

# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАСЧЕТА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В COSMO-RU ПО ДАННЫМ ТОЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ И ИЗМЕРЕНИЙ В МОСКВЕ В БЕЗОБЛАЧНЫХ УСЛОВИЯХ

*А.А. Полюхов<sup>1,2</sup>, Н.Е. Чубарова<sup>1,2</sup>, Г.С. Ривин<sup>1,2</sup>,  
М.В. Шатунова<sup>2</sup>, Т.А. Тарасова<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,*

<sup>2</sup> *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации,*

<sup>3</sup> *Centro de Previsao de Tempo e Estudos Climaticos/Instituto  
Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, Бразилия  
aeromsu@gmail.com*

## Введение

В настоящее время насчитывается более десятка методов численного решения уравнения переноса радиации. Выбор алгоритма расчета для целей оперативного прогноза погоды – это компромисс между точностью и быстродействием. В этой связи полинейные трехмерные алгоритмы в настоящее время не используются ни в одной службе прогноза погоды мира. Более простые, одномерные алгоритмы, основанные, в частности, на двухпоточковом приближении, требуют гораздо меньше машинного времени. Однако в последнее время из-за увеличения пространственного разрешения модели возрастают погрешности вычислений, связанные с влиянием топографии поверхности и отсутствием учета переотражения излучения от облаков вертикального развития. Множество работ [2, 3, 10, 17] посвящено определению погрешностей одномерных алгоритмов по сравнению с данными измерений и полинейных расчетов.

Кроме того, существует проблема определения пространственно-временного распределения веществ (углекислого газа, озона и аэрозолей). В настоящее время концентрации газов и оптические свойства аэрозоля задаются на основе климатических данных [13, 23, 24], которые не учитывают короткопериодные вариации, обусловленные различными факторами. В последнее время появляются прогностические модели аэрозолей, рассчитывающие аэрозольные оптические параметры на каждом шаге модели, например, МАСС-II [16], ЕСНАМ5-НАМ [21].

Целью данной работы является тестирование алгоритма расчета плотности потока солнечной радиации в мезомасштабной модели COSMO-Ru

в безоблачных условиях с использованием различных климатологий аэрозольных свойств атмосферы по сравнению с точной моделью CLIRAD(FC05)-SW и данными измерений Метеорологической обсерватории МГУ (МО МГУ) для выявления общей погрешности радиационного блока модели COSMO-Ru, а также разделения погрешностей в расчетах, связанных с самим алгоритмом и используемой аэрозольной климатологией.

Дополнительно была оценена чувствительность погрешности приземной температуры воздуха от погрешностей расчета суммарной радиации.

## **1. Методы и данные**

### **1.1. Алгоритмы расчета радиации**

В данной работе рассматриваются два алгоритма расчета радиации: радиационный алгоритм CLIRAD(FC05)-SW и алгоритм, используемый в мезомасштабной модели COSMO-Ru.

Алгоритм CLIRAD(FC05)-SW разработан в Goddard Space Flight Center в 1999 г. [5] и модифицирован 2007 г. [22]. В данном алгоритме спектр разбит на три полосы в ультрафиолетовой и видимой области ( $< 0,7$  мкм) и пять полос в ближнем инфракрасном диапазоне ( $> 0,7$  мкм). Учитывается поглощение радиации водяным паром ( $H_2O$ ), озоном ( $O_3$ ), кислородом ( $O_2$ ) и углекислым газом ( $CO_2$ ). Коэффициенты отражения и пропускания каждого слоя атмосферы вычисляются с использованием приближения  $\delta$ -Эдингтона [12].

Радиационный алгоритм модели COSMO-Ru изложен в [19]. Расчет потоков радиации данной модели, в отличие от алгоритма CLIRAD(FC05)-SW, основан на приближении, предложенном в 1980 году [26]. Весь солнечный спектр разбит на три интервала. Учитывается поглощение водяным паром, озоном, кислородом, углекислым газом.

В табл. 1 представлены основные характеристики алгоритмов.

Для валидации радиационного кода CLIRAD(FC05)-SW использовалась высокоточная модель, основанная на методе Монте – Карло [25], разработанная в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт».

### **1.2. Данные измерений**

Для тестирования вышеперечисленных алгоритмов используются наземные наблюдения за потоками радиации, оптическими свойствами аэрозоля, влажностью, облачностью и приземной температурой воздуха в МО МГУ.

**Таблица 1.** Основные характеристики радиационных кодов CLIRAD(FC05)-SW [22] и радиационного блока модели COSMO [19]

Интервалы	CLIRAD(FC05)-SW		COSMO	
	Интервал длин волн, мкм	Газы	Интервал длин волн, мкм	Газы
Интервалы	2,27–10	O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	1,53–4,64	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> ,
	1,22–2,27	O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O		
	1,22–10	O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O		
	0,7–1,22	O <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	0,7–1,53	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>
	0,323–1,22	O <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O		
	0,323–0,7	O <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	0,25–0,7	O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub>
	0,303–0,323	O <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>		
	0,2–0,303	O <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>		
База полос поглощения	HITRAN-2004		AFGL-1982	

*Балансомер Kipp&Zonen CNR4*

В МО МГУ наблюдения за прямой, рассеянной и отраженной коротковолновой радиацией ведутся с 1954 г. с использованием термоэлектрических приборов Ю.Д. Янишевского [5], принятых на сети актинометрических станций России. Как известно, стандартные сетевые актинометрические наблюдения имеют большие допуски измерений [1]. Допустимая ошибка пиранометра достигает 11 %, актинометра – 4 %.

С 2012 г. в МО МГУ дополнительно ведутся измерения радиационного баланса балансомером Kipp&Zonen CNR4 с вентилятором CVF 4. Главное преимущество данного прибора по сравнению со стандартным актинометрическим комплексом – одновременное измерение всех четырех составляющих радиационного баланса. Одновременность измерений позволяет исключить возможную ошибку в определении альбедо поверхности из-за асинхронного попадания солнечного излучения на датчики по причине разной закрытости приборов на крыше и на площадке, что наблюдается в случае проведения стандартных измерений. Однако балансомер установлен на площадке, закрытость которой несколько выше, чем на крыше МО МГУ. Поэтому утренние и вечерние измерения при низких высотах Солнца не были использованы в тестировании.

Для балансомера Kipp&Zonen CNR4 установлено, что в течение дня из-за изменения температуры датчиков коротковолновой радиации

происходит смещение места нуля. Наши оценки показали, что для летних условий это изменение приводит к ошибкам около  $\pm 1,5 \text{ Вт/м}^2$ , а для зимних –  $\pm 1 \text{ Вт/м}^2$ . Прибор отличается маленькой косинусной ошибкой (до 1 %), и высокой надежностью измерений в различных погодных условиях. Погрешность установки прибора достигает 0,5 градуса, это, в свою очередь, может приводить к ошибкам измерения суммарной радиации до  $9 \text{ Вт/м}^2$ . Погрешности прибора приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Погрешности измерений балансомера Kipp&Zonen CNR4 [14] и погрешности восстановления свойств аэрозоля [11]

Параметр	Погрешность
<b>Балансомер Kip&amp;ZonenCNR4, для суммарной радиации</b>	
Максимальное отклонение чувствительности датчика	< 4 %
Максимальная температурная погрешность	< 4 %
Максимальное отклонение чувствительности при изменении угла освещенности	< 1 %
Погрешности при уменьшении температуры воздуха	< 3 Вт/м <sup>2</sup> (при изменении 5 К/ч)
	< 1 Вт/м <sup>2</sup> (с установленным CVF 4)
Максимальное изменение чувствительности в год	< 1 %
Суммарная ошибка	< 20 Вт/м <sup>2</sup> (при 1000 Вт/м <sup>2</sup> )
<b>AERONET</b>	
Аэрозольная оптическая толщина (AOT)	$\pm 0,02$ для ультрафиолетовых фильтров (340, 380 нм) $\pm 0,01$ для остальных фильтров
Влагосодержание	10 %
Альbedo однократного рассеяния (SSA)	0,03
Комплексный показатель преломления	0,04 для действительной части, 30–50 % для мнимой части
Распределение частиц по размерам	10 % в максимуме и 35 % в минимуме в диапазоне $0,1 \leq r \leq 7 \text{ мкм}$

Для проведения тестирования был выбран балансомер Kipp&ZonenCNR4, так как его суммарная погрешность измерений на 7–9 % меньше, чем у стандартных актинометрических приборов.

#### *Фотометр CIMEL-CE-318*

В МО МГУ с 2001 г. проводятся измерения оптических и радиационных характеристик аэрозоля с помощью небесного фотометра CIMEL-CE 318-T, который входит в международную сеть AERONET [7, 11].

С помощью измерений в рамках данной сети восстанавливаются аэрозольная оптическая толщина, альbedo однократного рассеяния, фактор асимметрии индикатрисы рассеяния, распределение частиц по размерам. В табл. 2 показаны погрешности восстановления аэрозольных характеристик.

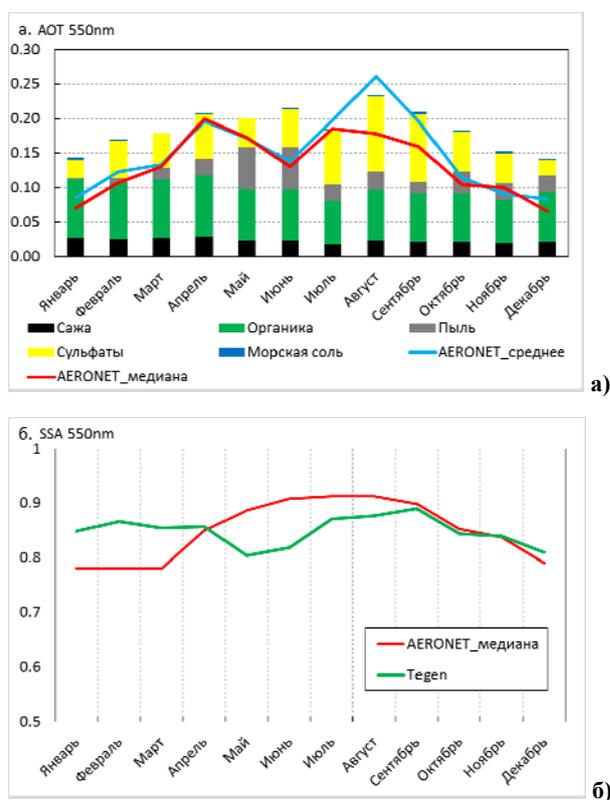
При автоматических измерениях характеристик аэрозоля существуют алгоритмы, позволяющие фильтровать данные измерений в автоматическом режиме при наличии облачности нижнего яруса [9, 20], однако они не чувствительны к тонкой и однородной перистой облачности. Эти облака могут внести существенный добавок в АОТ, поэтому при получении аэрозольной климатологии была использована дополнительная фильтрация по визуальным данным облачности [8]. Используя разработанную методику, был получен уточненный архив данных за период с 2001 по 2014 г., который был использован для сравнений со стандартными аэрозольными климатологиями.

### **1.3. Годовой ход свойств аэрозоля в МО МГУ**

Для вычисления радиации в мезомасштабных моделях используются климатические распределения аэрозолей (климатологии аэрозолей) – среднемесячные значения оптических характеристик аэрозолей. В модели COSMO-Ru существует возможность выбора двух климатологий: Танге (далее Танге) [23] и Теген (далее Теген) [24]. В настоящее время в оперативных моделях прогноза погоды климатология Танге практически не используется, поэтому в работе наибольшее внимание уделено исследованию аэрозольной климатологии Теген, для которой были проведены сравнения со среднемесячными значениями аэрозольной оптической толщины и альbedo однократного рассеяния по данным AERONET (рис. 1).

Годовой ход АОТ по данным наблюдений в Москве имеет два ярко выраженных максимума: в апреле и июле-августе. Весенний связан с увеличением эмиссии аэрозоля с открытой поверхности при небольшом количестве осадков и, соответственно, уменьшенном влажном осаждении аэрозоля. В июле-августе высокие значения АОТ наблюдаются при высокой температуре воздуха, при которой увеличивается генерация вторичного аэрозоля. В зимние месяцы АОТ достигает минимума в сезонном ходе для большей части Северного полушария, когда генерация вторичного аэрозоля замедляется [7], преобладает адвекция из арктических районов, а относительно большое количество осадков приводит к эффективному вымыванию аэрозоля. Локальный минимум АОТ также наблюдается в июне и связан с увеличением количества осадков и уменьшением повторяемости адвекции воздуха из южных регионов [6].

Большая разница между медианой и средними значениями в августе и сентябре объясняется сильными пожарами в 2002 и 2010 гг. на территории ЕТР в эти месяцы. Из рис. 1 видно, что в климатологии Tegen наблюдаются два максимума и два минимума в годовом ходе, однако данные экстремумы смещены на 1–2 месяца. Большие отличия данных от AERONET наблюдаются зимой, климатология Tegen завышает значение AOT на 0,06. Климатология Tegen также завышает альbedo однократного рассеяния в зимние месяцы на 0,07. Однако стоит заметить, что для зимних месяцев выборка данных AERONET невелика, например, в январе за 14 лет 33 дня измерений, тогда как в июле это число увеличивается до 290 дней [24].



**Рис. 1.** Годовой ход аэрозольных оптических толщин разных фракций по климатологии Tegen [24] до коррекции в модели COSMO-Ru и данными измерений [8] AOT (а) уровень 2,0 и альbedo однократного рассеяния (б) уровень 1,5 на длине волны 550 нм в Москве за 2001–2014 гг.

Среднегодовая оценка AOT на 550 нм по Tegen равна 0,207, по AERONET – 0,15; альbedo однократного рассеяния – 0,85 по Tegen и AERONET.

В исходном коде радиационного блока модели COSMO дополнительно задается тропосферная и стратосферная добавка к аэрозольной оптической толщине:

$$AOT_{str,k} = \left( \frac{T_{k-1}}{T_{k+1}} \right)^{15} (p_{k+1} - p_k) \frac{0,045}{19330},$$

$$AOT_{tr,k} = \left( 1 - \left( \frac{T_{k-1}}{T_{k+1}} \right)^{15} \right) (p_{k+1} - p_k) \frac{0,03}{101325 - 19330},$$

где  $AOT_{str,k}$  – стратосферная добавка аэрозольной оптической толщины на  $k$ -уровне модели;  $AOT_{tr,k}$  – тропосферная добавка;  $T$  – температура;  $p$  – давление.

Как видно из формулы, добавки введены искусственно, и суммарная добавка может достигать 0,045 для стратосферы и 0,03 для тропосферы.

## 2. Результаты

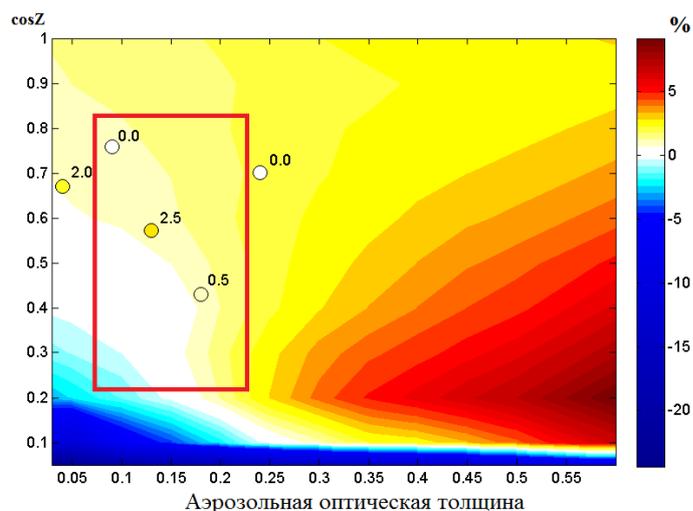
### 2.1. Оценка погрешности алгоритма CLIRAD(FC05)-SW

Чтобы оценить погрешность алгоритма CLIRAD(FC05)-SW, было проведено сравнение с результатами расчетов более точного алгоритма Монте – Карло [25]. В качестве исходных данных для CLIRAD(FC05)-SW использовалась модель «лето средних широт» [27]. По этим данным задаются вертикальные распределения температуры, влагосодержания и озона. Стратификация аэрозольных свойств до 12 км была взята по континентальной модели аэрозоля CONT-1, в слое выше (12–20 км) – по типу BSA (стратосферная модель аэрозоля).

В ходе проведения тестирования рассчитана плотность потока нисходящей солнечной радиации у поверхности Земли для одиннадцати значений косинуса зенитного угла Солнца от 0,05 до 1 и для двенадцати значений AOT на 550 нм от 0,03 до 0,6 (рис. 2). Похожие сравнения данного алгоритма с полинейными методами были проведены для нескольких случаев в рамках проекта CIRC [17], а также в [3, 22]. В последних работах сравнения проводились для фиксированного содержания аэрозоля и зенитном угле Солнца 30°.

Полученные значения подтверждают результаты CIRC для меньших значений AOT. Однако с ростом AOT, например при пожарах,

погрешность превышает 10 %. Также видно, что при малых значениях высоты Солнца алгоритм существенно занижает суммарную радиацию вследствие отсутствия учета эффектов сферичности атмосферы. Для высот Солнца более  $12^\circ$  ( $0,2 < \cos Z < 0,8$ ) и типичного континентального аэрозоля ( $0,04 < AOT < 0,25$ ) алгоритм CLIRAD(FC05)-SW показал хорошее соответствие с расчетами по высокоточной модели, погрешность не превышает 2 %. Исходя из полученных результатов, авторами не рассматриваются случаи с крайне высокими значениями AOT или малыми высотами Солнца.

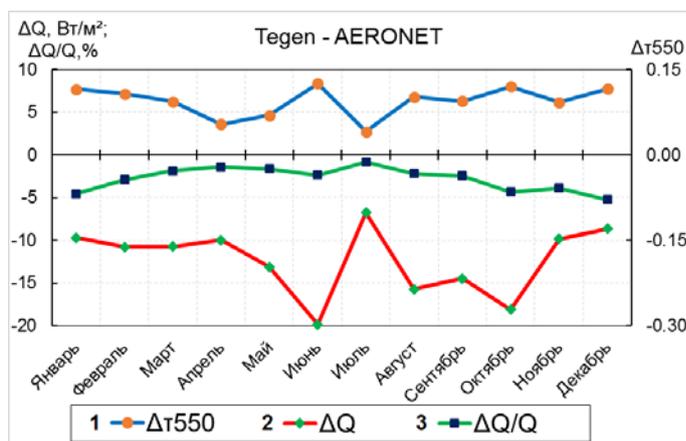


**Рис. 2.** Относительные ошибки расчета нисходящей коротковолновой радиации, полученные в данной работе (цветное поле) и ошибки в CIRC [17] (точки с подписью). Красной рамкой обозначены типичные условия при сравнениях в МО МГУ.

## 2.2. Влияние погрешностей климатологии Tegen по сравнению с данными наблюдений на расчет суммарной радиации

Как было описано выше, в настоящее время в моделях прогноза погоды используются среднемесячные значения оптических характеристик аэрозоля. Большие различия между оптическими характеристиками аэрозолей в аэрозольной климатологии и полученными в ходе наблюдений могут приводить к значительным погрешностям в расчете суммарной радиации. Данный эффект был оценен с помощью алгоритма

CLIRAD(FC05)-SW. Расчеты были проведены для полуденной высоты Солнца, соответствующей 15 числу каждого месяца. Альbedo поверхности задавалось для месяцев с ноября по март равным 0,7, с апреля по октябрь – равным 0,2 (рис. 3).



**Рис. 3.** Годовой ход разности среднемесячной аэрозольной оптической толщины на 550 нм (1) между климатологией Tegen с учетом добавки к АОТ, представленной в модели COSMO-Ru, и данными измерений AERONET в МО МГУ; и соответствующие абсолютное (2) и относительное (3) изменения величины суммарной радиации, рассчитанной по алгоритму CLIRAD(FC05)-SW.

После добавления стратосферного и тропосферного аэрозоля климатология Tegen в среднем за год завышает АОТ 550 нм на 0,094, что в свою очередь ведет к занижению суммарной радиации на -12,4 Вт/м<sup>2</sup>. В отдельные месяцы это значение колеблется от -19,9 до -6,8 Вт/м<sup>2</sup>. Самые большие относительные ошибки наблюдаются в зимний период (до -5 %), за год относительная ошибка составляет в среднем -3 %.

### 2.3. Оценки погрешностей расчета коротковолновой радиации с использованием радиационного блока модели COSMO

Тестирование проводилось для оценки погрешности как самого алгоритма расчета радиации в COSMO, так и для оценки погрешностей климатологий. Для этого по визуальным наблюдениям за облачностью с часовой дискретностью были выбраны периоды, в которые облачность по данным визуальных наблюдений и по модельным данным

отсутствовала не менее 5 часов. Для анализа были отобраны следующие дни: 22 августа 2012 г., 29 марта 2014 г., 27 июля 2014 г., 16 сентября 2014 г. Для выбранных дней высота Солнца изменялась от 16 до 53°, по данным измерений величина АОТ изменялась от 0,04 до 0,12 (табл. 3).

**Таблица 3.** Условия для тестирования

День	Часы	Альbedo	Влагододержание, см	АОТ 550 нм	
				AERONET	TEGEN
22.08.2012	8	0,17	1,02	0,10	0,28
29.03.2014	9	0,20	0,28	0,04	0,24
27.07.2014	11	0,19	1,84	0,12	0,25
16.09.2014	8	0,19	1,30	0,07	0,25

Измеренные нисходящие и восходящие потоки коротковолновой радиации на поверхности Земли были скорректированы с учетом погрешности отрицательного сдвига сигналов в ночное время, который оценивался как среднее значение радиации за первый час суток по солнечному времени. Все измерения были осреднены за исследуемый часовой интервал. В расчетах использовалась уточненная величина солнечной постоянной  $S_0 = 1360,8 \text{ Вт/м}^2$  (данные платформы SORCE [15]), приведенная для каждого выбранного дня к действительному расстоянию от Земли до Солнца. В качестве альbedo поверхности задавались значения, полученные по измерениям балансомера CNR-4 и из результатов расчета модели COSMO-Ru. Результаты COSMO-Ru с использованием климатологии аэрозолей Tanre (COSMO\_Tanre) и климатологии Tegen (COSMO\_Tegen) выдавались с часовой дискретностью.

Для оценки погрешности радиационного алгоритма модели COSMO-Ru расчеты по алгоритму CLIRAD(FC05)-SW проводились с идентичными входными параметрами из модели COSMO-Ru: альbedo поверхности, влагододержание, аэрозольная оптическая толщина и альbedo однократного рассеяния (CLIRAD\_param). АОТ на длинах волн, отличных от радиационного блока COSMO-Ru, вычислялась через параметр Ангстрема в соответствующих интервалах. Для оценки входных параметров задавались реальные значения по данным наблюдений (CLIRAD\_real). Конфигурации входных данных модели приведены в табл. 4

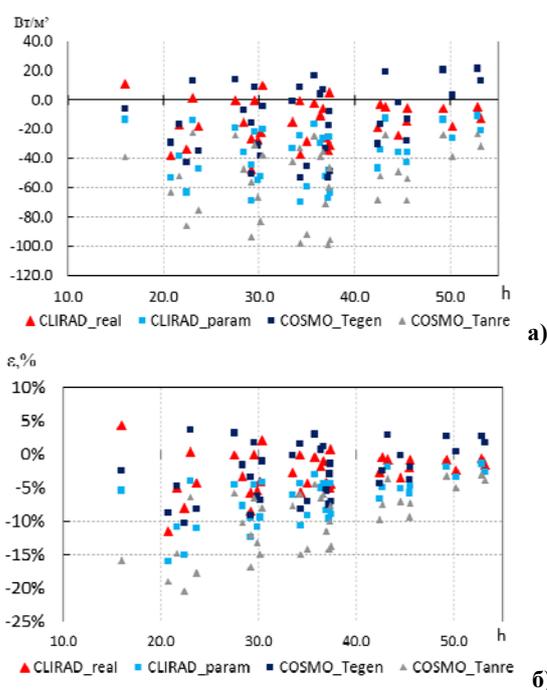
Относительная погрешность расчетов находилась как:

$$e\% = \frac{F - F_0}{F_0} 100\%,$$

где  $F_0$  – измеренная плотность потока нисходящей коротковолновой радиации,  $F$  – модельная плотность потока нисходящей коротковолновой радиации. Результаты показаны на рис. 4.

**Таблица 4.** Конфигурации входных данных и средние ошибки расчетов суммарной радиации относительно данных измерений для выбранных дней

Конфигурация	АОТ	Влагосодержание	Альбедо	Относительная ошибка, %	Абсолютная ошибка, Вт/м <sup>2</sup>
COSMO_Tanre	Tanre,1984	COSMO-Ru	COSMO-Ru	$-9,9 \pm 1,6$	$-53,9 \pm 7,9$
COSMO_Tegen	Tegen,1997	COSMO-Ru	COSMO-Ru	$-2,4 \pm 1,4$	$-13,2 \pm 7,7$
CLIRAD_param	Tegen,1997	COSMO-Ru	COSMO-Ru	$-6,9 \pm 1,2$	$-38,0 \pm 5,7$
CLIRAD_real	AERONET	AERONET	Kipp&Zonen CNR4	$-2,7 \pm 1,0$	$-15,2 \pm 4,8$



**Рис. 4.** Абсолютная (а) и относительная (б) погрешность расчетов суммарной коротковолновой радиации CLIRAD(FC05)-SW и COSMO-Ru с учетом данных измерений (красные треугольники), с климатологией Tegen (синие и голубые квадраты) и климатологией Tanre (серые треугольники).

Использование данных измерений оптических характеристик аэрозоля, влагосодержания и альbedo поверхности в алгоритме CLIRAD(FC05)-SW позволяют добиться наименьшей погрешности в расчете суммарной радиации. Погрешность CLIRAD\_real составила -2,7 % (-15,2 Вт/м<sup>2</sup>), что укладываются как в погрешности измерений, так и в погрешности самого алгоритма. Использование в расчетах климатологии Tegen и данных из модели COSMO-Ru по альbedo и влагосодержанию CLIRAD\_param увеличило погрешность до -6,9 % (-38,0 Вт/м<sup>2</sup>).

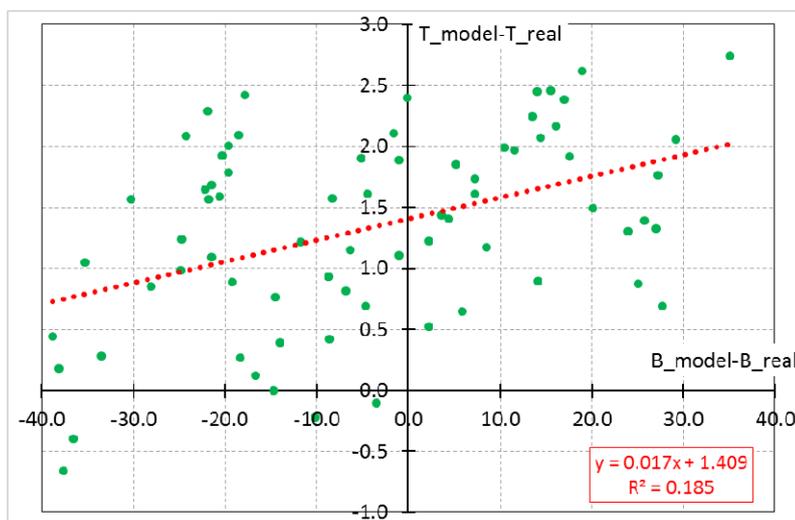
Сравнение данных расчетов CLIRAD\_real и CLIRAD\_param показало, что завышенное содержание аэрозоля в климатологии Tegen (до 0,2, см. табл. 3), а также погрешности в расчетах влагосодержания и значений альbedo в модели COSMO-Ru увеличивают погрешность расчетов суммарной радиации на (-6,9 % + 2,7 %) = 4,2 %.

Проведение расчетов при использовании одинаковых параметров в радиационном блоке COSMO-Ru и в CLIRAD(FC05)-SW позволило оценить погрешность алгоритма. Для выбранных условий получено, что радиационный блок COSMO-Ru завышает расчет суммарной радиации в среднем на (6,9 % - 2,4 %) = 4,5 %. Расчеты с использованием радиационного блока COSMO-Ru с климатологией Tegen отличаются наибольшей погрешностью до -9,9 % (-53,9 Вт/м<sup>2</sup>). Важно отметить, что при увеличении высоты Солнца относительная погрешность уменьшается.

#### **2.4. Оценка чувствительности рассчитанной приземной температуры к погрешности расчета баланса коротковолновой радиации**

Погрешность в расчете баланса коротковолновой радиации влияет на качество прогноза приземной температуры. Для определения данной чувствительности результаты моделирования были сравнены с данными наблюдений в МО МГУ (рис. 5).

При погрешности расчета баланса коротковолновой радиации в COSMO-Ru на 100 Вт/м<sup>2</sup> в типичных безоблачных условиях в Москве погрешность прогноза приземной температуры воздуха изменяется на  $1,7 \pm 0,5$  °C. Модельные расчеты, выполненные ранее [18], также показали существенную чувствительность расчета приземной температуры к погрешности баланса коротковолновой радиации, которая составила  $0,9 \pm 0,2$  °C на 100 Вт/м<sup>2</sup>. Большой разброс точек, а также увеличение чувствительности в сравнении с данными измерений можно связать с вкладом погрешностей других атмосферных факторов, например потоков явного, скрытого тепла, расчет встречного излучения атмосферы, адвекции тепла.



**Рис. 5.** Зависимость ошибки расчета приземной температуры воздуха от погрешности расчета баланса коротковолновой радиации.  $B_{model}$ ,  $T_{model}$  – баланс коротковолновой радиации и приземная температура, соответственно, по расчетам модели COSMO-Ru;  $B_{real}$ ,  $T_{real}$  – по данным измерений.

### Выводы

Проведено сравнение радиационного алгоритма CLIRAD(FC05)-SW с алгоритмом Монте – Карло для большого диапазона высот Солнца и значений AOT. В результате было получено, что при типичных аэрозольных условиях в Москве ( $0,04 < AOT < 0,25$ ;  $0,2 < \cos Z < 0,8$ ) погрешность не превышает 2 %.

В данной работе получено, что в условиях Москвы использование климатологии Tegen приводит к занижению суммарной радиации на 4,2 %. В свою очередь, алгоритм расчета радиации, используемый в модели COSMO-Ru, завышает расчет на 4,5 %. Вследствие компенсации ошибок суммарная погрешность сопоставима с расчетами алгоритма CLIRAD(FC05)-SW с использованием данных измерений.

Показано, что в типичных условиях в летние дни аэрозоль может оказывать существенное влияние на температуру воздуха на 2 метрах за счет эффектов ослабления и отражения солнечной радиации аэрозолями. Получено, что чувствительность расчета приземной температуры в модели

COSMO-Ru составляет 1,7 °C при погрешности расчета коротковолнового баланса радиации 100 Вт/м<sup>2</sup>.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-05-00985 и по г/б теме МГУ «Глобальные эффекты и местные особенности региональных изменений климата (ГЗ)». Работа выполняется в рамках приоритетного проекта COSMO Testing and Tuning of Revised Cloud Radiation Coupling.

#### Список использованных источников

1. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 5. Актинометрические наблюдения. Ч. 1, Актинометрические наблюдения на станциях. РД 52.04.562-96. 222 с.
2. Чубарова Н.Е., Рублев А.Н., Троценко А.Н., Трёмбач В.В. Вычисление потоков солнечного излучения и сравнение с результатами наземных измерений в безоблачной атмосфере // Известия РАН. ФАО. 1999. Т. 35. С. 222-239.
3. Юрова А. Ю., Толстых М. А. Анализ погрешностей двух алгоритмов расчета солнечного излучения для моделей общей циркуляции атмосферы // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 348. С. 61-69.
4. Янишевский Ю.Д. Актинометрические приборы и методы наблюдений. Л.: Гидрометиздат, 1957. 415 с.
5. Chou M. D., Suarez M. J. A solar radiation parameterization for atmospheric studies // NASA/TM-1999-T. 104606. Vol. 15. 40 p.
6. Chubarova N.Y. Seasonal distribution of aerosol properties over Europe and their impact on UV irradiance // Atmos. Meas. Tech. 2009. Vol. 2. P. 593-608. doi:10.5194/amt-2-593-2009.
7. Chubarova N., Smirnov A., Holben B. N. Aerosol properties in Moscow according to 10 years of AERONET measurements at the Meteorological Observatory of Moscow State University // Geography, environment, sustainability. 2011. Vol. 4 (1). P. 19-32.
8. Chubarova N. Y., Poliukhov A. A., Gorlova I. D. Long-term variability of aerosol optical thickness in Eastern Europe over 2001–2014 according to the measurements at the Moscow MSU MO AERONET site with additional cloud and NO<sub>2</sub> correction // Atmos. Meas. Tech. 2016. – Vol. 9. P. 313-334.
9. Dubovik O. et al. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105. P. 20673-20696.
10. Gleeson E., Toll V., Nielsen K.P., Rontu L., Mašek J. Effects of aerosols on clear-sky solar radiation in the ALADIN-HIRLAM NWP system // Atmos. Chem. Phys. 2016. Vol. 16. P. 5933-5948, doi:10.5194/acp-16-5933-2016.
11. Holben B.N. et al. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1998. – Vol. 66, No. 1. P. 1-16.
12. Joseph J. H., Wiscombe W. J., Weinman J. A. The delta-Eddington approximation for radiative flux transfer // J. Atm. Sci. 1976. Vol. 33, No. 12. P. 2452-2459.

13. Kinne S. *et al.* An AeroCom initial assessment—optical properties in aerosol component modules of global models // *Atm. Chem. Phys.* 2006. Vol. 6, No. 7. P. 1815-1834.
14. Kipp&Zonen. Instruction Manual CNR4 Net Radiometer.
15. Kopp G., Lean J.L. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38, No. 1. P. 01706.
16. Morcrette J.J. *et al.* Aerosol analysis and forecast in the European Centre for medium-range weather forecasts integrated forecast system: Forward modeling // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114 (D13). Doi:10.1029/2008JDo11115.
17. Oreopoulos L. *et al.* The continual intercomparison of radiation codes: Results from phase I // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. D06118. Doi:10.1029/2011JD016821.
18. Poliukhov A. *et al.* Comparison between calculations of shortwave radiation with different aerosol datasets and measured data at the MSU MO (Russia) // *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2017. Vol. 1810, No. 1. P. 100006.
19. Ritter B., Geleyn J.F. A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations // *Mon. Wea. Rev.* 1992. Vol. 120, No. 2. P. 303-325.
20. Smirnov A. *et al.* Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database // *Rem. Sens. Environ.* 2000. Vol. 73, No. 3. P. 337-349.
21. Stier P. *et al.* The aerosol-climate model ECHAM5-HAM // *Atm. Chem. Phys.* 2005. Vol. 5, No. 4. P. 1125-1156.
22. Tarasova T. A., Fomin B. A. The use of new parameterizations for gaseous absorption in the CLIRAD-SW solar radiation code for models // *J. Atm. Ocean. Tech.* 2007. Vol. 24, No. 6. P. 1157-1162.
23. Tanre D., Geleyn J. F., Slingo J. First results of the introduction of an advanced aerosol-radiation interaction in the ECMWF low resolution global model // *Aerosols and their climatic effects*. 1984. P. 133-177.
24. Tegen I. *et al.* Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results // *J. Geoph. Res.* 1997. Vol. 102, No. D20. P. 23895-23915.
25. Trembach V.V., Rublev A.N., Udalova T.A. Mathematical simulation of surface solar radiation distribution at broken clouds conditions // *IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation*, W. L. Smith and Yu. M. Timofeyev (Eds.). A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, 2001. P. 1058-1060
26. Zdankowski W.G., Welch R.M., Korb G. An investigation of the structure of typical two-stream-methods for the calculation of solar fluxes and heating rates in clouds // *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*. 1980. Vol. 53, No. 2. P. 147-166.
27. WMO. World Climate Research Program: A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation // *Technical report WCP-112, WMO-TD No. 24*, World Meteorological Organization, Geneva, 1986. 60 p.

*Поступила в редакцию 15.05.2017 г.*