COMPARISON OF TWO SCHEMES OF RADIATION TRANSFER WITHIN THE VEGETATION CANOPY BASED ON MEASUREMENTS AT THE MUKHRINO CARBON POLYGON

Pavinsky S.V.^{1*}, Stepanenko V.M.^{2,3,1}, Dyukarev E. A.^{4,3}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва

³Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

⁴Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

*stanislavpavinskij@gmail.com

Citation: Pavinsky S.V., Stepanenko V.M., Dyukarev E.A. 2025. Comparison of two schemes of radiation transfer within the vegetation canopy based on measurements at the Mukhrino Carbon Polygon. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 16(2): 58-68.

DOI: 10.18822/edgcc642575

АННОТАЦИЯ

С использованием данных автоматических наблюдений, проводимых на карбоновом полигоне «Мухрино», были сопоставлены две схемы расчёта переноса радиации внутри растительного полога: схема многократных отражений и модель переноса радиации в двухпотоковом приближении. Показано, что последняя имеет чувствительность как к заданию пропорции между прямой и рассеянной радиацией, поступающей из атмосферы, так и к уточнению параметров отражения и пропускания для листьев путем разбиения спектра на несколько частей. Продемонстрировано, что при задании одних и тех же оптических параметров двухпотоковая схема имеет более высокую степень согласованности с наблюдениями, чем схема многократных отражений.

Ключевые слова: солнечная радиация, модели переноса радиации внутри растительного полога, карбоновый полигон «Мухрино», автоматические наблюдения.

ABSTRACT

Models of radiation transfer within vegetation cover are an important component of the Earth system models, since solar radiation is the main source of energy on Earth and determines the thermal regime of the soil. It also significantly depends on the interception of the radiation by vegetation. The aim of this work is to evaluate the accuracy of a two-stream model of radiation transfer and a multiple reflection model that approximates radiation fluxes within vegetation cover using geometric series. Validation and comparison of the models were conducted using automatic observations recorded in a forest ecosystem at the Mukhrino carbon polygon. It is shown that the latter model is sensitive both to setting the proportion between atmospheric direct and diffuse radiation coming from the atmosphere and to refining the reflection and transmission parameters for leaves by dividing the spectrum into several parts. It is demonstrated that when setting the same optical parameters, the two-stream scheme has a higher degree of consistency with observations than the multiple reflection scheme.

Keywords: solar radiation, models of radiation transfer in vegetation canopies, Mukhrino Carbon Polygon, automatic observations.

ВВЕДЕНИЕ

Основным источником энергии на Земле является солнечная радиация. Она определяет абсолютные значения и суточные колебания температуры поверхности, которой она достигает, и, как следствие, устанавливает термический режим атмосферы. Температурный режим почвы, покрытой растительностью, сильно отличается от оголенных участков вследствие поглощения части радиации растительным пологом, который, в свою очередь, тратит часть приходящей энергии на транспирацию и поэтому нагревается менее существенно. В метеорологических, гидрологических моделях и моделях Земной системы реализованы различные схемы переноса радиации внутри растительного полога. Они необходимы для расчета теплообмена подстилающей поверхности с приземным слоем, а также для достоверного воспроизведения различных биогеохимических процессов внутри почвы – одной из составляющих круговорота углерода и метана. Все это особенно значимо при моделировании на длительные промежутки времени и сказывается на точности прогноза изменения климата. Помимо актуальности в моделировании динамики окружающей среды, разработка радиационных схем также представляет самостоятельный интерес.

Существует несколько подходов к моделированию процессов радиационного переноса внутри растительности. Среди них можно выделить два наиболее распространенных подхода: статистический метод и метод, основанный на решении уравнения переноса. Также существует подход, в котором растительный полог представляет собой слой, пропускающий известную часть радиации. Внутри растительности допускаются множественные переотражения, а потоки радиации описываются суммами геометрической прогрессии. Рассмотрим кратко эти подходы ниже.

Статистический метод или метод Монте-Карло подразумевает нахождение среднестатистических характеристик марковской цепи столкновений лучей света с объектами. Этому методу посвящено достаточно большое количество работ, в том числе обзорная статья [Disney et al., 1999], диссертация [Govaerts, 1996], а также публикации российских исследователей [Sergeev, Levashova, 2022; Levashova, Mukhartova, 2018]. Для расчета траекторий лучей света - «фотонов» необходимо детальное задание геометрии растительности, с которой они взаимодействуют, в частности расположение растений в пространстве, их листьев, стеблей и стволов. Например, в работе [Sergeev, Levashova, 2022] в рамках такого подхода рассмотрено взаимодействие коротковолнового излучения с ветвями березы, а в статье [Levashova, Mukhartova, 2018] для расчета радиационного переноса была разработана фрактальная модель дерева. В силу вычислительной трудоёмкости данный метод применим для ограниченных территорий, а задание большого количества геометрических параметров растительности усложняет обеспечение необходимыми внешними данными. В то же время детальность подобных моделей позволяет использовать их результаты как данные для валидации более простых схем радиационного переноса.

Способ расчета потоков радиации внутри растительного полога путем нахождения решения уравнения переноса излучения получил широкое распространение в задачах гидрометеорологии. Этот метод детально изложен в монографии [Ross, 1981], в особенности там описаны различные методы параметризации фитометрических характеристик растения и их распределения по высоте. Помимо этого, в книге приведено уравнение переноса радиации внутри неоднородного растительного полога, излагаются основные приближения и некоторые частные решения; слой растительности при этом считается мутной сплошной средой. В работах [Qiudan, Shufen, 2006, 2007] представлена модифицированная на случай нескольких вертикальных слоёв растительности радиационная схема, а также аналитическое решение уравнения переноса. В публикации [Levashova, Mukhartova, 2018] представлена радиационная схема, учитывающая горизонтальную неоднородность растительности.

В работах [Dickinson, 1983; Sellers, 1985] описано двухпотоковое приближение уравнения переноса, аналогичное применяемому для атмосферы [Coakley, Chylek, 1975]. Оно основано на предположении о том, что интенсивность излучения в направлениях верхней и нижней полусфер не зависит от угла распространения. Это допущение позволяет линеаризовать это уравнение и упрощает его аналитическое решение. Полное изложение этого метода, включая спецификацию параметров, таких как коэффициент отражения и коэффициент пропускания для листьев и стволов в области видимого и ближнего инфракрасного участков спектра, коэффициент отклонения от случайного распределения наклона листьев, а также альбедо почвы, изложено в техническом описании [Bonan, 1996]. Данная схема переноса радиации внутри полога реализована в модели Земной системы ИВМ РАН [Volodin et al., 2016; Volodin, Gritsun, 2020] в рамках блока деятельного слоя суши [Volodin, 2016; Stepanenko et al., 2024] ИВМ РАН-МГУ/ТегМ.

Один из наиболее простых подходов предполагает расчет баланса коротковолновой радиации растительного покрова и почвы с допущением, что известная часть солнечной радиации проходит сквозь растительность, представленную одним слоем, достигая почвы, а часть отражается от растительного полога и поверхности земли (альбедо также считается известным); отражение и поглощение внутри слоя происходит бесконечное число раз, что приводит к выражению результирующего потока через геометрическую прогрессию. Этот подход применен, например, в модели снежного покрова и поверхности земли SNOWPACK [Gouttevin et al., 2015].

Цель данной работы – оценить качество двухпотоковой модели переноса радиации [Bonan, 1996] и модели многократного отражения [Gouttevin et al., 2015] на основе данных автоматических наблюдений, проводимых в лесной экосистеме на карбоновом полигоне «Мухрино». Эти модели

рассматриваются в качестве альтернативных опций для описания радиационного баланса полога растительности в модели деятельного слоя суши TerM.

Задачи работы:

- оценить важность учёта зависимости оптических параметров растительности от длины волны: достаточно ли разбиения спектра на области видимого и ближнего инфракрасного излучения или необходимо привлекать более детальное спектральное распределение оптических величин;
- определить чувствительность двухпотоковой модели к соотношению потоков рассеянной и прямой радиации, поступающих из атмосферы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Модель двухпотокового приближения уравнения переноса

Уравнения переноса радиации в двухпотоковом приближении имеют следующий вид:

$$-\overline{\mu}\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}(L(z)+S(z))} + (1-(1-\beta)\omega)I \uparrow -\omega\beta I \downarrow = \omega \,\overline{\mu} \, k \, \beta_0 \, e^{-k(L(z)+S(z))}, \#(1)$$
$$\overline{\mu}\frac{\mathrm{d}I \downarrow}{\mathrm{d}(L(z)+S(z))} + (1-(1-\beta)\omega)I \downarrow -\omega\beta I \uparrow = \omega \,\overline{\mu} \, k \, (1-\beta_0) \, e^{-k(L(z)+S(z))}. \#(2)$$

Они записаны с допущением, что интенсивность рассеянного излучения I изотропна во всех направлениях верхней и нижней полусфер: $I(L(z) + S(z), \mu) = I \uparrow, I(L(z) + S(z), -\mu) = I \downarrow$. Здесь μ обозначает косинус зенитного угла в пределах верхней полусферы, а $-\mu$ – нижней. L(z) и S(z) – листовой и стеблевый индексы, зависящие от высоты z, м; они принимаются равными нулю на верхней границе крон. Интенсивности рассеянного излучения в уравнениях (1-2) нормированы на плотность потока прямой солнечной радиации на верхней границе растительности. В, В0 – параметры рассеяния наверх ($\mu > 0$) для рассеянного и прямого излучения, соответственно, ω – коэффициент рассеяния отдельных листьев (иголок) и стеблей, представляющий собой сумму коэффициента отражения и пропускания листа или стебля, $G(\mu)$ – площадь проекции листа единичной площади на плоскость, перпендикулярную направлению μ . $G(\mu) = 0.5 - 0.633\chi - 0.33\chi^2$; χ – мера упорядоченности расположения листьев относительно горизонта: преимущественно горизонтально $(\chi = 1)$, хаотично, что характерно для хвои $(\chi = 0.01)$, или вертикально $(\chi = -1)$. Значения параметра для разных типов растительности приведены в [Bonan, 1996]. Использовано обозначение $\overline{\mu} = \int_0^1 \mu/G(\mu) \, d\mu$, а также $k = \frac{G(\mu')}{\mu'}$, μ' – косинус зенитного угла нисходящего из атмосферы излучения. Все величины в уравнениях (1-2) безразмерны.

Решение системы дифференциальных уравнений производится отдельно для прямой и для рассеянной нисходящей из атмосферы радиации. Граничные условия для прямой радиации выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} I \downarrow = 0, & L + S = 0, \\ I \uparrow = \alpha_{soil} (I \downarrow + e^{-k(L+S)}), & L + S = max(L+S); \end{cases}$$
^{#(3)}

то есть на верхней границе крон рассеянная нисходящая радиация равна нулю, а у почвы, где сумма листового и стеблевого индекса достигает максимума, интенсивность направленного в верхнюю полусферу рассеянного излучения есть сумма отраженной от почвы прямой и рассеянной радиации; α_{soil} – альбедо почвы. В условиях только рассеянного нисходящего из атмосферы излучения правая часть в уравнениях (1-2) равна нулю, а интенсивности нормируются на рассеянную радиацию. Задаются следующие граничные условия:

$$\begin{cases} I \downarrow = 1, & L + S = 0, \\ I \uparrow = \alpha_{soil} I \downarrow , & L + S = max(L + S); \end{cases} #(4)$$

Уравнения (1-2) – это линейная неоднородная система дифференциальных уравнений, она имеет аналитическое решение. Зная его, можно найти долю рассеянной и прямой коротковолновой радиации, которая проникла через растительный полог и достигла поверхности почвы. Ниже представлено уравнение для поглощенной пологом коротковолновой радиации, нормированной на нисходящее из атмосферы прямое излучение:

$$\overline{I}^{\mu} = 1 - I_{out} \uparrow^{\mu} - (1 - \alpha_{soil}) I_{out} \downarrow^{\mu} - (1 - \alpha_{soil}) e^{-k(L+S)_{H}}, \#(5)$$

где $I_{out} \uparrow^{\mu}$ и $I_{out} \downarrow^{\mu}$ – рассеянная радиация, нормированная на нисходящую прямую, распространяющаяся из полога в направлении атмосферы и почвы соответственно. $(L + S)_H$ – сумма листового и стеблевого индекса на нижней границе растительности; $e^{-k(L+S)_H}$ – прямая нисходящая из атмосферы радиация, дошедшая до почвы; α_{soil} – альбедо почвы, зависящее от ее влажности и цвета [Bonan, 1996].

Уравнение поглощённой пологом коротковолновой радиации, нормированной на нисходящее рассеянное излучение:

$$\overline{I} = 1 - I_{out} \uparrow -(1 - \alpha_{soil})I_{out} \downarrow \#(6)$$

где I_{out} ↑ и I_{out} ↓ — рассеянная радиация, нормированная на нисходящую рассеянную, распространяющаяся от полога в направлении атмосферы и почвы соответственно.

Оптические параметры, такие как отражательная способность и коэффициент пропускания, сильно варьируются в зависимости от длины волны, поэтому уравнения (1-2), (5-6) имеет смысл рассматривать для ограниченных диапазонов длин волн. На настоящий момент потоки радиации в модели деятельного слоя суши TerM рассчитываются только для двух диапазонов длин волн – видимого спектра (380-760 нм) и ближнего инфракрасного (760-1400 нм). Используемые оптические параметры приведены в [Вопаn, 1996].

В ходе данной работы программная реализация схемы расчета потоков была доработана таким образом, чтобы она позволяла разбивать область спектра на произвольное количество интервалов и считать потоки с параметрами, осредненными по этим интервалам, а не по всему видимому и ближнему инфракрасному спектру. Это было сделано путем задания значений оптических параметров как кусочно-линейных функций.

Без уточнения некоторых оптических параметров такое улучшение не имело бы смысла. Поэтому на основе данных измерений [Hovi, Rautiainen, 2022; Noda et al., 2014] были уточнены коэффициенты отражения и пропускания для листьев хвойного вечнозеленого леса. В таблице 1 приведены их значения для функционального типа растительности «вечнозелёный хвойный лес», задающие кусочно-линейную функцию от длины волны.

| Табли | ща | 1. 3 | Значения | коэфф | ициентов | отр | ажения | И | прог | пускания | ЛИ | стьев | для | типа | растителы | юсти |
|-------|------|------|-------------|---------|------------|-------|---------|-----|--------|-----------|------|---------|-------|---------|------------|-------|
| «вечн | озе. | лёнь | ий хвойн | ый лес» | на основ | е даг | нных [І | Iov | ri, Ra | utiainen, | 202 | 22; No | da et | al., 20 | 014] | |
| Table | 1. | Leaf | f reflectar | nce and | transmitta | ince | values | for | the | "evergree | en n | needlel | eaf f | orest" | vegetation | type, |

| according to [Hovi, Rautiainen, 2022; Noda et al., 2014] | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| Коэффициент | 0.05 | 0.05 | 0.10 | 0.05 | 0.37 | 0.36 | 0.33 | 0.34 | 0.07 | 0.20 | |
| отражения | | | | | | | | | | | |
| Коэффициент | 0.00 | 0.03 | 0.08 | 0.03 | 0.35 | 0.35 | 0.31 | 0.32 | 0.05 | 0.16 | |
| пропускания | | | | | | | | | | | |

680

500

380

HM

550

Радиационная модель, используемая в SNOWPACK

750

1170

1120

1450

1600

1300

В модели SNOWPACK [Gouttevin et al., 2015] используется радиационная схема [Тасопеt et al., 1986], адаптированная [Stähli et al., 2009]. Растительный полог рассматривается как слой, взаимодействующий с определённой долей σ_f падающей на него радиации. Он имеет альбедо однократного рассеяния α_{skin} . Поверхность почвы имеет альбедо α_{soil} . Коротковолновая радиация, попавшая внутрь полога, отражается от растительности к почве и от почвы вверх. Процесс многократных отражений аппроксимируется бесконечными суммами потоков, поглотившихся почвой и растительностью, а также потоков, ушедших в атмосферу. Применяя формулу суммы бесконечной геометрической прогрессии, можно получить следующие уравнения коротковолновых балансов для верхней границы растительности ($SW_{net,skin}$) и поверхности почвы ($SW_{net,soil}$):

$$SW_{net,skin} = SW \downarrow (1 - \alpha_{skin})\sigma_f \left(1 + \frac{\alpha_{soil}(1 - \sigma_f)}{1 - \sigma_f \alpha_{soil} \alpha_{skin}} \right), \#(7)$$
$$SW_{net,soil} = \frac{SW \downarrow (1 - \alpha_{soil})(1 - \sigma_f)}{1 - \sigma_f \alpha_{soil} \alpha_{skin}}, \#(8)$$

где *SW* \downarrow – нисходящая из атмосферы суммарная (прямая и рассеянная) коротковолновая радиация, Вт м⁻². Считается, что коэффициент σ_f зависит от листового индекса *LAI* (м² м⁻²) по формуле $\sigma_f = 1 - \exp(-k_{LAI}LAI)$, где k_{LAI} принимает характерные значения в диапазоне 0.4-0.8 [Gouttevin et al., 2015].

Данная схема является одной из наиболее простых параметризаций переноса радиации внутри растительного полога. Оптические параметры, участвующие в ней, также можно варьировать в зависимости от длины волны. В силу своей простоты она с ошибкой отражает реальные физические процессы, поэтому от нее стоит ожидать результат, который в меньшей степени согласуется с измерениями, чем результат модели, основанной на решении уравнения переноса, описанной выше. Однако из-за малого количества параметров она довольно просто может быть откалибрована.

Объекты

Измерения, на основе которых сравнивались две радиационные модели, проводились на вышке пульсационных измерений. Она расположена на территории карбонового полигона «Мухрино» (60.89 с.ш., 68.71 в.д.), в темнохвойно-осиновом зеленомошном лесу с максимальной высотой деревьев 28 метров (Рис. 1). Потоки нисходящей и уходящей коротковолновой радиации над лесом измерялись на высоте 40 метров. Период измерений – 20 июня – 18 июля 2024 года. Шаг измерений – 10 секунд. Стоит отметить, что на данной метеостанции измеряется довольно большое количество параметров, в том числе радиационный баланс (коротковолновая + длинноволновая радиация) близ поверхности земли, а также ее температура и температура воздуха на разных высотах. Это позволяет рассчитывать потоки длинноволновой радиации у земли, однако в таком случае значения баланса будут являться отчасти модельными, так как для нахождения длинноволнового баланса почвы необходимо также рассчитать поток длинноволнового излучения из полога и атмосферы, направленный к земле. В силу поправки расчета результат будет отличаться от наблюдавшихся в действительности значений, поэтому модельные расчеты баланса коротковолновой радиации у поверхности почвы не валидировались.



Рис. 1. Темнохвойно-осиновый зеленомошный лес около высотной мачты карбонового полигона «Мухрино», по данным измерений которой верифицировались радиационные схемы *Fig.* 1. Forest around the eddy covariance station at the Mukhrino carbon measurement supersite. Based on the station's measurements, the radiation schemes were verified

Для измерений коротковолновых потоков над растительностью использовался прибор Кірр & Zonen CNR 4, диапазон длин волн – 300-2800 нм. Его чувствительность для данного диапазона составляет 7-20 мкВ Br^{-1} м². Ошибка, связанная с зенитным углом приходящих к прибору лучей (при значениях менее 80°), составляет менее 20 Вт м⁻² при плотности потока 1000 Вт м⁻². Для измерения баланса радиации под пологом леса использовался прибор Кірр & Zonen NR Lite с диапазоном длин волн 0.2-100 мкм, чувствительность – 10 мкВ Br^{-1} м², погрешность, обусловленная углом наклона приходящей радиации, составляет менее 30 Вт м⁻².

Методы расчета

Валидация моделей проводилась путем сравнения результатов моделирования двух радиационных схем с данными измерений потоков коротковолновой радиации над растительным пологом. Перед тем как перейти к анализу получившихся результатов, остановимся на спецификации параметров моделей и внешних данных.

Как для модели, основанной на переотражениях, так и для двухпотокового приближения уравнения переноса необходимо задание листового индекса *LAI*. Он был рассчитан на основании данных измерений со спутника SuperView-1 с мультиспектральным разрешением 2 метра. Диапазоны сенсора: ближний ИК – 770-890 нм, красный – 630-690 нм. Листовой индекс рассчитывался аналогично статье [Saito et al., 2001] следующим образом: *LAI* = 0.57 *exp*(2.33*NDVI*), где *NDVI* = $\frac{NIR-R}{NIR+R}$. *NIR* – отражательная способность в области ближнего ИК-диапазона, *R* – отражательная способность в области видимого красного цвета. Было получено значение листового индекса 3.5.

Коэффициент затухания k_{LAI} , используемый для вычисления доли радиации, с которой взаимодействует растительный полог (в схеме SNOWPACK), был принят равным 0.6, тогда как в работе [Gouttevin et al., 2015] его допустимые значения составляют 0.4-0.8.

Для двухпотоковой модели необходимо задавать информацию о пропорции прямой и рассеянной радиации, поступающей из атмосферы. Однако измерения отдельно прямой и рассеянной компонент радиации на данной станции не проводятся. Их соотношение было задано на основе данных многолетних наблюдений, проведенных на метеорологической станции Сытомино. Она находится в одноименном селе, расположенном на реке Оби, примерно в 150 км к востоку от карбонового полигона. Данные со станции о суммах прямой и рассеянной солнечной радиации при средних условиях облачности за июль приведены в [Pilnikova, 1998], табл. 1.8, 1.9. Средняя сумма прямой радиации в июле – 341 МДж м⁻², а рассеянной – 290 МДж м⁻². Поэтому доля прямой радиации от суммарной была принята равной 341/(290+341) = 0.54.

Для разбиения спектра радиации на некоторое число промежутков необходимо также обладать информацией о зависимости монохроматической интенсивности потока радиации, поступающего из атмосферы, от длины волны. В таблице 2, составленной на основе стандарта [ASTM G173-03, 2003], приведена информация об отношении плотности потока на определенных интервалах длин волн к суммарной плотности потока нисходящей коротковолновой радиации. Доля всего видимого излучения была задана как 0.6. Распределение солнечной радиации по спектру зависит от высоты солнца, аэрозольного состава воздуха [Gates, 1966], а также от других особенностей воздушной массы, сквозь которую проходит солнечный свет. В данной работе распределение задано постоянным, и эти факторы не учитываются.

При модельных расчётах с разбиением спектра на видимый и ближний инфракрасный диапазоны использовались оптические параметры, представленные в документации [Bonan, 1996]. Коэффициент отражения листа для типа растительности «вечнозелёный хвойный лес» в ней задано как 0.07 и 0.35 для видимой и ближней ИК областей спектра, соответственно. Значения коэффициента пропускания листа – 0.05 и 0.1 соответственно. Коэффициенты отражения веток и стволов – 0.16 и 0.39. Коэффициенты пропускания веток и стволов – 0.001 и 0.001. Альбедо почвы в модели [Bonan, 1996] рассчитывается с учетом ее влажности и зависит от типа почвы, но не зависит от угла падения лучей, то есть параметр одинаков как для рассеянного, так и для прямого излучения. Всего в модели представлено 8 типов почв от темной к светлой, а также почвы пустынь. В данной работе альбедо почвы оценивалось как средневзвешенное значение по 8 типам при 0.2 объема воды на единицу объема почвы. Для видимого излучения альбедо составило 0.099, для ближнего инфракрасного – 0.184.

В модельных экспериментах с разбиением спектра на 8 диапазонов в схеме двухпотокового приближения уравнения переноса [Bonan, 1996] использовались параметры отражения и

пропускания, представленные в таблице 1. По этим значениям строился кусочно-линейный интерполянт, осредняя который по диапазонам из таблицы 2 были получены значения параметров отражения и пропускания для 8 интервалов (Табл. 2). Коэффициенты пропускания и отражения для веток и альбедо почвы не изменялись.

Альбедо однократного рассеяния листьев для модели [Gouttevin et al., 2015] задавалось таким образом: для всей области коротковолновой радиации как осредненное из значений коэффициента отражения для видимой и ИК-частей спектра [Bonan, 1996] ($\alpha_{skin} = 0.07 \frac{760-380}{1400-380} + 0.35 \frac{1400-760}{1400-380}$); при разбиении на 8 интервалов, так же как и для двухпотоковой схемы – из таблицы 2. Альбедо почвы было задано аналогичным образом: $\alpha_{soil} = 0.1 \frac{760-380}{1400-380} + 0.184 \frac{1400-760}{1400-380}$. Все графики были построены с осреднением потоков за 5-минутные интервалы.

Таблица 2. Средняя доля интенсивности радиации в различных диапазонах длин волн в суммарном потоке коротковолнового излучения у поверхности Земли [ASTM G173-03, 2003]; коэффициенты отражения и пропускания листьев [Hovi, Rautiainen, 2022; Noda et al., 2014]

Table 2. The average proportion of radiation intensity across different wavelength bands in the total shortwave radiation flux at the Earth's surface [ASTM G173-03, 2003]; leaf reflectance and transmittance values [Hovi, Rautiainen, 2022; Noda et al., 2014]

| L / | | / | | | | | | |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|------|-------|-------|
| Доля | 0.14 | 0.16 | 0.15 | 0.13 | 0.18 | 0.12 | 0.07 | 0.05 |
| Коэффициент | 0.05 | 0.08 | 0.07 | 0.21 | 0.37 | 0.36 | 0.34 | 0.28 |
| отражения | | | | | | | | |
| Коэффициент | 0.01 | 0.06 | 0.05 | 0.19 | 0.35 | 0.35 | 0.33 | 0.26 |
| пропускания | | | | | | | | |
| Диапазон | 380-490 | 490-580 | 580-670 | 670-760 | 760-920 | 920- | 1080- | 1240- |
| длины | | | | | | 1080 | 1240 | 1400 |
| волны, нм | | | | | | | | |

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных результатов

Баланс коротковолновой радиации над растительным пологом – это разность нисходящего и уходящего в атмосферу (отраженного) коротковолнового излучения. Так как нисходящая компонента является входной величиной для моделей и берется из данных наблюдений, валидацию целесообразно проводить путем сравнения уходящих в атмосферу потоков коротковолновой радиации.

Рассмотрим временной ход отраженной радиации (Рис. 2). Видно, что модель, основанная на двухпотоковом приближении уравнения переноса, имеет в целом хорошую степень согласованности с данными наблюдений. Однако версия с разбиением спектра на два диапазона занижает уходящие в атмосферу потоки коротковолновой радиации более чем на 20 Вт м⁻² вблизи полудня, тогда как версия с восемью диапазонами завышает на 15-20 Вт м⁻². Расхождение порядка 40 Вт м⁻² между двумя конфигурациями связано прежде всего с различным заданием коэффициента пропускания хвои. В версии с двумя диапазонами [Вопап, 1996] он принят равным 0.1 в области ближнего инфракрасного излучения, что значительно ниже измеренных значений [Hovi, Rautiainen, 2022; Noda et al., 2014], на основе которых задавались значения пропускания для восьмидиапазоны версии (см. Табл. 1), и которые составляют в среднем более 0.3 для ближнего ИК диапазона. Таким образом, во втором случае полог поглощает меньшую долю проходящей сквозь него радиации, как следствие, до почвы доходит больше излучения из атмосферы, доля которой переотражается обратно в направлении полога. В конечном итоге значения уходящей в атмосферу радиации будут также выше.

Значения нисходящей радиации в несколько раз превосходят величины отраженной, поэтому различия в первые десятки Вт м⁻² будут слабо заметны на значениях балансов. Это отражено на рисунке 3 (левая диаграмма). Среднеквадратическое отклонение результатов двухпотоковой модели составило 10.6 Вт м⁻² и 8.4 Вт м⁻² для версии с двумя и восемью диапазонами соответственно. Это говорит о том, что разбиение спектра в целом повышает качество моделирования, хоть и незначительно.



Рис. 2. Временной ход плотностей потоков отраженной радиации; доля прямой радиации от нисходящей – 0.54

Fig. 2. Temporal variation of reflected radiation flux densities; the proportion of direct radiation in the total downward flux is 0.54



Рис. 3. Диаграммы рассеяния балансов коротковолновой радиации над лесом при разных разбиениях спектра. Левый график – двухпотоковая модель (доля прямой радиации от нисходящей – 0.54), правый – модель многократных отражений

Fig. 3. Scatter plots of shortwave radiation balance over the forest for different spectral discretizations. The left plot shows results from the two-stream model (the proportion of direct radiation in downward flux is 0.54), while the right plot shows results from the multiple-reflection model

Рисунок 4 позволяет оценить, насколько двухпотоковая модель чувствительна к отношению прямой и рассеянной радиации, поступающих из атмосферы. При облачной погоде прямой

солнечный свет не доходит до деятельного слоя, поэтому минимальная доля прямого излучения от суммарного коротковолнового была задана нулем. Максимальная доля 0.85 была задана как максимальное отношение прямой радиации к суммарной при ясном небе (время 12:30) в июле по данным наблюдений метеостанции Сытомино [Pilnikova, 1998], таблица 1.2. Как видно из левого графика, соотношение практически никак не сказывается на значениях баланса коротковолновой радиации растительности, максимальные различия составляют первые десятки Вт м⁻². Однако эта пропорция определяет количество радиации, проникшей до поверхности почвы. При ясном небе баланс у почвы более чем в два раза выше, чем при полностью рассеянном излучении атмосферы. Причем различия увеличиваются к полудню, так как в это время солнце находится наиболее высоко над горизонтом, и оптическая толщина леса (как однородной мутной среды) уменьшается, поскольку солнечные лучи проходят меньшее расстояние внутри растительности, а $G(\mu)$ для хвои практически не зависит от µ и равен примерно 0.5. Как следствие – до почвы доходит больше прямой солнечной радиации. Различия в значениях более заметны также из-за того, что баланс коротковолновой радиации у почвы по абсолютным значениям в несколько раз меньше такового баланса над лесом. Модель более чувствительна к пропорции прямой и рассеянной радиации, поступающей из атмосферы, чем к детальности разбиения спектра. Однако в модели Земной системы ИВМ РАН информация о пропорции и распределении нисходящей из атмосферы коротковолновой радиации есть, поэтому разбиение спектра потенциально может улучшить модельные результаты.

Модель многократных отражений [Gouttevin et al., 2015], при использовании двух диапазонов занижавшая значения баланса около полудня примерно на 100 Вт м⁻², после перехода к вычислениям по восьми интервалам повысила степень соответствия с измеренными данными (Рис. 5). Среднеквадратическое отклонение рассчитанных от измеренных балансов коротковолновой радиации над растительным пологом составило 43.2 Вт м⁻² и 29.2 Вт м⁻² для разбиения спектра на одну и на восемь частей соответственно. Рассмотрим еще раз рисунок 3. Видно, что с увеличением значений коротковолнового баланса увеличивается расхождение с данными наблюдений и что двухпотоковая схема показывает преимущественно лучший результат, особенно в середине дня. Линейность графика $f(\lambda x + \gamma y) = \lambda f(x) + \gamma f(y)$ позволяет довольно просто калибровать модели. Например, найдя функцию вида f(x) = ax, аппроксимирующую точки графика, можно домножать рассчитанные значения балансов на а⁻¹ и ожидать высокую степень соответствия с измерениями.



Рис. 4. Балансы коротковолновой радиации, рассчитанные по двухпотоковой модели при разном соотношении падающей прямой и рассеянной радиации с разбиением спектра на восемь частей *Fig.* 4. Shortwave radiation balances calculated using the two-stream model for different ratios of incident direct and diffuse radiation, with the spectrum divided into eight bands



Рис. 5. Временной ход отраженной радиации по данным измерений, а также рассчитанный по схеме многократных отражений при задании альбедо однократного рассеяния листьев и почвы постоянными во всем коротковолновом диапазоне и при делении коротковолнового спектра на восемь интервалов

Fig. 5. Temporal variation of reflected radiation based on measurement data and calculations using the multiple-reflection scheme, assuming constant single-scattering albedo of leaves and soil over the shortwave range and dividing the shortwave spectrum into eight bands

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы было показано, что двухпотоковая модель переноса радиации внутри растительного полога имеет высокую степень согласованности с данными наблюдений, осуществлённых в темнохвойно-осиновом лесу карбонового полигона «Мухрино» в летнее время года. Корректировка оптических параметров растительности оказала влияние на результаты моделирования, вместе с тем повышение спектрального разрешения расчётов не дало существенного улучшения качества моделирования; частично это связано с тем, что уточнены были только коэффициенты отражения и пропускания листьев, тогда как таковые параметры для стеблей и стволов, а также альбедо почвы были оставлены значениями по умолчанию для данного типа почвы и функционального типа растительности. Вклад в погрешность вносит и неточность расчета листового индекса. Было показано, что доля рассеянной радиации от суммарного коротковолнового потока, поступающего из атмосферы, существенно влияет на значения коротковолнового баланса над растительностью.

Также было показано, что модель, рассчитывающая потоки внутри полога как суммы геометрической прогрессии [Gouttevin et al., 2015], даже после разбиения на восемь диапазонов, при тех же оптических параметрах, что и модель [Bonan, 1996], хуже согласуется с наблюдениями.

БЛАГОДАРНОСТИ

Вышка пульсационных измерений, данные которой использовались в работе, возведена и поддерживается при поддержке гранта Правительства Тюменской области в соответствии с программой Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового

уровня в рамках национального проекта «Наука». Соглашение № 94-ДОН/05.5/20-ЮГУ-231 от 14.12.2020

Проверка и уточнение математических моделей выполнены в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

ЛИТЕРАТУРА

Bonan G.B. 1996. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: technical description and user's guide. NCAR Technical Note, NCAR/TN-417+STR. National Center for Atmospheric Research.

Coakley J.A., Chylek P. 1975. The two-stream approximation in radiative transfer: including the angle of the incident radiation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32: 409-418.

Dai Q., Sun S. 2006. A generalized layered radiative transfer model in the vegetation canopy. *Advances in atmospheric sciences*, 23: 243-257. DOI: 10.1007/s00376-006-0243-7

Dai Q., Sun S. 2007. A simplified scheme of the generalized layered radiative transfer model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24(2): 213-226. DOI: 10.1007/s00376-007-0213-8

Dickinson R.E. 1983. Land surface processes and energy balance climate-surface albedos and energy balance. Advances in atmospheric sciences, 25: 305-353

Disney M., Lewis P., North, P. 1999. Monte Carlo ray tracing in optical canopy reflectance modelling. *Remote Sensing Reviews*, 18: 163-196. DOI: 10.1080/02757250009532389

Gates D.M. 1966. Spectral Distribution of Solar Radiation at the Earth's Surface. *Science*, 151: 523-529 DOI: 10.1126/science.151.3710.523

Govaerts Y. 1996. A Model of Light Scattering in Three-Dimensional Plant Canopies: a Monte Carlo Ray Tracing Approach. PhD Thesis. Université Catholique de Louvain, Belgium.

Gouttevin I., Lehning M., Jonas T., Gustafsson D., Mölder M. 2015. A two-layer canopy model with thermal inertia for an improved snowpack energy balance below needleleaf forest (model SNOWPACK, version 3.2.1, revision 741). *Geoscientific Model Development*, 8(8): 2379-2398. DOI: 10.5194/gmd-8-2379-2015

Hovi A., Rautiainen M. 2022. Leaf and needle spectra for 25 boreal tree species. *Mendeley Data*, V1. DOI: 10.17632/nvgjcn5nsx.1

Levashova N.T., Mukhartova Yu.V. 2018. A three-dimensional model of solar radiation transfer in a non-uniform plant canopy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 107(1). DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/012101

Noda H.M., Motohka, T., Murakami, K., Muraoka H., Nasahara K.N. 2014. Reflectance and transmittance spectra of leaves and shoots of 22 vascular plant species and reflectance spectra of trunks and branches of 12 tree species in Japan. *Ecological Research*, 29(2), 111. DOI: 10.1007/s11284-013-1096-z

Pilnikova Z.N. 1998. Scientific and applied handbook on the climate of the USSR. Vol. 17. Parts 1-6. Gidrometeoizdat, St. Petersburg (in Russian). [Пильникова З.Н. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 17. Части 1-6. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998].

Ross J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Dr W. Junk Publishers. DOI: 10.1007/978-94-009-8647-3

Saito K., Ogawa S., Aihara M., Otowa K. 2001. Estimates of LAI for forest management in Okutama. Proc. 22nd ACRS 1, 600-605.

Sellers P.J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8): 1335-1372. DOI: 10.1080/01431168508948283

Stähli M., Jonas T., Gustafsson D. 2009. The role of snow interception in winter-time radiation processes of a coniferous subalpine forest. *Hydrological Processes*, 23(17): 2498-2512. DOI: 10.1002/hyp.7180

ASTM International. 2003. ASTM G173-03, Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface.

Sergeev I.D., Levashova N.T. 2022. Modeling the interaction of solar radiation with vegetation elements using the Monte– Carlo method. *Moscow University Physics Bulletin*, 4 (in Russian). [Сергеев И.Д., Левашова Н.Т. Моделирование взаимодействия солнечной радиации с элементами растительности при помощи метода Монте-Карло // Ученые записки физического факультета Московского университета. № 4.].

Stepanenko V.M., Medvedev A.I., Bogomolov V.Yu., Shangareeva S.K., Ryazanova A.A., Faykin G.M., Ryzhova I.M., Suiazova V.I., Debolskiy A.V., Chernenkov A.Yu. 2024. Land surface scheme TerM: the model formulation, code architecture and applications. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, vol. 39, no. 6: 363-377. DOI: 10.1515/rnam-2024-0031

Taconet O., Bernard R., Vidal-Madjar D. 1986. Evapotranspiration over an Agricultural Region Using a Surface Flux/Temperature Model Based on NOAA-AVHRR Data. *Journal of climate and applied meteorology*, 25: 284-307.

Volodin E.M. 2016. Representation of heat, moisture and momentum fluxes in climate models. Fluxes at surface. *Fundamental and Applied Climatology*, 1: 28-42. DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-28-42

Volodin E.M. 2016. Mathematical Modeling of the Earth System (Iakovlev N.G., Ed.). MAKS Press.

Volodin E.M., Gritsun A.S. 2020. Simulation of Possible Future Climate Changes in the 21st Century in the INM-CM5 Climate Model. *Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics*, 56(3): 218-228. DOI: 10.1134/S0001433820030123

Поступила в редакцию: 05.12.2024 Переработанный вариант: 17.06.2025 Принято в печать: 14.07.2025 Опубликована: 23.07.2025