

УДК 535; 504.32

Влияние континуального поглощения паров воды на радиационный форсинг углекислого газа в атмосфере для региона Нижнего Поволжья

К.М. Фирсов¹, Т.Ю. Чеснокова^{✉2}, А.А. Размоллов^{1*}

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 9.08.2022 г.;

после доработки 6.10.2022 г.;

принята к печати 26.10.2022 г.

Оценено влияние континуального поглощения водяного пара в атмосфере на радиационный форсинг CO₂ на основе массовых расчетов потоков теплового излучения для летних месяцев 2021 г. в регионе Нижнего Поволжья. Для моделирования использовалась выборка, состоящая из 368 вертикальных профилей (четыре реализации за сутки на протяжении трех летних месяцев). Показано, что с ростом влажности вклад CO₂ в радиационное воздействие на поверхность Земли уменьшается, что приводит к меньшему нагреву поверхности, при этом нагрев атмосферы увеличивается. Таким образом, усиление парникового эффекта за счет увеличения концентрации CO₂ в условиях высокой влажности будет приводить к еще большему нагреву атмосферы. При этом доминирующую роль играет континуум водяного пара, а не селективное поглощение в полосах H₂O.

Ключевые слова: атмосферный радиационный перенос, углекислый газ, континуум водяного пара, радиационный форсинг; atmospheric radiative transfer, carbon dioxide, water vapor continuum, radiative forcing.

Введение

В настоящее время наблюдается увеличение частоты и интенсивности природных катастрофических явлений, а также рост температуры подстилающей поверхности и тропосферы, которые связывают с парниковым эффектом, вызванным промышленной деятельностью и ростом численности населения Земли [1]. Проблемы климатических изменений связывают главным образом с ростом концентрации парниковых газов, которые поглощают электромагнитное излучение в длинноволновом диапазоне ($\lambda \geq 3$ мкм) [1, 2]. Длинноволновой спектральный диапазон характеризуется тем, что в нем доминирует собственное излучение атмосферы и подстилающей поверхности Земли. Парниковые газы препятствуют потерям энергии системы «подстилающая поверхность – атмосфера Земли» за счет собственного излучения. В коротковолновом диапазоне ($\lambda \leq 3$ мкм) солнечное излучение доминирует над собственным излучением Земли, а газы, погло-

щающие электромагнитное излучение (в том числе парниковые), дают вклад в альбедо рассматриваемой системы.

К парниковым газам относят H₂O, CO₂, CH₄, O₃, CO, фреоны и др. Вследствие антропогенного воздействия растет концентрация CO₂, CH₄, CO, фреонов и др. В частности, концентрация CO₂ за последние 50 лет возросла от 330 до примерно 400 ppm [1]. Среди парниковых газов водяной пар занимает особое место. С одной стороны, он является наиболее мощным поглотителем излучения в длинноволновом спектральном диапазоне и дает наибольший вклад в парниковый эффект. С другой – роль водяного пара в климатических процессах проявляется через обратные связи.

В отличие от других парниковых газов водяной пар в атмосфере Земли может переходить из одного агрегатного состояния в другое и его концентрация зависит от температуры окружающей среды. При повышении концентрации CO₂ в атмосфере возрастает температура воздуха и поверхности Земли за счет парникового эффекта. Увеличение температуры водной поверхности приводит к усилению испарения водяного пара, что вносит свой вклад в дополнительный нагрев поверхности Земли [2] и приводит к положительной обратной связи. С увеличением

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

содержания паров в атмосфере может возрастать и облачность, что приводит к большему отражению облаками солнечного излучения и уменьшению средней температуры Земли. Это отрицательная обратная связь. В целом процессы, связанные с прямыми и обратными связями, изучены и учитываются в современных климатических моделях.

Мгновенный радиационный форсинг парниковых газов является оценкой влияния роста концентрации парниковых газов на нагрев атмосферы и подстилающей поверхности. Мгновенный радиационный форсинг CO_2 определяют как разность потоков длинноволнового излучения при различных концентрациях CO_2 в атмосфере Земли.

В [3] были сделаны оценки влияния перекрытия полос поглощения H_2O и CO_2 на радиационный форсинг за счет удвоения концентрации CO_2 (от 320 до 640 ppm). Было показано, что если не учитывать поглощение H_2O , то радиационный форсинг CO_2 на нижней границе атмосферы составляет $3,65 \text{ Вт/м}^2$, при учете поглощения линиями H_2O — $1,56 \text{ Вт/м}^2$, а принимая во внимание еще и непрерывное поглощение H_2O радиационный форсинг CO_2 уменьшается до $0,55 \text{ Вт/м}^2$. При этом наибольшее влияние континуума наблюдалось в тропических широтах с большим содержанием водяного пара в атмосфере.

В работах [4, 5] рассмотрено влияние неопределенностей в моделях континуума H_2O на моделирование изменения в нисходящих и восходящих потоках излучения при удвоении концентрации CO_2 в атмосфере (с 287 до 574 ppm). Было обнаружено, что неопределенности в моделях континуума H_2O дают наибольший вклад в радиационный форсинг CO_2 у поверхности Земли (до 15%). На верхней границе атмосферы этот вклад был заметно меньше (3%). Влияние неопределенностей континуума H_2O на радиационный форсинг O_3 , CH_4 и N_2O было еще меньше (до 1%).

В нашей публикации [6] также было показано, что при высокой влажности величина радиационного форсинга уменьшается, т.е. нагрев поверхности слабо зависит от роста CO_2 , причем определяющим в этом является непрерывное поглощение. В [6] сопоставлялась модель MTCKD2.5 [7] и модель, разработанная нами для окна 8–12 мкм на основе аппроксимации экспериментальных данных Ю. Баранова [8–10]. Мы получили схожие результаты о влиянии непрерывного поглощения на форсинг CO_2 на верхней и нижней границах атмосферы. В последнее время появились новые версии модели континуума MT_CKD, поэтому представляется интересным сопоставить ее с моделью континуума на основе данных Ю. Баранова, а также провести моделирование для широкого диапазона метеорологических условий в реальной атмосфере, что дало бы возможность оценить влияние общего влагосодержания на форсинг CO_2 и неопределенности, связанные с использованием разных моделей континуума. Это и является целью нашего исследования.

1. Окна прозрачности атмосферы в длинноволновом диапазоне

В длинноволновом диапазоне основными поглощающими атмосферными газами с сильными полосами поглощения являются H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CO и CH_4 . На рис. 1 приведены оптические толщи, соответствующие линиям поглощения H_2O и CO_2 и непрерывному поглощению водяного пара на вертикальной трассе от 0 до 100 км для атмосферной модели лета средних широт [11]. Общее содержание H_2O в столбе атмосферы 3 г/м^2 . Содержание CO_2 задавалось равным 380 ppm. Параметры линий поглощения H_2O и CO_2 взяты из спектроскопической базы данных HITRAN [12]. Спектр непрерывного поглощения H_2O рассчитывался по модели MT_CKD-3.3 [7].

Как видно из рис. 1, в атмосферном спектре поглощения имеются спектральные окна прозрачности 8–12 мкм ($1250\text{--}830 \text{ см}^{-1}$) и 3–5 мкм ($3333\text{--}2000 \text{ см}^{-1}$), где значительную роль играет континуум водяного пара. В этих спектральных диапазонах присутствуют лишь слабые линии H_2O , а также крылья полос CO_2 , которые уширяются с ростом концентрации CO_2 , что приводит к усилению парникового эффекта. Непрерывное поглощение водяного пара обусловлено крыльями сильных полос [13, 14] и димерами H_2O [15–18], при этом self-континуум, обусловленный взаимодействием молекул H_2O между собой, квадратично зависит от концентрации паров воды и имеет сильную температурную зависимость. Однако до настоящего времени не окончены споры не только о величине коэффициентов непрерывного поглощения, но и о природе континуума.

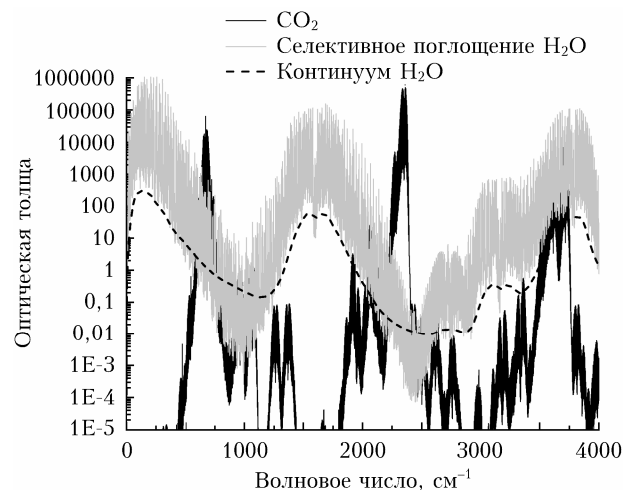


Рис. 1. Селективное поглощение H_2O и CO_2 и непрерывное поглощение H_2O на вертикальной трассе от 0 до 100 км для атмосферной модели лета средних широт. Спектральное разрешение $0,01 \text{ см}^{-1}$

Активные исследования непрерывного поглощения паров воды начались в 1970-е гг. в работах Д. Берча [19–21]. В настоящее время окно прозрачности 8–12 мкм хорошо изучено, имеется много

публикаций по лабораторным измерениям континуума (например, [8, 22]). В окне прозрачности 3–5 мкм проведено меньше измерений, среди них можно отметить эксперимент CAVIAR [23, 24] и данные Ю.И. Баранова [9, 10]. Подробный обзор исследований по континууму H₂O приведен в статье К.П. Шайна, И.В. Пташника, Дж. Радел [25]. В работах [26–28] было показано, что имеются значимые различия в величинах как коротковолновых, так и длинноволновых потоков излучения за счет использования разных моделей континуального поглощения при моделировании переноса излучения. В исследовании [27] было обнаружено, что при применении разных моделей континуума H₂O, таких как MT_CKD2.5, CAVIAR и данные Баранова, суммарный радиационный форсинг облаков меняет знак при разных значениях ледности облака.

Ранее в нашей работе [6] было показано, что континуальное поглощение паров воды экранирует полосы поглощения углекислого газа и радиационный форсинг CO₂ на нижней границе атмосферы сильно зависит от континуального поглощения H₂O. В макроокне прозрачности 8–12 мкм при низкой влажности оптическая толщина атмосферы мала и излучение от поверхности достигает космоса, а нисходящий поток излучения формируется полосами поглощения CO₂ (крыло полосы 15 мкм, а также относительно слабыми полосами с центрами 9,4 и 10,6 мкм). Так, например, для зимы полярных широт общее влагосодержание составляет 0,4 г/см², а оптическая толщина, обусловленная континуальным поглощением в окне прозрачности 8–12 мкм, варьируется в диапазоне 0,05–0,02. Для тропиков аналогичные величины составляют 4,2 г/см² и 0,26–0,9 соответственно.

Согласно вышесказанному, радиационный форсинг CO₂ на нижней границе атмосферы зависит не только от концентрации CO₂, но и от общего влагосодержания воздуха. Помимо этих двух факторов, на радиационный форсинг могут также влиять и температурные вариации, хотя и в меньшей степени, чем изменения концентрации CO₂ и H₂O. Это обусловлено тем, что большинство спектральных линий в полосах поглощения CO₂, попадающих в окно 8–12 мкм, образованы переходами с высоковольтбужденных состояний, которые имеют сильную температурную зависимость, следовательно, и радиационный форсинг CO₂ на нижней границе атмосферы также будет зависеть от температуры.

С ростом влагосодержания в атмосфере Земли окно прозрачности будет закрываться и излучение, уходящее от поверхности планеты, будет поглощаться атмосферой все в большей степени. Углекислый газ относится к равномерно перемешанному в атмосфере газам, и его парциальное давление P_{CO₂} спадает с высотой *h* так же, как давление воздуха по барометрической формуле, которую для нижней тропосферы (в случае изотермической атмосферы) можно аппроксимировать в виде [29, 30]:

$$P_{\text{CO}_2} = P_{0\text{CO}_2} \exp(-\beta h), \quad (1)$$

где $\beta = 0,125 = 1/H_0$ (H_0 – высота однородной атмосферы); P_{CO_2} , $P_{0\text{CO}_2}$ – парциальное давление CO₂ на высоте *h* и 0 км соответственно.

Концентрация водяного пара с высотой спадает быстрее, чем концентрация CO₂. Например, вертикальный профиль парциального давления H₂O в среднезональной метеорологической модели [29] для модельных оценок можно аппроксимировать формулой

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{0\text{H}_2\text{O}} \exp(-3\beta h).$$

Кроме того, поглощение за счет континуума H₂O квадратично зависит от концентрации паров воды. Согласно вышесказанному континуальное поглощение максимально в приземном слое и быстро спадает с высотой, причем скорость уменьшения пропорциональна $\exp(-6\beta h)$, т.е. примерно в шесть раз быстрее в сравнении с поглощением CO₂. Из этих качественных рассуждений понятна причина того, что континуальное поглощение в приземном слое экранирует полосы CO₂ и приводит к уменьшению форсинга CO₂ именно на нижней границе атмосферы, тогда как на форсинг CO₂ на верхней границе континуум будет оказывать существенно меньшее влияние.

2. Моделирование длинноволновых потоков излучения и радиационного форсинга CO₂ в атмосфере

При моделировании потоков излучения использовались две модели континуума: MT_CKD-3.3 и разработанная нами для окон прозрачности 3–5 и 8–12 мкм модель на основе экстраполяции экспериментальных данных Баранова [8–10] в виде

$$k = \left[C_s \exp\left(-\theta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) p_{\text{H}_2\text{O}} + C_f p \right] n_{\text{H}_2\text{O}},$$

где *k* – коэффициент континуального поглощения паров воды; C_s и C_f – сечения поглощения self-континуума и foreign-континуума соответственно; $n_{\text{H}_2\text{O}}$ – концентрация паров воды; *p* – давление воздуха; $p_{\text{H}_2\text{O}}$ – парциальное давление паров воды; $T_0 = 296$ К. Значения параметра C_f заимствованы из работы [10]. Параметры C_s (при $T = 296$ К) и температурный множитель в показателе экспоненты θ определялись подгонкой к экспериментальным данным, приведенным в [8–10]. Величина foreign-континуума в окне 8–12 мкм существенно меньше, чем self-континуума, параметр C_f определяется в экспериментах с существенно большей погрешностью, чем C_s , и выявить какую-либо температурную зависимость у C_f весьма проблематично, поэтому ее полагают константой. Более детальное описание нашей модели приведено в работе [26].

Длинноволновые потоки рассчитывались с помощью нашей оригинальной программы [26]. Для параметризации селективного молекулярного поглощения применялся метод *k*-распределения [31, 32],

при котором функция пропускания раскладывается в короткий ряд экспонент, что позволяет значительно ускорить вычисления при хорошей точности. Коэффициенты ряда разложения предварительно рассчитывались прямым полинейным методом *line-by-line* [33] для широких диапазонов температур и давлений с использованием спектроскопической базы параметров линий поглощения атмосферных газов HITRAN [12].

Были рассчитаны длинноволновые потоки излучения: восходящие на верхней и нисходящие на нижней границе безоблачной атмосферы для типичных метеорологических условий региона Нижнего Поволжья. Использовались данные ECMWF ERA-5 – European Reanalysis [34] для летних условий 2021 г. Этот год был выбран потому, что среднее содержание паров воды в вертикальном столбе атмосферы летом ($W_{H_2O} = 2,74 \text{ г/см}^2$) было выше среднего за другие годы. Мы рассматривали метеоданные за 2009–2021 гг., для которых среднее летнее влагосодержание в регионе Нижнего Поволжья $W_{H_2O} = 2,47 \text{ г/см}^2$. Для моделирования использовалась выборка из 368 вертикальных профилей атмосферы (четыре реализации за сутки: в 06:00, 12:00, 18:00 и 24:00) в июне, июле и августе. В таблице приведены обобщенные характеристики профилей: приземная температура (T , К), ее градиент в тропосфере ($\text{grad } T$, К/км), общее влагосодержание. Также приведен радиационный форсинг, обусловленный возрастанием концентрации CO_2 за последние 50 лет на нижней границе атмосферы ($\delta F_{\text{CO}_2 \text{ down}}$, Вт/м^2), верхней ($\delta F_{\text{CO}_2 \text{ up}}$, Вт/м^2) и атмосферы в целом ($\delta F_{\text{CO}_2 \text{ atm}}$, Вт/м^2). Результаты расчета, представленные на рис. 2, показывают изменчивость нисходящих потоков излучения у поверхности Земли и восходящих – на верхней границе атмосферы в рассматриваемый летний период в Нижнем Поволжье. На рис. 3 приведены расхождения в потоках длинноволнового излучения, обусловленные различиями в моделях континуального поглощения (MT_CKD-3.3 и нашей модели).

Температурно-влажностные характеристики в регионе Нижнего Поволжья летом 2021 г. и результаты моделирования радиационного форсинга CO_2 с учетом континуального поглощения H_2O с использованием модели MT_CKD-3.3 и без учета континуума H_2O

Характеристика	Среднее	СКО	Мин.	Макс.
T , К	300,00	5,40	287,00	311,40
$\text{grad } T$, К/км	-6,47	0,54	-7,60	-5,00
W_{H_2O} , г/см ²	2,74	0,71	0,98	4,60
$\delta F_{\text{CO}_2 \text{ down}}$, Вт/м ²	0,51	0,16	0,22	0,99
$\delta F_{\text{CO}_2 \text{ down}}$, Вт/м ² (без континуума)	0,91	0,10	0,72	1,23
$\delta F_{\text{CO}_2 \text{ up}}$, Вт/м ²	-0,78	0,09	-1,01	-0,57
$\delta F_{\text{CO}_2 \text{ up}}$, Вт/м ² (без континуума)	-0,89	0,09	-1,09	-0,67
$\delta F_{\text{CO}_2 \text{ atm}}$, Вт/м ²	0,27	0,09	-0,02	0,46
$\delta F_{\text{CO}_2 \text{ atm}}$, Вт/м ² (без континуума)	-0,02	0,04	-0,15	-0,07

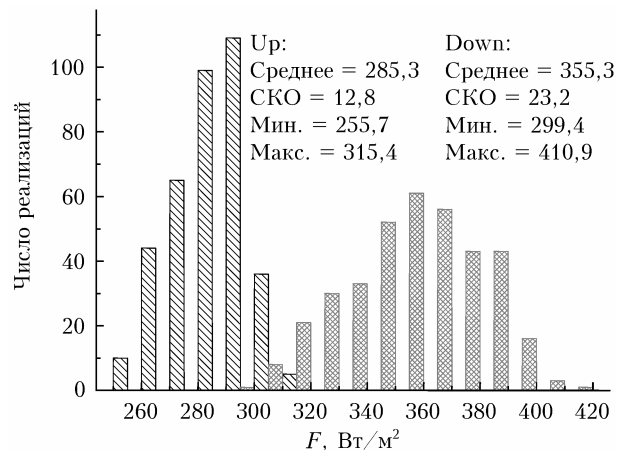


Рис. 2. Нисходящие потоки излучения на нижней границе атмосферы (Down) и восходящие на верхней (Up)

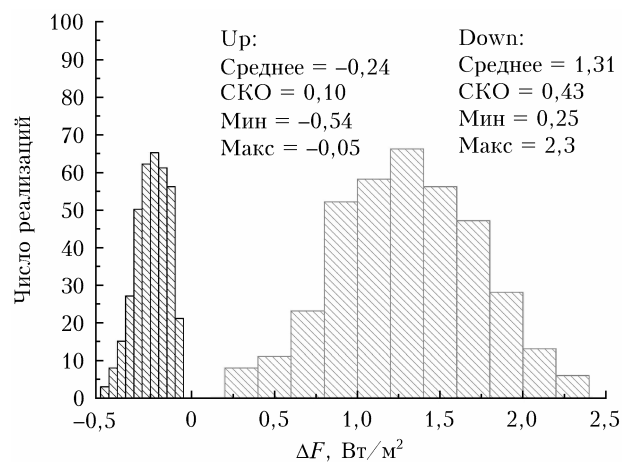


Рис. 3. Расхождение между расчетами длинноволновых потоков при использовании разных моделей континуума

Результаты, представленные в таблице и на рис. 2 и 3, позволяют сопоставить масштаб рассматриваемых величин. В частности, из рис. 2 и 3 следует, что разница потоков излучения, рассчитанных с использованием моделей континуума MT_CKD-3.3 и разработанной нами модели, сравнительно мала: среднее расхождение между расчетами потоков на нижней границе атмосферы $\Delta F_{\text{down}} = 1,31 \text{ Вт/м}^2$, что с учетом среднего значения потока 355 Вт/м^2 дало относительную погрешность менее 0,4%. Для восходящих потоков расхождение между расчетами потоков на верхней границе атмосферы $\Delta F_{\text{up}} = -0,24 \text{ Вт/м}^2$. Это при среднем значении восходящих потоков $285,3 \text{ Вт/м}^2$ дает относительную погрешность менее 0,1%. Оцененная нами неопределенность радиационного форсинга CO_2 на нижней границе атмосферы за счет использования различных моделей континуума составила $(0,82 \pm 0,36)\%$, а максимальный разброс не превышал 2,1%. Для восходящих потоков эта величина существенно меньше.

Из рис. 4 видно, что при оценке радиационного форсинга CO_2 на нижней границе атмосферы существенным является водяной пар, так как при возрастании концентрации паров воды за счет перекры-

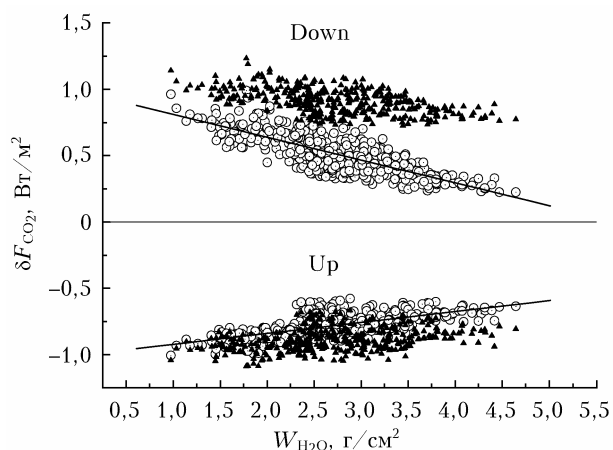


Рис. 4. Радиационный форсинг на нижней (Down) и верхней (Up) границах атмосферы, обусловленный возрастанием концентрации CO_2 от 330 до 395 ppm (кружки); результаты моделирования без учета континуального поглощения H_2O (треугольники)

вания их полос поглощения и H_2O и CO_2 вклад CO_2 в нисходящие потоки радиации уменьшается. На верхней границе атмосферы континуальное поглощение уже не дает такого значительного вклада в радиационный форсинг CO_2 .

Особо следует отметить роль континуального поглощения H_2O , которое резко снижает радиационный форсинг CO_2 при высоком содержании паров воды в атмосфере.

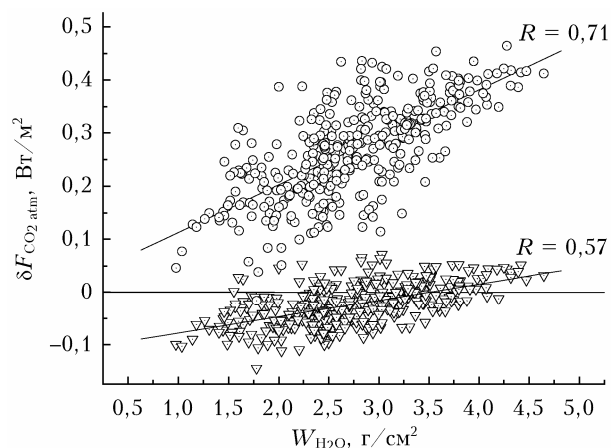


Рис. 5. Радиационный форсинг атмосферы в целом, обусловленный возрастанием концентрации CO_2 от 330 до 395 ppm (кружки); результаты моделирования без учета континуального поглощения H_2O (треугольники)

На рис. 5 значение $\delta F_{\text{CO}_2 \text{ atm}}$ определяет величину дополнительной поглощенной атмосферой лучистой энергии за счет возрастания концентрации CO_2 . Этот рисунок наиболее ярко демонстрирует роль континуального поглощения в радиационных процессах атмосферы. Так, если пренебречь континуальным поглощением, то нагрев атмосферы будет минимальным, причем радиационный форсинг CO_2 меняет знак в зависимости от содержания паров воды. При малом содержании паров воды атмосфе-

ра будет выхолаживаться за счет восходящих и нисходящих длинноволновых потоков излучения, а при высокой влажности — незначительно нагреваться. В летних условиях атмосфера всегда нагревается, причем чем больше влагосодержание в атмосфере, тем большая энергия поглощается атмосферой ($\delta F_{\text{CO}_2 \text{ atm}}$ возрастает), а радиационный форсинг на нижней границе атмосферы $\delta F_{\text{CO}_2 \text{ down}}$ уменьшается. При высоком содержании паров воды $\delta F_{\text{CO}_2 \text{ down}}$ уменьшается до $0,2 \text{ Вт/м}^2$ (см. рис. 4), тогда как значение нисходящего потока излучения при таком содержании паров воды $\sim 400 \text{ Вт/м}^2$ (т.е. относительное изменение $\sim 0,05\%$). Таким образом, с ростом влагосодержания парниковый эффект за счет возрастания концентрации CO_2 приводит к возрастающему нагреву атмосферы.

Заключение

На основании полученных нами результатов можно сделать следующие выводы.

1. Современные модели континуума позволяют с высокой точностью рассчитывать потоки излучения в атмосфере Земли. Наибольшие погрешности расчета потоков следует ожидать для нисходящих потоков при температурах выше 300 К .

Различия в радиационном форсинге на нижней границе атмосферы, обусловленные использованием вышеописанных моделей континуума, достигали 2% , тогда как для верхней эти различия существенно меньше. Наши оценки качественно согласуются с результатами работы [5], где также отмечалось, что различия в моделях континуума наиболее сильно проявились в радиационном форсинге CO_2 на нижней границе атмосферы.

2. Возрастание общего влагосодержания в вертикальном столбе атмосферы значительно влияет на радиационный форсинг CO_2 как на нижней, так и на верхней границах атмосферы. Причина этого — перекрытие полос поглощения CO_2 и H_2O , причем доминирующую роль играет континуум водяного пара, а не селективное поглощение в полосах H_2O .

3. Для нисходящих потоков длинноволнового излучения континуум H_2O экранирует полосы поглощения CO_2 наиболее сильно. С ростом влажности вклад радиационного воздействия CO_2 на поверхность Земли уменьшается, что приводит к меньшему нагреву поверхности, т.е. влияние парникового эффекта за счет увеличения концентрации CO_2 на нагрев поверхности уменьшается.

4. Для восходящих потоков вариации влажности приводят к заметно меньшим вариациям радиационного форсинга CO_2 на верхней границе атмосферы.

5. Радиационный форсинг CO_2 для атмосферы в целом с ростом влажности также увеличивается. Рост CO_2 при высоком влагосодержании приводит главным образом к нагреву атмосферы, нежели к нагреву поверхности.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leit-zell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: 10.1017/9781009157896.
2. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Bernsten 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. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing // *Climate Change 2007*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. P. 129–234.
3. Kiehl J.T., Ramanathan V. Radiative heating due to increased CO₂: The role of H₂O continuum absorption in the 12 and 18 μm region // *J. Atmos. Sci.* 1982. V. 39. P. 2923–2926. DOI: 10.1175/1520-0469.
4. 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. P. D20302. DOI: 10.1029/2010JD015505.
5. Paynter D.J., Ramaswamy V. Variations in water vapor continuum radiative transfer with atmospheric conditions // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. D16310. DOI: 10.1029/2012JD017504.
6. Михайлова В.А., Фесков С.В., Иванов А.И., Греков Л.И., Литинский А.О., Конобеева Н.Н., Белоненко М.Б., Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Порхун В.И., Иванченко Г.С., Лебедева О.С., Лебедев Н.Г., Завьялов В.Д., Крючков С.И. Моделирование неравновесных химико-физических процессов. Волгоград: Изд-во ВолГУБ, 2018. 256 с.
7. 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.
8. 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. P. 2291–2302.
9. Baranov Yu., Lafferty W.J. The water-vapor continuum and selective absorption in the 3–5 μm spectral region at temperatures from 311 to 363 K // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112. P. 1304–1313.
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. Anderson G., Clough S., Kneizys F., Chetwynd J., Shettle E. AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km). AFGL-TR-86-0110. Environmental Research Paper. N 954. Hanscom AFB: MA 01736. 1986. 25 p.
12. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C., Kochanov R.V., Tana Y., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Campargue A., Chance K.V., Drouin B.J., Flaud J.-M., Gamache R.R., Hodges J.T., Jacquemart D., Perevalov V.I., Perrin A., Shine K.P., Smith M.A.H., Tennyson J., Toon G.C., Tran H., Tyuterev V.G., Barbe A., Császár A.G., Devi V.M., Furtenbacher T., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Jolly A., Johnson T.J., Karman T., Kleiner I., Kyuberis A.A., Loos J., Lyu-lin O.M., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Moazzen-Ahmadi N., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Polyansky O.L., Rey M., Rotger M., Sharpe S.W., Sung K., Starikova E., Tashkun S.A., Vander Auwera J., Wagner G., Wilzewski J., Wcislo P., Yu S., Zak E.J. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2017. V. 203. P. 3–69. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.038.
13. Tipping R.H., Ma Q. Theory of the water vapor continuum and validations // *Atmos. Res.* 1995. V. 36. P. 69–94.
14. Несмелова Л.И., Родимова О.Б., Творогов С.Д. Контур спектральной линии и межмолекулярное взаимодействие. Новосибирск: Наука, 1986. 213 с.
15. Scribano Y., Leforestier C. Contribution of water dimer absorption to the millimeter and far infrared atmospheric water continuum // *J. Chem. Phys.* 2007. V. 126, N 23. P. 234301.
16. Vigin A.A. Water vapor continuum absorption in various mixtures: Possible role of weakly bound complexes // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2000. V. 64. P. 25–40.
17. Ptashnik I.V., Shine K.P., Vigin A.A. Water vapour self-continuum and water dimers: 1. Analysis of recent work // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112. P. 1286–1303. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2011.01.012.
18. Третьяков М.Ю., Кошелев М.А., Серов Е.А., Паршин В.В., Одинцова Т.А., Бубнов Г.М. Димер воды и атмосферный континуум // *Успехи физ. наук.* 2014. Т. 184. С. 1199–1215. DOI: 10.3367/UFN.0184.201411c.1199.
19. Burch D.E., Alt R.L. Continuum absorption by H₂O in the 700–1200 cm⁻¹ and 2400–2800 cm⁻¹ windows // Report AFGL-TR-84-0128 by Ford Aerospace and Communications Corporation, Aeronutronic Division to AFGL. United States Air Force, Hanscom AFB: Massachusetts 01731. 1984. 31 p.
20. Burch D.E. Investigation of the absorption of infrared radiation by atmospheric gases // Semi-Annual Technical Report. Philco-Ford Corporation, Aeronutronic Division, Newport Beach, CA. 1970. Rept. U-4784.
21. Burch D.E., Gryvnak D.A. Method of calculating H₂O transmission between 333 and 633 cm⁻¹. Report. 1979. P. 1–50.
22. Roberts R.E., Selby J.E.A., Biberman L.M. Infrared continuum absorption by atmospheric water vapor in the 8–12 micron meter window // *Appl. Opt.* 1976. V. 15. P. 2085–2090.
23. 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.
24. 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.
25. Shine K.P., Ptashnik I.V., Radel G. The water vapor continuum: Brief history and recent developments // *Surv. Geophys.* 2012. V. 33. P. 535–555. DOI: 10.1007/s10712-011-9170-y.
26. Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Климоchenko И.И. Вклад континуального поглощения H₂O в потоки длинноволнового излучения облачной и безоблачной атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 10. С. 843–849.
27. Чеснокова Т.Ю., Фирсов К.М., Размолов А.А. Вклад континуального поглощения водяного пара в радиационный баланс атмосферы при наличии перистых облаков // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 9. С. 743–751; Chesnokova T.Yu., Firsov K.M., Razmo-

- lov A.A.* Contribution of the water vapor continuum absorption to the radiation balance of the atmosphere with cirrus clouds // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 64–71.
28. *Rädel G., Shine K.P., Ptashnik I.V.* Global radiative and climate effect of the water vapor continuum at visible and near-infrared wavelengths // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2015. V. 141. P. 727–738. DOI: 10.1002/qj.2385.
29. *Зуев В.Е., Комаров В.С.* Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.
30. *Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
31. *Lacis A.A., Oinas V.* A description of the *k*-distribution methods for modelling nongray gaseous absorption, thermal emission, and multiple scattering in vertically inhomogeneous atmospheres // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96, N D5. P. 9027–9063.
32. *Творогов С.Д.* Некоторые аспекты задачи о представлении функции пропускания в ряд экспонент // *Оптика атмосф. и океана.* 1994. Т. 7, № 3. С. 315–326.
33. *Мицель А.А., Пташник И.В., Фирсов К.М., Фомин Б.А.* Эффективный метод полинейного счета пропускания поглощающей атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 1995. Т. 8, № 10. С. 1547–1551.
34. ECMWF ERA-5. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (last access: 9.07.2022).

К.М. Фирсов, Т.Ю. Чеснокова, А.А. Размолот. **Impact of the water vapor continuum absorption on the CO₂ radiative forcing in the atmosphere for Lower Volga Region.**

The impact of the water vapor continuum absorption in the atmosphere on CO₂ radiative forcing is estimated on the basis of mass calculations of thermal radiative fluxes for summer conditions in 2021 in the Lower Volga Region. The set of 368 vertical atmospheric profiles (four realizations per day during three summer months) was used for the simulation. It was shown that the humidity growth decreases the CO₂ contribution to radiative impact on the Earth's surface, which leads to weaker heating of the surface and stronger heating of the atmosphere. Thus, greenhouse effect reinforcement due to the CO₂ concentration increase at high humidity will lead to greater heating of the atmosphere. The water vapor continuum plays a dominating role in this process, but not selective absorption in H₂O bands.