

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.588.74, 551.521.13

Оценки молекулярного поглощения солнечного излучения в атмосфере в прошлом, настоящем и будущем

П.М. Неробелов^{1,2,3}, Г.М. Неробелов^{✉1}, Ю.М. Тимофеев^{1*}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 литера Б

³ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН
199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39

Поступила в редакцию 18.03.2025;
после доработки 11.04.2025;
принята к печати 14.04.2025

В настоящей работе с помощью модели SCIATRAN и расчетов потоков солнечного излучения в спектральной области 1–4 мкм анализируется молекулярное поглощение солнечного излучения основными антропогенными парниковыми газами CO₂ и CH₄ в атмосфере в прошлом, настоящем и будущем. Расчеты проводились для трех широтных зон (тропики, средние широты и субарктика) и двух сезонов — зима и лето. Согласно расчетам максимальное молекулярное поглощение солнечного излучения в области 1–4 мкм парниковыми газами приходится на тропики и достигает 153–168 Вт/м² в течение всего года. В 1750–2100 гг. молекулярное поглощение солнечного излучения газами CO₂ и CH₄ увеличивается, его изменение может составить 0,8–1,2 Вт/м². Прогнозируемое увеличение молекулярного поглощения солнечного излучения к концу XXI в. близко к современным оценкам изменения радиационного баланса Земли, которые составляют 0,5–1,0 Вт/м². Среднее глобальное увеличение молекулярного поглощения уходящего теплового излучения Земли больше, чем увеличение молекулярного поглощения солнечного излучения примерно в три–четыре раза. Изменения поглощения солнечного и уходящего излучения Земли с ростом содержания парниковых газов увеличивают дисбаланс энергии и приводят к изменению средней температуры планеты. Результаты исследования вносят вклад в изучение возможного влияния молекулярного поглощения приходящего солнечного излучения на будущее изменение радиационного баланса Земли.

Ключевые слова: радиационный баланс Земли, молекулярное поглощение, солнечное излучение, парниковые газы, CO₂, CH₄, SCIATRAN; Earth radiation balance, molecular absorption, solar radiation, greenhouse gases, CO₂, CH₄, SCIATRAN.

Введение

Антропогенные выбросы парниковых газов в атмосферу Земли (CO₂, CH₄ и др.) вызывают изменение радиационного баланса (РБ) и, как следствие, глобальное потепление климата планеты. В 2011–2020 гг. глобальная температура поверхности Земли повысилась на 1,1 °С по сравнению с 1850–1900 гг. Несмотря на принятые международные соглашения и взятые различными странами обязательства, до сих пор наблюдается рост содержания основных парниковых газов (CO₂ и CH₄) в атмосфере. В 2024 г. концентрация CO₂ в атмосфере достигла 420 ppm, CH₄ — 1866 ppb. Среднегодовые выбросы парниковых газов в 2010–2019 гг. были выше, чем

в любое предыдущее десятилетие, но темпы роста в данный период были ниже, чем в 2000–2009 гг. (1,3 %/г против 2,1 %/г) [1, 2]. Суммарные выбросы CO₂ в 1850–2019 гг. составили 2400 ± 240 Гт. Из них более половины (58%) — в 1850–1989 гг. (1400 ± 195 Гт CO₂) и ~ 42% — в 1990–2019 гг. (1000 ± 90 Гт). Глобальные антропогенные выбросы всех парниковых газов в 2019 г. оцениваются в 59 ± 6,6 Гт CO₂-экв., что примерно на 12% (6,5 Гт CO₂-экв.) выше, чем в 2010 г., и на 54% (21 Гт CO₂-экв.) выше, чем в 1990 г.

Климатические изменения влияют на частоту экстремальных погодных и климатических явлений во всех регионах земного шара [1–3]. Актуальность и практическая значимость изучения современных изменений климата Земли стимулировали проведение наземных и спутниковых измерений составляющих радиационного баланса планеты, теоретических и экспериментальных исследований [4, 5],

* Петр Максимович Неробелов (peter_nerobelov@mail.ru); Георгий Максимович Неробелов (akulishe95@mail.ru); Юрий Михайлович Тимофеев (y.timofeev@spbu.ru).

например в рамках международной программы CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) [6].

Одной из главных составляющих радиационного баланса атмосферы является молекулярное поглощение солнечного излучения парниковыми газами, величина которого составляет в среднем 75 из 340 Вт/м² поступающей на планету солнечной энергии [1]. Если говорить о РБ планеты в целом, то исследования показывают, что в настоящее время регистрируются его нарушения (имбаланс, или разность между приходящим к Земле и уходящим в космос электромагнитным излучением на верхней границе атмосферы), достигающие +0,5–1,0 Вт/м² [7–13]. В приведенных работах основными факторами роста имбаланса предполагаются изменения облачности и ледяного покрова в полярных регионах, а также увеличение атмосферного поглощения солнечного излучения парниковыми газами и уменьшение уходящего теплового излучения планеты.

Цель настоящей работы – исследование молекулярного поглощения солнечного излучения парниковыми газами CO₂ и CH₄ в прошлом, настоящем и будущем.

Материалы и методы

Выбор спектрального диапазона

Выбор области 1–4 мкм обусловлен наличием в ней относительно интенсивных полос поглощения CO₂ и CH₄, а также значительной доли (~30%) энергии солнечного излучения, приходящего к Земле. Более длинноволновые полосы поглощения CO₂ и CH₄ в средней области вносят вклад менее 1% в энергию поглощенного солнечного излучения этими газами. На рис. 1 представлен пример спектров оптической толщи атмосферы в области

1500–2500 нм для ряда атмосферных составляющих [14].

В рассматриваемой области спектра атмосферное поглощение обусловлено наличием и изменением содержания H₂O, CO₂, CH₄, N₂O и CO. Максимально молекулярное атмосферное поглощение обусловлено водяным паром. Во всей области 1–4 мкм присутствуют четыре полосы CO₂ и пять полос CH₄ различной интенсивности.

Модель переноса электромагнитного излучения SCIATRAN

Для расчетов потоков солнечного излучения и определения молекулярного поглощения парниковыми газами мы использовали модель SCIATRAN, описывающую перенос электромагнитного излучения в сферической атмосфере в диапазоне длин волн $\lambda = 0,17$ –40 мкм [15]. В модели учитывается ослабление электромагнитного (ЭМ) излучения в результате поглощения газами, а также многократное рэлеевское и аэрозольное рассеяние.

Солнечное излучение на верхней границе атмосферы задано в виде спектра Куруца [16]. Расчет с помощью SCIATRAN проведен со спектральным разрешением 10⁻² мкм на $\lambda = 1$ –4 мкм. Учитывалось поглощение пяти атмосферных газов: O₃, CH₄, H₂O, CO₂ и N₂O, содержание которых задано на основе результатов модели US Standard Atmosphere [17].

Потоки солнечного излучения рассчитаны для следующих моделей атмосферы: субарктической и среднеширотной (зимой и летом), тропической [7]. Для всех пяти атмосферных моделей использовались одинаковые вертикальные профили CO₂ и CH₄, но с учетом масштабирования для содержаний CO₂ и CH₄ в 1750 и 2020 гг. и прогнозов для 2100 г. (табл. 1). Значения содержания газов в 2100 г. были выбраны в соответствии с обзором [18] и проведенным ранее оценкам [19, 20]. В свою очередь,

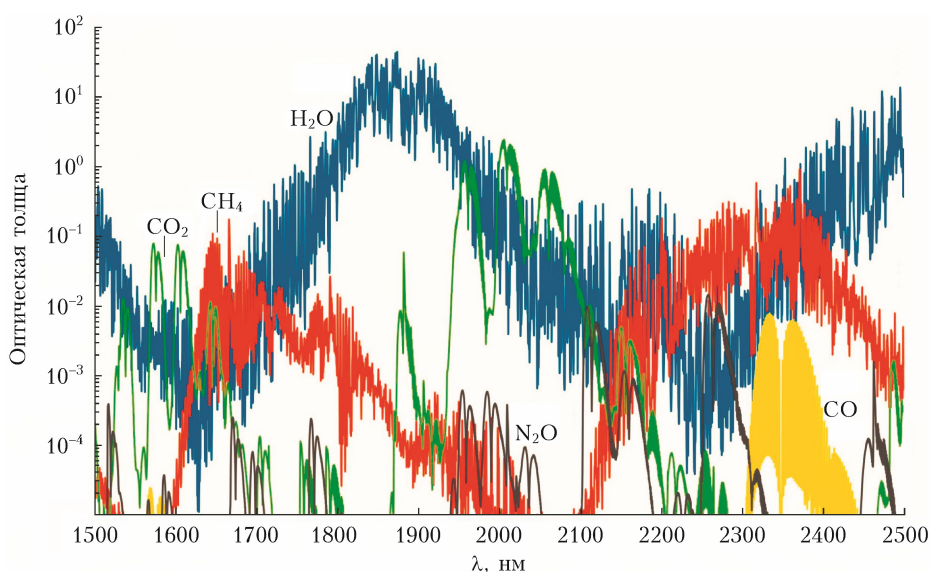


Рис. 1. Спектральная оптическая толщина атмосферы в области 1,5–2,5 мкм (1500–2500 нм) для H₂O, CO₂, CH₄, N₂O и CO [14] (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.38-2025/iss.7>)

вертикальные профили содержания O_3 , H_2O и N_2O , а также температуры воздуха и давления менялись в зависимости от выбора атмосферной модели, но без учета масштабирования в 1750, 2020 и 2100 гг.

Таблица 1
Содержание CO_2 и CH_4 в атмосферном столбе, ppm, используемое при расчете SCIATRAN

Год	Газ	
	CO_2	CH_4
1750	280	0,8
2020	407	1,8
2100	800	2,5

Молекулярное поглощение рассчитывалось в SCIATRAN методом *line-by-line*. Для учета радиационного влияния аэрозолей в модели использовались морские условия с фоновым содержанием аэрозоля (подробно см. [15], раздел 3.14.2). Расчеты выполнялись для безоблачной атмосферы. Сравнение результатов расчетов с наземными измерениями нисходящих потоков солнечного излучения в полярных районах [10] показало их согласие в пределах 4–8%.

Для моделирования и изучения сезонных и широтных вариаций потоков солнечного излучения и молекулярного атмосферного поглощения вычисления проводились для нескольких значений зенитного угла Солнца (ЗУС): минимальные (полдень) и максимальные (вечер) ЗУС за летний и зимний сезоны для тропиков, средних и субарктических широт (табл. 2). Отметим одинаковые максимальные ЗУС для зимнего периода в средних и субарктических широтах. Это связано с техническими трудностями, из-за которых для ЗУС > 72° (Солнце относительно низко над горизонтом) расчет с помощью модели SCIATRAN заканчивался ошибкой. В действительности в субарктических широтах ЗУС может быть и меньше 72°.

По модели SCIATRAN были получены значения потоков прямого и рассеянного солнечного излучения (1–4 мкм) на верхней границе атмосферы и поверхности земли. Поглощенный поток солнеч-

Таблица 2
Зенитные углы Солнца для моделей атмосферы, используемые в расчете SCIATRAN

Модель состояния атмосферы (координаты места определения ЗУС)	Max ЗУС, град	Min ЗУС, град
Тропики (18,5° с.ш.; 30,5° в.д.)	23	2
Средние широты – лето (40,5° с.ш.; 30,5° в.д.)	37	23
Средние широты – зима (40,5° с.ш.; 30,5° в.д.)	72	56
Субарктика – лето (60,5° с.ш.; 30,5° в.д.)	52	38
Субарктика – зима (60,5° с.ш.; 30,5° в.д.)	72	69

ного излучения за счет молекулярного атмосферного поглощения парниковыми газами рассчитывался с помощью соотношения

$$F_{abs} = F_0 - F_{out} - (F_{S1} - F_{S2}), \tag{1}$$

где F_0 – поток приходящего на верхнюю границу атмосферы солнечного излучения; F_{out} – поток солнечного излучения на верхней границе атмосферы (уходящего), отраженного системой «атмосфера – поверхность»; F_{S1} – поток солнечного излучения, падающего на поверхность Земли; F_{S2} – поток отраженного поверхностью Земли солнечного излучения. Отметим, что $(F_0 - F_{out})$ – это излучение, остающееся на планете в системе «Земля – атмосфера». Используя далее F_{abs} , мы рассчитали изменение молекулярного поглощения солнечного излучения парниковыми газами CO_2 и CH_4 при изменении их атмосферного содержания с середины XVIII по конец XXI в. (см. табл. 1).

Пример рассчитанных спектров потоков солнечного излучения приведен на рис. 2. Результаты представлены для минимального ЗУС в тропических широтах при современных значениях содержания CO_2 и CH_4 . На графике отчетливо наблюдаются полосы поглощения CO_2 (1,25–1,5 и 1,75–2,0 мкм) и CH_4 (1,75–2,0 и 2,5–3 мкм).

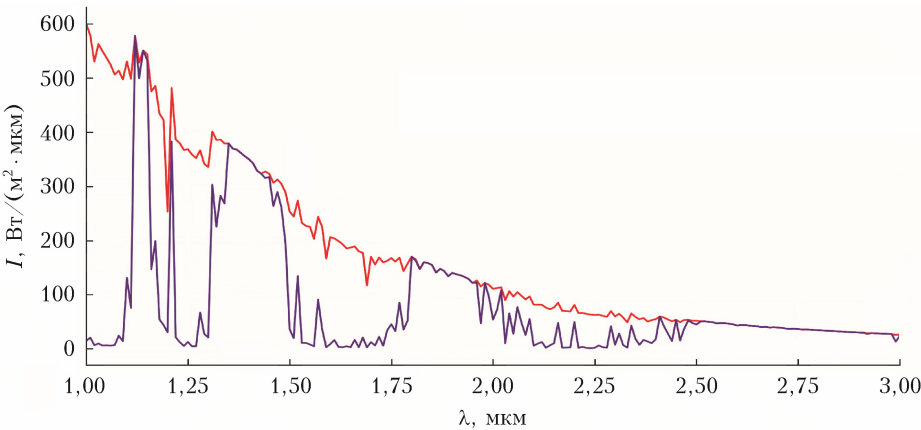


Рис. 2. Спектры солнечного излучения, оставшегося на планете (красная кривая) и поглощенного атмосферой (синяя кривая), в районе тропиков при современных значениях содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены значения интегральных потоков солнечного излучения (F), приходящего на верхнюю границу атмосферы (высоту 100 км), для пяти моделей для выбранных ЗУС при современном содержании парниковых газов. Рассчитанные потоки падающего солнечного излучения меняются от 402 (тропики) до 124 Вт/м² (средние широты и субарктика, зима).

Далее, согласно выражению (1), была выделена составляющая, соответствующая поглощению солнечного излучения парниковыми газами. На рис. 4 представлены интегральные потоки (в спектральной области 1–4 мкм) поглощенного солнечного излучения для разных моделей и ЗУС при современном содержании парниковых газов.

Максимальное поглощение солнечного излучения парниковыми газами в тропиках достигает 168–153 Вт/м² и наблюдается в дневное время практически в течение всего года; минимальное поглощение — в субарктике и в средних широтах зимой (48 и 54 Вт/м² соответственно). Максимальное значение поглощенного атмосферой излучения достигается при минимальном ЗУС (в тропиках 2°), а минимальное — при максимальных ЗУС (в субарктике и средних широтах зимой — 72°).

Расчеты молекулярного поглощения атмосферой при различных значениях содержания CO₂ и CH₄ для моделей 2100 г. (увеличенное содержание — УвС) и прединдустриального периода (1750 г.) (уменьшенное содержание — УмС) при минимальных ЗУС показали его незначительные изменения в абсолютном масштабе: 167–172 Вт/м²

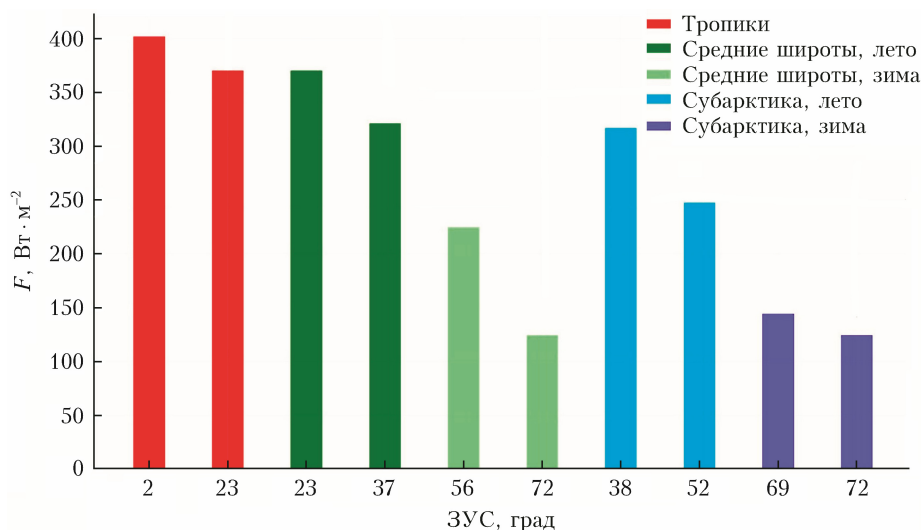


Рис. 3. Интегральные потоки (1–4 мкм) солнечного излучения на верхней границе атмосферы при различных значениях ЗУС, рассчитанные в модели SCIATRAN; здесь и далее на рисунках значения ЗУС на горизонтальной оси идут не по порядку для удобства интерпретации

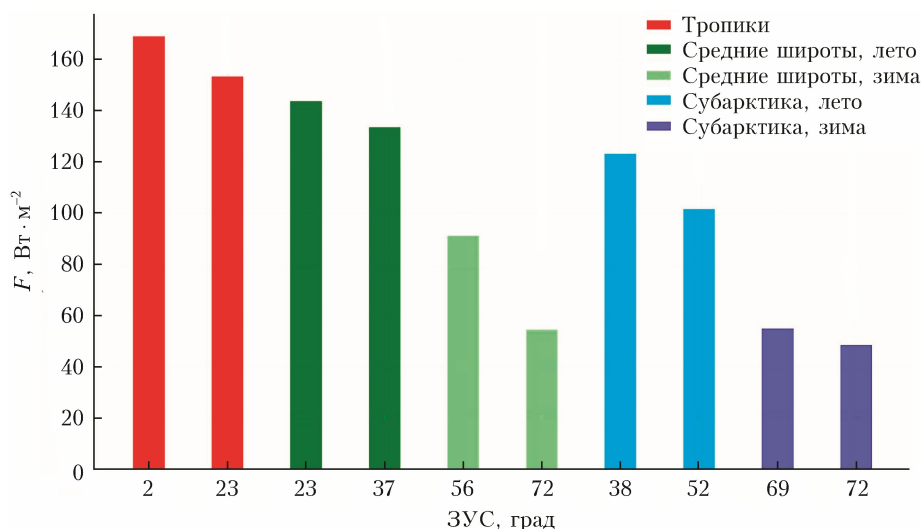


Рис. 4. Интегральные потоки (1–4 мкм) поглощенного атмосферой солнечного излучения при различных ЗУС, рассчитанные в модели SCIATRAN

в тропиках, 89–93 Вт/м² зимой и 141–146 Вт/м² летом в средних широтах, 53–56 Вт/м² зимой и 121–126 Вт/м² летом в субарктике. Из полученных результатов видно, что поглощенное атмосферой излучение изменяется примерно на 25–70% (относительно полученного максимума 172 Вт/м²) при движении из субарктической области к тропикам и в зависимости от сезона (т.е. от ЗУС), чего и следовало ожидать.

Для оценки изменения радиационного баланса на единицу площади поверхности планеты разделим полученные значения изменений компонентов радиационного баланса на четыре. Это следует сделать потому, что представленные в настоящей работе расчеты соответствуют мгновенным значениям излучения при конкретном ЗУС, тогда как в современных исследованиях представлены оценки имбаланса в виде среднего по всей поверхности Земли. Значение «четыре» получено из выражения (2) [21] как отношение солнечного излучения, приходящего на освещенную солнцем поверхность Земли ($S\pi R_E^2$) и на всю ее поверхность ($4\pi R_E^2$):

$$\underline{S} = S\pi R_E^2 / 4\pi R_E^2,$$

где S — солнечное излучение, приходящее на единицу площади земной поверхности; R_E — средний радиус Земли; $\underline{S}$ — солнечное излучение, осредненное по всей земной поверхности.

На рис. 5 показаны изменения молекулярного атмосферного поглощения (dF) при различных значениях содержания CO₂ и CH₄. Напомним, что содержание других парниковых газов, например водяного пара, не менялось при расчете поглощения в прошлом или будущем. Однако профили этих газов варьируются в зависимости от модели (т.е. региона и сезона).

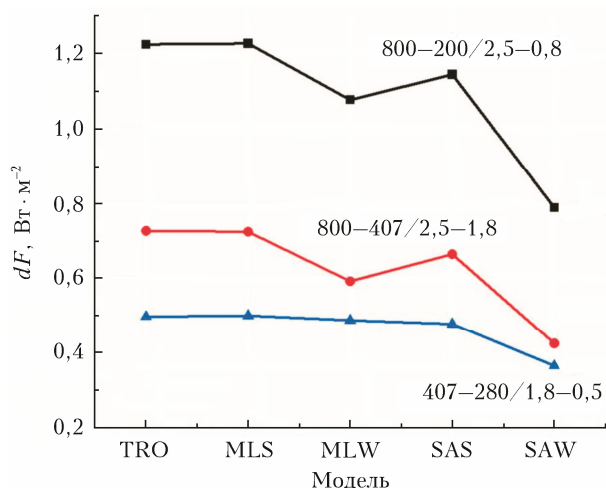


Рис. 5. Вариации молекулярного поглощения солнечного излучения с изменением содержания CO₂ и CH₄ в атмосфере при минимальном ЗУС для различных моделей (TRO — тропики; MLS — средние широты, лето; MLW — средние широты, зима; SAS — субарктика, лето; SAW — субарктика, зима); рядом с кривыми нанесены значения содержания CO₂/CH₄ в прошлом (синяя кривая), настоящем (красная) и будущем (черная)

Результаты расчетов вариаций атмосферного молекулярного поглощения солнечного излучения показывают, что изменение содержания парниковых газов за первый исследованный период (примерно с 1750 по 2020 г.) привело к увеличению молекулярного поглощения солнечной энергии от 0,37 (субарктика, зима) до 0,5 Вт/м² (тропики и средние широты, лето). Прогнозы роста содержания парниковых газов за 2020–2100 гг. указывают на увеличение молекулярного поглощения солнечного излучения от 0,4 (субарктика, зима) до 0,7 Вт/м² (тропики и средние широты, лето). С 1750 по 2100 г. изменения молекулярного поглощения солнечного излучения CO₂ и CH₄ может составить от 0,8 (субарктика, зима) до 1,2 Вт/м² (тропики и средние широта, лето).

Можно было бы ожидать более сильных сезонных и широтных вариаций поглощаемой солнечной энергии, принимая во внимание широтные и сезонные вариации температуры. Но они относительно малы, что связано с влиянием значительных пространственных изменений содержания водяного пара в моделях атмосферы. Водяной пар — основной естественный парниковый газ планеты Земля, его существенное влияние можно наблюдать на рис. 1, из которого следует, что в исследуемой спектральной области (1–4 мкм) водяной пар выраженно увеличивает оптическую толщину атмосферы. Поэтому полученные оценки молекулярного поглощения CO₂ и CH₄ для разных моделей атмосферы происходят на фоне изменяющегося в пространстве и времени парникового эффекта водяного пара. Например, в тропиках содержание водяного пара существенно выше, чем в полярных областях, что снижает влияние роста содержания CO₂ и CH₄ на изменение молекулярного поглощения.

Для сравнения с изменениями других компонент РБ Земли за счет роста содержания CO₂ и CH₄ воспользуемся результатами исследований [19, 20], где приведены оценки влияния изменений содержания CO₂ и CH₄ на уходящее длинноволновое излучение Земли в прошлом, настоящем и будущем (при тех же значениях содержания парниковых газов, что и в текущем исследовании). Согласно расчетам [19, 20] изменение молекулярного поглощения уходящего собственного излучения Земли за период 1750–2020 гг. находится в диапазоне 1,2–1,6 (CO₂) и 0,3–0,5 Вт/м² (CH₄), а за 1750–2100 гг. — 2,5–4,5 (CO₂) и 0,5–0,7 Вт/м² (CH₄). Как видно, среднее глобальное увеличение молекулярного поглощения солнечного излучения за 1750–2100 гг. меньше, чем изменение молекулярного поглощения уходящего теплового излучения Земли.

Заключение

Согласно результатам моделирования, максимальное молекулярное поглощение приходящего солнечного излучения основными парниковыми газами в области 1–4 мкм приходится на тропики и достигает 153–168 Вт/м² в течение всего года.

Минимальное поглощение потоков солнечного излучения наблюдается в субарктической области и средних широтах зимой (48 и 54 Вт/м² соответственно).

В 1750–2020 гг. за счет роста содержания CO₂ и CH₄ в атмосфере молекулярное поглощение приходящего солнечного излучения увеличилось на 0,36–0,5 Вт/м² в зависимости от широты и сезона. В 2020–2100 гг. прогнозируется увеличение молекулярного поглощения до 0,4–0,7 Вт/м². Наконец, за весь рассмотренный период (1750–2100 гг.) увеличение молекулярного поглощения может составить 0,8–1,2 Вт/м². Прогнозируемое увеличение поглощения солнечного излучения за счет увеличения атмосферного содержания CO₂ и CH₄ в XXI в. имеет близкие значения к современным оценкам изменения радиационного баланса Земли, которые составляют 0,5–1,0 Вт/м².

Среднее глобальное увеличение молекулярного поглощения солнечного излучения за 1750–2100 гг. ниже, чем изменение молекулярного поглощения уходящего теплового ИК-излучения Земли за тот же период (~1 против ~4 Вт/м²). Оба эффекта приводят к изменению радиационного баланса Земли, что в будущем может сказаться на изменении средней температуры планеты.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А.В. Розанову за консультации по использованию модели SCIATRAN.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке СПбГУ (шифр проекта 124032000025-1).

Список литературы

1. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / H. Lee, J. Romero (eds.). IPCC, Geneva, 2023. P. 35–115. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
2. *Summary for policymakers* // *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / H. Lee, J. Romero (eds.). IPCC, Geneva, 2023. P. 1–34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
3. *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме* / под ред. А.А. Киселева, Е.Л. Махоткина, Т.В. Павлова: СПб.: Научное издательство, 2022. 124 с.
4. *Атлас теплового баланса Земного шара* / под ред. М.И. Будыко. М.: Межведомственный геофизический комитет, 1963. 5 с.
5. Hansen J., Nazarenko L., Ruedy R., Sato M., Willett J., Del Genio A., Koch D., Lacis A., Lo K., Menon S., Novakov T., Perlwitz J., Russell G., Schmidt G.A., Tausnev N. Earth's energy imbalance: Confirmation and implications // *Science*. 2005. V. 308. P. 1431–1435. DOI: 10.1126/science.1110252.
6. Smith G.L., Priestley K.J., Loeb N., Wielicki B., Charlack T.P., Minnis P., Doelling D.R., Rutan D.A. Clouds and Earth Radiant Energy System (CERES), a review: Past, present, and future // *Adv. Space Res.* 2011. V. 48, iss. 2. P. 254–263.
7. Cheng L., Trenberth K.E., Fasullo J., Boyer T., Abraham J., Zhu J. Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015 // *Sci. Adv.* 2017. V. 3. DOI: 10.1126/sciadv.1601545.
8. von Schuckmann K., Minière A., Gues F., Cuesta-Vale F.J., Kirchengast G., Adusumilli S., Straneo F., Ablain M., Allan R.P., Barker P.M., Beltrami H., Blazquez A., Boyer T., Cheng L., Church J., Desbruyeres D., Dolman H., Domingue C.M., Garcia-Garcia A., Giglio D., Gilson J.E., Gorfer M., Haimberger L., Hakuba M.Z., Hendricks S., Hosoda S., Johnson G.C., Killick R., King B., Kolodziejczyk N., Korosov A., Krinner G., Kuusela M., Landerer F.W., Langer M., Laverne T., Lawrence I., Li Y., Lyman J., Marti F., Marzeion B., Mayer M., MacDougall A.H., McDougall T., Monselesan D.P., Nitzbon J., Ohtsuka I., Peng J., Purkey S., Roemmich D., Sato K., Sato K., Savita A., Schweiger A., Shepherd A., Seneviratne S.I., Simons L., Slater D.A., Slater T., Steiner A.K., Suga T., Szekely T., Thiery W., Timmermans M.-L., Vanderkelen I., Wjiffels S.E., Wu T., Zemp M. Heat stored in the Earth system 1960–2020: Where does the energy go? // *Earth Syst. Sci. Data*. 2023. V. 15. P. 1675–1709. DOI: 10.5194/essd-15-1675-2023.
9. Loeb N.G., Johnson G.C., Thorsen T.J., Lyman J.M., Rose F.G., Kato S. Satellite and ocean data reveal marked increase in Earth's heating rate // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. DOI: 10.1029/2021GL093047.
10. Hakuba M.Z., Frederikse T., Landerer F.W. Earth's energy imbalance from the ocean perspective (2005–2019) // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. DOI: 10.1029/2021GL093624.
11. Raghuraman S.P., Paynter D., Ramaswamy V. Anthropogenic forcing and response yield observed positive trend in Earth's energy imbalance // *Nat. Commun.* 2021. V. 12. DOI: 10.1038/s41467-021-24544-4.
12. Loeb N.G., Ham S.-H., Allan R.P., Thorsen T.J., Meyssignac B., Kato S., Johnson G.C., Lyman J.M. Observational assessment of changes in Earth's energy imbalance since 2000 // *Surv. Geophys.* 2024. V. 45, N 6. P. 1757–1783. DOI: 10.1007/s10712-024-09838-8.
13. Forster P., Storelvmo T., Armour K., Collins W., Dufréne J.-L., Frame D., Lunt D.J., Mauritsen T., Palmer M.D., Watanabe M., Wild M., Zhang H. The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. P. 923–1054. DOI: 10.1017/9781009157896.009.
14. Jacob D.J., Turner A.J., Maasakkers J.D., Sheng J., Sun K., Liu X., Chance K., Aben I., McKeever J., Frankenberg C. Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions // *Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 14371–14396. DOI: 10.5194/acp-16-14371-2016.
15. Rozanov V.V., Rozanov A.V., Kokhanovsky A.A., Burrows J.P. Radiative transfer through terrestrial atmosphere and ocean: Software package SCIATRAN // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2014. V. 133. P. 13–71. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.07.004.
16. Fontenla J., White O.R., Fox P.A., Avertt E.H., Kurucz R.L. Calculation of solar irradiances. I. Synthesis of the solar spectrum // *Astrophys. J.* 1999. V. 518. P. 480–500. DOI: 10.1086/307258.
17. 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. V. 954. P. 43.
18. *Strassmann K.M., Plattner G.K., Joos F.* CO₂ and non-CO₂ radiative forcings in climate projections for twenty-first century mitigation scenarios // *Clim Dyn.* 2009. V. 33. P. 737–749. DOI: 10.1007/s00382-008-0505-4.
 19. *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. DOI: 10.15372/AOO20191009; *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.
 20. *Акишина С.В., Михайлова А.С., Тимофеев Ю.М., Филиппов Н.Н.* Оценки вариаций радиационного воздействия метана в прошлом и будущем // *Оптика атмосф. и океана*. 2023. Т. 36, № 10. С. 818–821. DOI: 10.15372/AOO20231005; *Akishina S.V., Mikhailova A.S., Timofeyev Yu.M., Filippov N.N.* Estimates of variations in radiative forcing of methane in the past and in the future // *Atmos. Ocean. Opt.* 2023. V. 36, N S1. P. S74–S77.
 21. *Wallace J.M., Hobbs P.V.* Atmospheric Science: An Introductory Survey. New York: Academic Press, 1977. 467 p.

P.M. Nerobelov, G.M. Nerobelov, Yu.M. Timofeyev. Estimates of solar radiation molecular absorption in the atmosphere in the past, present, and future.

Human activity is currently causing global warming of the planet, primarily due to the emission of greenhouse gases into the Earth's atmosphere (CO₂, CH₄, etc.). Despite international agreements and commitments made by various countries, the concentration of key greenhouse gases — CO₂ and CH₄ — in the atmosphere continues to rise. The increase in greenhouse gas levels leads to changes in the Earth's radiation balance, which is the cause of modern climate changes affecting many extreme weather and climate events across the globe. One of the most important components of the atmospheric radiation balance is the molecular absorption of solar radiation by greenhouse gases. In this study, using the SCIATRAN model and calculations of solar radiation fluxes in the spectral range of 1–4 μm, the molecular absorption of solar radiation by key anthropogenic greenhouse gases, CO₂ and CH₄, is analyzed for their past, present, and future concentrations. The calculations were performed for three latitude zones (tropics, mid-latitudes, and subarctic) and two seasons (winter and summer). According to the calculations, the maximal molecular absorption of incoming solar radiation in the 1–4 μm range by the greenhouse gases occurs in the tropics and reaches 153–168 W/m² throughout the year. Over the period from 1750 to 2100, the molecular absorption of solar radiation by CO₂ and CH₄ is expected to increase to 0.8–1.2 W/m². The projected increase in molecular absorption of solar radiation by the end of the 21st century is close to current estimates of changes in Earth's radiation balance, which range from 0.5 to 1.0 W/m². At the same time, the global average increase in the molecular absorption of outgoing Earth's thermal radiation is approximately 3–4 times greater than the increase in solar radiation absorption. Both of these changes, driven by rising greenhouse gas concentrations, intensify the Earth energy imbalance and contribute to changes in the planet average temperature.