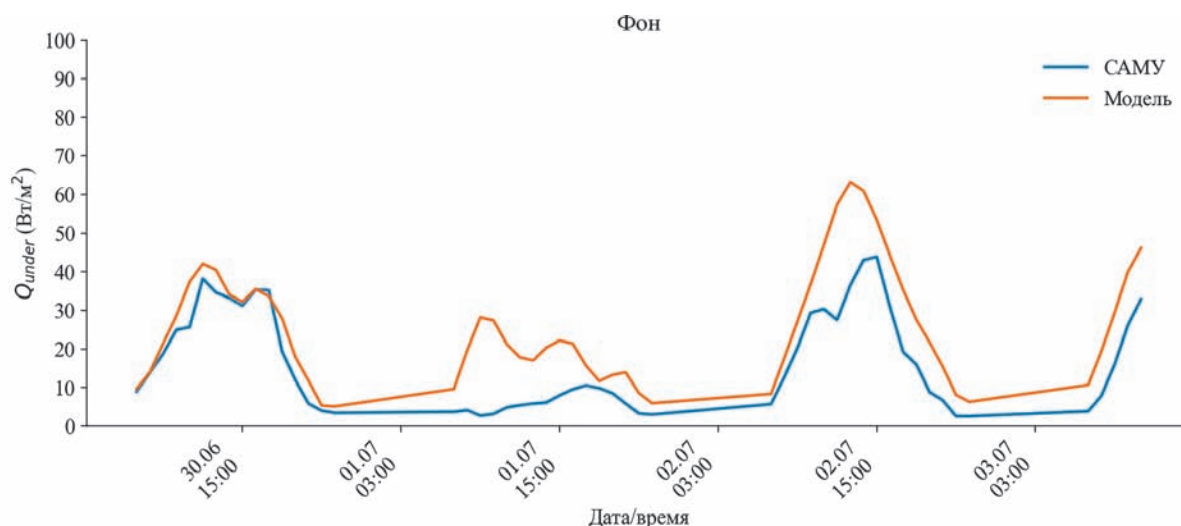


Рис. 5. Воспроизведение внутрисуточной динамики радиации под пологом на фоновой пробной площади в летний период (30.06–03.07.2025) (скользящее среднее, 3 ч)

Fig. 5. Reproduction of the diurnal dynamics of under-canopy radiation at the control sample plot during the summer period (from June 30 to July 03, 2025) (3-hour moving average)

В период 1 июля наблюдается увеличение расхождений между модельными и измеренными значениями, особенно в интервале около полудня. Завышение модельных оценок в дневные часы связано с тем, что экспоненциальная модель ослабления излучения предполагает стационарное и пространственно однородное распределение листовой поверхности, тогда как фактическая освещенность под пологом определяется комбинацией прямой и рассеянной радиации, динамикой облачности и эффектами локального проникновения солнечных лучей через разрывы в кроне. В условиях переменной облачности и быстро меняющейся доли прямой радиации эффективный коэффициент ослабления может отличаться от медианного значения k^* , используемого в расчетах. В результате модель достаточно корректно воспроизводит общий суточный ход радиации, но не отражает кратковременные изменения амплитуды.

Для оценки чувствительности расчетов радиации под пологом к величине коэффициента экстинкции были сопоставлены результаты моделирования, выполненные с использованием вариант-специфичных медианных значений k (рис. 6).

Сопоставление внутрисуточной динамики показывает, что изменение величины коэффициента экстинкции приводит к систематическому изменению амплитуды моделируемых значений Q_{under} при сохранении общей формы суточного хода. При увеличении k наблюдается более выраженное ослабление радиации в дневные часы и снижение максимальных значений под пологом древостоя. Наблюдения выполнялись только на фоновой ПП. В связи с этим различия между сценариями не следует интерпретировать как показатель достоверности вариантов. Представленные расчеты отражают исключительно чувствительность модели к величине коэффициента экстинкции

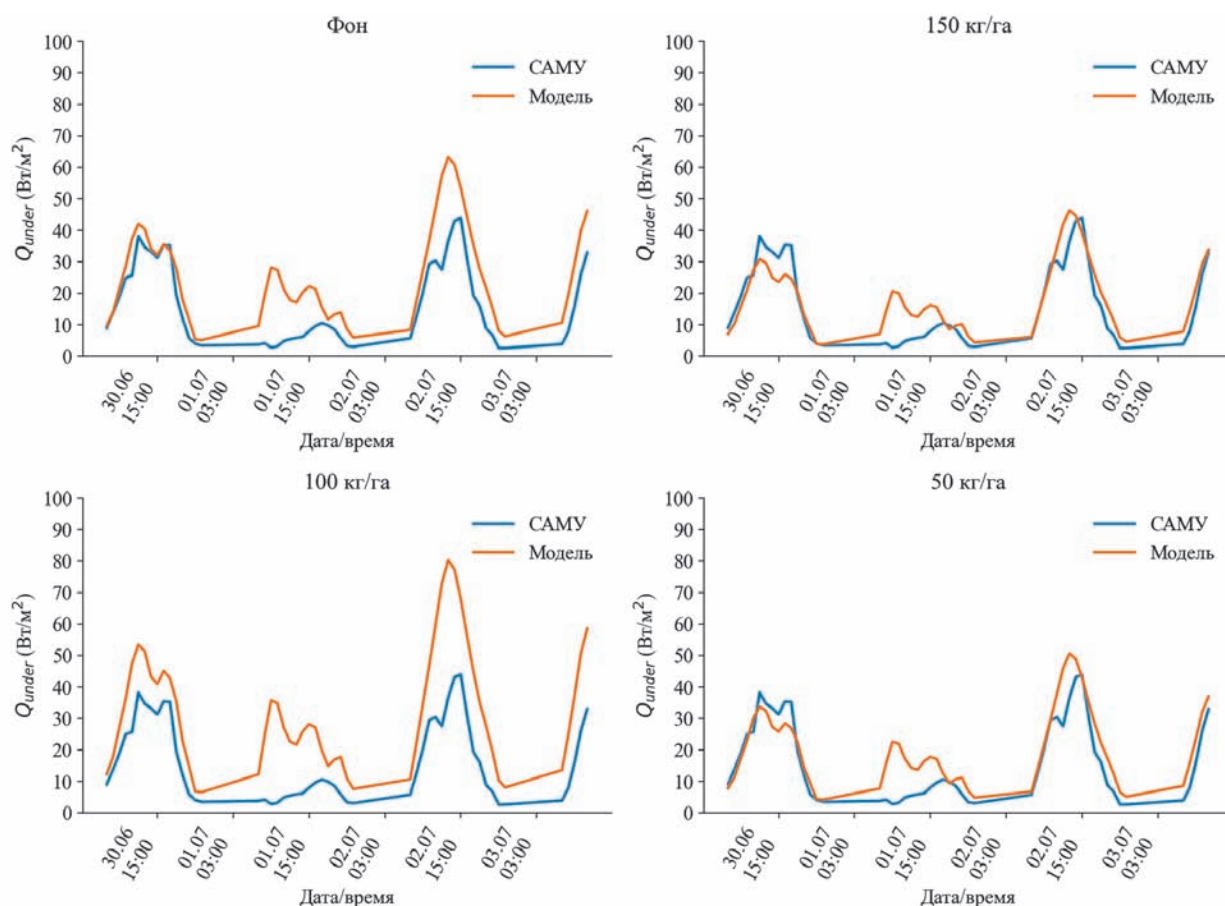


Рис. 6. Сценарный анализ расчетной радиации под пологом древостоя при различных значениях коэффициента экстинкции (фон, 150, 100 и 50 кг/га). Наблюдения приведены для фоновой пробной площади

Fig. 6. Scenario analysis of calculated under-canopy radiation at different values of the extinction coefficient (control, 150, 100 and 50 kg/ha). Observations are shown for the control sample plot

и демонстрируют влияние изменения параметра k на расчетный радиационный режим.

В результате выявленные различия между вариантами следует рассматривать как проявление параметрической чувствительности экспоненциальной модели к изменению коэффициента экстинкции, а не как прямую валидацию ПП с различными концентрациями внесения минеральных удобрений.

Таким образом, результаты валидации подтверждают, что применение вариант-специфичных медианных значений коэффициента экстинкции в сочетании с данными реанализа ERA5-Land обеспечивает физически обоснованное и устойчивое описание радиационного режима под пологом древостоя. Данный подход может служить надежной основой для моделирования потоков парниковых газов в напочвенном покрове в условиях ограниченных возможностей проведения прямых непрерывных измерений.

Заключение

В данном исследовании апробирован подход к оценке радиационного режима под пологом леса, основанный на сочетании данных глобального реанализа ERA5-Land, полевых измерений индекса листовой поверхности и параметризации ослабления солнечного излучения через коэффициент экстинкции полога. Использование вариант-специфичных медианных значений коэффициента экстинкции позволило получить устойчивые оценки радиации под пологом при ограниченном числе полевых наблюдений. Результаты валидации по данным наземных измерений подтверждают, что предложенная схема обеспечивает физически обоснованное воспроизведение интегральных характеристик радиационного режима и может служить надежной основой для последующего анализа функционирования лесных экосистем. В то же время имеющийся объем данных не позволяет делать строгие выводы о характере влияния доз минеральных удобрений на величину коэффициента экстинкции, что требует дальнейших исследований на расширенной выборке.

Полученная схема описания радиационного режима под пологом древостоя обеспечивает непрерывные оценки поступления солнечной энергии на поверхность напочвенного покрова на суточных и сезонных масштабах при минимальных требованиях к полевым измерениям. Это делает ее удобным входным модулем для анализа эмиссии и поглощения климатически активных газов (CO_2 , CH_4 , N_2O)

в напочвенном покрове, чувствительных к поступающей солнечной радиации и температуре. В частности, такие оценки могут быть использованы для параметризации фото-драйверных компонентов дыхания и фотодепонирования, описания световой модуляции микроклимата под пологом (нагрев верхнего слоя почвы, динамика влажности) и разделения вкладов радиационно и термально обусловленных процессов в суточном ходе потоков. В условиях ограниченной сети прямых газообменных измерений это позволяет экстраполировать результаты локальных наблюдений на уровень экспериментальной площадки и сопоставлять сезонную динамику потоков парниковых газов с изменчивостью светового режима под пологом древостоя.

Литература

Абдрахманов Р.Ф., Абзалов Р.М., Асфандияров А.З., Баимбетова Л.Р., Балков В.А., Баянов М.Г. Атлас Республики Башкортостан. Уфа: Китап, 2005. 419 с.

Beck H. E., Van Dijk A. I., Levizzani V., Schellekens J., Miralles D. G., Martens B., De Roo A. MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017. Vol. 21, no. 1. P. 589–615.

Bode C. A., Limm M. P., Power M. E., Finlay J. C. Sub-canopy solar radiation model: predicting solar radiation across a heavily vegetated landscape using LiDAR and GIS solar radiation models // *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 154. P. 387–397. doi: 10.1016/j.rse.2014.01.028

Boilley A., Wald L. Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 75. P. 135–143. doi: 10.1016/j.renene.2014.09.042

Bonan G. B. Climate change and terrestrial ecosystem modeling. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 551 p.

Breda N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies // *Journal of Experimental Botany*. 2003. Vol. 54, no. 392. P. 2403–2417.

Calders K., Origo N., Burt A., Disney M., Nightingale J., Raunonen P., Lewis P. Realistic forest stand reconstruction from terrestrial LiDAR for radiative transfer modelling // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, no. 6. P. 933. doi: 10.3390/rs10060933

Campbell G. S., Norman J. M. An introduction to environmental biophysics. 2nd ed. New York: Springer, 1998. 286 p.

Chen J. M., Rich P. M., Gower S. T., Norman J. M., Plummer S. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997. Vol. 102, no. D24. P. 29429–29443. doi: 10.1029/97JD01107

CID Bio-Science. CI-110 Plant Canopy Imager: User Manual. Camas, WA URL: https://cid-inc.com/static/media/uploads/manuals/ci110_manual.pdf (дата обращения: 16.01.2026).

Clark D. B., Clark D. A., Rich P. M., Weiss S., Oberbauer S. F. Landscape-scale evaluation of understory light and canopy structure: methods and application in a neotropical lowland rain forest // Canadian Journal of Forest Research. 1996. Vol. 26. P. 747–757. doi: 10.1139/x26-084

Connell J. H., Lowman M. D., Noble I. R. Subcanopy gaps in temperate and tropical forests // Australian Journal of Ecology. 1997. Vol. 22. P. 163–168. doi: 10.1111/j.1442-9993.1997.tb00655.x

Copernicus Climate Change Service (C3S). ERA5-Land hourly data from 1950 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land> (дата обращения: 16.01.2026).

Englund S. R., O'Brien J. J., Clark D. B. Evaluation of digital and film hemispherical photography and spherical densitometry for measuring forest light environments // Canadian Journal of Forest Research. 2000. Vol. 30, no. 12. P. 1999–2005. doi: 10.1139/x00-116

Fang H., Baret F., Plummer S., Schaepman-Strub G. An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications // Reviews of Geophysics. 2019. Vol. 57. P. 739–799. doi:10.1029/2018RG000608

Grant R. H. Partitioning of biologically active radiation in plant canopies // International Journal of Biometeorology. 1997. Vol. 40, no. 1. P. 26–40. doi: 10.1007/BF02439408

Gupta H. V., Kling H., Yilmaz K. K., Martinez G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling // Journal of Hydrology. 2009. Vol. 377. P. 80–91. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

Gutschick V. P. Joining leaf photosynthesis models and canopy photon-transport models // Photon-vegetation interactions: Applications in optical remote sensing and plant ecology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991. P. 501–535. doi: 10.1007/978-3-642-75389-3_16

Hardy J. P., Melloh R., Koenig G., Marks D., Winstral A., Pomeroy J. W., Link T. Solar radiation transmission through conifer canopies // Agricultural and Forest Meteorology. 2004. Vol. 126, no. 3–4. P. 257–270. doi: 10.1016/j.agrformet.2004.06.012

Hellstrom R. A. Forest cover algorithms for estimating meteorological forcing in a numerical snow model // Hydrological Processes. 2000. Vol. 14, no. 18. P. 3239–3256. doi: 10.1002/1099-1085

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Thépaut J. N. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. P. 1999–2049. doi: 10.1002/qj.3803

Jarvis P. G., Leverenz J. W. Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests // Physiological plant ecology IV: Ecosystem processes: Mineral cycling, productivity and man's influence. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1983. P. 233–280. doi: 10.1007/978-3-642-68156-1_9

Jennings S. B., Brown N. D., Sheil D. Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures // Forestry. 1999. Vol. 72, no. 1. P. 59–74. doi: 10.1093/forestry/72.1.59

Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography // Agricultural and Forest Meteorology. 2004. Vol. 121. P. 19–35. doi: 10.1016/j.agrformet.2003.08.027

Knyazikhin Y., Marshak A., Myneni R. B. Three-dimensional radiative transfer in vegetation canopies and cloud-vegetation interaction // Three dimensional radiative transfer in the cloudy atmosphere. 2005. P. 617–652. doi: 10.1007/3-540-28519-9_14

Leuchner M., Hertel C., Rötzer T., Seifert T., Weigt R., Werner H., Menzel A. Solar radiation as a driver for growth and competition in forest stands // Growth and defence in plants: Resource allocation at multiple scales. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. P. 175–191. doi: 10.1007/978-3-642-30645-7_8

Lin T. C., Chiang J. M. Applications of hemispherical photographs in studies of forest ecology // Taiwan Journal of Forest Science. 2002. Vol. 17, no. 3. P. 387–400.

Martens S. N., Breshears D. D., Meyer C. W. Spatial distributions of understory light along the grassland/forest continuum: effects of cover, height, and spatial pattern of tree canopies // Ecological Modelling. 2000. Vol. 126, no. 1. P. 79–93. doi: 10.1016/S0304-3800(99)00188-X

Monsi M., Saeki T. Über den lichtfaktor in den pflanzenengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion // Japanese Journal of Botany. 1953. Vol. 14. P. 22–52.

Mücke W., Hollaus M. Modelling light conditions in forests using airborne laser scanning data // Proceedings of the SilviLaser. 2011. P. 1–8. doi: 20.500.12708/42862

Niinemets Ü. Is there a species spectrum within the worldwide leaf economics spectrum? Major variations in leaf functional traits in the context of canopy structure and climate // New Phytologist. 2015. Vol. 205. P. 1–20. doi: 10.1111/nph.13001

Nijssen B., Lettenmaier D. P. A simplified approach for predicting shortwave radiation transfer through boreal forest canopies // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1999. Vol. 104, no. D22. P. 27859–27868. doi: 10.1029/1999JD900377

Nilson T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands // Agricultural Meteorology. 1971. Vol. 8. P. 25–38. doi: 10.1016/0002-1571(71)90092-6

Oliver C. D., Osawa A., Camp A. Forest dynamics and resulting animal and plant population changes at the stand and landscape levels // Journal of Sustainable Forestry. 1997. Vol. 6, no. 3–4. P. 281–312. doi: 10.1300/J091v06n03_05

Parker G. G., Davis M. M., Chapotin S. M. Canopy light transmittance in forest ecosystems // Tree Physiology. 2001. Vol. 22. P. 115–130. doi: 10.1093/treephys/22.2-3.147

Pearcy R. W. Sunflecks and photosynthesis in plant canopies. 1990.

Peng S., Zhao C., Xu Z. Modeling spatiotemporal patterns of understory light intensity using airborne

laser scanner (LiDAR) // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. Vol. 97. P. 195–203. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.003

QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Version 3.44. Open Source Geospatial Foundation Project. URL: <https://qgis.org> (дата обращения: 16.01.2026).

Rich P.M. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs // *Remote Sensing Reviews*. 1990. Vol. 5, no. 1. P. 13–29. doi: 10.1080/02757259009532119

Ross J. The radiation regime and architecture of plant stands. Springer Science & Business Media, 2012. Vol. 3.

Ryu Y., Baldocchi D.D., Kobayashi H., Van Ingen C., Li J., Black T.A., Rouspard O. Integration of MODIS land and atmosphere products with a coupled-process model to estimate gross primary productivity and evapotranspiration from 1 km to global scales // *Global Biogeochemical Cycles*. 2011. Vol. 25, no. 4. doi: 10.1029/2011GB004053

Sipe T.W., Bazzaz F.A. Gap partitioning among maples (*Acer*) in central New England; survival and growth // *Ecology*. 1995. Vol. 76. P. 1587–1602. doi: 10.2307/1938160

Smith A.P., Hogan K.P., Idol J.R. Spatial and temporal patterns of light and canopy structure in a lowland tropical moist forest // *Biotropica*. 1992. Vol. 24. P. 503–511. doi: 10.2307/2389012

U.S. Geological Survey (USGS). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 16.01.2026).

Urraca R., Gobron N. Temporal stability of long-term satellite and reanalysis products to monitor snow cover trends // *The Cryosphere*. 2023. Vol. 17, no. 2. P. 1023–1052. doi: 10.5194/tc-17-1023-2023

Urraca R., Huld T., Gracia-Amillo A., Martinez-de-Pison F. J., Kaspar F., Sanz-Garcia A. Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground measurements // *Solar Energy*. 2018. Vol. 164. P. 339–354. doi: 10.1016/j.solener.2018.02.059

Watson D.J. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years // *Annals of Botany*. 1947. Vol. 11, no. 41. P. 41–76.

Whitford K.R., Colquhoun I.J., Lang A.R.G., Harper B.M. Measuring leaf area index in a sparse eucalypt forest: a comparison of estimates from direct measurement, hemispherical photography, sunlight transmittance and allometric regression // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1995. Vol. 74, no. 3–4. P. 237–249. doi: 10.1016/0168-1923(94)02189-Q

Wigmosta M.S., Vail L.W., Lettenmaier D.P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain // *Water Resources Research*. 1994. Vol. 30, no. 6. P. 1665–1679. doi: 10.1029/94WR00436

Wilczak J.M., Akish E., Capotondi A., Compo G.P. Evaluation and bias correction of the ERA5 reanalysis over the United States for wind and solar energy applications // *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 7. P. 1667. doi: 10.3390/en17071667

Willmott C.J., Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance // *Climate Research*. 2012. Vol. 30. P. 79–82. doi: 10.3354/cr030079

Yan Y., Xu Y., Yue S. A high-spatial-resolution dataset of human thermal stress indices over South and East Asia // *Scientific Data*. 2021. Vol. 8, no. 1. P. 229. doi: 10.6084/m9.figshare.15149010

Yan G., Hu R., Luo J., Weiss M., Jiang H., Mu X., Zhang W. Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019. Vol. 265. P. 390–411. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.11.033

References

Abdrakhmanov R.F., Abzalov R.M., Asfandiyanov A.Z., Baimbetova L.R., Balkov V.A., Bayanov M.G. Atlas of the Republic of Bashkortostan. Ufa: Kitap; 2005. 419 p. (In Russ.)

Beck H.E., Van Dijk A.I., Levizzani V., Schellekens J., Miralles D.G., Martens B., De Roo A. MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017;21(1):589–615.

Bode C.A., Limm M.P., Power M.E., Finlay J.C. Subcanopy solar radiation model: predicting solar radiation across a heavily vegetated landscape using LiDAR and GIS solar radiation models. *Remote Sensing of Environment*. 2014;154:387–397. doi: 10.1016/j.rse.2014.01.028

Boilley A., Wald L. Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface. *Renewable Energy*. 2015;75:135–143. doi: 10.1016/j.renene.2014.09.042

Bonan G.B. Climate change and terrestrial ecosystem modeling. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2019. 551 p.

Breda N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*. 2003;54(392):2403–2417.

Calders K., Origo N., Burt A., Disney M., Nightingale J., Raunonen P., Lewis P. Realistic forest stand reconstruction from terrestrial LiDAR for radiative transfer modelling. *Remote Sensing*. 2018;10(6):933. doi: 10.3390/rs10060933

Campbell G.S., Norman J.M. An introduction to environmental biophysics. 2nd ed. New York: Springer; 1998. 286 p.

Chen J.M., Rich P.M., Gower S.T., Norman J.M., Plummer S. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997;102(D24):29429–29443. doi: 10.1029/97JD01107

CID Bio-Science. CI-110 Plant Canopy Imager: user manual. Camas, WA URL: https://cid-inc.com/static/media/uploads/manuals/ci110_manual.pdf (accessed: 16.01.2026).

Clark D.B., Clark D.A., Rich P.M., Weiss S., Oberbauer S.F. Landscape-scale evaluation of understory

light and canopy structure: methods and application in a neotropical lowland rain forest. *Canadian Journal of Forest Research*. 1996;26:747–757. doi: 10.1139/x26-084

Connell J. H., Lowman M. D., Noble I. R. Subcanopy gaps in temperate and tropical forests. *Australian Journal of Ecology*. 1997;22:163–168. doi: 10.1111/j.1442-9993.1997.tb00655.x

Copernicus Climate Change Service (C3S). ERA5-Land hourly data from 1950 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land> (accessed: 16.01.2026).

Englund S. R., O'Brien J. J., Clark D. B. Evaluation of digital and film hemispherical photography and spherical densiometry for measuring forest light environments. *Canadian Journal of Forest Research*. 2000;30(12):1999–2005. doi: 10.1139/x00-116

Fang H., Baret F., Plummer S., Schaepman-Strub G. An overview of global leaf area index (LAI): methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*. 2019;57:739–799. doi:10.1029/2018RG000608

Grant R. H. Partitioning of biologically active radiation in plant canopies. *International Journal of Biometeorology*. 1997;40(1):26–40. doi: 10.1007/BF02439408

Gupta H. V., Kling H., Yilmaz K. K., Martinez G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. 2009;377:80–91. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

Gutschick V. P. Joining leaf photosynthesis models and canopy photon-transport models. Photon-vegetation interactions: applications in optical remote sensing and plant ecology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1991. P. 501–535. doi: 10.1007/978-3-642-75389-3_16

Hardy J. P., Melloh R., Koenig G., Marks D., Winstral A., Pomeroy J. W., Link T. Solar radiation transmission through conifer canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2004;126(3–4):257–270. doi: 10.1016/j.agrformet.2004.06.012

Hellstrom R. A. Forest cover algorithms for estimating meteorological forcing in a numerical snow model. *Hydrological Processes*. 2000;14(18):3239–3256. doi: 10.1002/1099-1085

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Thépaut J. N. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020;146:1999–2049. doi: 10.1002/qj.3803

Jarvis P. G., Leverenz J. W. Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. *Physiological plant ecology IV: Ecosystem processes: Mineral cycling, productivity and man's influence*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1983. P. 233–280. doi: 10.1007/978-3-642-68156-1_9

Jennings S. B., Brown N. D., Sheil D. Assessing forest canopies and understory illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry*. 1999;72(1):59–74. doi: 10.1093/forestry/72.1.59

Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2004;121:19–35. doi: 10.1016/j.agrformet.2003.08.027

Knyazikhin Y., Marshak A., Myneni R. B. Three-dimensional radiative transfer in vegetation canopies and cloud-vegetation interaction. *Three Dimensional Radiative Transfer in the Cloudy Atmosphere*. 2005. P. 617–652. doi: 10.1007/3-540-28519-9_14

Leuchner M., Hertel C., Rötzer T., Seifert T., Weigt R., Werner H., Menzel A. Solar radiation as a driver for growth and competition in forest stands. *Growth and defence in plants: Resource allocation at multiple scales*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2012. P. 175–191. doi: 10.1007/978-3-642-30645-7_8

Lin T. C., Chiang J. M. Applications of hemispherical photographs in studies of forest ecology. *Taiwan Journal of Forest Science*. 2002;17(3):387–400.

Martens S. N., Breshears D. D., Meyer C. W. Spatial distributions of understory light along the grassland/forest continuum: effects of cover, height, and spatial pattern of tree canopies. *Ecological Modelling*. 2000;126(1):79–93. doi: 10.1016/S0304-3800(99)00188-X

Monsi M., Saeki T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*. 1953;14:22–52.

Mücke W., Hollaus M. Modelling light conditions in forests using airborne laser scanning data. *Proceedings of the SilviLaser*. 2011. P. 1–8. doi: 20.500.12708/42862

Niinemets Ü. Is there a species spectrum within the worldwide leaf economics spectrum? Major variations in leaf functional traits in the context of canopy structure and climate. *New Phytologist*. 2015;205:1–20. doi: 10.1111/nph.13001

Nijssen B., Lettenmaier D. P. A simplified approach for predicting shortwave radiation transfer through boreal forest canopies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1999;104(D22):27859–27868. doi: 10.1029/1999JD900377

Nilson T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agricultural Meteorology*. 1971;8:25–38. doi: 10.1016/0002-1571(71)90092-6

Oliver C. D., Osawa A., Camp A. Forest dynamics and resulting animal and plant population changes at the stand and landscape levels. *Journal of Sustainable Forestry*. 1997;6(3–4):281–312. doi: 10.1300/J091v06n03_05

Parker G. G., Davis M. M., Chapotin S. M. Canopy light transmittance in forest ecosystems. *Tree Physiology*. 2001; 22:115–130. doi: 10.1093/treephys/22.2.147

Pearcy R. W. Sunflecks and photosynthesis in plant canopies. 1990.

Peng S., Zhao C., Xu Z. Modeling spatiotemporal patterns of understory light intensity using airborne laser scanner (LiDAR). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014;97:195–203. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.003

QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Version 3.44. Open Source Geospatial Foundation Project. URL: <https://qgis.org> (accessed: 16.01.2026).

Rich P. M. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Reviews*. 1990;5(1):13–29. doi: 10.1080/02757259009532119

Ross J. The radiation regime and architecture of plant stands. Springer Science & Business Media; 2012. Vol. 3.

Ryu Y., Baldocchi D. D., Kobayashi H., Van Ingen C., Li J., Black T. A., Rouspard O. Integration of MODIS land

and atmosphere products with a coupled-process model to estimate gross primary productivity and evapotranspiration from 1 km to global scales. *Global Biogeochemical Cycles*. 2011;25(4). doi: 10.1029/2011GB004053

Sipe T. W., Bazzaz F. A. Gap partitioning among maples (*Acer*) in central New England; survival and growth. *Ecology*. 1995;76:1587–1602. doi: 10.2307/1938160

Smith A. P., Hogan K. P., Idol J. R. Spatial and temporal patterns of light and canopy structure in a lowland tropical moist forest. *Biotropica*. 1992;24:503–511. doi: 10.2307/2389012

U.S. Geological Survey (USGS). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (accessed: 16.01.2026).

Urraca R., Gobron N. Temporal stability of long-term satellite and reanalysis products to monitor snow cover trends. *The Cryosphere*. 2023;17(2):1023–1052. doi: 10.5194/tc-17-1023-2023

Urraca R., Huld T., Gracia-Amillo A., Martinez-de-Pison F. J., Kaspar F., Sanz-Garcia A. Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground measurements. *Solar Energy*. 2018;164:339–354. doi: 10.1016/j.solener.2018.02.059

Watson D. J. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*. 1947;11(41):41–76.

Whitford K. R., Colquhoun I. J., Lang A. R. G., Harper B. M. Measuring leaf area index in a sparse eucalypt forest: a comparison of estimates from direct measurement, hemispherical photography, sunlight transmittance and allometric regression. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1995;74(3–4):237–249. doi: 10.1016/0168-1923(94)02189-Q

Wigmosta M. S., Vail L. W., Lettenmaier D. P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*. 1994;30(6):1665–1679. doi: 10.1029/94WR00436

Wilczak J. M., Akish E., Capotondi A., Compo G. P. Evaluation and bias correction of the ERA5 reanalysis over the United States for wind and solar energy applications. *Energies*. 2024;17(7):1667. doi: 10.3390/en17071667

Willmott C. J., Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*. 2012;30:79–82. doi: 10.3354/cr030079

Yan Y., Xu Y., Yue S. A high-spatial-resolution dataset of human thermal stress indices over South and East Asia. *Scientific Data*. 2021;8(1):229. doi: 10.6084/m9.figshare.15149010

Yan G., Hu R., Luo J., Weiss M., Jiang H., Mu X., Zhang W. Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019;265:390–411. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.11.033

Поступила в редакцию / received: 10.03.2026; принята к публикации / accepted: 01.06.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Широких Павел Сергеевич

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: shirpa@mail.ru

Туктамышев Ильшат Ринатович

канд. биол. наук, младший научный сотрудник

e-mail: ishatik@yandex.ru

Жигунова Светлана Николаевна

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: zigusvet@yandex.ru

Бикбаев Ильнур Гатиатович

младший научный сотрудник

e-mail: ilnur.bikbaev.90@mail.ru

Гимазетдинов Вазир Дамирович

младший научный сотрудник

e-mail: vazir.gimazetdinov@mail.ru

Гулов Давут Меретгельдиевич

канд. биол. наук, младший научный сотрудник

e-mail: davut.gulov.96@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Shirokikh, Pavel

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher

Tuktamyshev, Ilshat

Cand. Sci. (Biol.), Junior Researcher

Zhigunova, Svetlana

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher

Bikbaev, Ilnur

Junior Researcher

Gimazetdinov, Vazir

Junior Researcher

Gulov, Davut

Cand. Sci. (Biol.), Junior Researcher

Мартыненко Василий Борисович

д-р биол. наук, главный научный сотрудник

e-mail: vb-mart@mail.ru

Баишева Эльвира Закирьяновна

д-р биол. наук, главный научный сотрудник

e-mail: elvbai@mail.ru

Габбасова Дилара Тагировна

канд. биол. наук, научный сотрудник

e-mail: dilara.gt@yandex.ru

Ахметова Миляуша Ринатовна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: mishaulya@yandex.ru

Харисов Денис Рамилевич

аспирант

e-mail: denizharisoff@yandex.ru

Martynenko, Vasiliy

Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher

Baisheva, Elvira

Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher

Gabbasova, Dilara

Cand. Sci. (Biol.), Researcher

Akhmetova, Milyausha

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Kharisov, Denis

Doctoral Student