

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН

УДК 535; 504.32

Вклад континуального поглощения водяного пара в потоки коротковолнового солнечного излучения в атмосфере Земли при наличии перистой облачности

К.М. Фирсов¹, Т.Ю. Чеснокова², А.А. Размоллов¹, А.В. Ченцов^{2*}

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

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

Поступила в редакцию 23.05.2017 г.

Рассчитаны потоки солнечного излучения в облачной и безоблачной атмосфере с учетом многократного рассеяния и поглощения. Рассмотрены облачные ситуации, наблюдающиеся в регионах Томска и Нижнего Поволжья. Сделано сравнение потоков, рассчитанных с использованием различных моделей континуального поглощения водяного пара, таких как эмпирическая модель MT_CKD, наиболее часто используемая в атмосферных расчетах, и модель континуума, основанная на экспериментальных данных CAVIAR. Сделаны оценки вклада континуума в коротковолновые потоки излучения в условиях различных типов облачности.

Ключевые слова: континуальное поглощение, водяной пар, коротковолновые потоки излучения, облачность; continual absorption, water vapour, shortwave radiative fluxes, cloudiness.

Введение

В настоящее время достаточно широко обсуждаются проблемы, связанные с глобальным потеплением климата. Экспериментальные и модельные данные, представленные в отчетах МГЭИК, свидетельствуют о том, что одним из важнейших факторов потепления климата является возрастание концентрации парниковых газов в результате деятельности человека [1]. Справедливости ради следует отметить, что широкий круг исследователей придерживается альтернативных точек зрения, которые основываются на многочисленных фактах, не укладывающихся в гипотезу антропогенных причин климатических изменений [2].

Общепринято, что естественные или антропогенные изменения радиационного баланса атмосферы на ее верхней границе определяют динамику климатической системы Земли. Эти изменения, называемые радиационным форсингом, определяются как разность между приходящей коротковолновой радиацией и уходящей коротковолновой и длинноволновой радиацией. Подчеркнем, что величина этого радиационного форсинга мала в сравнении с приходящими и уходящими потоками излучения и ее среднегодовое значение составляет менее 1% от величины этих потоков. Согласно [3], в индустриальную эру (начиная с 1750 г. по настоящее время) долгоживущие парниковые газы, которые связаны с хозяйственной деятельностью,

достаточно хорошо изучены и оказывают положительное радиационное воздействие $[(2,9 \pm 0,3) \text{ Вт/м}^2]$. Суммарное аэрозольное воздействие, включающее прямой эффект и опосредованный, вызванный изменением альbedo облаков, является отрицательным $[(-1,3 \pm 0,8) \text{ Вт/м}^2]$. Итоговое радиационное воздействие лежит в диапазоне $0,6\text{--}2,4 \text{ Вт/м}^2$. Причем наибольшие неопределенности относятся к прямому и косвенному (через образование дополнительной облачности) влиянию влажности и аэрозолей на климат. Также необходимо учитывать региональные особенности.

Для нижней границы атмосферы неопределенности в радиационном воздействии оказываются еще больше, чем для верхней границы. Так, например, нарушение радиационного баланса на нижней границе атмосферы, приводящее к нагреву океана, составляет $(0,64 \pm 0,43) \text{ Вт/м}^2$, что на порядок меньше неопределенностей в потоках излучения [4].

Водяной пар — основной парниковый газ в атмосфере. Однако он является консервативной примесью, так как его распределение по земному шару зависит от температуры воздуха. Его влияние может проявляться в радиационных процессах через обратные связи — положительные или отрицательные. Положительная обратная связь приводит к усилению парникового эффекта: при увеличении температуры воздуха влагосодержание атмосферы возрастает и вызывает дальнейшее повышение температуры воздуха. С другой стороны, влияние водяного пара может также проявляться в увеличении облачности и изменении количества осадков. В работе [5] было показано, что современные спектроскопические базы данных обеспечивают высокую точность расчета

* Константин Михайлович Фирсов (fkm@volsu.ru); Татьяна Юрьевна Чеснокова (ches@iao.ru); Алексей Владимирович Размоллов (alek.gazmolov2010@yandex.ru); Алексей Владимирович Ченцов (cav@iao.ru).

радиационных потоков, обусловленных селективным поглощением атмосферными газами, с погрешностью интегрального потока не более 1 Вт/м^2 . Иначе обстоит дело с континуальным поглощением, которое вносит большие неопределенности в расчетные значения восходящих и нисходящих потоков. Максимальный вклад в парниковый эффект дает континуум H_2O в длинноволновом диапазоне. Здесь неопределенности могут достигать $4,8 \text{ Вт/м}^2$ для отдельных метеорологических ситуаций [6] при использовании различных современных моделей континуума. Хотя в коротковолновом диапазоне континуум H_2O дает существенно меньший вклад в радиационные процессы, но результаты [7–9] свидетельствуют, что модель континуума CAVIAR, полученная на основе новых экспериментальных данных, дает значительно большие величины поглощенной атмосферой радиации. Так, например, в [9] было показано, что атмосферное поглощение коротковолновой радиации, усредненное по земному шару, в безоблачной атмосфере за счет континуума H_2O составляет $1,5 \text{ Вт/м}^2$ согласно общепринятой модели CKD, а по модели CAVIAR – $2,8 \text{ Вт/м}^2$. Исследования влияния моделей континуума на потоки коротковолнового излучения в безоблачной атмосфере также проводились в работах [10, 11], где была обнаружена разница до 2% в поглощенной в атмосфере коротковолновой радиации, вычисленной с моделями MT_CKD и CAVIAR.

В отличие от вышеуказанных работ, наше исследование выполнено с учетом вклада перистых облаков в радиационный перенос. В [9] сделана оценка вклада различия в моделях континуума в глобальное атмосферное поглощение коротковолновой радиации для облачной и безоблачной атмосферы с использованием данных CAVIAR и ранней модели CKD. В нашей статье сравниваются атмосферные коротковолновые потоки и радиационный форсинг в облачной атмосфере, вычисленные с более новой моделью MT_CKD2.5 и данными CAVIAR.

Для Нижнего Поволжья характерны большое количество солнечных дней в летнее время и перистая облачность, которая при малых оптических толщинах приводит к усилению парникового эффекта, поскольку пропускает коротковолновую солнечную радиацию и задерживает тепловую длинноволновую радиацию. При возрастании оптической толщи облаков коротковолновая радиация начинает заметно ослабляться и знак радиационного форсинга меняется. По нашим оценкам, дополнительное поглощение коротковолнового излучения за счет континуума H_2O должно смещать этот радиационный форсинг. Поэтому представляет интерес исследовать роль континуума при различной мощности перистых облаков. В данной работе мы анализируем влияние континуального поглощения паров H_2O на коротковолновые потоки излучения в двух регионах России.

Моделирование переноса излучения в атмосфере

Для решения стационарного уравнения переноса солнечного излучения в рассеивающей и погло-

щающей атмосфере был использован метод дискретных ординат DISORT [12], так как он позволяет корректно учесть многократное рассеяние излучения и обеспечивает высокую скорость расчета. В этом методе интегродифференциальное уравнение переноса при пространственном интегрировании разлагается в ряды по азимутальным и зенитным углам, т.е. по дискретным ординатам.

Входными данными для вычисления потоков излучения являются высотные профили оптической толщи газового поглощения и аэрозоля, альbedo однократного рассеяния аэрозоля, коэффициентов молекулярного (рэлеевского) рассеяния и поглощения, коэффициентов рассеяния и поглощения в облаках, альbedo подстилающей поверхности и спектр солнечного излучения.

Моделирование потоков осуществлялось для летних метеословий регионов Томска и Нижнего Поволжья. Характеристики температуры и влажности в Нижнем Поволжье определялись из данных реанализа NCEP/NCAR [13], в регионе г. Томска – по данным статистического анализа [14]. Высотные профили температуры и влажности приведены на рис. 1. Общее содержание H_2O было $2,35 \text{ г/м}^2$ для лета Волгограда и $2,8 \text{ г/м}^2$ для июля Томска.

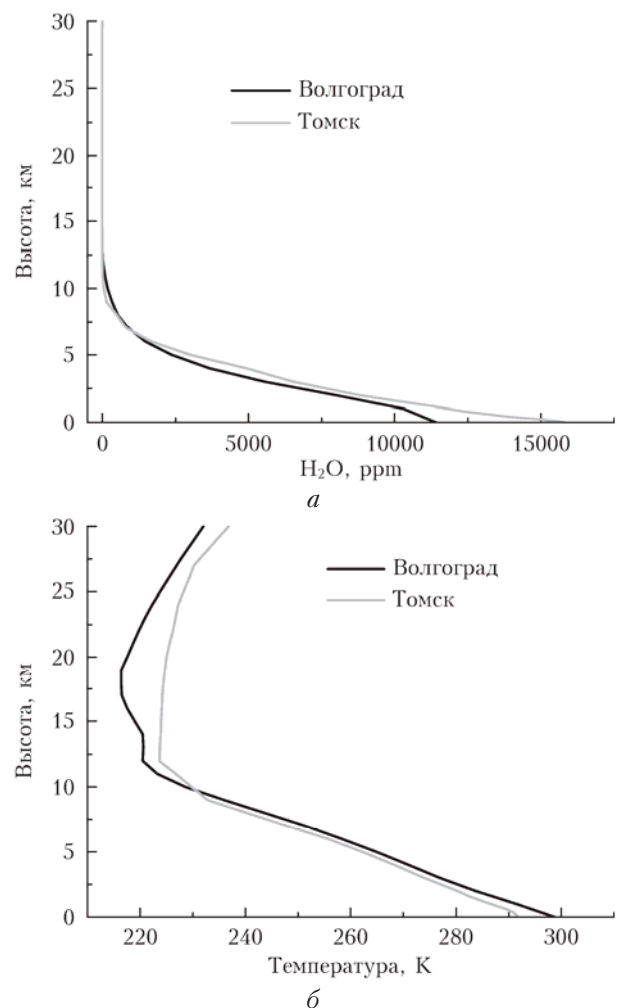


Рис. 1. Усредненные высотные профили влажности и температуры для июля Томска и лета Волгограда

Характеристики облачности определялись из спутниковых данных спектрорадиометра MODIS [15]; они учитывались при моделировании атмосферного переноса излучения на основе параметрических оптических моделей, используемых для моделирования климата [16, 17]. Были рассчитаны потоки для облачности, характерной для летних условий, согласно данным MODIS, для регионов Томска и Волгограда. Границы облачности, водность (IWC) и размер кристаллов облаков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики облачности согласно данным MODIS для двух регионов, усредненные за июль 2015 г.

Регион	Нижняя граница облачности, км	Верхняя граница облачности, км	IWC, г/м ³	Эффективный диаметр кристаллов, мкм
Томск	11,6	13	0,19	67,44
Волгоград	7	10	0,25	60,62

Использовалась городская модель аэрозоля на высоте до 2 км, выше — фоновая модель аэрозоля с дальностью видимости 50 км [18].

Вычисление коэффициентов поглощения оптического излучения осуществлялось точным методом полинейного счета *line-by-line* с использованием спектроскопической базы параметров линий поглощения атмосферных газов HITRAN 2012 [19] с учетом неселективного поглощения атмосферными газами с различными моделями континуума H₂O.

Континуальное поглощение водяным паром

Поглощение континуумом водяного пара сильнее зависит от атмосферных профилей влагосодержания, чем селективное поглощение H₂O, так как континуальное поглощение в окнах прозрачности (где оно вносит основной вклад в радиационный баланс атмосферы и обусловлено, главным образом, self-континуумом) пропорционально квадрату давления водяного пара и имеет сильную температурную зависимость. В видимом и ближнем ИК-диапазонах континуальное поглощение пока еще недостаточно изучено. Количество измерений при атмосферных температурах мало. Сравнение измерений усложняется различием в экспериментальных методах определения континуального поглощения, таких как Фурье-спектроскопия [7, 8, 20], калориметрическая фотометрия [21] и спектроскопия внутрирезонаторного затухания [22]. Более подробная информация о возможных причинах различия в экспериментальных данных приведена в [23, 24].

Для оценки влияния различия в современных моделях континуума водяного пара на моделирование переноса солнечного излучения в атмосфере были сделаны расчеты радиационных потоков с использованием современной модели континуума H₂O MT_CKD [25] и экспериментальных данных CAVIAR [7, 8]. В эксперименте CAVIAR коэффициенты self-континуума [7] были определены из лабораторных

измерений на фурье-спектрометре с высоким спектральным разрешением в диапазоне температур 293–473 К при давлениях 0,015–5 атм для четырех окон ближнего ИК-диапазона от 1000 до 4000 нм (10000–2500 см⁻¹). В работах [8, 10, 11] было отмечено, что при использовании модели континуального поглощения CAVIAR, основанной на новых экспериментальных данных [7, 8], чувствительность расчетных потоков радиации в безоблачной атмосфере к особенностям профиля концентрации водяного пара выше по сравнению с наиболее часто используемой в радиационных расчетах моделью MT_CKD. Это вызвано тем, что континуальное поглощение водяного пара в данных CAVIAR в среднем на порядок величины превышает предсказания модели MT_CKD в окнах прозрачности ближнего ИК-диапазона. В [9] были сделаны оценки влияния континуального поглощения на глобальный радиационный баланс Земли и атмосферы в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра с использованием данных CAVIAR и ранней модели континуума CKD2.1. Было показано, что атмосферное поглощение солнечного излучения увеличивается на 2 Вт/м² в безоблачной атмосфере при использовании в моделировании экспериментальных данных CAVIAR по сравнению с континуумом CKD2.1, а в облачной атмосфере разница в атмосферном поглощении за счет моделей континуума равнялась 0,4 Вт/м². При этом вклад усредненной облачности, рассмотренной в [9], в нисходящий поток в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра составил 56 Вт/м². Представляет интерес провести сравнение атмосферных радиационных потоков, вычисленных с новой версией континуума MT_CKD и с данными CAVIAR, в различных реальных облачных ситуациях.

Результаты расчетов

Сначала были сделаны оценки влияния различий в моделях континуального поглощения водяного пара на потоки солнечного излучения в безоблачной атмосфере для летних месяцев г. Волгограда и Томска. Разница между интегральными нисходящими потоками излучения у поверхности Земли, вычисленными с моделями континуума H₂O MT_CKD2.5 и CAVIAR в диапазоне 500–2500 нм, составила в безоблачной атмосфере 2 Вт/м² для Томска и 1,4 Вт/м² для Волгограда. Затем были вычислены потоки в облачной атмосфере, характерной для июля рассматриваемых регионов по данным MODIS (табл. 1).

Результаты расчетов спектральных потоков, вычисленных с разрешением 5 см⁻¹ с учетом облачности, приведены на рис. 2 и 3. Интегральные потоки солнечного излучения представлены в табл. 2. В сравнении с безоблачной атмосферой разница в нисходящих потоках за счет моделей континуума уменьшилась до 1 Вт/м² для Томска и 0,08 Вт/м² для Волгограда, что объясняется большей оптической толщей перистых облаков в регионе Волгограда согласно средним значениям за июль 2015 г., по сравнению с Томском.

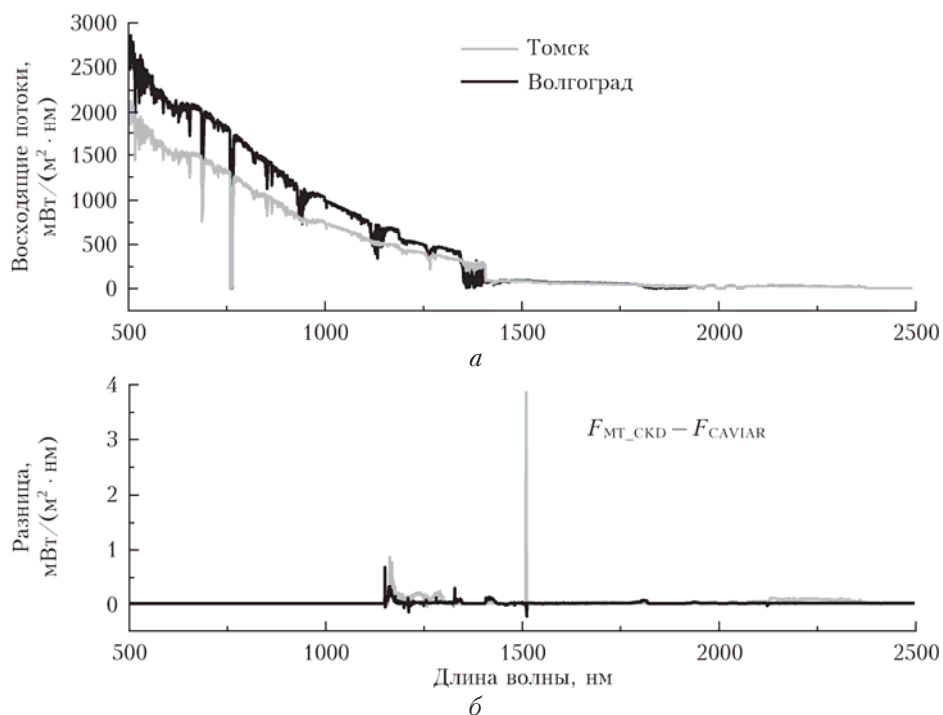


Рис. 2. Восходящие потоки излучения на верхней границе атмосферы (100 км) в облачных условиях для регионов Томска и Волгограда (а); разница между восходящими потоками излучения на верхней границе атмосферы, вычисленными с моделями континуума H_2O MT_CKD2.5 и CAVIAR (б)

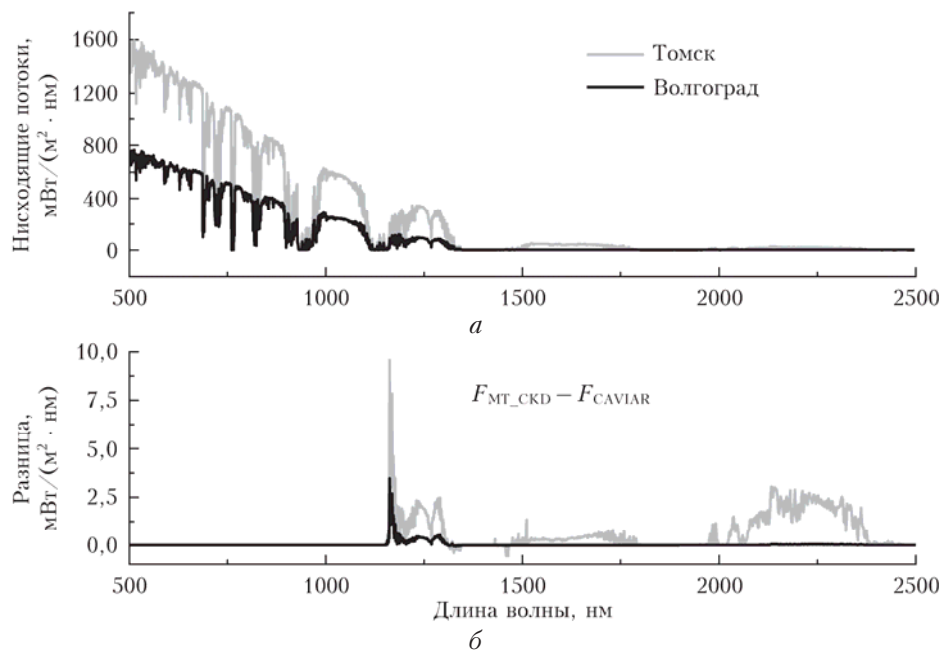


Рис. 3. Нисходящие потоки излучения у поверхности Земли в облачных условиях для регионов Томска и Волгограда (а); разница между нисходящими потоками излучения у поверхности Земли, вычисленными с моделями континуума H_2O MT_CKD2.5 и CAVIAR (б)

Радиационный форсинг перистых облаков на верхней и нижней границах атмосферы для регионов Томска и Волгограда, разница в радиационном форсинге перистых облаков за счет моделей континуума H_2O показаны на рис. 4, 5 и интегрально по спектру – в табл. 3. Радиационный форсинг облаков на верхней границе атмосферы рассчитывался как раз-

ница между уходящими потоками в присутствии перистой облачности и в безоблачной атмосфере; на нижней границе – как разница между суммарными потоками у поверхности Земли в облачной и безоблачной атмосфере. Разница в интегральном радиационном форсинге перистых облаков на верхней границе атмосферы, вычисленном с моделями континуума H_2O

Таблица 2

Интегральные восходящие, нисходящие потоки и разница между потоками излучения, вычисленными с моделями континуума H₂O MT_CKD2.5 и CAVIAR

IWC, г/м ³	Восходящий поток, Вт/м ²	Разница, Вт/м ²	Относительная разница, %	Нисходящий поток, Вт/м ²	Разница, Вт/м ²	Относительная разница, %
<i>Волгоград</i>						
0,250	1117,85	0,011	0,001	245,19	0,08	0,033
0,001	274,64	1,01	0,368	804,82	1,58	0,196
<i>Томск</i>						
0,190	850,06	0,048	0,006	548,82	0,97	0,177
0,001	262,84	1,46	0,556	787,40	2,07	0,263

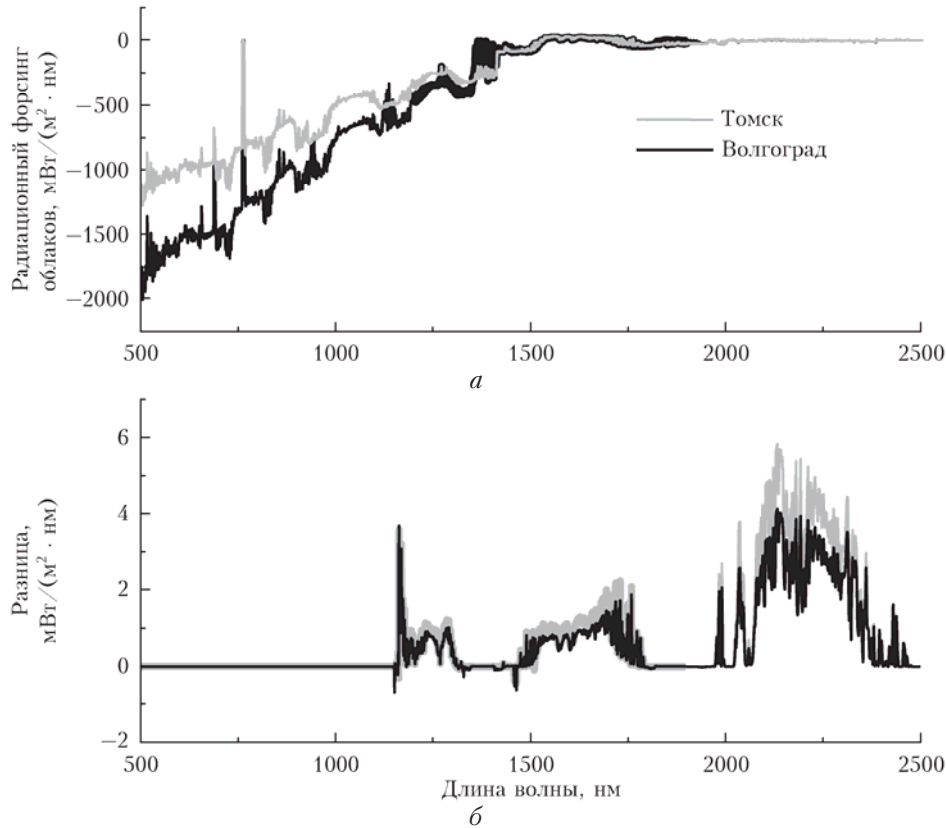


Рис. 4. Радиационный форсинг перистых облаков на верхней границе атмосферы для регионов Томска и Волгограда (а); разница в радиационном форсинге перистых облаков на верхней границе атмосферы, вычисленном с моделями континуума H₂O MT_CKD2.5 и CAVIAR (б)

MT_CKD2.5 и CAVIAR, составила $-1,5 \text{ Вт/м}^2$ для Томска и $-1,1 \text{ Вт/м}^2$ для Волгограда в июле 2015 г. Различие в радиационном форсинге перистых облаков у поверхности Земли, вычисленном с моделями континуума H₂O MT_CKD2.5 и CAVIAR, было $0,46 \text{ Вт/м}^2$ для Томска и $0,83 \text{ Вт/м}^2$ для Волгограда (см. табл. 3).

Рассчитаны потоки солнечного излучения с теми же характеристиками облаков, что и в табл. 1, но с уменьшенным значением водности $IWC = 0,001 \text{ г/м}^3$. Обнаружено, что при уменьшении оптической толщи перистых облаков их радиационный форсинг на нижней границе атмосферы меняет знак на противоположный (см. табл. 3). Одной из возможных причин такого поведения может быть то, что перистые облака состоят из крупных частиц в сравнении с длиной волны, поэтому индикатриса

рассеяния сильно вытянута вперед. При достаточно тонкой облачности рассеяние вперед будет больше рассеяния назад и диффузно рассеянный поток в переднюю полусферу возрастет. Это и приводит к увеличению на первом этапе потока у поверхности Земли. А с ростом оптической толщи облака альбедо еще будет расти, в таком случае и прямой и диффузно рассеянный в переднюю полусферу потоки будут резко уменьшаться и облака будут приводить в коротковолновом диапазоне к выхолаживанию.

Первоначально, когда перистые облака начинают формироваться, прямой поток излучения на нижней границе атмосферы изменяется незначительно, в то время как диффузно-рассеянный в переднюю полусферу поток возрастает и изменяется сильнее. Это приводит к тому, что интегральный поток, падающий на поверхность Земли, возрастает в сравнении

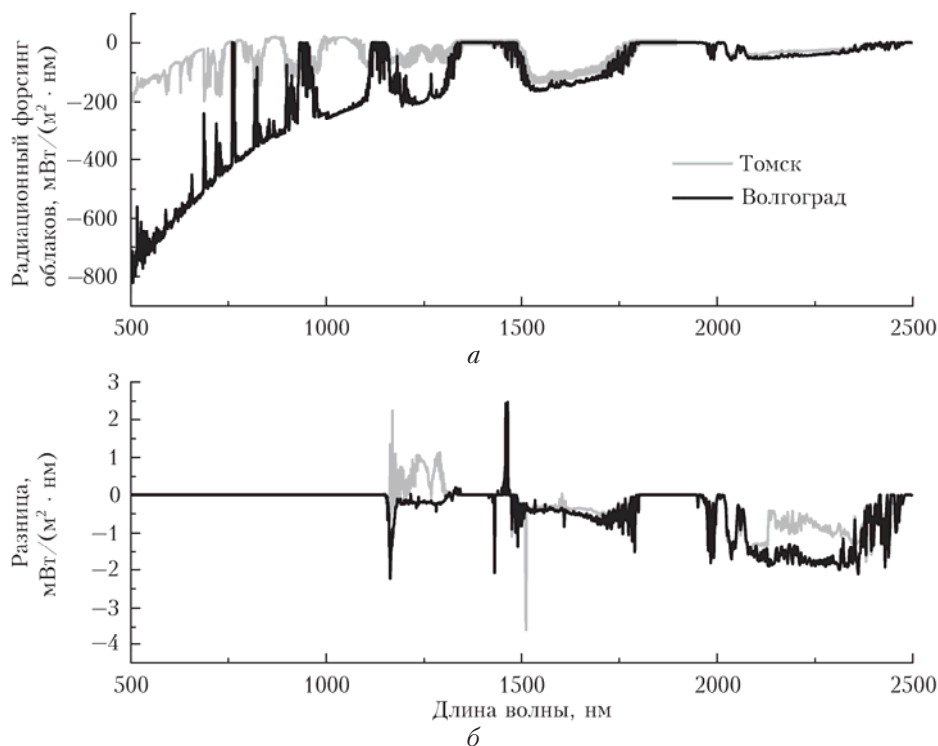


Рис. 5. Радиационный форсинг перистых облаков у поверхности Земли для регионов Томска и Волгограда (а) и разница в радиационном форсинге перистых облаков у поверхности Земли, вычисленном с моделями континуума H_2O MT_CKD2.5 и CAVIAR (б)

Таблица 3

Радиационный форсинг перистых облаков на верхней, нижней границах атмосферы и разница в радиационном форсинге перистых облаков, вычисленном с моделями континуума H_2O MT_CKD2.5 и CAVIAR

IWC, $г/м^3$	Радиационный форсинг облаков на верхней границе атмосферы, $Вт/м^2$	Разница в радиационном форсинге, $Вт/м^2$	Относительная разница, %	Радиационный форсинг облаков у поверхности Земли, $Вт/м^2$	Разница в радиационном форсинге, $Вт/м^2$	Относительная разница, %
<i>Волгоград</i>						
0,250	-858,58	1,130	0,132	-315,34	0,83	0,26
0,001	-16,39	0,129	0,787	15,09	0,15	1,00
<i>Томск</i>						
0,190	-594,48	1,490	0,251	-80,80	0,465	0,57
0,001	-8,71	0,079	0,907	6,50	0,094	1,50

с безоблачной атмосферой, усиливая парниковый эффект. По мере роста облачности прямой поток начинает падать, интегральный поток начинает уменьшаться по отношению к безоблачной ситуации, а знак облачного форсинга меняется и принимает обычное значение.

При низком значении водности $IWC = 0,001 г/м^3$ возрастает роль континуума водяного пара и увеличивается относительная разница в радиационном форсинге облаков, вычисленном с двумя моделями континуума H_2O MT_CKD2.5 и CAVIAR, в то же время абсолютная разница уменьшается (см. табл. 3), достигая 1,5% для Волгограда и 1% для Томска.

Заключение

Сделаны оценки влияния континуального поглощения водяного пара на вычисление потоков сол-

нечного излучения в диапазоне 0,5–2,5 мкм для метеомоделей и облачных ситуаций, наблюдающихся в июле в Томске и летом в Волгограде. Модель континуального поглощения CAVIAR, основанная на новых экспериментальных данных, дает более высокую чувствительность расчетных потоков радиации к общему содержанию водяного пара по сравнению с наиболее часто используемой в радиационных расчетах моделью MT_CKD. Различия в моделях континуума водяного пара в значительной степени зависят от общего влагосодержания и вертикального градиента температуры в тропосфере.

Разница между интегральными нисходящими потоками излучения у поверхности Земли, вычисленными с использованием моделей континуума H_2O MT_CKD2.5 и CAVIAR в диапазоне 0,5–2,5 мкм, составила в безоблачной атмосфере 2 $Вт/м^2$ для Томска и 1,4 $Вт/м^2$ для Волгограда; в облачной

атмосфере 1 Вт/м² для Томска и 0,08 Вт/м² для Волгограда, что объясняется большей оптической толщей перистых облаков в Волгограде в июле 2015 г. по сравнению с Томском.

Неопределенности в моделях континуума H₂O оказывают меньшее влияние на интегральные восходящие потоки на верхней границе атмосферы в случае перистой облачности. Разница между восходящими потоками излучения на верхней границе атмосферы, вычисленными с моделями континуума H₂O MT_CKD2.5 и SCAVIAR, составила 0,05 Вт/м² для Томска и 0,01 Вт/м² для Волгограда. Это сравнимо с погрешностью современных (*line-by-line* + + DISORT) расчетов потоков и потому может считаться пренебрежимо малым.

Различие в радиационном форсинге перистых облаков на верхней границе атмосферы, вычисленном с моделями континуума H₂O MT_CKD2.5 и SCAVIAR, равно 1,5 Вт/м² для Томска и 1,1 Вт/м² для Волгограда; у поверхности Земли эта разница почти в 2 раза больше для Волгограда, чем для Томска (0,83 и 0,46 Вт/м² соответственно). Относительные различия за счет моделей континуума в облачном радиационном форсинге могут достигать 1,5% в случае тонкой перистой облачности.

Обнаруженные расхождения в результатах моделирования коротковолновых потоков с использованием различных современных моделей континуума водяного пара свидетельствуют о необходимости уточнения данных по континууму при температурах, наблюдающихся в тропосфере.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 16-45-340152 р_а и Программы фундаментальных научных исследований П.10.3.8.

1. *Изменение климата*, 2014 г. Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Женева: МГЭИК, 2014. 163 с.
2. *Логинов В.Ф.* Радиационные факторы и доказательная база современных изменений климата. Минск: Беларус. наука, 2012. 266 с.
3. *Мелешко В.П., Груза Г.В., Зайцев А.С., Кароль И.Л., Катцов В.М., Кобышева Н.В., Мецкерская А.В., Мирвис В.М., Решетников А.И., Спорышев П.В., Ахентьева Е.М., Алексеев Г.В., Анисимов О.А., Аристова Л.Н., Бардин М.Ю., Богданова Э.Г., Булыгина О.Н., Георгиевский В.Ю., Говоркова В.А., Иванов В.В., Ильин Б.М., Клещенко Л.К., Ключева М.В., Кононова Н.К., Малевский-Малевич С.П., Махоткина Е.Л., Мелешко В.И., Надежина Е.Д., Павлова Т.В., Парамонова Н.Н., Покровский О.М., Разуваев В.Н., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В., Светлова Т.П., Стадник В.В., Хлебникова Е.И., Шаймарданов М.З., Шальгин А.Л., Шкломанов И.А., Школьник И.М., Шнееров Б.Е.* Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008. 228 с.
4. *Stephens G.L., L'Esuyer T.* The Earth's energy balance // *Atmos. Res.* 2015. V. 166. P. 195–203.
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.* 2012. V. 370. P. 2557–2577.
 9. *Rädel G., Shine K.P., Ptashnik I.V.* Global radiative and climate effect of the water vapour continuum at visible and near-infrared wavelengths // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2015. V. 141. P. 727–738. DOI: 10.1002/qj.2385.
 10. *Чеснокова Т.Ю., Журавлева Т.Б., Пташник И.В., Ченцов А.В.* Моделирование потоков солнечного излучения в атмосфере с использованием различных моделей континуального поглощения водяного пара в типичных условиях Западной Сибири // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 2. С. 100–107; *Chesnokova T.Yu., Zhuravleva T.B., Ptashnik I.V., Chentsov A.V.* Simulation of solar radiative fluxes in the atmosphere using different models of water vapor continuum absorption in typical conditions of Western Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 6. P. 499–506.
 11. *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.
 12. *Stamnes 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.
 13. *NCEP/NCAR reanalysis* [Electronic resource]. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/> (last access: 20.06.2017).
 14. *Комаров В.С., Ломакина Н.Я.* Статистические модели пограничного слоя атмосферы Западной Сибири. Томск: ИОА СО РАН, 2008. 222 с.
 15. *MODIS Atmosphere: Monthly Global Product* [Electronic resource]. URL: https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD08_M3/ (last access: 6.06.2017).
 16. *De Leon R.R., Haigh J.D.* Infrared properties of cirrus clouds in climate models // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2007. V. 133. P. 273–282.
 17. *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.
 18. *Kneizys F.X., Robertson D.C., 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 / L.W. Abreu, G.P. Anderson (eds.). North Andover, USA: Ontar Corporation, 1996. 261 p.
 19. *Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Broven 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.G., Wagner G. The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 130. P. 4–50.
20. Ptashnik I.V., Petrova T.M., Ponomarev Yu.N., Shine K.P., Solodov A.A., Solodov A.M. Near-infrared water vapour self-continuum at close to room temperature // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 120. P. 23–35.
21. Bicknell W.E., Cecca S.D., Griffin M.K., Swartz S.D., Flusberg A. Search for low-absorption regions in the 1.6- and 2.1- μm atmospheric windows // *J. Directed Energy.* 2006. V. 2, N 2. P. 151–161.
22. Mondelain D., Aradj A., Kassi S., Campargue A. The water vapour self-continuum by CRDS at room temperature in the 1.6 μm transparency window // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 130. P. 381–391.
23. Пташник И.В. Континуальное поглощение водяного пара: краткая предыстория и современное состояние проблемы // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 5. С. 443–459.
24. Shine K.P., Campargue A., Mondelain D., McPheat R.A., Ptashnik I.V., Weidmann D. The water vapour continuum in near-infrared windows – Current understanding and prospects for its inclusion in spectroscopic databases // *J. Mol. Spectrosc.* 2016. V. 327. P. 193–208.
25. *Continuum* model [Electronic resource]. URL: http://rtweb.aer.com/continuum_frame.html (last access: 17.06.2017).

K.M. Firsov, T.Yu. Chesnokova, A.A. Razmolov, A.V. Chentsov. **Contribution of water vapour continual absorption to shortwave fluxes of solar radiation in the Earth's atmosphere with cirrus cloudiness.**

The solar radiative fluxes in the cloudy and cloudless atmosphere are calculated taking into account multiple scattering and absorption. The cloudy conditions observed in Tomsk and Volgograd regions are considered. A comparison between the fluxes calculated with different water vapor continuum absorption models, such as the MT_CKD empirical model, commonly used in the atmospheric simulation, and the continuum model based on the CAVIAR experimental data, is carried out. The water vapor continuum impact on the shortwave radiative fluxes in the presence of different cloud types is estimated.