

# АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДВУХ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ

*А.Ю. Юрова<sup>1</sup>, М.А. Толстых<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации*

<sup>2</sup> *Институт вычислительной математики РАН*

*alla.yurova@gmail.com, tolstykh@inm.ras.ru*

## Введение

Необходимость улучшения блоков параметризаций физических процессов (ПФП) в моделях общей циркуляции (МОЦ) атмосферы подтверждается многочисленными сравнениями моделируемых полей приземной температуры, осадков, облачности, радиационного баланса с данными наземных и спутниковых наблюдений [7–8]. Указанные сравнения выявляют систематические ошибки МОЦ в моделировании метеорологических полей, непосредственно связанные с работой блоков физических параметризаций моделей. За последнее десятилетие были существенно улучшены такие блоки ПФП, как схемы расчета переноса излучения, схемы, описывающие процессы глубокой и мелкой конвекции, схемы облакообразования, однако дальнейшее уменьшение ошибок прогноза связано как с усовершенствованием ПФП, так и с согласованием работы отдельных методов ПФП между собой в рамках конкретной модели атмосферы.

Развитие методик расчета переноса излучения в атмосфере в последние два десятилетия было связано с уточнением функций пропускания атмосферных газов, увеличением количества спектральных интервалов, разработкой методов одновременного учета газового поглощения и рассеяния на водяных каплях и частицах аэрозоля. В результате современные радиационные блоки МОЦ рассчитывают радиационные потоки и притоки в атмосфере с высокой точностью, но требуют большого времени для работы и поэтому не могут рассчитываться на каждом шаге по времени модели, что в свою очередь снижает точность радиационных расчетов. К тому же сравнение различных радиационных алгоритмов для облачной атмосферы показывает достаточно большой разброс величин притоков солнечного излучения в облачных слоях.

Полулагранжева модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ [2] используется в качестве оперативной модели глобального среднесрочного прогноза погоды в

Гидрометцентре России. В оперативной практике используется версия модели с разрешением  $0,9^\circ$  по долготе,  $0,72^\circ$  по широте и 28 уровнями по вертикали. Существует также версия модели, ориентированная на сезонные прогнозы [1]. В данной работе были протестированы существующий, а также альтернативный радиационный алгоритм, который планируется ко внедрению в ПЛАВ – CLIRAD(FC05)-SW при условии его большей успешности. Представляется, что быстроедействие, сочетающееся с полнотой описания процессов переноса излучения в атмосфере, алгоритма CLIRAD(FC05)-SW делает его выигрышным кандидатом на внедрение в модель ПЛАВ. Данный постулат тестируется путем сравнения с полинейными расчетами, считающимися эталоном качества в моделировании переноса излучения.

### Метод

Обе параметризации радиационного переноса, исследуемые в данной работе, основаны на решении уравнения переноса радиации в атмосфере в двухпоточковом приближении дельта-Эддингтона. Приближение дельта-Эддингтона заключается в представлении индикатрисы рассеяния с помощью двух членов разложения по полиномам Лежандра с использованием дельта функции для пика рассеяния в направлении распространения света [9]. В двухпоточковом приближении решение уравнения переноса солнечного излучения в атмосфере в предположении об изотропности рассеяния можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}\frac{dF^\uparrow(\tau)}{d\tau} &= \alpha_1 F^\uparrow(\tau) - a_2 F^\downarrow(\tau) - \alpha_3 S(\tau), \\ \frac{dF^\downarrow(\tau)}{d\tau} &= \alpha_2 F^\uparrow(\tau) - \alpha_1 F^\downarrow(\tau) + \alpha_4 S(\tau), \\ \frac{dS(\tau)}{d\tau} &= -S(\tau) / \mu_0,\end{aligned}$$

где  $F^\uparrow$  и  $F^\downarrow$  – потоки рассеянного излучения на границах слоя атмосферы;  $S$  – поток прямого излучения;  $\mu_0$  – косинус угла падения прямого излучения;  $a_i$  ( $i=1, 4$ ) – коэффициенты пропускания и отражения для прямого и рассеянного излучения. Конкретный вид коэффициентов  $a_i$  зависит от формулировки модели. В модели CLIRAD(FC05)-SW данные коэффициенты являются функциями оптической толщины слоев, вероятности выживания кванта (отношения коэффициента рассеяния излучения к сумме коэффициентов поглощения и рассеяния) и параметра, который определяет форму индикатрисы рассеяния. В модели ACRANEВ данные коэффициенты рассчитаны для каждого слоя заранее, с учетом свойств газового и аэрозольного поглощения и рассеяния.

Описание радиационного алгоритма ACRANEВ, заимствованного из французской модели ARPEGE/IFS, приведено в [12]. Можно отметить следующие особенности метода:

1) в интервале длин волн солнечного излучения расчет ведется лишь по одному спектральному интервалу, охватывающему все длины волн;

2) локальные оптические толщины для газовой атмосферы рассчитаны предварительно вдоль идеализированных нерассеивающих путей и используются в оперативном счете модели уже в подготовленном виде;

3) газовое поглощение в атмосфере зависит от давления и температуры;

4) для описания многократного рассеяния применяется аддитивный метод [10];

5) есть две опции описания геометрии облаков: случайная и максимальное перекрытие

6) коэффициенты облачного поглощения и рассеяния являются функциями водности и ледности облаков, данная зависимость описывается с помощью формул аппроксимаций Паде на основе данных наблюдений в различных типах однородных облаков.

Радиационный алгоритм CLIRAD(FC05)-SW был разработан в Goddard Space Flight Center [5] и модифицирован в работе [13]. Радиационная схема основана на двухпоточковом приближении дельта-Эддингтона и аддитивном методе. В данном алгоритме включено поглощение солнечной радиации водяным паром, молекулами озона, кислорода и углекислого газа, облаками и аэрозолем и явно описано взаимодействие между поглощением и рассеянием молекулами, водяными каплями в облаках и аэрозольными частицами. Выделены восемь спектральных интервалов в ультрафиолетовой и видимой области и три интервала в ближнем инфракрасном диапазоне, где применяется k-распределение с 1–4 членами распределения. Идея метода k-распределения заключается в группировке узких спектральных интервалов, коэффициент газового поглощения для которых одинаков, с последующим расчетом данного коэффициента для всей группы одновременно [4]. Интегрирование ведется не по длине волны, а по коэффициенту поглощения. Предложенные в [13] модификации алгоритма CLIRAD(FC05)-SW касались уменьшения количества членов распределения и модификации коэффициентов газового поглощения с учетом континуума водяного пара. Они позволили без потери точности уменьшить время расчета в безоблачной атмосфере и увеличить точность расчета притоков солнечного излучения в облачных слоях [14] по сравнению с оригинальной версией CLIRAD(FC05)-SW. В облачных слоях оптическая толщина является функцией водности (или ледности) и эффективного размера частиц [5].

При сравнении точности двух алгоритмов эталоном служили результаты полинейных расчетов [6]. Данные расчеты отличаются большой точностью за счет большого числа

спектральных интервалов и более надежного метода Монте-Карло, применяемого при решении уравнения переноса радиации.

Расчет проводился для стандартных атмосфер (умеренных широт и тропической) в газовой, безоблачной (с включением аэрозоля) и облачной атмосфере.

Были унифицированы солнечная постоянная, альbedo подстилающей поверхности и аэрозольная оптическая толщина. Расчеты велись для стандартной атмосферы, лето умеренных широт при зенитном угле Солнца  $30^\circ$ . Рассматривалась однородная облачность, помещенная в слой 1–2 км с тремя различными значениями водности. Для удобства в следующем разделе приводятся соответствующие данной водности оптические толщины, рассчитанные по алгоритму модели CLIRAD(FC05)-SW [5].

### Результаты и обсуждение

В безоблачной, безаэрозольной атмосфере погрешность радиационного алгоритма ACRANEВ в солнечном диапазоне составляет от  $-4$  до  $+5$  Вт/м<sup>2</sup> (рис. 1а), что несколько выше погрешности модели CLIRAD(FC05)-SW ( $1,5$  Вт/м<sup>2</sup>), но несмотря на это обеспечивает достаточно высокую точность расчетов. В атмосфере с присутствием аэрозоля погрешность несколько увеличивается и составляет от  $-7$  до  $+5$  Вт/м<sup>2</sup> (рис. 1б), что также, можно считать, соответствует требуемой от радиационных расчетов точности.

Однако при включении в схему радиационного переноса облачного слоя точность воспроизведения потоков и притоков по схеме ACRANEВ резко падает. Так, суммарное поглощение радиации в атмосфере отличается на  $\pm 12\%$  от полинейных расчетов. При увеличении водности (оптической толщины облаков) ошибка меняет знак с отрицательной (недоучет поглощения) на положительную (слишком сильное поглощение) (рис. 2). Следует отметить, что алгоритм CLIRAD(FC05)-SW имеет существенно меньшую ошибку, слабо зависящую от водности облаков. Что касается непосредственно поглощения в облачных слоях, то ошибка модели ACRANEВ может составлять порядка  $100$  Вт/м<sup>2</sup>, по сравнению с максимум  $7$  Вт/м<sup>2</sup>, когда сопоставлялись результаты модели CLIRAD(FC05)-SW с полинейными расчетами (таблица). В таблице также видна сильная зависимость радиационных характеристик от водности облаков, следовательно, от точности задания этой характеристики зависит и точность расчетов потоков и притоков радиации, как отмечалось в [3].

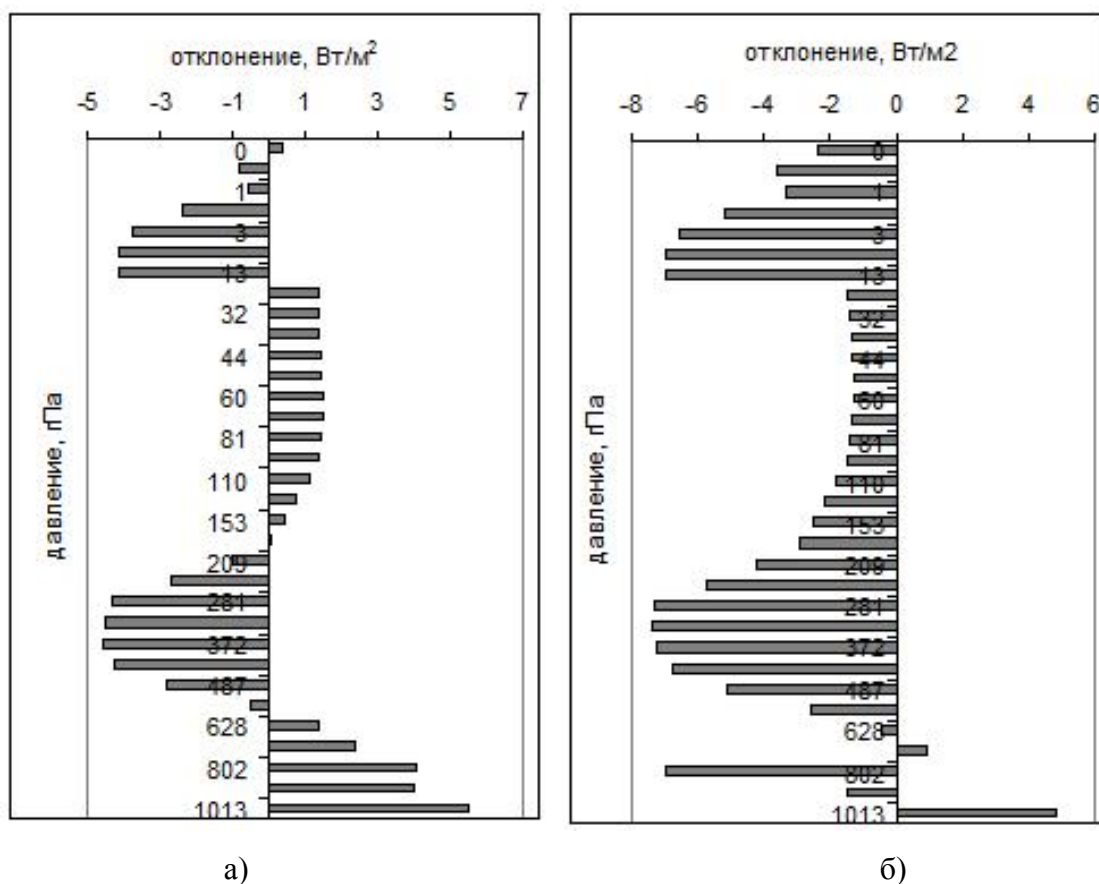


Рис. 1. Отклонение результатов расчетов интегральных потоков солнечного излучения модели AC RANEB от более точных расчетов радиационного переноса для газовой безаэрозольной атмосферы (а), атмосферы со стандартным профилем аэрозоля (б).

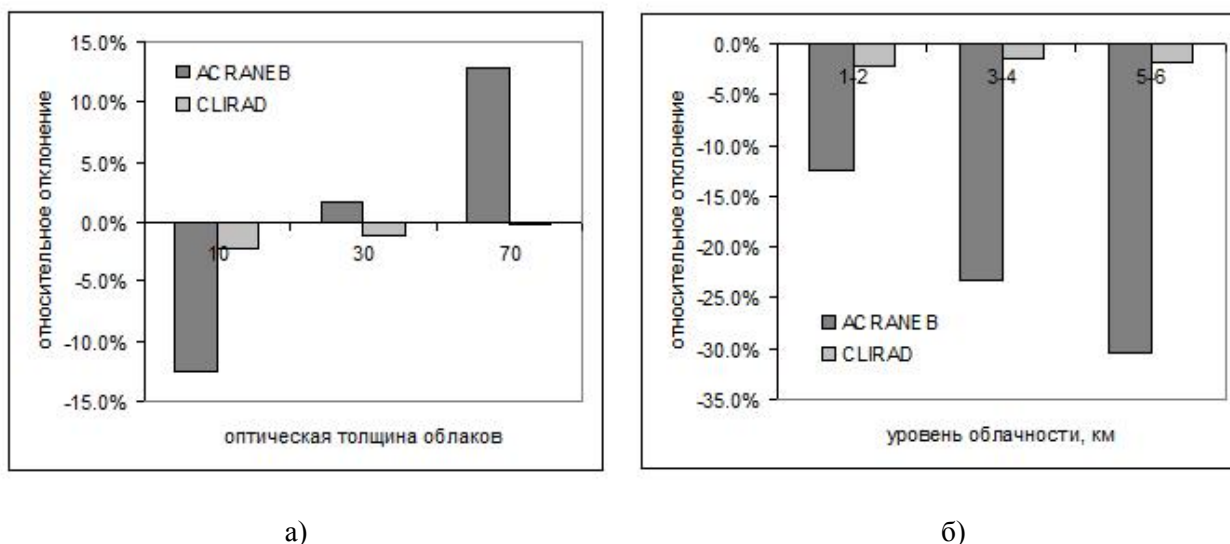


Рис. 2. Отклонение результатов расчетов моделей AC RANEB и CLIRAD от результатов полинейных расчетов суммарного поглощения солнечной радиации в атмосфере с облаками для (а) различной оптической толщины облаков и (б) различной высоты облаков при оптической толщине 10.

**Сравнение интегральных радиационных характеристик в атмосфере с облачностью с использованием полинейных расчетов и двух тестируемых радиационных алгоритмов для различных оптических толщин облачности ( $\tau_{cl}$ ), соответствующим различным значениям водности ( $c_{wc}$ , g/g) в слое 1–2 км от поверхности земли**

Радиационные характеристики	Полинейные расчеты, Вт/м <sup>2</sup>	Расчеты CLIRAD, Вт/м <sup>2</sup>	Расчеты ACRANEB, Вт/м <sup>2</sup>	Отличие от полинейных CLIRAD, Вт/м <sup>2</sup>	Отличие от полинейных ACRANEB, Вт/м <sup>2</sup>
<b><math>\tau_{cl}=10</math> (<math>c_{wc}=5,5 \cdot 10^{-5}</math>)</b>					
Баланс на поверхности	422,0	425,2	313,9	-3,2(-0,8 %)	108,1(25,6 %)
Баланс на ВГА	714,6	711,2	569,8	3,4(0,5 %)	144,7(20,3 %)
Поглощение в атмосфере	292,6	286,0	256,0	6,6(2,3 %)	36,7(12,5 %)
Ослабление в облачном слое	459,0	451,0	619,9	8,0(1,7 %)	-160,9(-35,1 %)
<b><math>\tau_{cl}=30</math> (<math>c_{wc}=2,06 \cdot 10^{-4}</math>)</b>					
Баланс на поверхности	209,7	218,0	77,2	-8,4(-4,0 %)	132,4(63,2 %)
Баланс на ВГА	528,9	533,2	401,8	-4,3(-0,8 %)	127,2(24,0 %)
Поглощение в атмосфере	319,3	315,2	324,5	4,0(1,3 %)	-5,3(-1,7 %)
Ослабление в облачном слое	749,2	735,0	931,0	14,2(1,9 %)	-181,8(-24,3 %)
<b><math>\tau_{cl}=70</math> (<math>c_{wc}=5,75 \cdot 10^{-4}</math>)</b>					
Баланс на поверхности	94,0	108,5	6,5	-14,5(-15,4 %)	87,5(93,1 %)
Баланс на ВГА	426,4	439,8	381,3	-13,5(-3,2 %)	45,0(10,6 %)
Ослабление в атмосфере	332,3	331,3	374,8	1,0(0,3 %)	-42,5(-12,8 %)
Поглощение в облачном слое	906,6	885,0	1021,1	21,6(2,4 %)	-114,6(-12,6 %)

Большие расхождения в поглощении и отражении радиации в слое облачности, рассчитанными по схеме ACRANEB по сравнению с полинейными расчетами, отмечались и ранее [11]. Главной причиной таких расхождений можно считать один спектральный интервал, применяемый для описания всего солнечного излучения. Дополнительной причиной может являться то, что формулы аппроксимации Паде [11] хорошо описывают зависимость коэффициентов поглощения и рассеяния от водности облаков лишь при среднем значении водности, а при больших или малых ее значениях данные аппроксимации теряют точность.

В настоящее время радиационный алгоритм CLIRAD(FC05)-SW внедрен в исследовательскую версию модели ПЛАВ для глобального среднесрочного прогноза погоды с 51 уровнем по вертикали. Суммарное по глобусу значение приходящей к поверхности земли, а также уходящей от верхней границы атмосферы радиации отличается между существующим и новым радиационным алгоритмом для ряда протестированных дней незначительно, однако региональные значения, связанные с распределением облачности различной оптической толщины, существенно отличаются. Предварительные результаты тестирования показали значимое уменьшение ошибок прогноза некоторых метеополей (как приземных, так и в высоких слоях атмосферы) при внедрении нового радиационного алгоритма, однако при этом существенно увеличилось общее время счета модели ПЛАВ. Также на тестовых прогнозах по историческим данным было показано преимущество радиационного алгоритма CLIRAD(FC05)-SW для сезонного прогноза. Особенности совместной работы МОЦ ПЛАВ и нового радиационного алгоритма, а также детали влияния радиационного алгоритма на ошибки прогноза будут исследоваться в дальнейшей работе.

### **Выводы**

Радиационный алгоритм ACRANEВ, в настоящее время работающий в модели ПЛАВ, отличается более высокой степенью упрощения, чем CLIRAD(FC05)-SW. В частности, в данном алгоритме используется только один спектральный интервал, что не позволяет рассчитывать потоки и притоки солнечного излучения в облачных и аэрозольных слоях атмосферы с достаточно высокой точностью.

Применение современной вычислительно эффективной и в то же время достаточно полно описывающей процессы переноса радиации модели CLIRAD(FC05)-SW в МОЦ ПЛАВ может позволить провести детальный анализ взаимодействия радиационных и метеорологических полей, а также, возможно, улучшить качество прогнозов, приблизив их к мировому уровню.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 10-05-01066-а.

### **Список использованных источников**

1. Киктев Д.Б., Тросников И.В., Толстых М.А. Зарипов Р.Б. Оценки успешности прогнозов сезонных аномалий метеорологических полей для модели SL-AV в эксперименте SMIP-2 // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 6. – С. 16–26.

2. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 4. – Р. 5–16.

3. Шатунова М.В., Дмитриева-Арраго Л.Р. Зависимость потоков солнечного излучения в облачной атмосфере от микрофизических свойств облачности // Труды Гидрометцентра России. – 2001. – Вып. 344. – С. 43–58.
4. Arking A., Grossman K. The influence of line shape and band structure on temperatures in planetary atmospheres // J. Atmos. Sci. – 1972. – Vol. 29. – P. 937–949.
5. Chou M.-D., Suarez M.J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies // NASA Tech. Memo. 10460. – 1999. – Vol. 15. – 48 p.
6. Fomin, B.A. Mazin I.P. Model for an investigation of radiative transfer in cloudy atmosphere // Atmospheric Research. – 1998. – Vol. 47-48. – P. 127–153.
7. Fouquart Y., Bonnel B. Intercomparing Shortwave Radiation Codes for Climate Studies // Journal of Geophysical Research. – 1991. – Vol. 96.– P. 8955–8968.
8. Halthore R.N. Intercomparison of shortwave radiative transfer codes and measurements // Journal of Geophysical Research. – 2005. – Vol. 110. – № D11. – P. 1–18.
9. Joseph J.H., Wiscombe W.J., Weinman J.A. The Delta-Eddington approximation for radiative flux transfer // J. Atmos. Sci. – 1976. – Vol. 33. – P. 2452–2459.
10. Lacis A., Hansen J.E. A parameterization for the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere // J. Atmos. Sci. – 1974. – Vol. 31. – P. 118–133.
11. Masek J, Geleyn J.F. New parameterization of cloud optical properties for ALARO-0 // 16th ALADIN Workshop. – 2006.
12. 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, № 2. – P. 303–325.
13. Tarasova T., Fomin B. The Use of New Parameterizations for Gaseous Absorption in the CLIRAD-SW Solar Radiation Code for Models // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2007. – Vol. 24, № 6. – P. 1157–1162.
14. Tarasova T., Fomin B. Analysis of errors in solar heating rate calculations with broadband radiation codes in cloud layers // AIP Conference Proceedings. – Aip, 2009. – P. 109–112.

Поступила в редакцию 3.09.2012 г.