

Альтернативная оценка вклада метана в парниковый эффект

© 2023. Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с.,Н. В. Сырчина¹, к. х. н., доцент, с. н. с.,¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Институт биологии Коми научного центра

Уральского отделения Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: grigory_kantor@mail.ru, nvms1956@mail.ru

Метан относится к числу парниковых газов (ПГ), увеличение концентрации которого в атмосфере вызывает особую тревогу экологов и климатологов. Основными источниками выбросов CH_4 являются добыча и переработка углеводородного сырья, разведение крупного рогатого скота, овцеводство, выращивание риса. Для снижения выбросов CH_4 различные страны берут на себя обязательства, направленные на сокращение объёмов производства в соответствующих отраслях экономики. Однако наши оценки показывают, что принятый Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) вклад метана в глобальное потепление сильно преувеличен. В качестве основного инструмента теоретического анализа использована простейшая модель парникового эффекта, представленная в работах С.М. Семёнова. Спектры поглощения ПГ (значения сечения поглощения молекул H_2O , CO_2 , CH_4 и N_2O в диапазоне волновых чисел $0-3000 \text{ см}^{-1}$) взяты из базы данных HITRAN. Результаты расчётов показывают, что парниковый эффект и формирование средней глобальной температуры поверхности Земли обусловлен почти исключительно двумя веществами – водой и углекислым газом, при этом суммарный вклад CH_4 и N_2O не превышает 1,4%. Полученные результаты дают основания для критической оценки распространённого мнения о высокой опасности актуальных выбросов метана с точки зрения глобального потепления и наблюдающихся климатических изменений. Антропогенные выбросы метана по имеющимся оценкам составляют 9390 млн т в год в CO_2 -эквиваленте, или 375,6 млн т CH_4 в год (с учётом принятого МГЭИК значения потенциала глобального потепления метана). Из них 30% (112,7 млн т) приходится на разведение крупного рогатого скота. При полном прекращении производства молока и говядины снижение средней глобальной температуры за счёт уменьшения выбросов CH_4 составит менее $0,04^\circ\text{C}$, что не превышает 2,5% от целевого ограничения роста глобального потепления на уровне не более $1,5^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: парниковый эффект, климат, метан.

Alternative assessment of methane's contribution to the greenhouse effect

© 2023. G. Ya. Kantor^{1,2}ORCID: 0000-0002-6462-6702³N. V. Syrchina¹ORCID: 0000-0001-8049-6760³¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²The Institute of Biology of Komi Scientific Centre

of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: grigory_kantor@mail.ru, nvms1956@mail.ru

Methane is one of the greenhouse gases (GHG), the increase in the concentration of which in the atmosphere is of particular concern to environmentalists and climatologists. The main sources of CH_4 emissions are the extraction and processing of hydrocarbon raw materials, cattle and sheep breeding, and rice cultivation. To reduce CH_4 emissions, various countries are making commitments aimed at reducing production volumes in their respective sectors of the economy. However, our estimates show that the contribution of methane to global warming accepted by the IPCC is greatly exaggerated. The simplest model of the greenhouse effect, presented in the works of S.M. Semenov, was used as the main tool for theoretical analysis. The values of the GHG absorption spectra are taken from the HITRAN database. The results obtained showed that the greenhouse effect and the formation of the average global temperature of the Earth's surface are caused almost exclusively by two substances – water and carbon dioxide, while the total contribution of CH_4 and N_2O does not exceed 1.4%. The results of the calculations provide grounds for a critical assessment of the widespread opinion about the high risk of current CH_4 emissions from the point of view of global warming and the observed climate changes.

Anthropogenic emissions of CH₄ are estimated to be 9390 million tons per year in CO₂ equivalent, or, taking into account the global warming potential of CH₄ accepted by IPCC – 375.6 million tons per year. Of these, 30% (112.7 million tons) fall on the cattle breeding. With the complete cessation of milk and beef production, the decrease in the average global temperature due to the reduction of CH₄ emissions will be less than 0.04 °C, which does not exceed 2.5% of the target limiting the growth of global warming at a level of no more than 1.5 °C.

Keywords: greenhouse effect, climate change, methane.

Общеизвестно, что в формировании климата Земли важную роль играет так называемый «парниковый эффект» – повышение средней температуры земной поверхности и приземных слоёв атмосферы по сравнению с той, которая была бы в отсутствие поглощения инфракрасного излучения атмосферой [1, 2]. Определённый вклад в парниковый эффект вносят все газы, имеющие интенсивные линии поглощения электромагнитного излучения с длиной волны более 3,3 мкм (волновое число менее 3000 см⁻¹). Они получили название парниковых газов (ПГ). Чем выше концентрация парникового газа в атмосфере, тем больше его вклад в парниковый эффект. Многие ПГ присутствуют в атмосфере Земли в ничтожно малой концентрации и не оказывают практически никакого влияния на температуру земной поверхности и, следовательно, климат. Наибольший вклад в парниковый эффект вносят четыре газа – водяной пар H₂O, углекислый газ CO₂, метан CH₄ и оксид азота(I) N₂O [3, 4]. Согласно результатам многолетних наблюдений, концентрация CO₂ в атмосфере в течение последних 50 лет быстро возрастает, что сопровождается ростом средней глобальной температуры [5]. Эта тенденция дала основание предполагать, что основной причиной глобального потепления является накопление CO₂, выбрасываемого в атмосферу при сжигании ископаемого топлива (уголь, нефть, природный и попутный газы, горючие сланцы) объектами энергетики, транспорта и промышленности [6]. На протяжении миллионов лет углерод, входящий в состав ископаемого топлива, был законсервирован (депонирован) в недрах Земли. Человечество для получения тепла использовало главным образом возобновляемые источники энергии (древесину, солому, тростник и т. п.). Углекислый газ, поступающий в атмосферу при сжигании таких материалов, быстро поглощается наземными растениями и фитопланктоном в процессе фотосинтеза, в результате баланс этого газа в атмосфере сохраняется. К нарушению баланса привело активное освоение депонированного углерода. Дополнительные объёмы CO₂, образующиеся при сжигании добываемого из недр Земли топлива, фотосинтезирующие

организмы в современных климатических условиях удалять из атмосферы не успевают, в результате концентрация CO₂ в атмосфере увеличивается, что ведет к усилению парникового эффекта.

В результате активной антропогенной деятельности атмосфера нашей планеты обогащается не только CO₂, но и другими ПГ. В качестве критерия, позволяющего сравнивать вклад различных ПГ в долгосрочное повышение средней температуры климатической системы Земли, было введено понятие «потенциал глобального потепления» – ПГП (Global Warming Potential, GWP), представляющее собой определённый числовой индекс [7–9]. Концепция применения числового индекса для сравнительной оценки вклада различных ПГ в глобальное потепление аналогична концепции потенциала разрушения озонового слоя [10–14]. Фактически ПГП стал своеобразным стандартом для оценки относительной эффективности сокращения выбросов различных ПГ, который удобно использовать в качестве количественной основы «обмена» одного типа сокращения выбросов на другой [15, 16].

В самом общем виде способ расчёта ПГП был предложен в статье [14], хотя термин GWP в ней ещё не применялся. Коэффициент эквивалентности парникового газа вводился как отношение накопленного за определённое время парникового эффекта *i*-го ПГ к накопленному парниковому эффекту диоксида углерода. Накопленный парниковый эффект *i*-го парникового газа AG_i определялся формулой:

$$AG_i = k_i \int_0^T M_i(t) dt,$$

где T – период времени, на который рассчитывается накопленный парниковый эффект; $M_i(t)$ – остаточная масса ПГ по истечении времени t после выброса 1 кг ПГ в атмосферу; k_i – парниковый эффект в расчёте на 1 кг парникового газа. Единицу измерения парникового эффекта при этом не конкретизировали. Окончательный вид (с точностью до обозначений) формула для расчёта ПГП приобрела в Первом оценочном докладе Меж-

правительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) [7]:

$$GWP_{\text{ПГ}} = \frac{\Delta F_{\text{ПГ}} \cdot \int_0^T C_{\text{ПГ}}(t) dt}{\Delta F_{\text{CO}_2} \cdot \int_0^T C_{\text{CO}_2}(t) dt},$$

где $GWP_{\text{ПГ}}$ – потенциал глобального потепления парникового газа; $\Delta F_{\text{ПГ}}$ и ΔF_{CO_2} – величины мгновенного радиационного форсинга для парникового газа и диоксида углерода соответственно в результате выброса в атмосферу одинакового количества (массы или объёма) того и другого газа; $C_{\text{ПГ}}(t)$ и $C_{\text{CO}_2}(t)$ – концентрация парникового газа и диоксида углерода соответственно, убывающая со временем вследствие химической или фотохимической деструкции; T – временной горизонт (20, 100 или 500 лет), t – время.

В этой формуле в качестве конкретной метрики парникового эффекта используется величина так называемого радиационного форсинга – ключевого параметра, упоминание о котором присутствует буквально во всех работах, посвящённых изменению климата. В понятие радиационного форсинга разные авторы нередко вкладывают разный смысл, поэтому следует придерживаться наиболее точного и полного определения, приведённого в глоссарии 6-го оценочного доклада МГЭИК [22]: «Радиационный форсинг – это изменение суммарного (нисходящий минус восходящий) потока радиации (выраженного в Вт/м²) вследствие изменения внешнего фактора изменения климата, такого как изменение концентрации двуокиси углерода (CO₂), концентрации вулканических аэрозолей или мощности излучения Солнца».

Вычисление ПГП на основе радиационного форсинга встретило многочисленную критику, в том числе и от самих авторов этой концепции. В докладе [7] прямо сказано, что предлагаемая концепция является сугубо предварительной и требует серьёзного совершенствования, но в соответствии с истиной, что нет ничего более постоянного, чем временное, понятие ПГП до сих пор активно используется для сравнения климатических эффектов от выброса различных парниковых газов, а также эффективности мероприятий по смягчению его последствий.

Важным фактором, влияющим на ПГП парникового газа, является время жизни ПГ в атмосфере. Все парниковые газы (за исключением водяного пара и диоксида углерода) подвергаются химической и фотохимической

деструкции, в результате чего их парниковая активность со временем снижается. Углекислый газ вовлекается в целый ряд биохимических циклов и в конечном итоге также выводится из атмосферы. В наиболее простом случае экспоненциального спада концентрации ПГ после разового выброса за время жизни принимается промежуток времени, за который концентрация снижается в 2,72 раза. Этот промежуток в 1,44 раза больше периода полудеструкции. За тройное время жизни ПГ его концентрация спадает в 20 раз, за пятикратное – в 150 раз. Устойчивые в атмосферных условиях (долгоживущие) ПГ обеспечивают глобальное потепление на более длительный промежуток времени по сравнению с неустойчивыми [17]. Кроме радиационного форсинга и времени жизни, при расчётах ПГП могут учитываться и некоторые дополнительные факторы, оказывающие влияние на парниковый эффект (изменение солнечной постоянной, влияние атмосферных аэрозолей и т. д.) [18, 19].

Единицей измерения ПГП является эквивалент CO₂ – количество выбросов CO₂, которое будет оказывать такое же воздействие на указанный ключевой показатель изменения климата в течение определенного периода времени, как и количество выбросов другого ПГ или смеси других ПГ. В «классическом» определении ПГП таким ключевым показателем является радиационный форсинг. Принятые МГЭИК показатели ПГП используются для обеспечения стандартизированного подхода к оценке вклада различных ПГ в изменение климата, однако возможность оценивания парниковых эффектов различных газов в CO₂-эквиваленте не означает, что эти выбросы имеют эквивалентный эффект по всем ключевым показателям изменения климата [20].

Существуют различные временные горизонты для расчёта ПГП парниковых газов. МГЭИК приводит значения ПГП для 20, 100 и 500 лет. Выбор временного горизонта зависит от цели использования этого показателя. Если цель состоит в том, чтобы определить максимальное изменение температуры, то принимается временной горизонт в 100 лет (или больше). Если показателем изменения климата является скорость изменения температуры, следует рассматривать более короткий временной горизонт [21]. На Конференции Сторон Парижского соглашения в Катовице было принято решение о том, что при представлении сводных данных о выбросах и удалении ПГ каждая Страна использует значения ПГП, выраженные в CO₂-эквиваленте за 100 лет,

приведённые в Пятом оценочном докладе МГЭИК [22] или значения ПГП за 100 лет из последующего доклада [23].

Значения ПГП каждого ПГ регулярно рассматриваются на Конференции Сторон Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН и, когда это необходимо, корректируются, при этом в полной мере принимаются во внимание любые соответствующие решения Конференции Сторон [24].

Одна из наиболее серьёзных претензий к концепции ПГП заключается в том, что, вопреки названию, этот параметр не касается температурного эффекта от поступления парникового газа в атмосферу. Для расчёта ПГП используется величина радиационного форсинга, т. е. нарушения баланса вертикальных потоков электромагнитного излучения на верхней границе тропосферы. Форсинг сам по себе не вызывает мгновенного повышения температуры поверхности Земли и приповерхностных слоёв атмосферного воздуха, но вследствие изменения энергетического баланса после выброса ПГ эта температура начинает расти, и рост продолжается до тех пор, пока баланс не будет восстановлен при более высокой температуре поверхности Земли и приповерхностного воздуха.

Для оценки эквивалентности парниковых газов по величине температурного эффекта разными авторами был предложен целый ряд индексов, из которых признание МГЭИК получил Потенциал глобального изменения температуры (Global Temperature Change Potential, GTP), предложенный в работе [8] в нескольких вариантах. Подобно ПГП, GTP рассчитывается на разные временные горизонты (20, 50 или 100 лет).

В последнее время при обсуждении проблемы глобальных климатических изменений фокус внимания переместился с углекислого газа на метан. Концентрация CH_4 в атмосфере значительно ниже, чем концентрация CO_2 , актуальный вклад в поглощение инфракрасного излучения у CH_4 намного меньше, чем у CO_2 и, тем не менее, именно рост концентрации CH_4 вызывает особую тревогу «климатических алармистов». Обоснование справедливости соответствующих опасений базируется на том, что рассчитанная и согласованная МГЭИК величина ПГП CH_4 значительно выше, чем ПГП CO_2 . В соответствии с Докладом МГЭИК 2007, ПГП CH_4 за 100 лет принят равным 25. Часто эта цифра интерпретируется таким образом, что «метан в 25 раз опаснее углекислого газа», поэтому необходимо приложить особые усилия для ограничения выбросов

этого газа в атмосферу. Поскольку основными источниками выбросов CH_4 являются добыча и переработка углеводородного сырья, животноводство (разведение крупного рогатого скота, овцеводство), свалки и выращивание риса [25, 26], считается необходимым создать все условия для ограничения развития соответствующих отраслей экономики.

В качестве подтверждения особой экологической опасности CH_4 в публикациях часто приводятся весьма вольные интерпретации понятия ПГП вроде того, что «метан более эффективно удерживает тепло в атмосфере по сравнению с углекислым газом», «парниковая активность метана обусловлена особо высокой интенсивностью линий поглощения излучения в инфракрасной области» и тому подобные, не имеющие никакого отношения к действительности. Вообще, трактовка ПГП как признака опасности ПГ говорит либо о полном непонимании сути дела, либо об умышленном введении аудитории в заблуждение для достижения неких политических или экономических целей.

Целью настоящей статьи является разъяснение сущности понятия «потенциал глобального потепления», обзор альтернативных сравнительных климатических индексов парниковых газов, а также анализ роли метана в формировании климата Земли.

Объекты и методы исследования

В качестве основного инструмента теоретического анализа мы использовали простейшую математическую модель парникового эффекта, представленную в работах С.М. Семёнова [27, 28]. Источником данных по спектрам поглощения ПГ является база данных HITRAN [29]. Необходимые вычисления выполнены в среде Microsoft Excel 2010.

В качестве исходных данных были приняты следующие значения:

- средняя глобальная температура поверхности суши и океана в 2022 г. +14,76 °C [30];
- солнечная постоянная (энергетическая освещённость на расстоянии 1 астрономической единицы от Солнца) 1368 Вт/м² [31];
- полная масса воды в атмосфере $1,29 \cdot 10^{13}$ т [32], в том числе $1,53 \cdot 10^{12}$ т в конденсированном состоянии [33];
- среднемесячная концентрация диоксида углерода в атмосферном воздухе в 2022 г. 417,06 ppm (ppm – миллионная доля по объёму) [34];
- среднемесячная концентрация метана в атмосферном воздухе в 2022 г. 1,912 ppm [34];

– среднемесячная концентрация оксида азота (I) в атмосферном воздухе в 2022 г. 0,3357 ppm [34];

– нормальная температура атмосферного воздуха 273,15 K (0 °C);

– нормальное давление атмосферного воздуха 101325 Па;

– средняя молярная масса сухого воздуха 28,97 г/моль;

– ускорение свободного падения на поверхности Земли 9,807 м/с².

Для упрощения расчётов атмосфера представляется слоем несжимаемой жидкости постоянного состава, оказывающим при 0 °C давление 101,325 кПа на поверхности Земли (эквивалентная атмосфера при нормальных условиях). Из уравнения Клапейрона-

Менделеева $pV = \frac{m}{\mu}RT$ и выражения для

гидростатического давления $p = \rho gH$ можно найти высоту эквивалентной атмосферы

$H = \frac{RT}{\mu g} = 7994$ м (p – давление воздуха на поверхности Земли, V – объём, m – масса, μ – молярная масса, R – газовая постоянная 8,314 Дж/(моль K), T – абсолютная температура, ρ – плотность, g – ускорение свободного падения).

Плотность воздуха эквивалентной атмосферы $\rho = \frac{p}{gH} = 1,294$ кг/м³, количество вещества на единицу объёма $\nu = \frac{\rho}{\mu} = 44,62$ моль/м³,

молярный объём $\frac{1}{\nu} = 0,0224$ м³/моль, концен-

трация молекул газов, входящих в состав воздуха, равна $n = N_A \cdot \nu = 2,687 \cdot 10^{25}$ м⁻³ (N_A – число Авогадро $6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹).

Объём эквивалентной атмосферы равен произведению площади поверхности Земного шара на высоту атмосферы $4\pi R^2 \cdot H = 4,076 \cdot 10^{18}$ м³ (здесь R – средний радиус Земного шара 6371 км).

Результаты и обсуждение

Сущность парникового эффекта, как известно, состоит в следующем. Максимум спектральной плотности солнечного излучения приходится на видимую часть спектра, для которой атмосфера почти прозрачна (будем считать её абсолютно прозрачной). Земная поверхность, поглощая энергию видимого света, переизлучает её в области теплового

инфракрасного излучения. Если бы атмосфера не содержала ПГ, то средняя температура поверхности Земли, как показано ниже, была бы около -18 °C (≈ 255 K).

Плотность потока энергии солнечного излучения, падающего на Землю (солнечная постоянная), равна 1368 Вт/м² [31]. Из этой мощности около 30% отражается облаками и поверхностью Земли (величина альбедо $\alpha \approx 0,3$). В первом приближении средняя плотность потока энергии солнечного света, поступающего в атмосферу, равна $S_0 = 1368 \cdot (1-\alpha)/4 = 239,4$ Вт/м². Коэффициент 1/4 учитывает тот факт, что площадь поверхности Земного шара в 4 раза превышает площадь диска, в виде которого Земля видна со стороны Солнца. В стационарных условиях установившегося динамического равновесия между падающим и уходящим в космос излучением точно такую же величину (239,4 Вт/м²) имеет плотность потока инфракрасного теплового излучения Земли, прошедшего через атмосферу и уходящего в космическое пространство (причём эта величина не зависит от наличия или отсутствия в атмосфере парниковых газов). Этой величине по закону Стефана-Больцмана соответствует температура $T_0 = \left(\frac{S_0}{\sigma}\right)^{1/4} = 254,90$ K =

$-18,25$ °C (σ – постоянная Стефана-Больцмана $5,6704 \cdot 10^{-8}$ Вт · м⁻² · K⁻⁴).

Если в атмосфере присутствуют ПГ, то к потоку энергии видимого света добавляется нисходящий поток теплового излучения атмосферы, нагретой излучением Земли, и динамическое равновесие падающей и уходящей радиации устанавливается при более высокой температуре земной поверхности. Средняя плотность энергии излучения, уходящего с верхней границы атмосферы в космос, независимо от концентрации ПГ остаётся постоянной (239,4 Вт/м²). Разность между повышенной температурой поверхности Земли и той, которая была бы при отсутствии парниковых газов ($-18,25$ °C), и является количественной характеристикой парникового эффекта. Эмпирическая величина парникового эффекта по данным 2022 г. составляет $+14,76 - (-18,25) = 33,01$ °C.

Распределение потоков теплового инфракрасного излучения по высоте эквивалентной атмосферы описывается системой двух дифференциальных уравнений (здесь и далее мы придерживаемся оригинальных обозначений из статей [27, 28]):

$$\frac{dJ^\downarrow(h)}{d(-h)} = -w(h)J^\downarrow(h) + 0,5w(h)[J^\downarrow(h) + J^\uparrow(h)], \quad (1)$$

$$\frac{dJ^\uparrow(h)}{dh} = -w(h)J^\uparrow(h) + 0,5w(h)[J^\downarrow(h) + J^\uparrow(h)], \quad (2)$$

где $J^\downarrow(h)$ и $J^\uparrow(h)$ – нисходящий и восходящий потоки теплового излучения соответственно на высоте h от земной поверхности, $w(h)$ – коэффициент поглощения излучения на высоте h . Здесь мы слегка изменили вид уравнений, заменив в качестве независимой переменной массу нижележащего слоя воздуха M на более наглядную величину – высоту h . На суть решения это не влияет. При этом должны выполняться граничные условия: $S_0 + J^\downarrow(h) = J^\uparrow(h)$ (энергетический баланс нисходящего и восходящего потоков) и $J^\downarrow(H) = 0$ (нисходящий поток теплового излучения на верхней границе атмосферы отсутствует). Здесь H – высота верхней границы эквивалентной атмосферы ($H = 7994$ м), S_0 – плотность потока падающего солнечного излучения ($S_0 = 239,4$ Вт/м²). Эта система уравнений имеет следующие решения [27, 28]:

$$J^\downarrow(h) = 0,5S_0 \int_h^H w(x)dx, \quad (3)$$

$$J^\uparrow(h) = S_0 \left[1 + 0,5 \int_h^H w(x)dx \right]. \quad (4)$$

Восходящий поток теплового инфракрасного излучения на поверхности Земли

$$J^\uparrow(0) = S_0 \left[1 + 0,5 \int_0^H w(x)dx \right]. \quad (5)$$

Интеграл в правой части (5) – это оптическая плотность атмосферы D в единицах натурального логарифма, связанная с коэффициентом пропускания P и коэффициентом поглощения A соотношениями:

$$P = e^{-D}; A = 1 - P = 1 - e^{-D}; D = -\ln P = -\ln(1 - A). \quad (6)$$

Окончательное выражение для температуры поверхности Земли и приповерхностного воздуха принимает вид:

$$T = \left[\frac{\beta}{\sigma} S_0 \left(1 + \frac{D}{2} \right) \right]^{1/4}, \quad (7)$$

где β – калибровочный коэффициент, значение которого подбирается из условия, чтобы при современных концентрациях парниковых газов выражение (7) давало фактически наблюдаемую величину $287,91 \text{ K} = +14,76 \text{ }^\circ\text{C}$. Необходимость корректировки выражения закона Стефана-Больцмана обусловлена тем, что упрощённая модель не учитывает наличие нерадиационных механизмов теплоотдачи (конвекция, испарение) и отличие коэффициента излучения поверхности Земли от единицы.

Для определения величины парникового эффекта парникового газа или смеси парниковых газов необходимо знать коэффициенты поглощения инфракрасного излучения атмосферой по всей ширине спектра $0-3000 \text{ см}^{-1}$. Для расчёта этих коэффициентов можно воспользоваться общедоступными базами данных спектров поглощения газов. В климатических исследованиях наиболее популярна база данных HITRAN [29] (Кембридж, Великобритания), предоставляющая онлайн-доступ к детальным спектрам поглощения 55 газов (на 2023 г.). Объём данных HITRAN очень велик. Например, для молекулы CO_2 в диапазоне волновых чисел $0-3000 \text{ см}^{-1}$ база данных содержит сведения по 273735 линиям поглощения электромагнитного излучения. Для ускорения расчётов мы произвели предварительное сглаживание спектров путём суммирования интенсивностей линий по спектральным интервалам шириной 5 см^{-1} с учётом относительного обилия молекул разного изотопного состава (изотопологов). Таким образом, каждый спектр, используемый в данной работе, был представлен 600 отсчётами сечения поглощения молекул, отнесёнными к серединам спектральных интервалов шириной 5 см^{-1} , т. е. волновое число i -го отсчёта (в см^{-1}) задавалось формулой $\nu_i = 2,5 + 5 \cdot i$ ($i = 0-599$). Здесь и далее индексом i будет задаваться номер спектрального интервала, а индексом j – номер парникового газа (1 – H_2O ; 2 – CO_2 ; 3 – CH_4 ; 4 – N_2O). Совокупность сечений поглощения молекул четырёх рассматриваемых газов для 600 волновых чисел составляет матрицу s_{ij} ($i = 0-599, j = 1-4$). Показатель оптического поглощения (экстинкции) j -го газа для i -го волнового числа равен произведению $s_{ij} \cdot n_j$, где n_j – концентрация молекул j -го ПГ, которая может быть вычислена путём умножения концентрации молекул воздуха на объёмную долю j -го газа. Данные по современным концентрациям CO_2, CH_4 и N_2O были взяты из бюллетеней Национального управления океанических и атмосферных исследований

США (NOAA) за 2022 г. [37, 39]: CO₂ – 417 ppm, CH₄ – 1,91 ppm, N₂O – 0,336 ppm. Наибольшей неопределённостью характеризуется концентрация паров воды вследствие интенсивных стохастических процессов испарения, конденсации, кристаллизации и сублимации. Для грубой оценки концентрации молекул воды в атмосфере воспользуемся информацией о том, что в атмосфере в пересчёте на жидкость содержится 12900 км³, или 1,29 · 10¹³ м³ воды [32]. Масса этой воды составляет 1,29 · 10¹⁹ г, из которых по оценке [33] 1530 Гт (1,53 · 10¹⁸ г) находятся в конденсированном состоянии. Таким образом, масса водяного пара, участвующего в создании парникового эффекта, равна 1,14 · 10¹⁹ г, соответствующее количество вещества – 6,311 · 10¹⁷ моль, число молекул пара – 3,801 · 10⁴¹. Учитывая объём эквивалентной атмосферы 4,078 · 10¹⁸ м³, получим концентрацию молекул водяного пара в атмосфере 9,321 · 10²² м⁻³ или 3469 ppm. Таким образом, необходимые для расчёта экстинкции концентрации молекул ПГ равны: n₁ = 9,33 · 10²² м⁻³; n₂ = 1,12 · 10²² м⁻³; n₃ = 5,14 · 10¹⁹ м⁻³; n₄ = 9,02 · 10¹⁸ м⁻³.

Для каждого *i*-го спектрального интервала суммарный показатель экстинкции равен

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^4 s_{ij} n_j, \text{ а коэффициент поглощения}$$

$\lambda_i = 1 - e^{-\gamma_i H}$, где *H* – высота эквивалентной атмосферы. Мощность излучения, поглощаемая атмосферой в *i*-м спектральном интервале, равна $B_i \lambda_i$, где B_i – спектральная плотность теплового излучения чёрного тела, вычисляемая

по формуле Планка: $B_i = \frac{2\pi h c^2 \nu_i^3}{e^{kT} - 1} \cdot 500$, где

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ м² кг/с (постоянная Планка), $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с (скорость света), $k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ м² кг с⁻² К⁻¹ (постоянная Больцмана), *T* – абсолютная температура поверхности Земли, 500 – ширина спектрального интервала в системе СИ (5 см⁻¹ = 500 м⁻¹). Полная мощность теплового излучения, поглощаемая атмосферой по всей ширине спектра, равна

$$\sum_{i=0}^{599} B_i \lambda_i, \text{ а интегральный коэффициент поглощения } A = \frac{\sum_{i=0}^{599} B_i \lambda_i}{\sum_{i=0}^{599} B_i}.$$

Подстановка величины $D = -\ln(1 - A)$ в уравнение (7) позволяет вы-

числить температуру поверхности Земли *T*, а разность $T - T_0$ даёт величину парникового эффекта.

Необходимо отметить, что расчёт температуры земной поверхности с учётом парникового эффекта производится при некотором начальном предположении о значении этой температуры. Возникающее в результате расчёта расхождение можно устранить, используя надстройку Подбор параметра пакета Microsoft Excel. Для этого в целевую ячейку нужно ввести разность начальной и конечной температуры и выполнить подбор параметра, приравнивая разность нулю. Эта же надстройка позволяет вычислить значение калибровочного коэффициента β .

Оценить вклад отдельного ПГ (парциальный парниковый эффект) в общий эффект можно двояким образом. В аддитивном варианте расчёта газ в его актуальной концентрации добавляется к изначально «чистому» воздуху (не содержащему парниковых газов). В таком случае рассчитанный парниковый эффект будет приписан к добавленному газу. Недостаток такого метода заключается в том, что при этом не учитывается перекрытие спектральных линий различных газов, что даёт завышенную величину каждого парциального парникового эффекта и общего эффекта в целом. В субтрактивном варианте сначала рассчитывается общий парниковый эффект, а затем из смеси удаляется какой-либо один газ, и снижение приземной температуры характеризует величину вклада удалённого газа в общий парниковый эффект.

В таблице приведены результаты расчётов величины парникового эффекта для различных вариантов состава атмосферного воздуха и соответствующие значения приземной температуры. Для вариантов 2–4 приведены результаты расчёта аддитивным методом, а для вариантов 7–10 – субтрактивным. Значения парциального парникового эффекта в вариантах 2–4 относятся к единственному парниковому газу, присутствующему в смеси, а в вариантах 7–10 – к отсутствующему. На рисунке приведены значения парциального парникового эффекта, вычисленные субтрактивным методом, и доля каждого ПГ в суммарном эффекте (под суммарным эффектом подразумевается сумма парциальных эффектов отдельных газов). Отметим, что общий парниковый эффект смеси газов отличается от суммы парциальных эффектов отдельных ПГ, поскольку температура не является аддитивной физической величиной. Значение кали-

Таблица / Table

Парниковый эффект при различных вариантах состава атмосферного воздуха
Greenhouse effect under different variants of atmospheric air composition

Вариант Option	Концентрации парниковых газов Greenhouse gas concentrations ppm				Оптическая плотность Optical density	Температура земной поверхности Earth surface temperature °C	Общий парниковый эффект Total greenhouse effect °C	Парциальный парниковый эффект Partial greenhouse effect °C
	H ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O				
1	–	–	–	–	0,0000	–18,25	0,00	–
2	3469	–	–	–	1,2010	+10,32	28,57	28,57
3	–	417,06	–	–	0,2528	–11,16	7,08	7,08
4	–	–	1,912	–	0,0223	–17,59	0,66	0,66
5	–	–	–	0,3357	0,0198	–17,66	0,58	0,58
6	3469	417,06	1,912		1,4377	+14,76	33,01	–
7	–	–	–	–	0,2926	–10,11	8,13	24,87
8	3469	–	–	–	1,2369	+11,01	29,26	3,75
9		417,06	–	–	1,4248	+14,52	32,77	0,24
10	–	–	1,912	–	1,4284	+14,59	32,84	0,17
11	–	834,12	–	0,3357	1,4839	+15,59	33,84	0,83*
12	–	417,06	3,824		–	1,4435	+14,87	33,11

Примечание: * – приведена величина повышения средней глобальной температуры при удвоении концентрации CO₂ (вариант 11) и CH₄ (вариант 12).

Note: * – the increase in the average global temperature is given with a doubling of the concentration of CO₂ (option 11) and CH₄ (option 12).

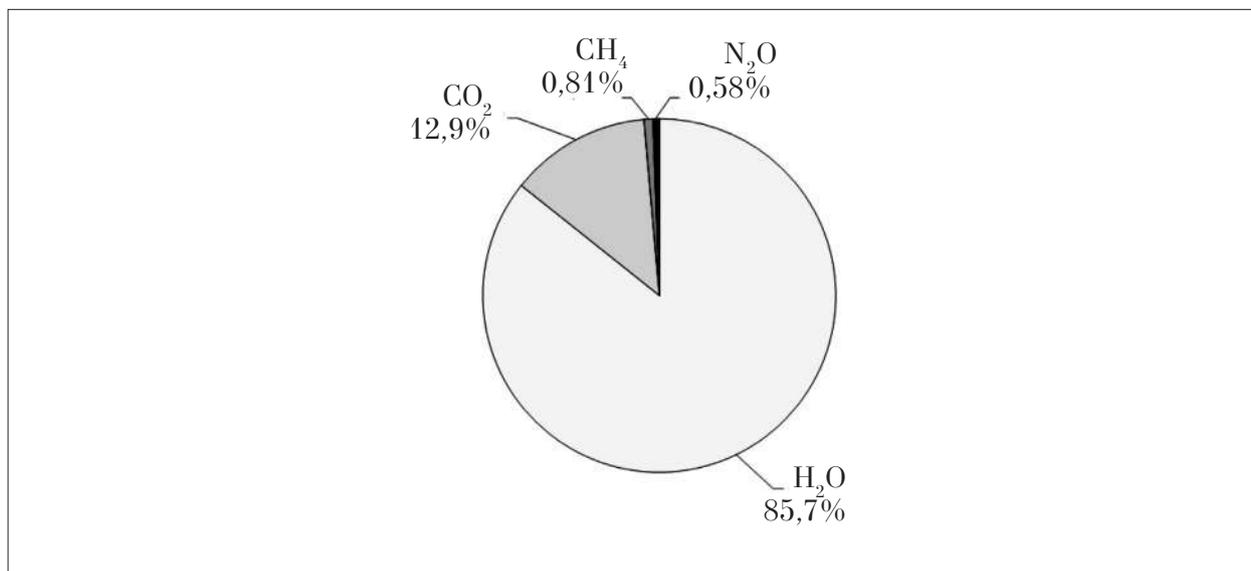


Рис. Вклад основных парниковых газов в общий парниковый эффект
Fig. Contribution of major greenhouse gases to the total greenhouse effect

бровочного коэффициента β для смеси всех четырёх ПГ было принято равным 0,947, а для остальных вариантов состава атмосферного воздуха вычислялось по формуле $\beta = 1 - 0,0370 \cdot D$ (D – оптическая плотность).

Кроме того, в таблице (варианты 11 и 12) представлены последствия двукратного повышения концентрации CO₂ и CH₄ соответственно.

Из приведённых данных очевидно, что парниковый эффект на Земле обусловлен

почти исключительно двумя компонентами атмосферного воздуха – парами воды и углекислым газом. Влияние CH_4 и N_2O на парниковый эффект пренебрежимо мало (суммарно 1,39%), и рассуждения о значительном вкладе этих газов в климатические изменения следует признать некорректными (не говоря уже о прочих ПГ, концентрация которых измеряется триллионными долями). Следует отметить, что H_2O не входит в число ПГ, выбросы которых подлежат регулированию [4].

В последние годы в работах, посвящённых глобальному потеплению, упор делается на необходимость сокращения антропогенных выбросов CH_4 , 30% которых приходится на сельское хозяйство (в основном на животноводство) [35]. В качестве первоочередной меры предлагается существенно сократить поголовье крупного рогатого скота, а потребность в животном белке компенсировать за счёт употребления в пищу крупных насекомых, выращивание которых не сопровождается существенными выбросами CH_4 . С этой точки зрения интересно оценить климатический эффект полного прекращения производства молока и говядины.

В качестве исходных данных по антропогенным выбросам CH_4 воспользуемся опубликованными сведениями о мировых выбросах этого газа [36]. Антропогенные выбросы CH_4 по имеющимся оценкам составляют 9390 млн т в год в CO_2 -эквиваленте, или с учётом потенциала глобального потепления – 375,6 млн т CH_4 в год. Из них 30% (112,7 млн т в год) приходится на животноводство (27% за счёт желудочной ферментации + 3% за счёт обращения с навозом). Необходимо учесть время жизни CH_4 в атмосфере (12 лет) и тот факт, что установившееся стационарное количество газа в атмосфере равно произведению годового выброса на время жизни газа. Таким образом, масса CH_4 в атмосфере, накопленная за счёт животноводства, составляет 1352 млн т или в пересчёте на объём $1,888 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$ (учтена молярная масса метана 16,04 г/моль и молярный объём 0,0224 м³/моль). Объём эквивалентной атмосферы равен $4 \pi R^2 H = 4,077 \cdot 10^{18} \text{ м}^3$ (R – средний радиус Земли 6371 км, H – высота эквивалентной атмосферы 7994 м). Доля «животноводческого» метана в атмосфере составляет $1,888 \cdot 10^{12} / 4,077 \cdot 10^{18} = 4,631 \cdot 10^{-7}$, или 0,463 ppm. В случае полного прекращения производства молока и говядины концентрация метана составит 1,449 ppm. Расчёт приземной температуры и величины парникового эффекта для этой концентрации CH_4 даёт следующие результаты: величина

парникового эффекта = 32,97 °С, приземная температура 14,723 °С, т. е. снижение средней глобальной температуры составит 0,037 °С. Полученный результат даёт основания задуматься об истинных целях «демонизации» CH_4 и о возможных последствиях сокращения объёмов добычи углеводородного сырья и производства животноводческой продукции.

В качестве дополнительного подтверждения корректности полученного результата можно привести оценку роли эмиссии метана от газовой отрасли России в глобальной климатической динамике [37]. Расчёт климатического эффекта от полного прекращения выбросов метана предприятиями ПАО «Газпром» даёт снижение среднегодовой глобальной равновесной температуры у поверхности Земли на 0,003–0,0076 °С. Такие оценки красноречиво говорят о том, что любые мероприятия по снижению выбросов метана в атмосферу лишены какого-либо практического смысла.

Заключение

Расчёты, выполненные на основе простейшей математической модели парникового эффекта в земной атмосфере и детальных спектров поглощения теплового инфракрасного излучения показали, что парниковый эффект и формирование средней глобальной температуры поверхности Земли обусловлены почти исключительно двумя веществами (водой и углекислым газом), при этом суммарный вклад CH_4 и N_2O не превышает 1,4%. Результаты расчётов дают основания для критической оценки распространённого мнения о высокой опасности актуальных выбросов CH_4 с точки зрения глобального потепления и наблюдающихся климатических изменений. Показано, что в результате полного прекращения производства молока и говядины снижение средней глобальной температуры составит менее 0,04 °С.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.

References

1. Mitchell J.F.B. The “greenhouse” effect and climate change // Reviews of Geophysics. 1989. V. 27. No. 1. P. 115–139. doi: 10.1029/RG027i001p00115

2. Jones M.D.H., Henderson-Sellers A. History of the greenhouse effect // *Progress in Physical Geography*. 1990. V. 14. No. 1. P. 1–18. doi: 10.1177/030913339001400
3. Iwata H., Okada K. Greenhouse gas emissions and the role of the Kyoto Protocol // *Environmental Economics and Policy Studies*. 2014. V. 16. P. 325–342. doi: 10.1007/s10018-012-0047-1
4. Syrchina N.V., Kantor G.Ya., Pugach V.N., Ashikhmina T.Ya. Contribution of carbon dioxide and water to the greenhouse effect // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 218–223 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2021-4-218-223
5. Global climate change [Internet resource] <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/> (Accessed: 25.01.2023).
6. Myhrvold N.P., Caldeira K. Greenhouse gases, climate change and the transition from coal to low-carbon electricity // *Environmental Research Letters*. 2012. V. 7. No. 1. Article No. 014019. doi: 10.1088/1748-9326/7/1/014019
7. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Report Prepared for IPCC by Working Group I / Eds. J.T. Houghton, G.J. Jenkins, J.J. Ephraums (Meteorological Office, Bracknell, United Kingdom. 1990 [Internet resource] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ipcc_far_wg_i_full_report.pdf (Accessed: 01.02.2023).
8. Shine K.P., Fuglestvedt J.S., Hailemariam K., Stuber N. Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases // *Climatic Change*. 2005. V. 68. No. 3. P. 281–302. doi: 10.1007/s10584-005-1146-9
9. Neubauer S.C. Global warming potential is not an ecosystem property // *Ecosystems*. 2021. V. 24. P. 2079–2089. doi: 10.1007/s10021-021-00631-x
10. Wuebbles D.J. Chlorocarbon emission scenarios: potential impact on stratospheric ozone // *Journal of Geophysical Research*. 1983. V. 88. No. C2. P. 1433–1443. doi: 10.1029/JC088iC02p1433
11. Lashof D.A., Ahuja D.R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming // *Nature*. 1990. V. 344. No. 6266. P. 529–531. doi: 10.1038/344529a0
12. Rogers J.D., Stephens R.D. Absolute infrared intensities for F-113 and F-114 and an assessment of their greenhouse warming potential relative to other chlorofluorocarbons // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1988. V. 93. P. 2423–2428. doi: 10.1029/JD093iD03p02423
13. Fisher C.R., Hales C., Wang W.C., Ko M., Sze N.D. Model calculations of the relative effects of CFCs and their replacements on global warming // *Nature*. 1990. V. 344. P. 513–516. doi: 10.1038/344513a0
14. Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect // *Science*. 1990. V. 248. No. 4960. P. 1217–1219. doi: 10.1126/science.248.4960.1217
15. Smith S.J., Wigley M.L. Global warming potentials: 1. Climatic implications of emissions reductions // *Climatic Change*. 2000. V. 44. No. 4. P. 445–457. doi: 10.1023/A:1005584914078
16. Smith S.J., Wigley T.M.L. Global warming potentials: 2. Accuracy // *Climatic Change*. 2000. V. 44. No. 4. P. 459–469. doi: 10.1023/A:1005537014987
17. Khalil M.A.K. Non-CO₂ greenhouse gases in the atmosphere // *Annual Review of Energy and the Environment*. 1999. V. 24. No. 1. P. 645–661. doi: 10.1146/annurev.energy.24.1.645
18. Fuglestvedt J.S., Berntsen T.K., Godal O., Sausen R., Shine K.P., Skodvin T. Assessing Metrics of Climate Change: Current Methods and Future Possibilities. CICERO Report 2001:04. Oslo, Norway [Internet resource] https://pub.cicero.oslo.no/cicero-xmlui/bitstream/handle/11250/192042/CICERO_Report_2001-4.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Accessed: 01.02.2023).
19. Wigley T.M.L. The Kyoto Protocol: CO₂, CH₄ and climate implications // *Geophysical research letters*. 1998. V. 25. No. 13. P. 2285–2288. doi: 10.1029/98GL01855
20. 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 / Eds. 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. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2391 p. doi: 10.1017/9781009157896
21. Scheutz C., Kjeldsen P., Gentil E. Greenhouse gases, radiative forcing, global warming potential and waste management – an introduction // *Waste Management & Research*. 2009. V. 27. No. 8. P. 716–723. doi: 10.1177/0734242X09345599
22. IPCC, 2014: Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.
23. Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on the third part of its first session, held in Katowice from 2 to 15 December 2018. FCCC/PA/CMA/2018/3/Add.2 [Internet resource] <https://ledslac.org/wp-content/uploads/2020/09/e.-Decision-18-cma.1.pdf> (Accessed: 25.01.2023).
24. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change [Internet resource] <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (Accessed: 25.01.2023).
25. Karakurt I., Aydin G., Aydiner K. Sources and mitigation of methane emissions by sectors: A critical review // *Renewable Energy*. 2012. V. 39. No. 1. P. 40–48. doi: 10.1016/j.renene.2011.09.006

26. Kantor G.Ya., Syrchina N.V., Ashokhmina T.Ya. Modeling the carbon balance of municipal solid waste landfills // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 198–204 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-198-204
27. Semenov S.M. Greenhouse effect and its anthropogenic enhancement // *Solnechno-zemnaya Fizika*. 2012. V. 21. P. 10–17 (in Russian).
28. Semenov S.M. Greenhouse effect: discovery, concept development, role in formation of global climate and its human-induced changes // *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. 2015. No. 2. C. 103–126 (in Russian).
29. The HITRAN database [Internet resource] <https://hitran.org/> (Accessed: 25.01.2023).
30. National Oceanic and Atmospheric Administration (USA): Annual 2022 Global Climate Report [Internet resource] <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213> (Accessed: 30.06.2023).
31. Shirley J.H. Solar constant // *Encyclopedia of planetary science*. Encyclopedia of earth science. Springer, Dordrecht, 1997. P. 745–746. doi: 10.1007/1-4020-4520-4_370
32. Quante M., Matthias V. Water in the Earth's atmosphere // *Journal de Physique IV France*. 2006. V. 139. No. 1. P. 37–61. doi: 10.1051/jp4:2006139005
33. Galashev A.E. Molecular-dynamic modeling of ultradisperse water in the Earth atmosphere // *High Temperature*. 2010. V. 48. No. 4. P. 518–526. doi: 10.1134/S0018151X10040097
34. National Oceanic and Atmospheric Administration (USA): Greenhouse gases continued to increase rapidly in 2022 [Internet resource] <https://www.noaa.gov/news-release/greenhouse-gases-continued-to-increase-rapidly-in-2022> (Accessed: 30.06.2023).
35. Gerber P.J., Hristov A.N., Henderson B., Makkar H., Oh J., Lee C., Meinen R., Montes F., Ott T., Firkins J., Rotz A., Dell C., Adesogan A.T., Yang W.Z., Tricarico J.M., Kebreab E., Waghorn G., Dijkstra J., Oosting S. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review // *Animal*. 2013. V. 7. No. s2. P. 220–234. doi: 10.1017/S1751731113000876
36. Global methane emissions and mitigation opportunities [Internet resource] <https://www.globalmethane.org/documents/gmi-mitigation-factsheet.pdf> (Accessed: 30.06.2023).
37. Methane and climate change: scientific problems and technological aspects. Edited by academician of the RAS V.G. Bondur, academician of the RAS I.I. Mokhov, correspondent member of the RAS A.A. Makosk. Moskva: Russian Academy of Sciences, 2022. 388 p. (in Russian).