

Оценки вариаций радиационного форсинга для углекислого газа в последнее столетие и в будущем

Ю.М. Тимофеев, Я.А. Виролайнен, А.В. Поляков*

Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Поступила в редакцию 21.05.2019 г.

На основе анализа интегральной формы уравнения переноса излучения исследованы физические причины изменений уходящего теплового излучения (УТИ) Земли при увеличении содержания CO_2 в атмосфере. Увеличение содержания CO_2 может приводить как к увеличению, так и к уменьшению различных компонент УТИ в зависимости от оптической плотности спектрального интервала. Рассчитаны и проанализированы спектры потоков УТИ в области 3–30 мкм для пяти климатических моделей атмосферы Земли и различных концентраций углекислого газа, от доиндустриального (280 ppm) до современного (407 ppm) и прогнозируемых в будущем значений (800 и 1200 ppm). Сезонные и пространственные вариации радиационного форсинга CO_2 (РФУГ) в настоящее время достигают около 20% и 40% соответственно. Сопоставления измерений УТИ различными приборами в разные годы (например, прибором SI-1 в 1977 и 1979 гг. и ИКФС-2 в 2015–2017 гг.) показывают снижение его величины в полосах поглощения CO_2 , обусловленное смещением вверх излучающих слоев в тропосфере. Таким образом, в настоящее время РФУГ за счет роста углекислого газа с доиндустриальных значений оценивается в пределах $-(0,94-1,62)$ Вт/м².

Ключевые слова: радиационный форсинг, углекислый газ, уходящее тепловое излучение, радиационный баланс, спутниковый мониторинг; radiative forcing, carbon dioxide, outgoing thermal radiation, radiative balance, satellite monitoring.

Введение

Исследования современных изменений климата Земли и определяющих их факторов, а также прогнозы изменений климата и их возможных последствий на ближайшее столетие — одни из наиболее актуальных тем мировой науки в настоящее время. Основной причиной изменений климата по современным представлениям является увеличение содержания в атмосфере парниковых газов (углекислого газа, метана и др.) под влиянием антропогенных факторов [1, 2]. Для характеристики этого влияния часто используют понятие радиационного форсинга (radiative forcing). В настоящей работе под радиационным форсингом углекислого газа (РФУГ) понимаются изменения величины интегральных по спектру потоков уходящего теплового излучения (УТИ) в полосах поглощения углекислого газа на верхней границе атмосферы. Рост содержания в атмосфере радиационно-активных газов (CO_2 , CH_4 , N_2O и т.д.) приводит в большей части их полос поглощения к смещению вверх излучающих слоев и уменьшению величины УТИ вследствие известного отрицательного вертикального градиента температуры в тропосфере [3]. Такие уменьшения величины УТИ в разных полосах парниковых газов были зарегистрированы ранее (см., например, [4]).

* Юрий Михайлович Тимофеев (y.timofeev@spbu.ru); Яна Акселевна Виролайнен (yana.virolainen@spbu.ru); Александр Викторович Поляков (a.v.polyakov@spbu.ru).

1. Механизм формирования радиационного форсинга

В предположении выполнимости в атмосфере локального термодинамического равновесия, а также малости эффектов рассеяния ИК-излучения в безоблачной атмосфере можно записать следующее соотношение для интенсивности восходящего теплового монохроматического излучения на уровне z $I_v^\uparrow(z)$ (интегральную форму уравнения переноса излучения [5]):

$$I_v^\uparrow(z) = I_{v,0} \exp\left[-\sec\theta \int_0^z k_v(z') dz'\right] + \sec\theta \int_0^z k_v(z') B_v[T(z')] \exp\left[-\sec\theta \int_{z'}^z k_v(z'') dz''\right] dz'$$
$$I_{v,0} = \varepsilon_v B_v(T_0) + (1 - \varepsilon_v) I_v^\downarrow(0),$$

где $I_{v,0}$ — восходящее излучение на уровне поверхности Земли; \exp — функция пропускания атмосферы; $k_v(z')$ — объемный коэффициент поглощения (включающий плотность поглощающих и излучающих газов); $B_v(T_0)$ и $B_v[T(z')]$ — функции Планка абсолютно черного излучения при температуре поверхности T_0 и вертикального профиля температуры атмосферы; $I_v^\downarrow(0)$ — нисходящее излучение атмосферы; ε_v — излучательная способность поверхности; θ — зенитный угол наблюдений.

Таким образом, интенсивность восходящего излучения (а также уходящего на верхней границе атмосферы) состоит из трех компонент: излучения поверхности, дошедшего до уровня z' (I); отраженного от поверхности нисходящего излучения атмосферы, дошедшего до уровня z (II); излучения нижележащих слоев атмосферы, достигшего уровня z (III).

Рассмотрим, что происходит с этими компонентами при увеличении содержания поглощающего газа, например CO_2 . Компонента I уменьшается за счет увеличения поглощения CO_2 и уменьшения функции пропускания атмосферы. Компонента II может вести себя по-разному, т.к. возрастает нисходящее излучение атмосферы $I_v^-(0)$ (становится больше излучающих молекул CO_2), но уменьшается функция пропускания атмосферы. В большинстве случаев вклад этой компоненты в уходящее излучение относительно мал из-за близости ИК излучательной способности ϵ_v к единице. Наконец, компонента III также может иметь разные знаки в зависимости от оптической плотности атмосферы в рассматриваемой полосе и длины волны. При высокой оптической плотности уходящее излучение формируется в стратосфере, рост содержания CO_2 вызывает смещение вверх излучающих стратосферных слоев и вследствие положительного вертикального градиента температуры рост величины УТИ. Если оптическая плотность относительно невелика, то излучение формируется в тропосфере и увеличение высоты излучающих слоев приводит к уменьшению величины УТИ. Именно этот механизм уменьшения УТИ как основной описан в [3].

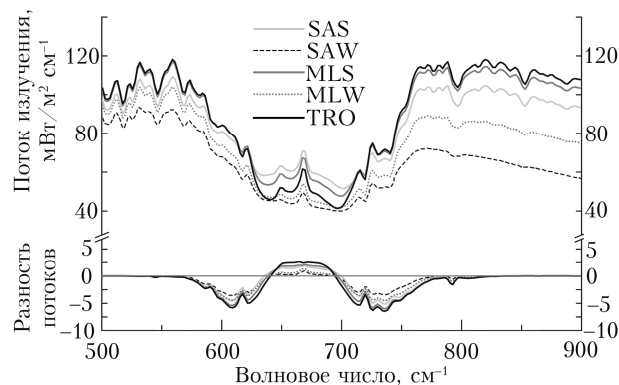
Отметим, что изменение высоты излучающих слоев в стратосфере вызывает противоположный эффект – УТИ увеличивается. Качественный анализ влияния роста парниковых газов на уходящее излучение и РФУГ показывает, что возможен и вариант охлаждения планеты, т.е. РФУГ может иметь разные знаки в зависимости от оптических характеристик атмосферы. Отметим, что второй эффект может быть и незаметен, когда в расчетах используются функции пропускания грубого спектрального разрешения и все излучение в полосе по данным расчетов формируется в тропосфере.

2. Численный анализ радиационного форсинга CO_2

Проверка сделанных выше качественных выводов о механизмах влияния роста парниковых газов на радиационный баланс на верхней границе атмосферы была сделана на основе расчетов с помощью программы, использующей метод *line-by-line* [6]. Были рассчитаны спектры интенсивности и потоков УТИ в области 3–30 мкм (3333–333 cm^{-1}) для пяти климатических моделей атмосферы Земли: субполярная, лето (SAS) и зима (SAW); средние широты, лето (MLS) и зима (MLW); тропики (TRO)[7] для различного содержания CO_2 . Потоки излучения вычислялись с использованием фактора диффузности со значением 1,66 [5]. Эти расчеты позволяют иссле-

довать пространственные и временные вариации РФУГ за счет роста содержания CO_2 за последние ~40 лет.

На рисунке представлены спектры потоков УТИ в области полосы поглощения CO_2 15 мкм для разных моделей атмосферы, а также разности потоков с доиндустриальным (280 ppm) и современным (407 ppm) содержанием CO_2 .



Спектральные потоки УТИ для различных моделей атмосферы при современном содержании CO_2 407 ppm (вверху), а также разность потоков с содержанием CO_2 в доиндустриальный период – 280 ppm (внизу)

Как видно из нижней части рисунка, в области центра полосы (высокой оптической плотности) наблюдается рост УТИ, в средней части и крыле полосы – его уменьшение. Таким образом, стратосферный эффект роста УТИ при увеличении содержания CO_2 подтверждается расчетами с помощью современного радиационного кода. Суммарный эффект увеличения содержания CO_2 во всей полосе 15 мкм и, следовательно, РФУГ отрицательный, т.е. в целом происходит уменьшение УТИ, приводящее к потеплению атмосферы.

3. Анализ вариаций радиационного форсинга

В таблице приведены интегральные потоки УТИ и величины РФУГ для пяти моделей атмосферы и содержания CO_2 в различные годы. С 1977 г. до настоящего времени в зависимости от сезона и широты значения РФУГ выросли с 0,43–0,75 до 0,94–1,62 $\text{Вт}/\text{м}^2$, т.е. в 1,5–2 раза. Минимальный РФУГ соответствует модели субарктической зимы, максимальный – модели тропиков. Значительный рост РФУГ также наблюдается для модели лета средних широт. Сезонные вариации РФУГ достигают в настоящее время 0,223–0,245 $\text{Вт}/\text{м}^2$, т.е. ~20%; пространственные вариации при современном содержании CO_2 составляют 1,14–1,55 $\text{Вт}/\text{м}^2$, или ~40%.

Также подчеркнем, что вклад в РФУГ вносят в основном три спектральные области – полосы поглощения CO_2 : 15; 10,4; 4,3 мкм. Оценка относительного вклада в РФУГ, например, для модели тропиков за счет изменения содержания CO_2 от 280 до 407 ppm составляет для этих полос 1,42 (88%); 0,16 (10%); 0,03 $\text{Вт}/\text{м}^2$ (2%) соответственно при суммарном значении РФУГ 1,62 $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Интегральный поток уходящего теплового излучения в трех полосах поглощения CO₂ (ИП, Вт/м²), а также радиационный форсинг за счет роста содержания CO₂ с доиндустриальной эпохи (РФУГ, Вт/м²) в зависимости от содержания CO₂ и модели атмосферы

CO ₂ , ppm	Параметр	Модель атмосферы				
		SAS	SAW	MLS	MLW	TRO
280 (1750 г.)	ИП	230,56	169,38	247,51	199,10	253,93
	ИП	229,97	168,92	246,78	198,49	253,13
337 (1979 г.)	РФУГ	-0,59	-0,46	-0,73	-0,61	-0,80
	ИП	229,76	168,75	246,52	198,27	252,84
360 (1995 г.)	РФУГ	-0,80	-0,63	-0,99	-0,83	-1,09
	ИП	229,58	168,61	246,30	198,08	252,59
381 (2005 г.)	РФУГ	-0,97	-0,77	-1,21	-1,02	-1,33
	ИП	229,45	168,51	246,14	197,94	252,42
397 (2014 г.)	РФУГ	-1,10	-0,87	-1,38	-1,16	-1,51
	ИП	229,37	168,44	246,04	197,86	25,31
407 (2018 г.)	РФУГ	-1,18	-0,94	-1,47	-1,24	-1,62
	ИП	227,28	166,76	243,37	195,63	249,36
800	РФУГ	-3,28	-2,62	-4,14	-3,47	-4,57
	ИП	226,07	165,80	241,77	194,33	247,56
1200	РФУГ	-4,49	-3,58	-5,74	-4,78	-6,37

Кроме современных значений, в таблице приведены также величины РФУГ для содержания в атмосфере Земли CO₂ 800 и 1200 ppm, которые могут быть достигнуты при продолжающемся росте содержания углекислого газа за счет его антропогенных источников. Значения РФУГ при этом возрастают в 3–4 раза по сравнению с современным периодом.

4. Экспериментальные оценки изменений уходящего теплового излучения

Для проверки качества расчетных методов важны экспериментальные исследования вариаций РФУГ. Оценки климатических изменений можно осуществить с помощью сравнений спектров УТИ, измеренных в разные периоды времени. Подобные оценки приведены, например, в [8, 9]. В [8] сопоставлены среднеглобальные спектры уходящего излучения, измеренные в разные годы разными спутниковыми приборами: 1970 (прибор IRIS), 1997 (IMG) и 2012 г. (IASI). Также в [8] показан рост УТИ в окне прозрачности атмосферы 8–12 мкм и уменьшение излучения в полосах CO₂ и метана. При этом разности в яркостных температурах уходящего излучения достигали +2 К в окне прозрачности и –5,5 К в полосе метана. В [9] были рассчитаны спектры интенсивностей УТИ для сопоставления с данными спутниковых измерений разных лет (в частности, с измерениями Фурье-спектрометра СИ-1 в 1977 и 1979 гг. [10] и Фурье-спектрометра ИКФС-2 в 2015–2017 гг. [11]). Все расчеты проводились для спектрального разрешения 5 см⁻¹ (спектральное разрешение аппаратуры СИ-1). Данные измерений аппаратуры ИКФС-2 также приводились к этому спектральному разрешению с помощью методики, описанной в [12]. В [9, 12] отмечены значительное уменьшение излучения с 1977 и 1979 гг. по 2015–2017 гг. в большей части 15-мкм полосы CO₂ и признаки его роста в центре полосы.

В настоящее время важны организация и осуществление мониторинга РФУГ в глобальном масштабе с помощью современных спутниковых приборов, таких как IASI, CrIS, ИКФС-2, позволяющих определять вертикальный профиль температуры и содержание CO₂ в атмосфере с относительно высоким пространственным разрешением. Эти данные, особенно с учетом значительных пространственно-временных вариаций CO₂ в районах мегаполисов [13], позволят существенно повысить точность оценок влияния антропогенных факторов на прогнозы погоды и современные исследования изменений климата нашей планеты.

Закключение

Проведенный анализ интегральной формы уравнения переноса теплового излучения показывает, что изменение содержания парниковых газов (например, CO₂) может приводить как к увеличению, так и к уменьшению уходящего теплового излучения, т.е. РФУГ может иметь разные знаки в зависимости от оптической плотности спектрального интервала.

Рассчитаны интегральные потоки УТИ в спектральной области 3–30 мкм для пяти климатических моделей атмосферы Земли: лета и зимы субполярных широт, лета и зимы средних широт, тропиков. Расчеты проводились для различного содержания CO₂, от доиндустриального (280 ppm) до современных значений (407 ppm), а также для значений в 800 и 1200 ppm (возможные концентрации в будущем). В области центра полосы 15 мкм (высокой оптической плотности) наблюдается рост УТИ, в средней части полосы – его уменьшение. Таким образом, стратосферный эффект роста УТИ при увеличении содержания CO₂ подтверждается расчетами с помощью современного радиационного кода. Суммарный же вклад CO₂ в РФУГ – отрицательный, т.е. в целом наблюдается уменьшение УТИ.

Вклад в РФУГ за счет изменений содержания CO₂ в атмосфере Земли вносят в основном три спектральные области – полосы поглощения CO₂ 15 (88%); 10,4 (10%); 4,3 мкм (2%). Так, например,

для модели тропиков РФУГ за счет изменения содержания CO₂ с 280 до 407 ppm равен для этих полос -1,42; -0,16; -0,03 Вт/м² соответственно при их суммарном вкладе в РФУГ -1,62 Вт/м².

С 1977 г. до настоящего времени РФУГ вырос с 0,43–0,75 до 0,94–1,62 Вт/м² в зависимости от сезона и широты, т.е. в 1,5–2 раза. Сезонные вариации РФУГ достигают в настоящее время 0,223–0,245 Вт/м² (~20%). Пространственные вариации РФУГ при современных концентрациях CO₂ составляют 1,14–1,55 Вт/м² (~40%). При продолжении роста антропогенных эмиссий CO₂ величины РФУГ могут возрасти в 3–4 раза по сравнению с современными значениями.

Сопоставление величин УТИ, измеренных различными приборами в разные годы, показывает значительное уменьшение излучения с 1977–1979 по 2015–2016 гг. в большей части 15-мкм полосы CO₂ и признаки его роста в центре полосы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-00768).

1. 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. 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing // *Climate Change 2007: The Phys. Sci. Basis. contribution of working groups I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.) Cambridge, New York: Cambridge University Press. P. 95–116.
2. IPCC. Climate Change: 2013 The Physical Science Basis, working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. URL: http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/WGIAR5_SPM_brochure_en.pdf (last access: 21.04.2019)
3. Hansen J., Lacis A., Ruedy R., Sato M., Wilson H. How sensitive is the world's climate? // *Natl. Geog. Soc. Res. Exploration*. 1993. N 9. P. 142–158.
4. Harries J.E., Brindley H.E., Sahoo P.J., Bantges R.J. Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing

longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997 // *Nature*. 2001. V. 410. P. 355–357.

5. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб: Наука, 2003. 475 с.
6. Clough S.A., Shephard M.W., Mlawer E.J., Delamere J.S., Iacono M.J., Cady-Pereira K., Boukabara S., Brown R.D. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Trans.* 2005. V. 91. P. 233–244.
7. Anderson G.P., Clough S.A., Kneizys F.X., Chetwynd J.H., Shettle E.P. AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km) // *Environ. Res.* 1986. N 954. 43 p.
8. Bantges R.J., Brindley H.E., Chen X.H., Huang X.L., Harries J.E., Murray J.E. On the detection of robust multidecadal changes in Earth's outgoing longwave radiation spectrum // *J. Climate*. 2016. V. 29, N 13. P. 4939–4947.
9. Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Козлов Д.А., Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Делер В., Эртель Д., Шпенкух Д. Сопоставление спектров уходящего теплового ИК излучения разных лет // *Исслед. Земли из космоса*. 2018. № 5. С. 65–72.
10. Kempe V., Oertel D., Schuster R., Becker-Ross H., Jahn H. Absolute IR-spectra from the measurement of Fourier-spectrometers aboard Meteor 25 and 28 // *Acta Astronautica*. 1980. V. 7, N 12. P. 1403–1416.
11. Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Никулин А.Г., Козлов Д.А., Монахов Д.О., Козлов И.А., Архипов С.А., Целиков В.А., Романовский А.С. Бортовые инфракрасные фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли // *Исслед. Земли из космоса*. 2013. № 6. С. 25–37.
12. Козлов Д.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Козлов И.А., Делер В., Эртель Д., Шпенкух Д. Методика пересчета спектров теплового излучения атмосферы различного спектрального разрешения для взаимного сопоставления измерений бортовых инфракрасных фурье-спектрометров // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 1. С. 52–60.
13. Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виралайнен Я.А., Макарова М.В., Поляков А.В., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н., Фока С.Ч. Пространственно-временные вариации содержания CO₂ по данным спутниковых и наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга // *Изв. РАН. ФАО*. 2019. Т. 55, № 1. С. 65–72.

Yu.M. Timofeev, Ya.A. Virolainen, A.V. Polyakov. Estimates of variations in CO₂ radiative forcing in the last century and in future.

Based on the analysis of the radiative transfer equation in the integral form, we investigate the physical causes of changes in the Earth outgoing thermal radiation (OTR) due to increasing atmospheric CO₂ content. CO₂ concentration growth can lead to both increase and decrease in various components of the OTR depending on the optical density of a spectral interval. We calculate and analyze the spectra of OTR fluxes in the range 3–30 μm for five climate atmospheric models and various concentrations of carbon dioxide from pre-industrial (280 ppm) to present (407 ppm) and projected in the future values (800 and 1200 ppm). Seasonal and spatial variations in CO₂ radiative forcing (RF) currently reach about 20% and 40%, respectively. Comparison of OTR measurements with different instruments in different years (for example, SI-1 in 1977 and 1979 and IKFS-2 in 2015–2017) demonstrates a decrease in the OTR values in the CO₂ absorption bands caused by the upward displacement of radiating layers in the troposphere. We estimate the RF due to the growth of CO₂ concentrations from pre-industrial to present values to be in the range -(0.94–1.62) W/m².