

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 535; 504.32

Вклад континуального поглощения водяного пара в радиационный баланс атмосферы при наличии перистых облаков

Т.Ю. Чеснокова¹, К.М. Фирсов², А.А. Размоллов^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Волгоградский государственный университет
400062, г. Волгоград, пр. Университетский, 10

Поступила в редакцию 10.04.2018 г.

Проведено моделирование восходящих и нисходящих потоков солнечного и теплового излучения для метеорологических условий, характерных для лета средних широт. Сделаны оценки радиационного баланса атмосферы за счет перистой облачности при ее различной мощности. Определена чувствительность радиационного форсинга к моделям континуального поглощения водяного пара.

Ключевые слова: атмосферный радиационный перенос, континуум водяного пара, перистые облака; atmospheric radiative transfer, water vapor continuum, cirrus clouds.

Введение

Потоки и притоки коротковолнового солнечного и длинноволнового собственного излучения в атмосфере Земли определяют радиационный баланс и регулируют циркуляцию атмосферы. Радиационным балансом системы «атмосфера–подстилающая поверхность» называется разность между поглощенной ею радиацией и собственным ее излучением. Современные модели общей циркуляции атмосферы, на основе которых получают наиболее реалистичные оценки эволюции состояния климатической системы, пока не дают возможности однозначно предсказать изменения глобального климата будущего и прогнозировать его региональные особенности. Одна из причин этого – неопределенности параметрических моделей, описывающих процесс переноса излучения через атмосферу Земли [1]. Наблюдаемые дисбалансы связывают главным образом с неопределенностями описания взаимодействия излучения с аэрозолем и облачностью. Однако во всех процессах трансформации облаков и аэрозолей ключевую роль играет водяной пар.

Вклад водяного пара в парниковый эффект в атмосфере Земли значительно превосходит вклад от других газов, таких как CO₂, CH₄ и др. Например, различие между тропическими и полярными широтами определяется различием не только температуры, но и содержания паров воды в атмосфере. Однако при обсуждении проблем, связанных

с усилением парникового эффекта, в первую очередь обращают внимание на возрастание концентрации CO₂, CH₄ и других оптически активных газов, поскольку рост их концентрации приводит непосредственно к возрастанию парникового эффекта. Изменения концентрации водяного пара не могут напрямую влиять на климатические характеристики, в этом смысле он является консервативной примесью, так как его воздействие на атмосферные процессы опосредованное – через обратные связи. Положительная обратная связь приводит к усилению парникового эффекта: при увеличении температуры воздуха (например, за счет возрастания концентрации CO₂) влагосодержание атмосферы возрастает. Рост концентрации водяного пара, в свою очередь, может приводить к увеличению облачности (отрицательная обратная связь), причем при описании всех этих процессов возникают неопределенности относительно величины и знака этой обратной связи [2]. Мы полагаем, что одна из причин – неоднозначность современных спектроскопических моделей, используемых для расчета поглощения парами воды. Отчасти этот тезис согласуется с выводами работы [3], где отмечалось, что коррекция континуального поглощения во вращательной полосе воды приводит к статистически значимому изменению в радиационном облачном форсинге.

В современных моделях, используемых при решении задач переноса излучения, рассматриваются две компоненты: селективное поглощение, обусловленное спектральными линиями, и континуальное поглощение в микро- и макроокнах прозрачности атмосферы. Континуальное поглощение, несмотря на малость, дает значительный вклад в радиационные

* Татьяна Юрьевна Чеснокова (ches@iao.ru); Константин Михайлович Фирсов (fkm.volsu@mail.ru); Алексей Александрович Размоллов (alek.razmolov2010@yandex.ru).

потоки, особенно в окне прозрачности атмосферы 8–12 мкм. Это связано с тем, что поглощение в спектральных линиях насыщено, тогда как в окнах прозрачности атмосферы, где доминирует континуум, поглощение не насыщено. Современные модели континуального поглощения — полуэмпирические, с параметрами, определяемыми на основе экспериментальных данных. Величина континуального поглощения мала, что затрудняет его экспериментальное исследование и, соответственно, приводит к большим неопределенностям в параметрах при его модельном описании [4].

Погрешности расчета восходящих и нисходящих потоков излучения в полосах поглощения (селективное поглощение) не превышают 1 Вт/м^2 [5], тогда как континуальное поглощение при большом влагосодержании в атмосфере может приводить к значительным неопределенностям в расчетах потоков. Например, для тропических условий погрешности расчета нисходящих потоков излучения на нижней границе атмосферы, обусловленные неопределенностями в континуальном поглощении паров воды, могут достигать $4,8 \text{ Вт/м}^2$ [6]. Использование модели континуального поглощения CAVIAR [7, 8] для коротковолнового диапазона спектра и модели, полученной нами на основе данных Baranov et al. [9, 10] для окна 8–12 мкм, привело к существенно большему радиационному облачному форсингу на верхней границе атмосферы в сравнении с использованием модели MT_CKD 2.5 [11, 12], различия достигали величины $\sim 2 \text{ Вт/м}^2$, что заметно превышало оценки, полученные в работе [13].

Особенности континуального поглощения, связанные с тем, что в длинноволновом диапазоне спектра его вклад в радиационные потоки существенно больше, чем в коротковолновом, должны проявляться в случае перистой облачности, в том числе вносить соответствующие неопределенности при расчете облачных форсингов. Известно, что в ряде случаев появление тонких перистых облаков приводит к усилению парникового эффекта, поскольку тонкие облака пропускают коротковолновую солнечную радиацию почти беспрепятственно и задерживают тепловую длинноволновую радиацию. При возрастании оптической толщи облаков коротковолновая радиация начинает заметно ослабляться, знак радиационного воздействия меняется и в целом атмосфера охлаждается. Ранее было показано, что длинноволновые и коротковолновые потоки излучения чувствительны к различным моделям континуального поглощения паров воды [6, 14]. Поэтому необходимо было исследовать, как скажется на радиационном балансе атмосферы (когда учитываются одновременно и длинноволновые, и коротковолновые потоки излучения) использование различных моделей континуума, приведет ли это к количественным отличиям либо могут проявляться и качественные отличия. В работе проведено моделирование восходящих и нисходящих потоков солнечного и теплового излучения и сделаны оценки чувствительности радиационного баланса облачной атмосферы к моделям континуального поглощения водяного пара.

Модели переноса солнечного и теплового излучения в атмосфере с учетом континуального поглощения водяного пара

Современные модели континуума водяного пара, основанные на новых экспериментальных данных CAVIAR и Baranov et al., предсказывают большее поглощение, чем используемые в настоящее время в моделях прогноза климата, что приводит к большему радиационному воздействию атмосферы. Для того чтобы оценить вклад различий в моделях континуума в радиационный перенос в облачной атмосфере, были рассчитаны потоки с учетом различных моделей континуума и различной ледности перистых облаков. В длинноволновом диапазоне (LW) сделано сравнение радиационных потоков для двух моделей континуума: популярной модели MT_CKD [11, 12] и полученной нами модели [6, 15] на основе экспериментальных данных Baranov et al. В коротковолновом диапазоне спектра (SW) сопоставлялись модели континуума MT_CKD и CAVIAR.

Развиваемый нами подход к моделированию атмосферного переноса излучения основывается на современных спектроскопических базах данных, включающих информацию о тонкой структуре линий и сечениях поглощения газов. Проблема состоит в том, что для получения информации о потоках излучения и скорости радиационного нагрева и выхолаживания необходимо решать интегро-дифференциальное уравнение переноса излучения в неоднородной газовой-аэрозольной среде с учетом облачности. Однако применение прямых методов *line-by-line* (LBL) для решения таких задач неприемлемо вследствие больших затрат. В работах [16–18] было показано, что при расчете широкополосного потока излучения функция пропускания зависит только от функции распределения коэффициента поглощения в заданном спектральном интервале и не зависит от тонкой структуры спектра, что позволило предложить эффективный метод параметризации в виде ряда экспонент. Это позволяет до 100000 раз сжимать исходную спектроскопическую информацию. Разработанный нами статистический метод учета перекрытия полос разных газов позволил метод рядов экспонент довести до технологии, которую легко формализовать для вычислений. Фактически метод рядов экспонент («*k*-распределения») (KG) позволяет на основе спектроскопической базы данных типа HITRAN [19] создавать компактную базу данных характеристик молекулярного поглощения, которую можно использовать совместно с различными методами решения уравнения переноса с учетом многократного рассеяния в облаках и аэрозолях, например с методами Монте-Карло и дискретных ординат.

Для решения стационарного уравнения переноса солнечного излучения в рассеивающей и поглощающей атмосфере мы использовали метод дискретных ординат DISORT [20], обладающий высокой скоростью и точностью расчетов. Для параметризации

характеристик молекулярного поглощения атмосферных газов применялся метод KG. Коротковолновый диапазон 0,2–5 мкм разбивался на 30 интервалов, где характеристики аэрозоля и облачности были приняты постоянными, согласно разбиению Slingo [21], а для учета спектрального хода газового поглощения и солнечного излучения использовались 10 квадратур Гаусса на каждом спектральном интервале. Внеатмосферный солнечный спектр задавался согласно данным Kirguzc [22, 23]. Учитывались основные поглощающие газы, распределение по высоте которых было взято из метеомодели лета средних широт AFGL [24], но с содержанием CO_2 380 ppm, O_3 300 DU и CH_4 1,8 ppm. Применялась городская модель аэрозоля на высоте до 2 км, выше – фоновая модель аэрозоля с дальностью видимости 50 км согласно модели [25]. Альбеда поверхности было принято постоянным со значением 0,2.

В длинноволновом диапазоне для параметризации молекулярного поглощения с целью ускорения расчетов также использовался метод KG. При расчете длинноволновых потоков весь интервал 0–3000 см^{-1} разбивался на подинтервалы шириной 20 см^{-1} . Для каждого подинтервала рассчитывались коэффициенты разложения в ряд экспонент, учитывались основные поглощающие газы. Для решения уравнения переноса в тепловом диапазоне использовалась наша оригинальная программа [6, 26], в которой облака описывались моделью «серого тела», когда учитывалось лишь поглощение, а рассеянием пренебрегалось. Различия в потоках при использовании DISORT с *line-by-line* расчетами [27] со спектральным разрешением 0,5 см^{-1} и нашей программы с методом KG в облачных условиях не превысили 1,6% [26], что может рассматриваться как достаточно неплохое согласие. Тем не менее в длинноволновом диапазоне расхождения между различными моделями оказались существенно большими, чем в коротковолновом. Следует отметить, что отличия в моделях касались не только аппроксимации рядом экспонент, но и приближения «серого тела» и разных квадратурных формул для численного интегрирования по высоте.

Радиационные процессы, охлаждение или нагревание атмосферы и поверхности Земли в значительной степени зависят от характеристик облачности. Перистые облака регулярно покрывают 20–30% площади земного шара [28]. Они могут охлаждать атмосферу, поглощая и рассеивая солнечное излучение в коротковолновом диапазоне, при этом увеличивая излучение, приходящее на Землю в длинноволновом диапазоне за счет того, что кристаллы могут излучать большую энергию, чем водяной пар [29]. Для учета облачности в радиационных блоках климатических моделей и прогноза погоды используют такие характеристики, как водность или ледность (IWC) облака, эффективный диаметр капель или кристаллов и высота расположения облаков, которые могут быть получены из регулярных спутниковых наблюдений. На основе этих характеристик созданы различные параметризации, упрощающие расчет пе-

реноса излучения в облаках. В климатических моделях для учета свойств перистых облаков используются параметризации Fu et al. [28, 30], позволяющие на основе вышеперечисленных характеристик облаков определить коэффициенты ослабления и поглощения, альбедо однократного рассеяния, фактор асимметрии. В наших расчетах мы применяем параметризацию Fu et al., разработанную для расчетов переноса солнечного излучения в перистых облаках [28], а затем развитую для ИК-диапазона [30].

Варьирование оптической толщины (ледности или водности облака) приводит к значимым изменениям радиационных потоков. Например, тепловой поток, приходящий на подстилающую поверхность от нижней границы облака, при изменении водности на порядок (от 0,03 до 0,3 $\text{г}/\text{м}^3$) различается на 15 $\text{Вт}/\text{м}^2$, при этом отличие от безоблачных условий составляет 40–50 $\text{Вт}/\text{м}^2$ [29]. Поэтому мы провели моделирование атмосферного переноса излучения в присутствии перистых облаков различной мощности и оценили влияние моделей континуального поглощения водяного пара на расчеты радиационного форсинга облаков. Были рассмотрены перистые облака Ci1 – Ci4 при варьировании IWC в диапазоне от 0,001 до 0,1 $\text{г}/\text{м}^3$. Они располагались на высотах 6–8 км с эффективным диаметром кристаллов 50 мкм, что встречается в средних широтах.

Тестовые расчеты потоков излучения

Были сделаны тестовые расчеты коротковолновых потоков излучения в безоблачной атмосфере с использованием метода LBL со спектральным разрешением 0,01 см^{-1} и с помощью параметризации методом KG. Учитывались поглощение основными атмосферными газами для модели лета средних широт, аэрозольное и релеевское рассеяние и поглощение. Результаты расчетов прямых и диффузно рассеянных нисходящих потоков у поверхности Земли и восходящих потоков на верхней границе атмосферы приведены в табл. 1. Сравнение показало хорошее согласие прямых расчетов LBL и параметризации KG. Расхождение в прямых потоках не превышало 0,34%, а в диффузно рассеянных нисходящих потоках – 0,04%.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что аппроксимация рядом экспонент для коротковолнового диапазона приводит к погрешности, не превышающей 0,4%. Для длинноволнового диапазона такая погрешность будет, по крайней мере, не выше, а, скорее всего, ниже, поскольку число спектральных интервалов, на которые разбивается длинноволновой диапазон, в 5 раз превышает число интервалов разбиения коротковолнового диапазона.

Пакет программ DISORT предполагает, что при расчете переноса излучения неоднородная трасса разделяется на слои, каждый из которых является однородным, т.е. для численного интегрирования по высоте применяется метод прямоугольников. Этот

Таблица 1

**Коротковолновые потоки излучения у поверхности Земли и на верхней границе атмосферы (Вт/м²)
в спектральном интервале 0,25–3,33 мкм**

Высота, км	DISORT + LBL			DISORT + KG, 10 квадратур			Различия в потоках, % LBL – KG		
	Прямой	Нисход. диффуз.	Восхо- дящий	Прямой	Нисход. диффуз.	Восхо- дящий	Прямой	Нисход. диффуз.	Восхо- дящий
0	330,613	97,379	85,599	331,754	97,34	85,819	-0,34	0,04	-0,26
100	651,461	-0,003	127,599	653,185	0,005	127,84	-0,26	–	-0,19

Примечание. Зенитный угол Солнца SZA = 60°.

метод вполне приемлем для коротковолнового диапазона, однако для длинноволнового диапазона спектра, когда приходится учитывать собственное излучение, он может приводить к большим погрешностям. Чтобы оценить эти погрешности в длинноволновом диапазоне, был проведен расчет переноса излучения для безоблачной атмосферы двумя методами (табл. 2). При расчетах использовалась стандартная сетка высот. В наших вычислениях при использовании метода KG интегрирование по высоте было оптимизировано и применялись квадратуры более высокого порядка, чем в DISORT, что обеспечивало погрешность расчета не хуже 1 Вт/м² [5, 6].

Согласно вышесказанному расхождению в длинноволновых потоках главным образом обусловлены разными квадратурными формулами при численном интегрировании по высоте, причем эта погрешность, как следует из табл. 2, может достигать 2%. В качестве дополнительного аргумента можно сделать грубую аналитическую оценку погрешности расчета. Для этого будем полагать, что собственное излучение атмосферы описывается моделью «черного тела» $F = \sigma T^4$, тогда относительная погрешность потока определится формулой $\Delta F/F = 4\Delta T/T$. Даже если погрешность в температуре в отдельном слое составит $\Delta T \sim 1$ К, то погрешность в потоке превысит 1%. Чтобы повысить точность расчетов в длинноволновом диапазоне при использовании DISORT, нужно будет очень сильно дробить высотную сетку так, чтобы число точек достигало нескольких сотен.

Последнее, что следовало оценить, – это погрешность, обусловленную пренебрежением рассеяния в длинноволновом диапазоне. В работе [29] было показано, что при влажности больше 0,1 г/м³ потоки излучения от облаков описываются моделью «черного тела» с высокой точностью. Поэтому мы провели расчеты для более тонких облаков, причем для описания поглощения облаками использовали модель «серого тела», т.е. излучение облака рассчитывалось согласно закону Кирхгофа. Облако будет излучать, как «черное тело», лишь в том случае, когда его оптическая толщина много больше единицы. Расчеты проводились для тех же метеорологических условий, что и в табл. 2 для безоблачной атмосферы, с тем лишь отличием, что на высотах от 9 до 11 км располагалось перистое облако с эффективным диаметром частиц 50 мкм и IWC = 0,001 г/м³.

Из сопоставления длинноволновых потоков в безоблачной и облачной атмосфере видно, что погрешность между DISORT и KG возросла примерно на 1 Вт/м² (0,6%) для восходящих потоков и незначительно изменилась для нисходящих. Причину этого легко объяснить. Вклад облаков в нисходящий поток на уровне Земли мал, а все определяется излучением газовых компонент атмосферы, тогда как на верхней границе атмосферы перистые облака дают определяющий вклад. Другой вывод, который можно сделать из этих расчетов, это то, что пренебрежение рассеянием в облаках в длинноволновом диапазоне не приводит к заметным погрешностям при расчете потоков.

Таблица 2

**Длинноволновые потоки излучения у поверхности Земли и на верхней границе атмосферы (Вт/м²)
в спектральном интервале 3,7–100 мкм**

Высота, км	DISORT + LBL		KG		Различия в потоках		Различия в потоках, %	
	F_{down}	F_{up}	F_{down}	F_{up}	ΔF_{down}	ΔF_{up}	ΔF_{down}	ΔF_{up}
<i>Безоблачная атмосфера</i>								
0	358,043	433,97	355,394	434,04	2,65	-0,07	0,74	-0,02
100	0	276,04	0	281,51	0	-5,47	0	-1,9
<i>Перистые облака, IWC = 0,001 г/м³</i>								
0	359,73	433,97	357,25	434,04	2,48	-0,07	0,7	0,02
100	0	263,29	0	269,82	0	-6,53	0	2,5

Примечание. F_{down} – нисходящий поток, F_{up} – восходящий поток. Метеомодель – лето, средние широты.

Результаты расчетов радиационного форсинга

Были рассчитаны потоки излучения на нижней и верхней границах атмосферы при варьировании IWC от 0,001 до 0,1 г/м³ и в безоблачной атмосфере для лета средних широт. Моделирование проходило отдельно для теплового и солнечного диапазонов. Перистые облака располагались на высотах от 6 до 8 км с эффективным диаметром кристаллов 50 мкм. Содержание CO₂ составляло 380 ppm, O₃ 300 DU и CH₄ 1,8 ppm, альbedo поверхности 0,2. В табл. 3 и 4 приведены результаты расчета восходящих и нисходящих потоков на верхней и нижней границах атмосферы, а также вклад континуального поглощения.

Из табл. 3 следует несколько выводов. Во-первых, континуальное поглощение для безоблачной атмосферы дает максимальный вклад в нисходящие длинноволновые потоки, достигающий 11%. С ростом мощности облака его вклад падает, но тем не менее остается значимым. Во-вторых, для восходящих потоков длинноволнового излучения на верхней границе атмосферы вклад континуума значительно меньше, чем для нисходящих потоков, и быстро уменьшается с увеличением ледности облака. Это легко объяснить тем, что плотные облака экранируют собственное излучение нижнего слоя тропосферы там, где континуум доминирует, а выше облаков влажность мала и, соответственно, роль континуального излучения незначительна.

Из анализа табл. 3 и 4 следует, что в коротковолновом диапазоне вклад континуума проявляется иначе, чем в длинноволновом. Для нисходящего потока его относительный вклад практически не меняется, а для восходящего излучения с ростом ледности хотя и убывает, но значительно медленнее, чем в длинноволновом диапазоне. Следует также обратить внимание на то, что в длинноволновом диапазоне континуальное поглощение приводит к возрастанию нисходящего потока излучения на нижней границе атмосферы и уменьшению восходящего потока излучения на верхней границе атмосферы, т.е. к возрастанию парникового эффекта. В коротковолновом диапазоне континуальное поглощение приводит к уменьшению нисходящего и восходящего потоков, т.е. к возрастанию поглощения парами воды, находящимися в воздухе. С ростом поглощения парами воды нисходящий коротковолновый поток уменьшается, а следовательно, уменьшается и нагрев поверхности Земли, однако рост температуры воздуха за счет дополнительного поглощения континуумом приведет к дополнительному длинноволновому нисходящему потоку излучения и, соответственно, к дополнительному нагреву поверхности. Если рассматривать радиационный баланс на верхней границе атмосферы, то для системы «атмосфера–подстилающая поверхность» континуальное поглощение приводит к усилению парникового эффекта во всем спектральном диапазоне.

Радиационный форсинг (RF) облаков вычислялся как разница между потоками в присутствии облаков и в безоблачной атмосфере. Были вычислены

Таблица 3
Вклад континуума H₂O в длинноволновые потоки излучения в облачной и безоблачной атмосфере (Вт/м²) в спектральном интервале 3,7–100 мкм

IWC, г/м ³	ИК-потоки с континуумом		ИК-потоки без континуума		Вклад континуума		Относительный вклад континуума, %	
	F_{down}	F_{up}	F_{down}	F_{up}	ΔF_{down}	ΔF_{up}	ΔF_{down}	ΔF_{up}
0	355,394	281,505	315,392	289,780	40,002	-8,275	11,256	-2,940
0,001	358,184	274,712	320,088	282,304	38,096	-7,592	10,636	-2,764
0,01	374,662	234,358	347,620	238,008	27,043	-3,65	7,218	-1,557
0,1	390,445	193,831	373,247	194,298	17,198	-0,466	4,405	-0,2405

Примечание. F_{down} — нисходящий поток у поверхности, F_{up} — восходящий поток на 100 км.

Таблица 4
Вклад континуума H₂O в коротковолновые потоки излучения в облачной и безоблачной атмосфере (Вт/м²) в спектральном интервале 0,25–3,33 мкм

IWC, г/м ³	Потоки с континуумом		Потоки без континуума		Вклад континуума		Относительный вклад континуума, %	
	F_{down}	F_{up}	F_{down}	F_{up}	ΔF_{down}	ΔF_{up}	ΔF_{down}	ΔF_{up}
0	428,628	127,631	440,167	133,258	-11,539	-5,627	-2,692	-4,409
0,001	420,016	135,313	431,347	141,201	-11,331	-5,888	-2,698	-4,352
0,01	358,135	193,452	367,768	201,000	-9,633	-7,548	-2,690	-3,902
0,1	161,612	373,828	165,857	386,203	-4,246	-12,375	-2,627	-3,310

Примечание. F_{down} — нисходящий поток у поверхности (прямой + диффузно рассеянный), F_{up} — восходящий поток на 100 км.

радиационные форсинги с использованием моделей континуума водяного пара MT_CKD2.5 (в тепловом и солнечном диапазонах), CAVIAR (в солнечном диапазоне) и Varanov et al. (в тепловом диапазоне). Суммарный RF определялся как сумма радиационных форсингов в тепловом и солнечном диапазонах. На рис. 1 представлена зависимость RF перистых облаков от IWC для двух зенитных узлов Солнца (SZA), которые могут наблюдаться летом в средних широтах. Суммарный RF на нижней границе атмосферы при SZA = 35° выше RF при SZA = 60°, достигая отличия почти в 2 раза при большой оптической толщине облаков (рис. 1, а). На верхней границе атмосферы при небольшой ледности и SZA = 35° наблюдаются меньшие значения RF, чем при SZA = 60°, но с увеличением ледности радиационный форсинг при SZA = 35° возрастает быстрее, чем при SZA = 60°, и становится больше RF при SZA = 60°. При этом суммарное радиационное воздействие перистых облаков на нижней границе атмосферы больше, чем на верхней.

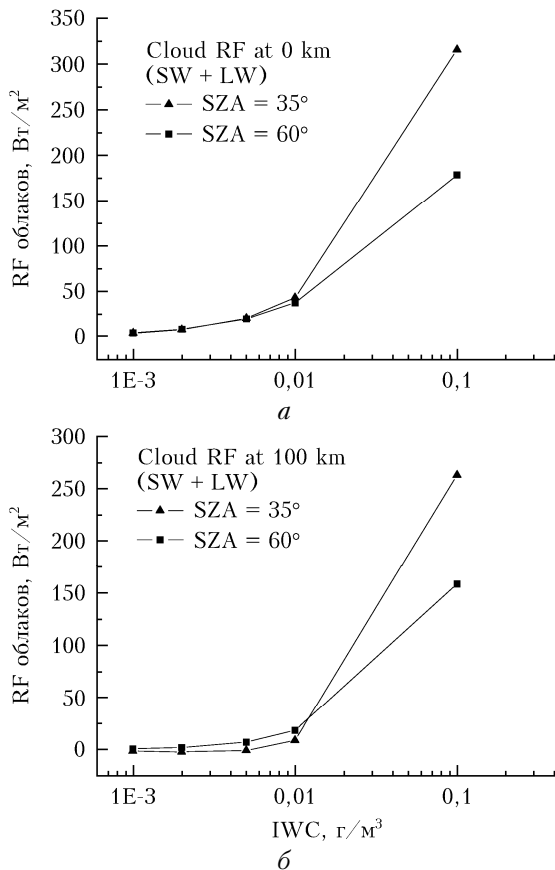


Рис. 1. Суммарный RF облаков на нижней (а) и верхней (б) границах атмосферы, вычисленный с моделью континуума MT_CKD 2.5

На рис. 2 и 3 приведены различия в радиационном форсинге перистых облаков, вычисленном с различными моделями континуума. Результаты моделирования RF облаков при IWC 0,001–0,01 г/м³ существенно зависят от моделей континуума. Различия в суммарном RF облаков на нижней границе

атмосферы за счет моделей континуума MT_CKD 2.5 (SW + LW) и данных CAVIAR (SW) совместно с данными Varanov et al. (LW) достигало 1,2 Вт/м² при IWC = 0,01 г/м³ и SZA = 60° (рис. 2, а). Дальнейшее увеличение ледности до 0,1 г/м³ уменьшает относительные различия в RF, но остаются достаточно большие абсолютные различия. При тонкой перистой облачности расхождения составили 5% (рис. 2, б). Различия в суммарном RF облаков на верхней границе атмосферы за счет моделей континуума составило 1,8 Вт/м² при IWC = 0,1 г/м³ и SZA = 35° (рис. 3, а), при этом наблюдаются большие относительные различия при небольшой оптической толщине облаков.

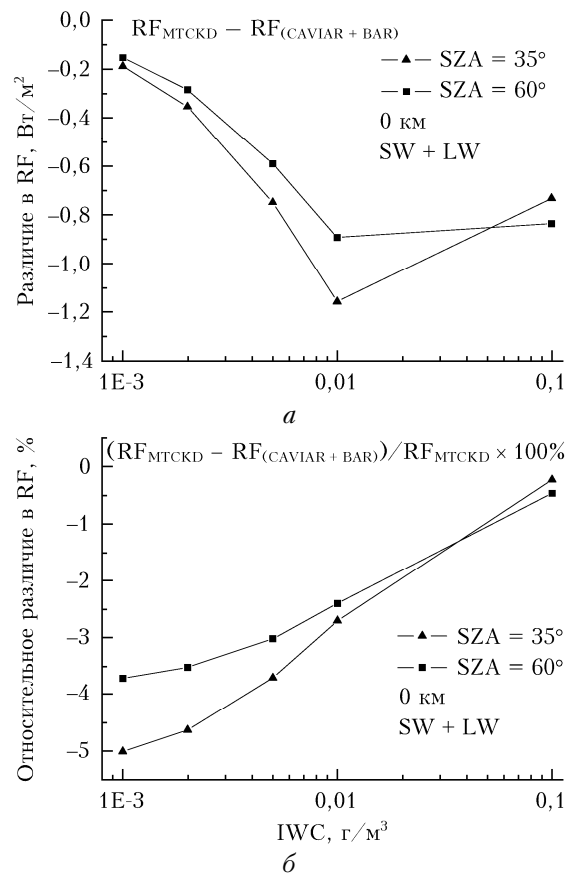


Рис. 2. Абсолютные (а) и относительные (б) различия в суммарном RF облаков на нижней границе атмосферы, вычисленном с моделью континуума MT_CKD 2.5 (SW + LW) и моделями CAVIAR (SW) совместно с Varanov et al. (LW)

В реальной атмосфере могут возникать условия, когда появление тонких облаков приводит к усилению парникового эффекта, а при дальнейшем возрастании ледности — к выхолаживанию. Так, например, перистая облачность при малых оптических толщах приводит к усилению парникового эффекта, поскольку пропускает коротковолновую солнечную радиацию и задерживает тепловую длинноволновую радиацию. При возрастании оптической толщи перистых облаков коротковолновая радиация начинает заметно ослабляться и знак RF меняется. Может

ли повлиять выбор модели континуального поглощения на знак радиационного форсинга?

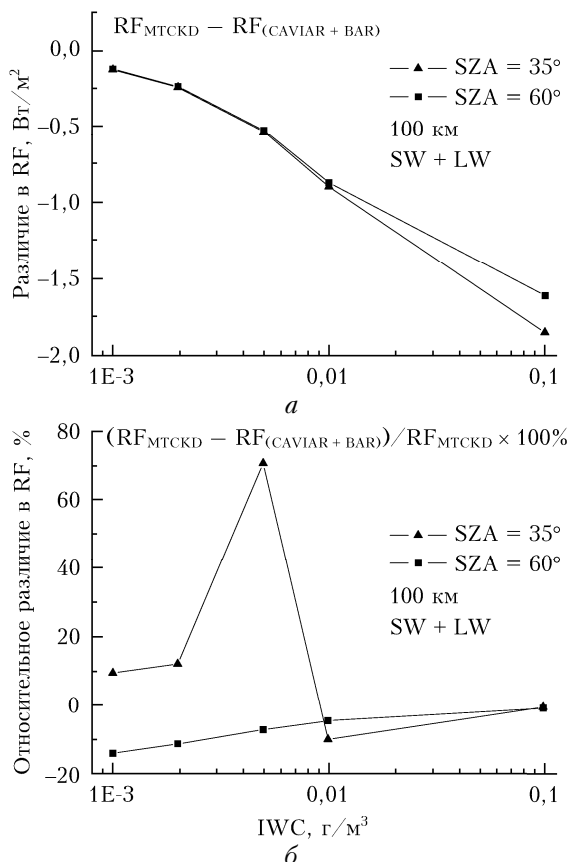


Рис. 3. Абсолютные (а) и относительные (б) различия в суммарном RF облаков на верхней границе атмосферы, вычисленном с моделью континуума MT_CKD 2.5 (SW + LW) и моделями CAVIAR (SW) совместно с Baranov et al. (LW)

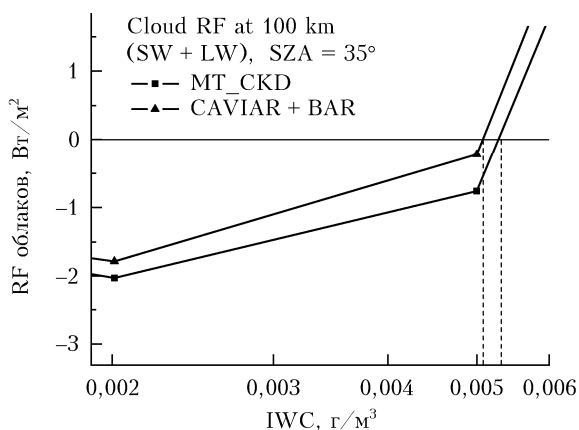


Рис. 4. Смена знака суммарного RF облаков на верхней границе атмосферы, вычисленного с моделью континуума MT_CKD 2.5 (SW + LW) и моделями CAVIAR (SW) совместно с Baranov et al. (LW)

Мы рассчитали суммарный форсинг перистых облаков с использованием модели MT_CKD (SW + LW), а также с данными CAVIAR в SW-диапазоне и данными Baranov et al. в LW-диапазоне при

различных значениях ледности. На рис. 4 показано, что облачный радиационный форсинг на верхней границе атмосферы, вычисленный с разными моделями континуума, меняет знак при различных значениях: $IWC = 0,0051 \text{ г/м}^3$ при использовании MT_CKD и $0,0054 \text{ г/м}^3$ при CAVIAR совместно с Baranov et al.

Заключение

Разработана и протестирована широкополосная модель для расчета потоков излучения в атмосфере Земли для безоблачных и облачных условий. Она основывается на разложении широкополосных функций пропускания в ряд экспонент, что обеспечивает высокую скорость и точность расчета потоков излучения как для безоблачных, так и для облачных условий. Погрешность расчета за счет использования рядов экспонент в сравнении с прямым методом счета *line-by-line* не превышала 0,3%. Для учета рассеяния в облаках и на аэрозольных частицах в коротковолновом диапазоне применялся метод дискретных ординат, а в длинноволновом диапазоне для описания облаков использовалось приближение «серого тела». Наши тестовые расчеты показали, что погрешности расчета потоков не превышают 1%.

Проведенное нами моделирование для типичных летних условий умеренных широт показало, что радиационное воздействие перистых облаков приводит к росту нисходящего потока излучения на нижней границе атмосферы в сравнении с безоблачной атмосферой, т.е. к усилению парникового эффекта. При этом вклад континуума водяного пара в восходящие и нисходящие потоки излучения, а также различия в моделях континуума зависят от величины ледности или водности облака. Сопоставление двух современных моделей континуума показало, что для перистых облаков различия в радиационном форсинге для нижней границы атмосферы составляли величину, изменяющуюся в диапазоне от $-0,1$ до $-1,2 \text{ Вт/м}^2$ или от -5 до $-0,5\%$ в зависимости от ледности облака, тогда как для верхней границы атмосферы эти различия составляли от $-0,2$ до -2 Вт/м^2 , причем относительное различие в радиационном форсинге при зенитном угле Солнца, равном 35° , испытывало значительные осцилляции. Детальное исследование обнаруженного эффекта позволило установить, что при использовании разных моделей континуума суммарный радиационный форсинг облаков меняет знак при разных значениях ледности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект № АААА-А17-117021310148-7).

1. Stephens G.L., L'Ecuyer T. The Earth's energy balance // Atmos. Res. 2015. V. 166. P. 195–203.
2. Stephens G.L., Wild M., Stackhouse P.W., Ecuyer T.L., Kato S., Henderson D.S. The global character of the flux of downward longwave radiation // J. Clim. 2012. V. 25. P. 2329–2340. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00262.1.

3. Turner D.D., Merrelli A., Vimont D., Mlawer E.J. Impact of modifying the longwave water vapor continuum absorption model on community Earth system model simulations // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. D04106. DOI: 10.1029/2011JD016440.
4. Пташник И.В. Континуальное поглощение водяного пара: краткая предыстория и современное состояние проблемы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 5. С. 443–459.
5. Firsov K.M., Chesnokova T.Yu., Bobrov E.V., Klitochenko I.I. Estimation of uncertainties in the longwave radiative fluxes simulation due to spectroscopic errors // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9292. P. 929205. DOI: 10.1117/12.2075550.
6. Чеснокова Т.Ю., Клиточенко И.И., Фирсов К.М. Вклад континуального поглощения H₂O в потоки длинноволнового излучения облачной и безоблачной атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 10. С. 843–849.
7. Ptashnik I.V., McPheat R.A., Shine K.P., Smith K.P., Williams R.G. Water vapor self-continuum absorption in near-infrared windows derived from laboratory measurements // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. D16305.
8. Ptashnik I.V., McPheat R.A., Shine K.P., Smith K.M., Williams R.G. Water vapour foreign continuum absorption in near-infrared windows from laboratory measurements // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2012. V. 370. P. 2557–2577.
9. Baranov Yu.I., Lafferty W.J., Ma Q., Tipping R.H. Water-vapor continuum absorption in the 800–1250 cm⁻¹ spectral region at temperatures from 311 to 363 K // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2008. V. 109, N 12–13. P. 2291–2302.
10. Baranov Yu.I., Lafferty W.J. The water vapour self- and water-nitrogen continuum absorption in the 1000 and 2500 cm⁻¹ atmospheric windows // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2012. V. 370. P. 2578–2589.
11. URL: http://rtweb.aer.com/continuum_frame.htm (last access: 09.03.2018).
12. Mlawer E.J., Payne V.H., Moncet J.-L., Delamere J.S., Alvarado M.J., Tobin D.C. Development and recent evaluation of the MT_CKD model of continuum absorption // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2012. V. 370. P. 2520–2556.
13. Paynter D., Ramaswamy V. Variations in water vapor continuum radiative transfer with atmospheric conditions // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. D16310. DOI: 10.1029/2012JD017504.
14. Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Размолов А.А., Ченцов А.В. Вклад континуального поглощения водяного пара в потоки коротковолнового солнечного излучения в атмосфере Земли при наличии перистой облачности // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 10. С. 813–820; Firsov K.M., Chesnokova T.Yu., Razmolov A.A., Chentsov A.V. Contribution of the water vapor continuum absorption to shortwave solar fluxes in the Earth's atmosphere with cirrus cloudiness // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 1. P. 1–8.
15. Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Бобров Е.В. Роль континуального поглощения паров воды в длинноволновых радиационных процессах приземного слоя атмосферы в регионе Нижнего Поволжья // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 8. С. 665–672; Firsov K.M., Chesnokova T.Yu., Bobrov E.V. The role of the water vapor continuum absorption in near ground long-wave radiation processes of the lower Volga Region // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 1. P. 1–8.
16. Чеснокова Т.Ю., Фирсов К.М., Воронина Ю.В. Применение рядов экспонент при моделировании широкополосных потоков солнечного излучения в атмосфере Земли // *Оптика атмосфер. и океана.* 2007. Т. 20, № 9. С. 799–804.
17. Tvorogov S.D., Zhuravleva T.B., Rodimova O.B., Firsov K.M. Theory of series of exponents and its application for analysis of radiation processes // *Problems of Global Climatology and Ecodynamics: Anthropogenic Effects on the State of Planet Earth.* UK: Springer/Praxis, Chichester, 2008. Ch. 9. P. 211–240.
18. Lacis A., Oinas V. A description of the *k*-distribution method for modeling non-grey gaseous absorption, thermal emission, and multiple scattering in vertically inhomogeneous atmospheres // *J. Geophys. Res.* D. 1991. V. 96, N 5. P. 9027.
19. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Chance K., Cohen E.A., Coudert L.H., Devi V.M., Drouin B.J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R.R., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J.T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R.J., Li G., Long D.A., Lyulin O.M., Mackie C.J., Massie S.T., Mikhailenko S., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V., Perink A., Polovtseva E.R., Richard C., Smith M.A.H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G.C., Tyuterev V.I., Wagner G. The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 130. P. 4–50.
20. Stammes K., Tsay S.-C., Wiscombe W., Jayaweera K. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media // *Appl. Opt.* 1988. V. 27, iss. 12. P. 2502.
21. Slingo A.A. GCM parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds // *J. Atmos. Sci.* 1989. V. 46, N 10. P. 1419–1427.
22. Fontenla J., White O.R., Fox P.A., Avrett E.H., Kurucz R.L. Calculation of solar irradiances. I. Synthesis of the solar spectrum // *Astrophys. J.* 1999. V. 518. P. 480–500.
23. URL: <http://kurucz.harvard.edu/sun/irradiance2008/> (last access: 09.03.2018).
24. Anderson G.P., Clough S.A., Kneizys F.X., Chetwynd J.H., Shettle E.P. AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km) // AFGL-TR-86-0110, AFGL (OPI), Hanscom AFB, MA 01736. Environmental Research Paper. 1986. N 954. 25 p.
25. Kneizys F.X., Robertson D.S., Abreu L.W., Acharya P., Anderson G.P., Rothman L.S., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Shettle E.P., Gallery W.O., Berk A., Clough S.A., Bernstein L.S. The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model. Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, Hanscom AFB, MA 01731-3010. 1996. P. 260.
26. Firsov K.M., Chesnokova T.Yu., Klitochenko I.I., Razmolov A.A. Comparison of two water vapor continuum models in simulation of the longwave fluxes taking into account absorption in cirrus clouds // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. P. 100350I-1.
27. Mitsel A.A., Ptashnik I.V., Firsov K.M., Fomin A.B. Efficient technique for *line-by-line* calculating the transmittance of the absorbing atmosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 1995. V. 8, N 10. P. 847–850.

28. *Fu Q.* An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models // *J. Clim.* 1996. V. 9. P. 2058–2082.
29. *Харин А.С., Лузан П.И., Шатунова М.В., Дмитриева-Арраго Л.Р.* Метод расчета компонент радиационной энергетики системы «Земля–атмосфера» в ИК-области спектра и роль микрофизических свойств облаков // Тр. Гидрометцентра России. 2010. С. 59–77.
30. *Fu Q., Yang P., Sun W.* An accurate parameterization of the infrared radiative properties of cirrus clouds for climate models // *J. Clim.* 1998. V. 11. P. 2223–2237.

T.Yu. Chesnokova, K.M. Firsov, A.A. Razmolov. **Contribution of the water vapor continuum absorption to radiative balance of the atmosphere with cirrus clouds.**

The upward and downward fluxes of solar and thermal radiation are simulated for the meteorological conditions typical for midlatitude summer. The atmospheric radiative balance due to cirrus cloudiness with different depth is assessed. The sensitivity of the radiative forcing to models of water vapor continual absorption is estimated.