

УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ И ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

Доктор физико-математических наук Б.М. СМIRНОВ (ОИВТ РАН)

Углекислый газ в атмосфере Земли

Рассматривая энергетический баланс Земли и атмосферы, мы установили, что определяющую роль в образовании парникового эффекта играет вода в виде пара и аэрозолей¹. Определённую добавку к этому может дать углекислый газ атмосферы, поскольку наиболее интенсивная полоса поглощения молекул CO₂ находится в спектре теплового излучения Земли. Отметим, что поглощение излучения молекулами воды и углекислого газа происходит в разных областях пространства, поскольку вода сосредоточена в тропосфере на высотах менее 10 км, а далее с увеличением высоты её концентрация резко падает. Углекислый газ, наоборот, перемешивается с воздухом в результате конвективного движения последнего и большого времени жизни молекул углекислого газа в атмосфере. (Заметим, что концентрация молекул CO₂ в тропосфере и стратосфере постоянна, если мы находимся вдали от источников и поглотителей углекислого газа.) В результате углекислый газ поглощает его источником в атмосфере на больших высотах, чем молекулы воды. Однако на этих высотах зависимость температуры атмосферы от высоты не монотонная, так что накопление углекислого газа в атмосфере может неоднозначно сказаться на изменении её теплового излучения. Тем самым и рост концентрации углекислого газа в атмосфере Земли, и его влияние на интенсивность инфракрасного излучения атмосферы, требуют внимательного анализа. Рассмотрим отдельные аспекты проблемы накопления атмосферного

углекислого газа и влияния его на энергетический баланс Земли.

Рис. 1 представляет основные каналы углеродного цикла при прохождении углерода с поверхности Земли через атмосферу². Хотя точность этих данных ограничена, приведённая диаграмма отражает основные особенности углеродного цикла. Фотосинтез является главным процессом удаления углекислого газа из атмосферы. Это комплексный процесс, где хлоропласты³ растений являются катализатором, который под действием солнечного излучения переводит молекулы CO₂ в твёрдые формы углерода⁴. Сложный характер процесса фотосинтеза⁵ является свидетельством того, что этот процесс зависит от типа и фазы роста участвующего в нём растения и внешних условий, при которых он протекает. По характеру процесса фотосинтеза растения делят на C3 и C4 группы по числу атомов углерода, участвующих в элементар-

² <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/>

³ Хлоропласты (от греч. *chloros* – зелёный и *plastos* – вылепленный), внутриклеточные органоиды (пластиды) растений, в которых осуществляется фотосинтез; благодаря хлорофиллу окрашены в зелёный цвет. Встречаются в клетках различных тканей надземных органов растений, особенно обильны и хорошо развиты в листьях и зелёных плодах. http://dic.academic.ru/dic.nsf/dic_biology/6249/ХЛОРОПЛАСТЫ

⁴ Hill R. *Oxygen Evolved by Isolated Chloroplasts*, *Nature*, V. 139, 1937.

⁵ Jones H.G. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. (Cambridge, Camb.Univ.Press, 1992); Hall D.O., Rao K.K. *Photosynthesis*. (Cambridge, Camb. Univ.Press, 1999); Lawlor D.W. *Photosynthesis*. (Oxford, BIOS, 2001); Bidlack J.E., Stern K.R., Jansky S. *Introductory plant biology*. (New York, McGraw-Hill, 2003); *Handbook of Photosynthesis*. (Boca Ratonm CRC Pressm 2005); Blankenship R.E. *Molecular Mechanisms of Photosynthesis*. (London, Wiley, 2014).

¹ Смирнов Б.М. Энергетический баланс Земли и атмосферы. *Энергия: экономика, техника, экология*. № 4. 2016.

ном химическом процессе фотосинтеза. Для растений группы C3, к которой относятся пшеница, рис, фасоль, процесс протекает при столкновении молекулы CO₂ с промежуточным продуктом, тогда как для растений группы C4 молекулы CO₂ сначала захватываются клеткой и далее процесс протекает с участием связанных молекул. Это ведёт к разным зависимостям скорости процесса фотосинтеза от условий, при которых он протекает, и в частности, от концентрации молекул CO₂ в окружающем воздухе⁶. Наряду с процессом фотосинтеза, удаление углекислого газа из атмосферы над океанами может быть связано с растворением его в океане, что ведёт к образованию карбонатов типа CaCO₃. Разложение карбонатов создаёт поток углекислого газа в атмосферу. Другими каналами образования атмосферного углекислого газа являются процессы гниения, а также дыхания растений и микробов.

⁶ <http://www.ciesin.org/docs/004-038/004-038a.html>

Деятельность человека также ведёт к накоплению углекислого газа в атмосфере. Большую часть потока CO₂ в атмосферу за счёт хозяйственной деятельности человека даёт сжигание ископаемого топлива (угля, нефти и газа) и углеродсодержащих материалов. При этом 35% выброса CO₂ в атмосферу составляет сжигание угля, 36% приходится на нефть, 20% на газ, 3% выбросов углекислого газа происходит при изготовлении цемента, остальное – при использовании дров, биотоплива и т.д.⁷. Существенный вклад в образование атмосферного углекислого газа вносит уничтожение лесов в тропических районах Южной Америки, Африки и Азии⁸. Примерно 1.5 · 10⁵ км² тропических лесов уничтожается ежегодно. Трудно определить влияние этого процесса на климат Земли. С одной стороны, освобождаемая от леса площадь используется далее в сельскохозяйственном производстве, где

⁷ <https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse-effect>

⁸ Lean J., Rowntree P.R. Understanding the sensitivity of a GCM simulation of Amazonian deforestation to the specification of vegetation and soil characteristics. *J. Climate*. 1997. V. 10; Hahmann A.N., Dickinson R.E. *RCCM2-BATS model over tropical South America: Applications to tropical deforestation*. *J. Climate*. V. 10. 1997; Lawrence D., Vandecar K. *Effects of Tropical Deforestation on Climate and Agriculture*. *Nature Climate Change*. V. 5. 2015.

Рис. 1.
Потоки углерода через атмосферу Земли в углеродном цикле.
Указанные значения потоков выражены в млрд тонн углерода в год.



"Энергия: экономика, техника, экология" 5/2016

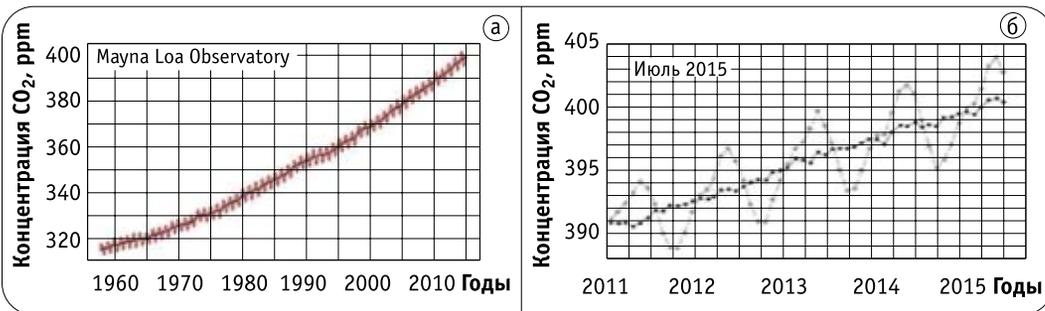


Рис. 2.
Концентрация двуокиси углерода в атмосферном воздухе согласно измерениям обсерватории Мауна Лоа (Mauna Loa): а) в течение последнего полувека и б) в течение последних лет.

фотосинтез играет определяющую роль. С другой стороны, уничтожение лесов изменяет характер испарения воды с освобождённой площади. Это ведёт к неоднозначному влиянию процесса уничтожения лесов на климат Земли.

Отметим следующий аспект диаграммы, представленной на рис. 1. При современной концентрации углекислого газа в атмосфере его поток в атмосферу по всем каналам превышает суммарный поток углекислого газа, удаляемого из атмосферы, таким образом в современных условиях концентрация молекул CO_2 в атмосфере увеличивается. В настоящее время атмосфера Земли содержит примерно $8 \cdot 10^{17}$ г (100 млрд т) углерода в форме молекул CO_2 . Для сравнения: средняя масса атмосферной воды равна $1.3 \cdot 10^{19}$ г, а масса атмосферного воздуха составляет $5.1 \cdot 10^{21}$ г. Время нахождения молекул углекислого газа в атмосфере составляет примерно 4 года. За это время углекислый газ перемешивается с воздухом в атмосфере так, что концентрация молекул CO_2 в атмосферном воздухе не зависит от точки её измерения вдали от источников углекислого газа и областей его поглощения. Поэтому при анализе накопления CO_2 в атмосфере, учитывая неопределённости в значениях потоков углекислого газа в атмосферу и из неё, удобно использовать измеряемую величину: концентрацию атмосферного углекислого газа. Давайте исключим из баланса углерода на Земле потоки, относящиеся к деятельности человека, и будем считать при этом, что другие потоки углерода с поверхности

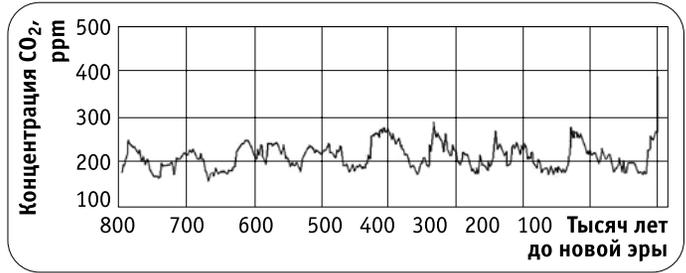
Земли и обратно сохраняются, поскольку содержание углерода в Земле и океане значительно превышает его содержание в атмосфере. В результате концентрация углекислого газа в атмосфере будет такая же, какой она была до промышленной эры, скажем, до 1750 г. Эта концентрация находится в пределах 260÷280 ppm, как это следует из анализа отложений углерода в ледниках, и она сохранялась такой в предыдущие 10000 лет⁹.

Наиболее полная информация относительно современной концентрации молекул CO_2 в атмосфере и её эволюции следует из измерений обсерватории Мауна Лоа (Mauna Loa), Гавайи, США¹⁰. Эта обсерватория удачно расположена на высоте 3400 м над уровнем моря, что исключает влияние источников атмосферного CO_2 и позволяет оперировать со стабильной концентрацией углекислого газа в атмосферном воздухе. При этом мониторинг концентрации атмосферного углекислого газа происходит непрерывно, начиная с 1958 г. Результаты этого мониторинга представлены на рис. 2 с месячным или годовым усреднением концентрации молекул углекислого газа. Согласно данным рис. 2, концентрация молекул CO_2 в атмосфере изменилась с 316 ppm в 1959 г. до 402 ppm в 2015 г. ($1 \text{ ppm} = 10^{-6}$). Рис. 2а показывает, что концентрация молекул CO_2 в атмосфере растёт с ускорением. Действительно, скорость накопления молекул CO_2 в атмосфере изменилась с 0.7 ppm в год в 1959 г. до примерно 2.1 ppm в год в 2015 г. Сезонные вариации концентрации молекул CO_2 в атмосфере (рис. 2б) происходят за счёт более высокой интенсивности фотосинтеза в северном полушарии по сравнению с южным. В результате в период с мая по сентябрь, когда фотосинтез

⁹ <https://www.ipcc.ch/publications-and-data/ar4/wg1/en/ch757-3.html>.

¹⁰ <https://en.wikipedia.org/wiki/Mauna-Loa-Observatory>.

Рис. 3.
Концентрация
углекислого газа
в атмосфере Земли
в прошлом (восстановлена
из анализа ледникового
льда).



имеет место в северном полушарии, происходит уменьшение измеряемой концентрации молекул углекислого газа.

Средний ежегодный рост концентрации углекислого газа в атмосфере в настоящее время, который составляет 2.1 ppm в год, соответствует сжиганию $4.4 \cdot 10^9$ тонн углерода. Это немногим меньше количества углерода, содержащегося в добытых в этом году ископаемых горючих топливах (уголь, нефть, газ). Далее, из рис. 2б следует, что концентрация атмосферного углекислого газа уменьшилась с 402 ppm до 395 ppm с мая по сентябрь 2014 г. и потом увеличилась с 395 ppm до 404 ppm с сентября 2014 г. по май 2015 г. Это соответствует переходу $15 \cdot 10^9$ тонн углерода из атмосферы в первом случае и переходу $19 \cdot 10^9$ тонн углерода в атмосферу во втором случае. Как видно, мы имеем в своём распоряжении информацию о современном содержании углекислого газа в атмосфере и скорости его изменения.

Наряду с мониторингом современного содержания углекислого газа в атмосфере определённое понимание эволюции этого параметра в прошлом даёт анализ содержания углекислого газа в ледниковых отложениях. На рис. 3 приведено изменение во времени концентрации углекислого газа в прошлом¹¹. Оставляя в

стороне периодический характер осцилляций этой величины, отметим, что среднее значение концентрации углекислого газа близко к его значению в нашей эре в преиндустриальную эпоху.

Излучение молекул CO₂ в воздушной атмосфере

Пока углекислый газ отсутствовал в атмосфере Земли, равновесное излучение, рассчитанное в рамках модели чёрного тела для излучающей атмосферы, характеризовалось температурой $T \uparrow = 244$ К. Это соответствует потоку уходящего теплового излучения, равному $J_0 = \sigma T^{\uparrow 4} = 200$ Вт/см², как это следует из энергетического баланса Земли и атмосферы (здесь σ – постоянная Стефана–Больцмана, равна $5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт · м⁻² К⁻⁴).

Проведённые расчёты показали, что введение углекислого газа в атмосферу ведёт к уменьшению уходящего потока излучения (рис. 4) и, соответственно, к росту температуры Земли. Как видно, изменение потока уходящего излучения ΔJ относительно мало, и поэтому увеличение температуры Земли ΔT в результате введения в атмосферу углекислого газа составляет

$$\Delta T = \frac{T}{4} \cdot \frac{\Delta J}{J_0} \approx 1.8 \text{ К.}$$

При этом увеличение или уменьшение вдвое концентрации молекул углекис-

¹¹ Lüthi D., Le Floch M., Bereiter B. et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. Nature. V. 453. 2008.

Рис. 4.
Изменение уходящего потока
теплового излучения атмосферы ΔJ
в результате введения в атмосферу
углекислого газа с указанной
концентрацией, если сначала
углекислый газ отсутствует в ней.

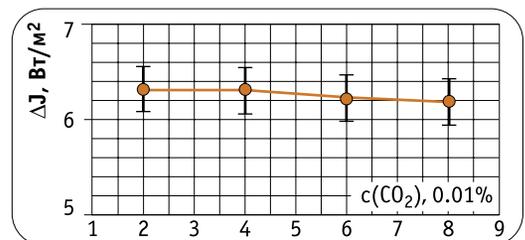
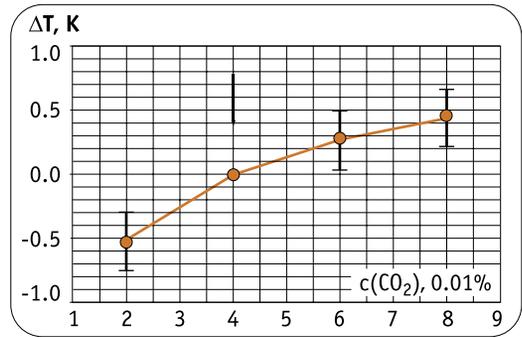


Рис. 5.
Изменение температуры
поверхности Земли за счёт
изменения концентрации молекул
углекислого газа по сравнению
с современным значением.



лого газа в атмосфере ведёт к изменению потока излучения, которое не превышает модельной ошибки результата. Тем самым **правильнее было бы считать, что указанные изменения концентрации молекул углекислого газа не ведут к изменению температуры Земли при современной концентрации углекислого газа.**

В то же время изменение средней температуры Земли при увеличении или уменьшении современной концентрации углекислого газа вдвое от его современного значения относительно невелико и не превышает ошибки расчётов, которая составляет примерно 0.1 K. Отсюда приходим к выводу, что **удвоение современной концентрации углекислого газа не приведёт к изменению интенсивности уходящего теплового излучения Земли и связанному с этим изменению средней температуры Земли.**

Отметим благоприятность условий, позволяющих обеспечить высокую точность и надёжность данного вывода. Большое время жизни молекул углекислого газа в атмосфере обеспечивает сильное перемешивание углекислого газа с атмосферным воздухом, так что на больших высотах, вдали от источников и поглотителей молекул CO_2 , концентрация молекул углекислого газа постоянна как в пространстве, так и во времени. Создаваемое атмосферным углекислым газом уходящее тепловое излучение формируется на больших высотах. Поэтому такие факторы, как влажность воздуха, наличие облаков, присутствие пыли в атмосфере и другие факторы, приводящие к нерегулярностям потока уходящего теплового излучения атмосферы в основной области спектра, не проявляются в полосе излучения молекул углекислого газа. Поэтому можно с высокой точностью рассчитать поток уходящего теплового излучения, определяемый переходами между колебательными уровнями молекул углекислого газа, если задан профиль температуры атмосферы как функции высоты, или же наоборот, определить высотный профиль температуры атмосферы по

измеренному потоку излучения в полосе поглощения углекислого газа.

Тепловое излучение атмосферных молекул углекислого газа в сторону Земли

Теперь определим поток теплового излучения из атмосферы на Землю, который создаётся находящимися там молекулами углекислого газа. На рис. 5 представлена зависимость изменения температуры поверхности Земли от концентрации молекул углекислого газа в предположении, что другие параметры атмосферы при этом сохраняются. В частности, при удвоении концентрации молекул CO_2 в атмосфере по сравнению с современным её значением увеличение глобальной температуры Земли составляет

$$\Delta T = 0.4 \pm 0.2 \text{ K}$$

Определение спектральных потоков излучения на поверхность Земли менее точно, чем уходящее излучение по следующим причинам. Во-первых, вблизи поверхности Земли находятся источники и поглотители углекислого газа, которые влияют на его концентрацию и делают распределение CO_2 неравномерным в приземном пространстве. Во-вторых, излучение, создаваемое молекулами CO_2 вблизи поверхности Земли, частично экранируется тепловым излучением других компонент, в том числе приземной пылью и влагой. В-третьих, в отличие от уходящего излучения, которое определяется одним колебательным переходом с участием только нижнего колебательного состояния, в создании теплового излучения участвуют три колебательных перехода, причём спектры этих переходов пересекаются. Эти факторы снижают точность определения потока теплового излучения на поверхность Земли, которое оценивается примерно в 40%.

Механизмы изменения климата Земли

По сути дела, рассматриваемая проблема атмосферного углекислого газа является одной из проблем изменения климата в результате изменения параметров Земли и атмосферы, в частности, происходящего в результате деятельности человека. Поскольку углекислый газ вносит малый вклад в энергетический баланс Земли, другие факторы могут быть более существенными при эволюции климата Земли, который меняется на наших глазах¹².

Энергетический баланс Земли и атмосферы в основном зависит от атмосферной воды, поэтому изменение её содержания в атмосфере отражается на изменении климата¹³. При этом водяной пар выступает в энергетическом балансе Земли и её атмосферы как источник инфракрасного излучения, тогда как аэрозоли, в том числе входящие в состав облаков, влияют на энергетический баланс Земли¹⁴ не только как эффективный источник теплового излучения, но и как отражатель солнечного излучения. Отметим, что содержание аэрозоля в атмосфере носит локальный характер. В частности, концентрация аэрозоля в северном полушарии втрое больше, чем в южном¹⁵.

Такую же роль может играть пыль в приземной атмосфере, хотя её действие

обычно носит локальный характер. Другие парниковые газы дают небольшой вклад в тепловой баланс Земли, хотя их концентрация в атмосфере Земли увеличивается более быстрыми темпами, чем углекислого газа. Так, с 1750 г. концентрация атмосферного метана увеличилась более, чем на 150%¹⁶. Происходящее в настоящее время быстрое уменьшение содержания атмосферного озона также необходимо учитывать в энергетическом балансе Земли, поскольку озон является одним из парниковых газов.

Таким образом имеется много факторов, которые следует принимать во внимание при анализе изменений климата Земли. Удобно выбрать один из них в качестве параметра, характеризующего изменение параметров атмосферы, которое приводит к изменению энергетического баланса Земли.

В качестве такого параметра Аррениус¹⁷ в конце XIX века предложил использовать концентрацию углекислого газа в атмосфере. Такая практика получила распространение, поскольку концентрация углекислого газа является наиболее стабильным параметром при описании изменений в атмосфере. Конечно, для этой цели можно было бы использовать, например, ежегодный подъём уровня моря, который составляет 2.9 ± 0.4 мм¹⁸, и это могло бы характеризовать изменение условий на Земле, приводящих к изменению климата. Можно использовать другие параметры, характеризующие состояние атмосферы, и изменение каждого из которых приводит к соответствующему изменению температуры Земли. Однако, использование содержания углекислого газа в атмосфере является удобным и исторически принятым методом для этой цели. В рамках такого подхода средняя температура Земли является функцией концентрации углекислого газа в атмосфере с. Характеристикой этой связи является изменение средней температуры Земли ΔT при удвоении содержания углекислого газа в атмосфере, которое носит название равновесной климатической чувстви-

¹² Martyn D. *Climates of the World*. (Amsterdam, Elsevier, 1992); *State of the climate in 2003*. Ed. by D.H. Levinson and A.M. Waple. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **85**(6), S1 (2004); *State of the climate in 2004*. Ed. by D.H. Levinson. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **86**, S1(2005); Karoly D. J., 2003, *Ozone and Climate Change*, *Science*. V. 302.

¹³ Dai A., Trenberth K.E., Karl T.R. *Effects of clouds, soil, moisture, precipitation and water vapour on diurnal temperature range*. *J. Climat.* V. 12, 1999; Smith C.A., Haigh J.D., Toumi R. *Radiative forcing due to trends in the stratospheric water vapour*. *Geophys. Res. Lett.* V. 28, 2001.

¹⁴ Ramanathan V. et al. *Aerosols, climate, and the hydrological cycle*. *Science*. V. 294, 2001; Kaufman Y.J., Tanré D., Boucher O. *A satellite view of aerosols in the climate system*. *Nature*. V. 419, 2002; Wylie D.P. et al. *Trends in global cloud cover in two decades of HIRS observations*. *Journal of Climate*. V. 18, 2005; Bellouin N. et al. *Global Estimate of Aerosol Direct Radiative Forcing from Satellite Measurements*. *Nature*. V. 438, 2005.

¹⁵ <https://www.wmo.int/pages/themes/climate/causes-of-climate-change.php>.

¹⁶ <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7h.html>.

¹⁷ Arrhenius S. *On the Influence of Carbonic Acid upon Temperature of the Ground*. *Philosophical Magazine*. V. 41, 1896.

¹⁸ <https://en.wikipedia.org/wiki/Global-warming>.

тельности (equilibrium climate sensitivity). Именно эта величина часто используется как мера изменения климата, причём учитывается, что наряду с изменением содержания углекислого газа в атмосфере происходит изменение других её параметров. Эта величина многократно вычислялась как в оригинальных работах, так и в рамках соответствующих национальных и международных программ. Не останавливаясь на деталях отдельных вычислений, приведём конечный результат¹⁹

$$\delta T = (3.0 \pm 1.5) \text{ }^\circ\text{C}.$$

Столь высокая неопределённость рассматриваемого параметра связана с большой неопределённостью в изменении других параметров атмосферы, которые происходят в процессе эволюции планеты наряду с изменением концентрации атмосферного углекислого газа. В данном случае учитывается реальный характер эволюции климата, когда наряду с изменением концентрации атмосферного углекислого газа происходит изменение и других параметров.

Обратим внимание на трудность измерения параметров Земли, характеризующих и влияющих на её климат. Это в первую очередь относится к водяному атмосферному пару и аэрозолям, основным компонентам, определяющим тепловое излучение атмосферы. Флуктуации плотности этих величин значительно превышают точность определения их средних значений, что необходимо для определённых выводов. Такая же проблема сопровождает измерение средней температуры Земли, которая используется как характеристика изменения климата. Очевидно, флуктуации температуры Земли, пространственные, суточные, сезонные, достигают десятков градусов, тогда как для анализа изменения климата требуется точность порядка десятой градуса. Тем самым для надёжного анализа необходим большой массив информации.

Заключение

Проведённый анализ влияния атмосферного углекислого газа на энергетический баланс Земли приводит нас к следующим выводам. Основные потери энергии Земли и её атмосферы как целого в их общем энергетическом балансе связаны с тепловым излучением атмосферы в инфракрасной области спектра, который в основном обязан излучению атмосферной воды в виде пара и аэрозолей, а углекислый газ имеет второстепенное значение для этого процесса. Наблюдаемое накопление углекислого газа в атмосфере при его современном содержании слабо влияет на поток инфракрасного излучения, уходящего за пределы атмосферы, и приводит к увеличению этого потока на поверхность Земли. В результате удвоение содержания углекислого газа в атмосфере по сравнению с настоящим значением этой величины ведёт к росту средней температуры поверхности Земли на величину $0.4 \pm 0.2 \text{ K}$ при сохранении неизменными других параметров атмосферы, влияющих на климат Земли. Это значительно меньше эмпирического изменения средней температуры Земли при удвоении содержания углекислого газа в атмосфере, который равен в среднем $3.0 \pm 1.5 \text{ K}$ и является аппроксимацией наблюдаемых значений изменения средней температуры Земли и концентрации углекислого газа. Тем самым эмпирическое значение учитывает изменение других параметров, влияющих на климат Земли, наряду с ростом концентрации углекислого газа в атмосфере. Отсюда следует, что **накопление углекислого газа в атмосфере не является главным фактором, ответственным за изменение климата при современных условиях.**

Таким образом, концентрация углекислого газа в атмосфере является лишь удобным индикатором, который характеризует изменение условий энергетического баланса и, соответственно, климата Земли. Поэтому соотношение между наблюдаемой средней температурой Земли и текущей концентрацией углекислого газа в атмосфере нельзя воспринимать буквально. Последнее означает, что, если полностью прекратить выброс в атмосферу углекислого газа при сжигании ископаемого топлива, это слабо отразится на наблюдаемом изменении климата Земли.

¹⁹ *Platt G.N. The Carbon Dioxide Theory of Climatic Change. Tellus. V. 8, Issue 2. 1956; Snyder M.A., Bell J.L., Sloan L.C. 2002. Climate responses to a doubling of atmospheric carbon dioxide for a climatologically vulnerable region. Geophys. Res. Lett. V. 29, 014431. 2002 и др.*