

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.41

Оценки вариаций радиационного воздействия метана в прошлом и в будущем

С.В. Акишина, А.С. Михайлова, Ю.М. Тимофеев, Н.Н. Филиппов✉*

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

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.;
после доработки 31.07.2023 г.;
принята к печати 17.08.2023 г.

Проанализированы потоки уходящего теплового излучения (УТИ), полученные с помощью радиационного кода MODTRAN для пяти климатических моделей земной атмосферы и трех значений содержания метана (0,8 ppm — преиндустриальное, 1,8 ppm — современное и 2,5 ppm — прогноз на конец XXI в.), рассчитаны радиационные воздействия CH_4 . Наблюдается уменьшение потоков УТИ примерно на 0,15% по сравнению с доиндустриальной эпохой. Пространственно-временные вариации потоков УТИ при современном содержании метана достигают ~13%. Из-за роста концентрации метана в атмосфере Земли к настоящему времени относительно его содержания в доиндустриальную эпоху его радиационное воздействие оценивается в пределах от –0,482 до –0,266 Вт/м².

Ключевые слова: радиационное воздействие, метан, уходящее тепловое излучение, MODTRAN; radiative forcing, methane, outgoing thermal radiation, MODTRAN.

Введение

Метан — один из важнейших парниковых газов, оказывающих воздействие на климат Земли, третий по своему влиянию на глобальное потепление после водяного пара и углекислого газа. Согласно исследованиям ИРСС [1] потенциал глобального потепления метана в 25 раз больше, чем CO_2 . Важной характеристикой факторов, влияющих на климат нашей планеты, является радиационное воздействие (РВ). РВ определяется как изменение полного потока излучения, включающего как излучение Солнца, так и собственное тепловое излучение атмосферы на уровне тропопаузы [2]. Другое определение РВ — изменение уходящего теплового излучения (УТИ) при соответствующих изменениях параметров атмосферы [2]. Такое определение можно использовать, потому что нисходящее тепловое излучение на верхней границе атмосферы практически равно нулю, за исключением пренебрежимо малого реликтового МКВ-излучения с яркостной температурой около 2,7 К, т.е. полный поток равен УТИ.

Постоянные оценки РВ метана необходимы в силу значительного роста его атмосферного содержания в последние десятилетия. Подробно меха-

низм РВ и расчеты РВ углекислого газа были описаны в работе [3]. Анализ РВ метана на основе данных реанализа, представленных службой мониторинга атмосферы Коперника (CAMS, Copernicus Atmosphere Monitoring Service), был проведен, например, в работах [2, 4, 5]. В настоящей работе для расчетов РВ CH_4 мы использовали модель переноса излучения MODTRAN [6].

Цель работы — исследовать широтные и временные вариации РВ метана, оценить относительный вклад в РВ основных антропогенных парниковых газов (метана и углекислого газа).

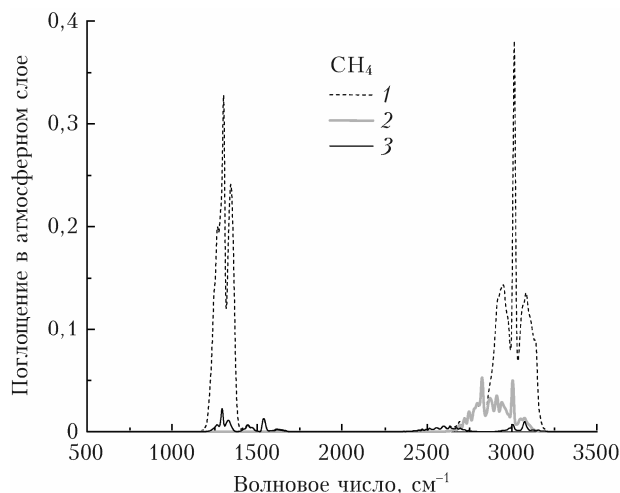
Описание методики

С 1750 г. содержание метана в атмосфере Земли увеличилось на 150%. Если в преиндустриальную эпоху оно составляло около 0,8 ppm, то в настоящее время — приблизительно 1,8 ppm [7]. Результаты недавних исследований Национального управления океанических и атмосферных исследований [8] показали, что годовой рост содержания метана в атмосфере в 2021 г. составил 0,017 ppm — это наибольшее значение за последние 40 лет. По разным оценкам, содержание CH_4 к концу XXI в. возрастет еще на 100%. В работе [7] приведены результаты анализа, согласно которым его содержание может вырасти до 3,5 ppm в 2100–2300 гг.

Наши вычисления охватывали ИК- (тепловую) область спектра 3–40 мкм (3333–250 см^{–1}), где содержится более 99% энергии теплового излучения

* Светлана Васильевна Акишина (st076936@student.spbu.ru); Анастасия Сергеевна Михайлова (st075797@student.spbu.ru); Юрий Михайлович Тимофеев (y.timofeev@spbu.ru); Николай Николаевич Филиппов (n.filippov@spbu.ru).

Земли. В этой же области находятся две относительно интенсивные полосы поглощения метана — ν_3 и ν_4 . Наиболее важной полосой, сильно влияющей на парниковый эффект метана, является полоса ν_4 (7,6 мкм). На рисунке приведен результат модельного расчета поглощения метана в вертикальном столбе атмосферы Земли при концентрации метана 1,8 ppm.



Поглощение метана в тепловой области спектра. Интенсивности A учтенных в расчете полос: 1 — $A > 0$; 2 — $100 \cdot 10^{-20} > A > 10 \cdot 10^{-20}$ см · молек. $^{-1}$; 3 — $10 \cdot 10^{-20} > A > 10^{-20}$ см · молек. $^{-1}$

Расчет проведен по модели сильных столкновений [9] в приближении однородного слоя атмосферы с давлением 0,5 атм и температурой 250 К. Значения частот, интенсивностей и коэффициентов уширения линий метана воздухом взяты из базы данных HITRAN [10]. Результаты расчета на рисунке усреднены по интервалу в 10 см^{-1} . Видно, что основной вклад в поглощение дают полосы с интенсивностью $A > 10^{-20}$ см · молек. $^{-1}$. Их положения и интенсивности приведены в табл. 1. Вместо значений соответствующих колебательных частот в табл. 1 приводятся значения центров масс полос, определенных по формуле

$$\omega_0 = \frac{\sum_m A_m \omega_m}{\sum_m A_m},$$

где ω_m и A_m — частоты и интенсивности линий полосы в базе данных HITRAN.

Таблица 1
Основные полосы поглощения метана в тепловой области спектра

Изотополог метана	Полоса	Центр масс полосы, см $^{-1}$ /мкм	Интенсивность, 10^{-20} см · молек. $^{-1}$
$^{12}\text{CH}_4$	ν_4	1308/7,65	514,1
$^{12}\text{CH}_4$	ν_2	1516/6,60	5,374
$^{12}\text{CH}_4$	$2\nu_4$	2597/3,85	5,496
$^{12}\text{CH}_4$	$\nu_2 + \nu_4$	2854/3,50	37,14
$^{13}\text{CH}_4$	ν_3	3020/3,31	11,91
$^{12}\text{CH}_4$	ν_3	3031/3,30	1082
$^{12}\text{CH}_4$	$2\nu_2$	3063/3,26	3,157

Уходящий поток излучения формируется за счет излучения поверхности и собственного теплового излучения атмосферы. При увеличении содержания CH_4 в атмосфере Земли формирование теплового излучения происходит в более высоких слоях тропосферы, где температурный градиент отрицательный и величина УТИ уменьшается, а радиационный баланс становится не нулевым, а положительным.

Расчеты УТИ проводились с помощью программы MODTRAN для пяти моделей атмосферы, разработанных в AFGL (Air Force Geophysics Laboratory): субполярная, лето (SAS) и зима (SAW); средние широты, лето (MLS) и зима (MLW); тропики (TRO) [11]. Радиационный код MODTRAN позволяет рассчитывать функции пропускания, интенсивности и потоки атмосферного излучения со средним спектральным разрешением в широкой спектральной области от 0 до 5000 см^{-1} .

Содержание метана в расчетах полагалось равным 0,8 ppm в прединдустриальный период; 1,8 ppm в настоящее время; 2,5 ppm в будущем.

Результаты и обсуждение

В табл. 2 приведены интегральные потоки (ИП) УТИ и изменения РВ метана за счет роста содержания CH_4 с доиндустриального периода для указанных выше значений. Пространственно-временные вариации потоков УТИ при современном значении содержания метана составляют ~13% (минимальное значение — субполярная модель, зима — $231,351 \text{ Вт/м}^2$; максимальное значение — средние широты, лето — $264,143 \text{ Вт/м}^2$).

Таблица 2
Интегральный поток УТИ (Вт/м^2) в зависимости от содержания метана и модели атмосферы, радиационное воздействие метана (Вт/м^2) за счет наблюдаемого и прогнозируемого роста его содержания с доиндустриального периода

Параметр	CH_4 , ppmv	SAS	SAW	MLS	MLW	TRO
ИП	0,8	261,643	231,617	264,625	248,710	261,886
ИП	1,8	261,161	231,351	264,143	248,298	261,413
РВ		-0,482	-0,266	-0,482	-0,412	-0,473
ИП	2,5	260,903	231,202	263,889	248,078	261,171
РВ		-0,740	-0,415	-0,736	-0,632	-0,715

Расчитанное радиационное воздействие из-за роста содержания метана с доиндустриальной эпохи составляет от $-0,266 \text{ Вт/м}^2$ (субарктика, зима) до $-0,482 \text{ Вт/м}^2$ (летний период, субарктика и средние широты). Большое значение РВ наблюдаются и в тропиках: $-0,473 \text{ Вт/м}^2$. Близкие значения РВ в теплый период года объясняются подобием вертикальных профилей температуры и содержания метана для всех широт.

Сезонные вариации РВ максимальны в субарктике и составляют примерно 45%. Это обусловлено относительно сильной сезонной вариацией потоков

УТИ в субполярных районах: зима — УТИ составляют 231,351 Вт/м², летом — 261,161 Вт/м², т.е. более 12%. Минимальные сезонные вариации РВ (15%) наблюдаются в средних широтах, где УТИ составляют 264,143 Вт/м² летом и 248,298 Вт/м² зимой. Существенные различия полученных значений РВ для разных широт (15 и 45%) отражают тот факт, что естественные вариации температуры в тропосфере средних широт значительно меньше, чем в субарктических широтах.

Если рассматривать оценки потоков УТИ для прогностического значения содержания метана (2,5 ppm), то они варьируются очень мало (меньше 0,5 Вт/м²), так как мы используем в расчетах те же вертикальные профили температуры. Изменение их на 1° — рост в тропосфере и падение в стратосфере — не меняют существенно этот вывод.

Радиационное воздействие в конце столетия, по нашим оценкам, может возрасти существенно. Если в настоящее время среднее РВ за счет увеличения атмосферного содержания метана составляет –0,423 Вт/м², то в конце столетия оно может достигнуть –0,648 Вт/м², т.е. изменится более чем на 60%. Пространственно-временные вариации РВ также увеличатся: полная амплитуда их изменений достигнет ~0,32 Вт/м². Минимум РВ будет наблюдаться зимой в субполярных широтах (–0,415 Вт/м²), а максимум — летом на всех широтах (от –0,715 до –0,740 Вт/м²).

Сравнение полученных результатов для метана с подобными оценками для СО₂ [3] (современное содержание было принято равным 400 ppm) показывают, что РВ метана в настоящее время составляет примерно 25% от РВ СО₂. При увеличении содержания углекислого газа, как и метана, в будущем в три раза (1200 ppm) наблюдается сильный рост его РВ и уменьшение вклада метана (в относительных величинах). Это обусловлено заметным отличием поглощения в полосах СО₂ и СН₄ в земной атмосфере. Если благодаря принимаемым в настоящее время мерам по сокращению антропогенных эмиссий углекислого газа удастся стабилизировать его содержание на современном уровне, то относительный вклад метана в РВ возрастет до ~45%.

Заключение

Проведены расчеты интегральных потоков УТИ в спектральной области 3–40 мкм для различного содержания метана в атмосфере Земли и пяти основных климатических моделей. Использовались пять климатологических профилей температуры, влажности и содержаний других газов по моделям AFGL и радиационный код MODTRAN.

Результаты вычислений показали уменьшение потоков УТИ по сравнению с доиндустриальной эпохой на ~0,15%; пространственно-временные вариации потоков УТИ при современном содержании метана составляют ~13%. На основе модельных значений потоков УТИ рассчитано РВ за счет изменчивости содержания метана по отношению к доин-

дустриальной эпохе. Пространственные вариации модельных значений РВ составляют от –0,266 до –0,482 Вт/м². Сезонные вариации РВ максимальны в субарктике (45%).

Радиационное воздействие метана может существенно возрасти к 2100–2300 гг. В настоящее время РВ метана составляет ~25% от РВ СО₂. Если рост содержания углекислого газа удастся прекратить, то относительный вклад СН₄ в РВ в конце столетия возрастет до ~45%. Оценки РВ полезны для предсказания изменений приземной температуры и могут быть использованы для построения климатических моделей Земли.

Список литературы

1. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. A Contribution of Working Group I to Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing / P. Forster, V. Ramaswamy (eds.). Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge University Press, 2007. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/changes-in-atmospheric-constituents-and-radiative-forcing/> (last access: 10.06.2022).
2. Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestad J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H. Anthropogenic and natural radiative forcing // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
3. Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Поляков А.В. Оценки вариаций радиационного форсинга для углекислого газа в последнее столетие и в будущем // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 10. С. 856–859; Timofeev Yu.M., Virolainen Ya.A., Polyakov A.V. Estimates of variations in CO₂ radiative forcing in the last century and in the future // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 2. P. 206–209.
4. Etminan M., Myhre G., Highwood E.J., Shine K.P. Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 12614–12623.
5. Bellouin N., Davies W., Shine K.P., Quaas J., Müllerstädt J., Forster P.M., Smith C., Lee L., Regayre L., Brasseur G., Sudarchikova N., Bouarar I., Boucher O., Myhre G. Radiative forcing of climate change from the Copernicus reanalysis of atmospheric composition // Earth Syst. Sci. Data. 2020. V. 12. P. 1649–1677. DOI: 10.5194/essd-12-1649-2020.
6. Berk A., Bernstein L.S., Robertson D.C. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN 7. Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA., 1987.
7. Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K., Daniel J.S., Kainuma M.L.T., Lamarque J.-F., Matsumoto K., Montzka S.A., Raper S.C.B., Riahi K., Thomson A., Velders G.J.M., van Vuuren D.P.P. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // Clim. Change. 2011. V. 109, N 213. P. 213–241.

8. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration): Increase in atmospheric methane set another record during 2021. 2022. URL: <https://www.noaa.gov/news-release/increase-in-atmospheric-methane-set-another-record-during-2021> (last access: 10.06.2022).
9. Tonkov M.V., Filippov N.N., Timofeev Yu.M., Polyakov A.V. A simple model of the line mixing effect for atmospheric applications: Theoretical background and comparison with experimental profiles // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1996. V. 56. P. 783–795.
10. Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J., Hashemi R., Karlovets E.V., Skinner F.M., Conway E.K., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y., Wcislo P., Finenko A.A., Nelson K., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Campargue A., Chance K.V., Coustenis A., Drouin B.J., Flaud J.M., Gamache R.R., Hodges J.T., Jacquemart D., Mlawer E.J., Nikitin A.V., Perevalov V.I., Rotger M., Tennyson J., Toon G.C., Tran H., Tyuterev V.G., Adkins E.M., Baker A., Barbe A., Cane E., Császár A.G., Dudaryonok A., Egorov O., Fleisher A.J., Fleurbaey H., Foltynowicz A., Furtenbacher T., Harrison J.J., Hartmann J.M., Horneman V.M., Huang X., Karman T., Karns J., Kass S., Kleiner I., Kofman V., Kwabia-Tchana F., Lavrentieva N.N., Lee T.J., Long D.A., Lukashetskaya A.A., Lyulin O.M., Makhnev V.Y., Matt W., Massie S.T., Melosso M., Mikhailenko S.N., Mondelain D., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Perrin A., Polyansky O.L., Raddaoui E., Raston P.L., Reed Z.D., Rey M., Richard C., Tobias R., Sadiek I., Schwenke D.W., Starikova E., Sung K., Tamassia F., Tashkun S.A., Vander Auwera J., Vasilenko I.A., Vigasin A.A., Villanueva G.L., Vispoel B., Wagner G., Yachmenev A., Yurchenko S.N. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2022. V. 277, P. 107949–1–82.
11. Anderson G.P., Clough S.A., Kneizys F.X., Chetwynd J.H., Shettle E.P. AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km) // Environ. Res. Papers. 1986. N 954. P. 5–8.

S.V. Akishina, A.S. Mikhailova, Yu.M. Timofeyev, N.N. Filippov. Estimates of variations in radiative forcing for methane in the past and in the future.

We calculate CH₄ radiative forcing from the analysis of outgoing thermal radiation (OTR) fluxes obtained by the MODTRAN radiative code for five climate atmospheric models and various methane concentrations (0.8, 1.8, and 2.5 ppm). OTR values decreased by ~0.15% compared to the pre-industrial era. Seasonal and spatial variations in OTR fluxes at current methane rates reach ~13%. To date, due to the increasing CH₄ concentration in the Earth's atmosphere, methane RF is estimated at between –0.482 and –0.266 W/m².