

Вклад континуального поглощения H_2O в потоки длинноволнового излучения облачной и безоблачной атмосферы

К.М. Фирсов¹, Т.Ю. Чеснокова², И.И. Клиточенко^{1*}

¹ Волгоградский государственный университет
400062, г. Волгоград, пр. Университетский, 100

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 28.03.2016 г.

Окно прозрачности атмосферы 8–12 мкм является одним из определяющих спектральных интервалов в формировании теплового баланса атмосферы, причем вклад континуального поглощения в радиационный баланс наиболее значим. Представлены результаты моделирования восходящих и нисходящих потоков для различных метеорологических ситуаций (облачные и безоблачные), и оценивается роль континуума H_2O с использованием различных моделей континуального поглощения.

Ключевые слова: континуальное поглощение водяным паром, перистые облака, перенос излучения, радиационный форсинг; water vapor continual absorption, cirrus cloud, transfer of radiation, radiative forcing.

Введение

Мониторинг атмосферы и земной поверхности, а также повышение качества предсказаний погоды и климата как в глобальном, так и региональном масштабах требуют все более сложных и высокоточных радиационных моделей. В настоящее время сложилась устойчивая точка зрения о том, что молекулярное поглощение в современных радиационных моделях учитывается достаточно корректно, чего нельзя сказать об аэрозоле и облаках [1]. Действительно, многочисленные сопоставления рассчитанных значений интегральных потоков радиации с использованием различных спектроскопических баз данных, содержащих информацию о параметрах спектральных линий, демонстрируют незначительные расхождения в селективном поглощении. Одним из примеров такого сопоставления является работа [2], где отмечалось, что рассчитанные значения интегральных потоков длинноволновой радиации с использованием текущей версии спектроскопической базы HITRAN (2008 г.) и предыдущей базы (2002 г.) показали очень хорошее согласие: отличия менее чем на $\sim 0,1$ Вт/м². Очевидно, что такие сопоставления лишь косвенно подтверждают, что вышеуказанные погрешности малы, поскольку они отражают не абсолютные погрешности в параметрах линий,

а лишь отличия одной базы от другой. Более последовательный анализ качества спектроскопической базы данных HITRAN, выполненный нами на основе статистического подхода, позволил получить более объективную оценку погрешности расчета интегральных длинноволновых потоков ~ 1 Вт/м². Следует отметить, что эта оценка является верхней, так как получена в предположении, что погрешности параметров линий либо систематически завышены, либо занижены [3].

Все вышесказанное свидетельствует, что на сегодняшний момент времени нет особых проблем с селективным молекулярным поглощением. Иначе дело обстоит с континуальным поглощением парами воды в макро- и микроокнах прозрачности атмосферы. Причем здесь есть несколько аспектов.

В последнее десятилетие наиболее популярной для радиационных расчетов стала модель континуума MT_CKD [4]. Это обусловлено рядом причин. Данная модель малопараметрическая, описывает контур спектральной линии не только в крыле, но и в промежуточной части, регулярно обновляется по мере появления новых экспериментальных фактов (к настоящему времени известно около 10 версий). В то же время отличия одной версии этой модели от другой не очень значительны, причем качество модели оценивается на основе расчета энергетического баланса для верхней границы атмосферы, где чувствительность потоков к континуальному поглощению невелика. Следует также заметить, что скорость радиационного выхолаживания для типичных условий тропиков, умеренных и высоких широт при

* Константин Михайлович Фирсов (fkm.volsu@mail.ru); Татьяна Юрьевна Чеснокова (ches@iao.ru); Ирина Игоревна Клиточенко (kii_irina@mail.ru).

использовании различных моделей континуума также мало различается [5]. Все эти аргументы, казалось бы, свидетельствуют в пользу того, что не только с селективным, но и с континуальным поглощением дело обстоит благополучно.

Однако есть факты, свидетельствующие о том, что модель континуального поглощения требует уточнения. Это подтверждается рядом работ [3, 6, 7]. Так, например, в [6] приведены оценки погрешностей расчета длинноволновых потоков для лета умеренных широт, которые составили $1,1 \text{ Вт/м}^2$ для восходящего и $2,5 \text{ Вт/м}^2$ для нисходящего потоков соответственно. Чувствительность нисходящих потоков на нижней границе атмосферы к континуальному поглощению существенно выше, нежели для восходящих потоков для верхней границы атмосферы, причем среднезональные метеорологические профили не отражают в полной мере условия, реализующиеся в атмосфере Земли. Наши оценки показывают, что для некоторых метеорологических условий современные модели континуума могут приводить к значительным погрешностям в нисходящих потоках для окна прозрачности атмосферы 8–12 мкм, превышающим 14% [3], что составляет очень большую величину для климатических моделей.

В то же время вклад водяного пара в парниковый эффект является определяющим и влияющим как на глобальный климат, так и на микроклимат отдельного региона. Однако этот вклад проявляется лишь через его обратные связи. С одной стороны, рост концентрации парниковых газов, таких как CO_2 и CH_4 , вызывает нагрев атмосферы и поверхности Земли, что приводит к увеличению содержания паров воды в атмосфере (положительная обратная связь). С другой стороны, положительная обратная связь приводит не только к увеличению концентрации паров воды, но и к изменению вертикальных профилей температуры, что, в свою очередь, оказывает влияние на влажность, а также облачность и осадки (отрицательная обратная связь), причем относительно величины и даже знака этой обратной связи проходили широкие дебаты [8]. В этом плане следует отметить работу [9], где на основе анализа результатов климатического моделирования отмечалось, что коррекция континуального поглощения в микроокнах прозрачности (в спектральных областях вблизи 24 и 50 мкм) привела к сравнительно небольшому прямому радиационному эффекту, но статистически значимому, поскольку это вызвало изменения в вертикальных профилях температуры и влажности и, как следствие, в изменении радиационного облачного форсинга. Поэтому роль континуального поглощения необходимо исследовать во всем многообразии атмосферных процессов, включая облачность.

В данной работе проведено сопоставление расчетов восходящих длинноволновых потоков на верхней границе атмосферы и нисходящих на нижней границе атмосферы для облачных и безоблачных условий при использовании двух моделей континуума: MT_SKD и полученной нами на основе экспериментальных данных [10, 11].

Моделирование ИК-потоков с учетом поглощения перистыми облаками

Используемые нами модели для расчета переноса радиации в атмосфере Земли основываются на методе прямого счета, когда учитывается детальная информация о газовой-аэрозольном составе атмосферы, облачности, подстилающей поверхности, метеорологическом состоянии и т.п. Нами разработаны эффективные методы параметризации характеристик молекулярного поглощения, основанные на разложении функций пропускания в ряды экспонент. Экспоненциальный вид функций пропускания обеспечивает возможность применения практически любых методов решения уравнения переноса с учетом многократного рассеяния излучения аэрозолем и облаками. При расчете длинноволновых потоков весь интервал $0\text{--}3000 \text{ см}^{-1}$ разбивался на подынтервалы шириной 20 см^{-1} . Для каждого подынтервала рассчитывались коэффициенты разложения в ряд экспонент, учитывались следующие газы: H_2O , CO_2 , O_3 , CH_4 , N_2O . Более детальное описание модели учета молекулярного поглощения приведено в работе [12].

При расчетах использовались две модели континуума. Первая модель, широко используемая MT_SKD2.5, применялась во всем рассматриваемом спектральном интервале. Вторая модель также основывалась на MT_SKD2.5, но для окна прозрачности атмосферы в диапазоне $830\text{--}1130 \text{ см}^{-1}$ она заменялась на модель, полученную нами на основе экспериментальных данных [10, 11], причем коэффициент континуального поглощения рассчитывался по формуле

$$k = k_s + k_f = (C_s \exp(-T_0/T) n_{\text{H}_2\text{O}} + C_f n) p_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (1)$$

где k_s – коэффициент поглощения, обусловленный взаимодействием между молекулами H_2O (self-континуум); k_f – коэффициент поглощения за счет взаимодействия между молекулами H_2O и молекулами воздуха (foreign-континуум); $n_{\text{H}_2\text{O}}$ – концентрация паров воды; n – концентрация молекул воздуха; $p_{\text{H}_2\text{O}}$ – парциальное давление паров воды; параметр C_s был заимствован из работы [10], C_f – из работы [11], а T_0 определялся на основе температурной зависимости коэффициентов континуального поглощения, зарегистрированной в работе [10]. В результате для каждого подынтервала (шириной 20 см^{-1}) в диапазоне частот $830\text{--}1130 \text{ см}^{-1}$ был получен свой набор параметров C_s , C_f и T_0 . Диапазон изменений параметра T_0 составлял величину $1430\text{--}1720 \text{ К}$, характер изменений по спектру достаточно монотонный с максимумом на частоте 990 см^{-1} . Поскольку измерения в [10] проводились при повышенных температурах, то данная формула при температурах ниже 311 К является аппроксимационной. Однако измерения в [10] выполнены для достаточно широкого диапазона температур $310\text{--}363 \text{ К}$, что позволяет достаточно уверенно аппроксимировать эти данные на более низкие температуры, соответствующие атмосферным. Справедливость данной

модели подтверждается также тем, что при экстраполяции на температуру 296 К коэффициенты self-континуума хорошо согласуются с данными Burch, Alt [13].

Коэффициенты континуального поглощения водяного пара для модели континуума MT_CKD2.5 и согласно данным Varanov et al. показаны на рис. 1. Коэффициенты self- и foreign-континуума MT_CKD приведены при температуре 296 К. Коэффициенты self-континуума по данным Varanov et al. аппроксимированы на температуру 296 К на основе температурной зависимости в работе [10] (рис. 1, а). Коэффициенты foreign-континуума Varanov et al. (рис. 1, б) взяты из работы [11].

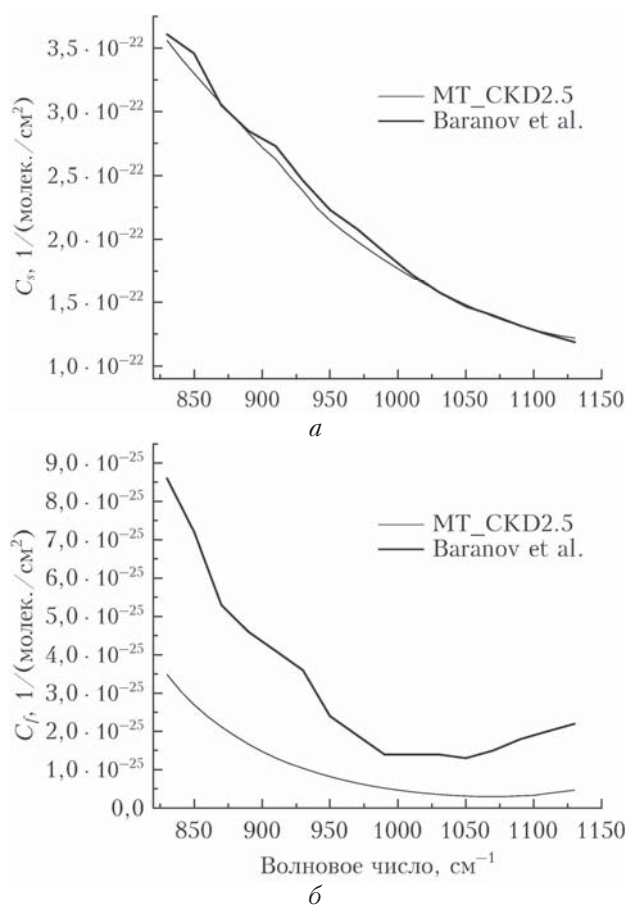


Рис. 1. Коэффициенты континуального поглощения водяного пара для двух моделей континуума MT_CKD2.5 и согласно данным Varanov et al.: а – self-континуум; б – foreign-континуум

Наибольшая неопределенность для окна 8–12 мкм наблюдается в коэффициентах поглощения foreign-континуума. Это обусловлено тем, что они на два порядка меньше, чем коэффициенты self-континуума, и для летних условий умеренных широт вклад foreign-континуума в общее поглощение мал. Однако с ростом высоты ситуация меняется. Коэффициенты поглощения self-континуума квадратично зависят от концентрации паров воды, которая быстро падает с высотой. Поэтому роль foreign-континуума с ростом высоты возрастает. Следует также отметить

тот факт, что коэффициенты поглощения foreign-континуума, приведенные работе [11], примерно в 3–4 раза превышают коэффициенты, используемые в модели MT_CKD. Далее описанную выше модель континуума будем называть BL_MT.

Изменчивость свойств перистых облаков приводит к значительным вариациям в результатах моделирования атмосферного радиационного переноса в климатических моделях [14, 15]. Перистые облака (C_i) расположены преимущественно в верхней тропосфере и нижней стратосфере и состоят из несферических ледяных кристаллов. Трудности в описании и моделировании радиационных свойств перистых облаков связаны, главным образом, со сложной формой их ледяных частиц. Поэтому в настоящее время созданы различные параметризации, упрощающие учет радиационных характеристик облака в уравнении переноса излучения. В большинстве климатических моделей при вычислении переноса излучения для описания свойств облаков используются две переменные, такие как водность облака и эффективный радиус частиц. В широко известной работе [15] предложена эффективная параметризация оптических характеристик перистых облаков в инфракрасном диапазоне. Спектральный диапазон 4–100 мкм был разбит на 36 интервалов, в которых коэффициент поглощения облака рассчитывался по формуле

$$\beta_{abs} = IWC/D(b_0 + b_1D + b_2D^2 + b_3D^3), \quad (2)$$

где D – эффективный диаметр ледяных кристаллов, мкм; IWC – водность облака, г/м³.

Мы провели моделирование восходящих и нисходящих ИК-потоков с учетом поглощения перистыми облаками, используя параметризацию, предложенную в [15]. Были рассмотрены ситуации с расположением перистых облаков на высотах от 6 до 8 км с эффективным диаметром ледяных кристаллов $D = 50$ мкм при различной водности облака IWC . Для моделирования типов облаков $Ci1$ – $Ci4$ [16] содержание IWC варьировалось в пределах 0,001–0,1 г/м³. Рассматривались две метеорологические модели CCMVAL [17] для лета средних широт (B2) и тропиков (B3). Содержание водяного пара в столбе атмосферы в метеомоделях B2 и B3 составляло 2 и 4 г/см² соответственно; концентрация CO_2 – 380 ppm. Высотные профили распределения концентрации других атмосферных газов взяты из моделей AFGL.

Обсуждение результатов

Результаты моделирования для нисходящих потоков приведены в табл. 1, для восходящих потоков в табл. 2. Радиационный форсинг облаков рассчитывался как разница между потоками, вычисленными с учетом поглощения и излучения облаками и для безоблачной атмосферы. Радиационный форсинг облаков приведен в табл. 3. Как и ожидалось, перистые облака на высотах 6–8 км приводят к дополнительному парниковому эффекту, задерживая

Таблица 1

Нисходящие потоки у земной поверхности, вычисленные с моделями континуума H₂O MT_CKD2.5 и BL_MT на основе данных Varanov et al. [10, 11], с учетом и без учета вклада в поглощение перистых облаков Ci в спектральном диапазоне 0–3000 см⁻¹

Метеомодель CCMVAL	Тип облачности, IWC, г/м ³	Потоки, Вт/м ²		Расхождения в потоках $F_{BL_MT} - F_{MT_CKD}$
		MT_CKD	BL_MT	
Тропики B3	Безоблачно	405,78	410,61	4,83
	Ci1 0,001	408,03	412,53	4,50
	Ci2 0,01	419,67	422,46	2,78
	Ci4 0,1	427,20	428,90	1,70
	Безоблачно	215,20	215,74	0,54
Средние широты B2	Ci1 0,001	219,12	219,628	0,50
	Ci2 0,01	239,92	240,24	0,32
	Ci4 0,1	255,07	255,27	0,20

Таблица 2

Восходящие потоки на верхней границе атмосферы, вычисленные с моделями континуума H₂O MT_CKD2.5 и BL_MT на основе данных Varanov et al. [10, 11], с учетом и без учета вклада в поглощение перистых облаков Ci в спектральном диапазоне 0–3000 см⁻¹

Метеомодель CCMVAL	Тип облачности, IWC, г/м ³	Потоки, Вт/м ²		Расхождения в потоках $F_{BL_MT} - F_{MT_CKD}$
		MT_CKD	BL_MT	
Тропики B3	Безоблачно	278,61	276,53	-2,08
	Ci1 0,001	271,16	269,32	-1,83
	Ci2 0,01	231,46	230,86	-0,60
	Ci4 0,1	200,91	200,89	-0,01
	Безоблачно	220,78	220,65	-0,13
Средние широты B2	Ci1 0,001	212,88	212,77	-0,11
	Ci2 0,01	171,15	171,11	-0,04
	Ci4 0,1	141,37	141,37	0

Таблица 3

Радиационный форсинг перистых облаков Ci (Вт/м²), вычисленный с моделями континуума H₂O MT_CKD2.5 и BL_MT на основе данных Varanov et al. [10, 11], в спектральном диапазоне 0–3000 см⁻¹

Метеомодель CCMVAL	Тип облачности, IWC, г/м ³	На нижней границе атмосферы		На верхней границе атмосферы		Суммарный радиационный форсинг	
		MT_CKD	BL_MT	MT_CKD	BL_MT	MT_CKD	BL_MT
Тропики B3	Ci1 0,001	2,25	1,92	-7,45	-7,21	5,20	5,29
	Ci2 0,01	13,89	11,84	-47,15	-45,67	33,26	33,83
	Ci4 0,1	21,41	18,28	-77,70	-75,64	56,29	57,35
Средние широты B2	Ci1 0,001	3,92	3,89	-7,90	-7,88	3,98	4,00
	Ci2 0,01	24,72	24,50	-49,63	-49,54	24,91	25,03
	Ci4 0,1	39,87	39,53	-79,42	-79,29	39,55	39,76

уходящее тепловое излучение (отрицательный радиационный форсинг для уходящего излучения), величина радиационного эффекта пропорциональна водности облаков. С ростом водности радиационный форсинг облаков возрастает и на нижней границе атмосферы, что проявляется в заметном возрастании нисходящего потока по величине на нижней границе атмосферы и приводит, как следствие, к дополнительному нагреву поверхности в сравнении с безоблачной ситуацией.

Из табл. 3 видно, что на верхней границе атмосферы радиационный форсинг облаков примерно одинаковый как для условий тропиков, так и для умеренных широт, однако на нижней границе атмосферы ситуация иная. В тропических широтах общее влагосодержание в атмосфере выше, чем в умеренных широтах. Это приводит к тому, что в тропиках пары воды в большей степени экранируют облака, и, как следствие, радиационный форсинг на нижней границе атмосферы для тропиков значительно меньше, чем для умеренных широт. Однако общий радиационный форсинг, который характеризует тепло, поглощенное самой атмосферой (см. табл. 3), возрастает с ростом IWC и ростом общего влагосодержания в атмосфере. По этой причине в тропиках воздушные массы будут нагреваться в большей степени, нежели подстилающая поверхность, а в умеренных широтах ситуация обратная.

Приведенные выше результаты согласуются с современными представлениями об облачных форсингах и качественно подтверждают истинность расчетов. Наибольший интерес представляют расчеты форсингов, выполненные с различными моделями континуума. Из анализа табл. 1–3 можно выявить условия, когда радиационные форсинги не зависят от используемых моделей континуума, а когда различия в моделях могут приводить к заметной разнице в потоках и повлиять на радиационные процессы в атмосфере.

В данной работе мы использовали два модельных вертикальных метеорологических профиля, соответствующих умеренным и тропическим широтам, причем общее влагосодержание для умеренных широт немного меньше среднезонального значения, а для тропических широт выше среднезонального. Для таких условий и безоблачной атмосферы расчеты при использовании разных моделей континуума для тропиков демонстрируют значительные расхождения в потоках излучения, тогда как для умеренных широт такие расхождения примерно на порядок меньше.

Для оптических тонких облаков ($Ci1$, $IWC = 0,001 \text{ г/м}^3$) различие между нисходящими потоками у поверхности Земли, вычисленными с моделями континуума $\text{H}_2\text{O MT_CKD2.5}$ и BL_MT на основе данных Varanov et al. [10, 11], достигает $4,5 \text{ Вт/м}^2$ (1,1%) для тропических условий (рис. 2, а). Различие уменьшается более чем в 2 раза ($1,7 \text{ Вт/м}^2$, или 0,4%) при увеличении водности облака IWC на 2 порядка. Относительное различие между нисходящими потоками, вычисленными с двумя моделями континуума H_2O , также уменьшается при уве-

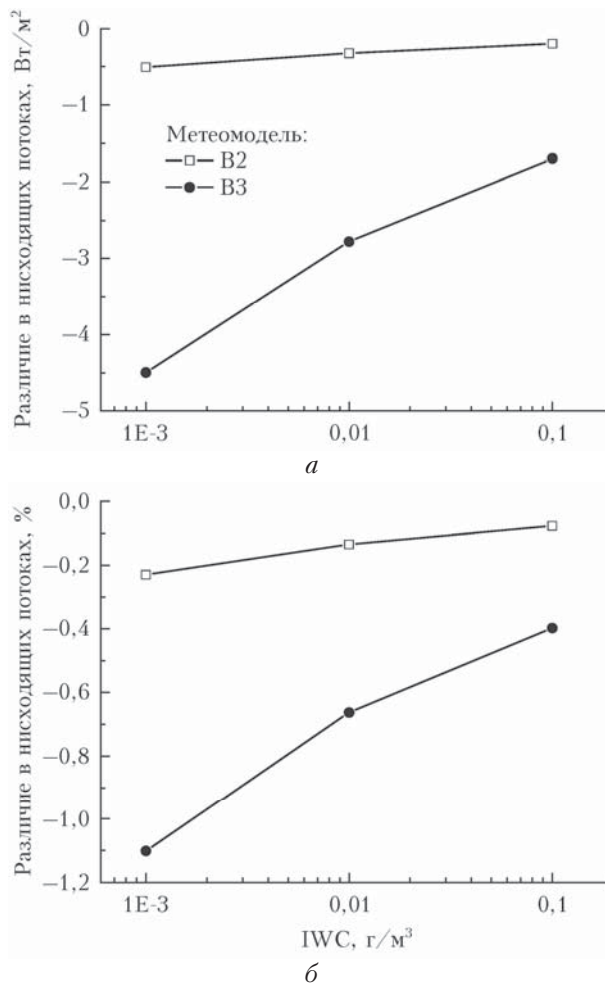


Рис. 2. Абсолютные (а) и относительные различия (б) между нисходящими потоками у поверхности Земли, вычисленными с моделями континуума $\text{H}_2\text{O MT_CKD2.5}$ и BL_MT , для метеоусловий средних широт (B2) и тропиков (B3)

личении IWC. Восходящие потоки менее чувствительны к различиям в моделях континуума H_2O (рис. 3). Разница в восходящих потоках не превышает $1,8 \text{ Вт/м}^2$ (0,67%) при малых значениях водности облака и быстрее уменьшается с увеличением водности (до 0,007% при $Ci4$ с $IWC = 0,1 \text{ г/м}^3$) по сравнению с ситуацией с нисходящими потоками.

При наличии облачности максимальное расхождение между радиационными форсингами, рассчитанными с моделями континуума $\text{H}_2\text{O MT_CKD2.5}$ и BL_MT , наблюдается при больших значениях IWC и тропической метеомодели B3 ($3,1 \text{ Вт/м}^2$ на нижней границе атмосферы и $2,1 \text{ Вт/м}^2$ на верхней границе атмосферы, рис. 4 и 5). Оказалось, что относительное различие в радиационном форсинге облаков на нижней границе атмосферы не зависит от величины водности облака IWC и составляет 15 и 0,9% для метеомоделей B3 и B2 соответственно. Относительное различие в радиационном форсинге облаков на верхней границе атмосферы при $IWC = 0,001 \text{ г/м}^3$ составляет 3,3% для метеомодели B3

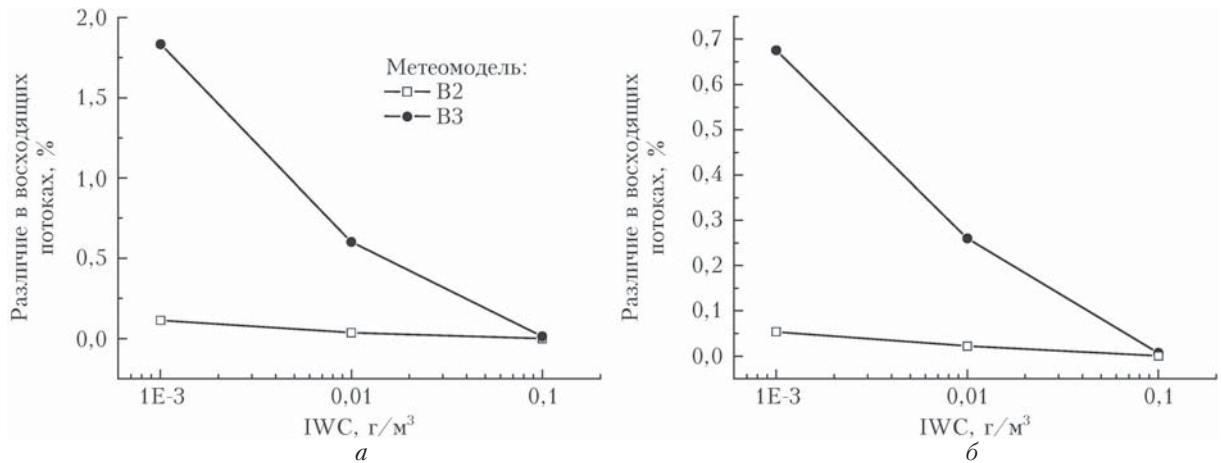


Рис. 3. Абсолютные (а) и относительные различия (б) между восходящими потоками на верхней границе атмосферы, вычисленными с моделями континуума H_2O MT_CKD2.5 и BL_MT, для метеоусловий средних широт (B2) и тропиков (B3)

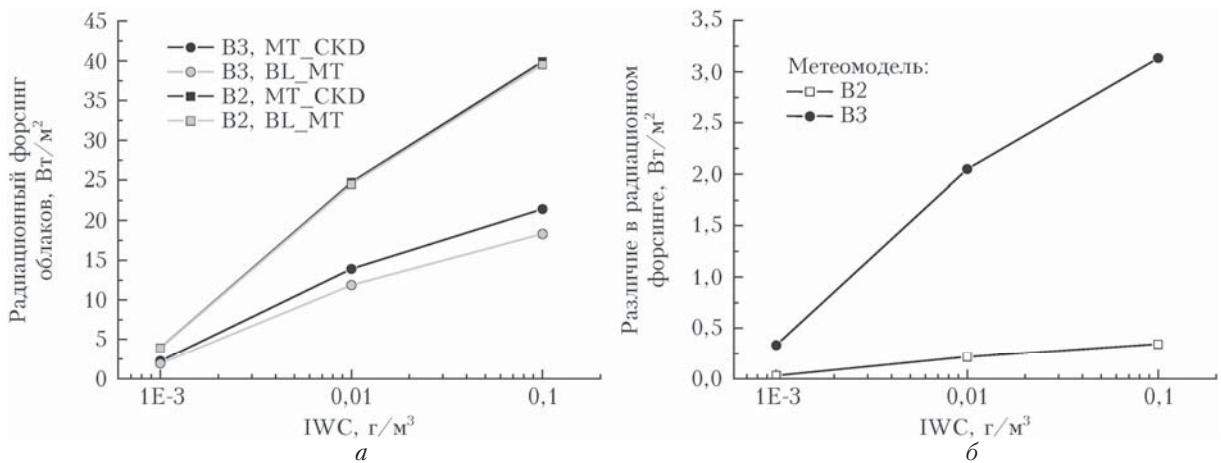


Рис. 4. Радиационный форсинг перистых облаков на нижней границе атмосферы для метеоусловий средних широт (B2) и тропиков (B3) при использовании моделей континуума H_2O MT_CKD2.5 и BL_MT; спектральный диапазон $0-3000\text{ см}^{-1}$ (а). Различие в радиационном форсинге облаков при использовании моделей континуума H_2O MT_CKD2.5 и BL_MT для различных метеорологических условий и водности облаков IWC (б)

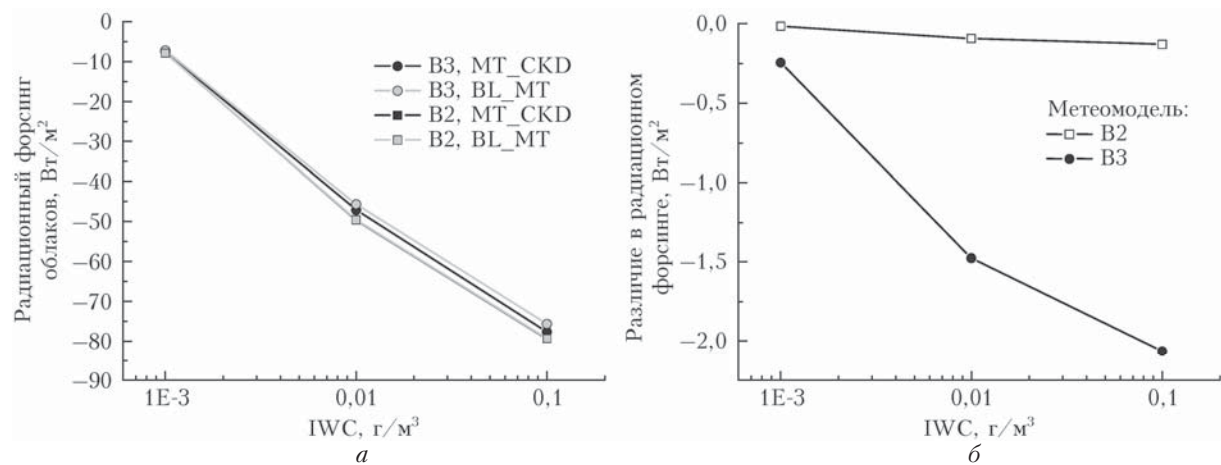


Рис. 5. Радиационный форсинг перистых облаков на верхней границе атмосферы для метеоусловий средних широт (B2) и тропиков (B3) при использовании моделей континуума H_2O MT_CKD2.5 и BL_MT; спектральный диапазон $0-3000\text{ см}^{-1}$ (а). Различие в радиационном форсинге при использовании моделей континуума H_2O MT_CKD2.5 и BL_MT для различных метеорологических условий и водности облаков IWC (б)

и 0,19% для В2, при IWC = 0,1 г/м³ различие уменьшилось до 2,7% для метеомодели В3 и до 0,16% для В2.

Заключение

В данной работе для нас представляло интерес выяснить, насколько критичны радиационные форсинги облаков к той или иной модели континуума. Результаты моделирования показали, что для облачной атмосферы и метеорологических условий, близких к тропическим, расхождения в восходящих потоках на верхней границе атмосферы, обусловленные различиями в моделях континуума, быстро нивелируются с увеличением оптической толщины облаков, тогда как для нисходящих потоков на нижней границе атмосферы различия сохраняются, хотя и несколько уменьшаются. Различия в моделях континуума наиболее сильно проявились для облачного форсинга на нижней границе атмосферы для тропических условий, при которых они достигают 15%, что весьма существенно. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости уточнения модели континуума в области 8–12 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы ФНИ Государственных академий наук на 2013–2020 гг. (проект П.10.3.8), а также частично поддержана грантом РФФИ № 16-45-340152 р_а.

1. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R. IPCC, 2007: «Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing» in Climate Change; 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. Cambridge Univ., Cambridge, UK, USA, 2007.
2. Фомин Б.А., Фалалеева В.А. Прогресс в атмосферной спектроскопии и «эталонные» расчеты для тестирования радиационных блоков климатических моделей // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 8. С. 803–806; Fomin B.A., Falaleeva V.A. Recent progress in spectroscopy and its effect on line-by-line calculations for the validation of radiation codes for climate models // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 6. P. 626–629.
3. 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.
4. 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 absorp-

tion // Phil. Trans. Roy. Soc. A. 2012. V. 370. P. 2520–2556. DOI: 10.1098/rsta.2011.0295.

5. Huang Y., Ramaswamy V., Soden B. An investigation of the sensitivity of the clear-sky outgoing longwave radiation to atmospheric temperature and water vapor // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. P. 13. D05104. DOI: 10.1029/2005JD006906.
6. Paynter D.J., Ramaswamy V. An assessment of recent water vapor continuum measurements upon longwave and shortwave radiative transfer // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. 13 p. D20302. DOI: 10.1029/2010JD015505.
7. Radel G., Shine K.P., Ptashnik I.V. Global radiative and climate effect of the water vapour continuum at visible and near-infrared wavelengths // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2015. V. 141. P. 727–738. DOI: 10.1002/qj.2385.
8. 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. Climate. 2012. V. 25. P. 2329–2340. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00262.1
9. 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. 11. D04106. DOI: 10.1029/2011JD016440.
10. 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.
11. 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. Roy. Soc. A. 2012. V. 370. P. 2578–2589.
12. 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 атмосф. 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 longwave radiation processes of the lower Volga Region // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 28, N 1. P. 1–8.
13. Burch D.E., Alt R.L. Continuum absorption by H₂O in the 700–1200 cm⁻¹ and 2400–2800 cm⁻¹ windows // AFGL-TR-84-0128, Air Force Geophys. Lab., Hanscom AFB, Mass. 1984.
14. De Leon R.R., Haigh J.D. Infrared properties of cirrus clouds in climate models // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2007. V. 133. P. 273–282.
15. Fu Q., Yang P., Sun W.B. An accurate parameterization of the infrared radiative properties of cirrus clouds for climate models // J. Climate. 1998. V. 11. P. 2223–2237.
16. Yong-Sang Choi, Chang-Hoi Ho. Radiative effect of cirrus with different optical properties over the tropics in MODIS and CERES observations // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L21811. DOI: 10.1029/2006GL027403.
17. CCMVal Radiation Intercomparison. URL: <http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earpmf/ccmvalrad.shtml>

K.M. Firsov, T.Yu. Chesnokova, I.I. Klitochenko. Contribution of water vapor continuum absorption to longwave radiative fluxes in the cloudy and cloudless atmosphere.

The atmospheric transparency window of 8–12 μm is one of the main spectral intervals forming thermal balance of the atmosphere; at that, the contribution of continual absorption to the radiative balance is the most significant. The results of simulation of upward and downward fluxes for different meteorological situations (cloudy and cloudless) are presented; and role of H₂O continuum is estimated with use of different models of continual absorption.