

## ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ И ЕГО АНТРОПОГЕННОЕ УСИЛЕНИЕ

<sup>1,2</sup>С.М. Семенов

## GREENHOUSE EFFECT AND ITS ANTHROPOGENIC ENHANCEMENT

<sup>1,2</sup>S.M. Semenov

Кратко представляются возможные факторы изменения глобального климата, обсуждаются многофакторность этого явления и роль антропогенной составляющей. На основе современных спектроскопических данных количественно характеризуется увеличение температуры в приповерхностном слое, которое связано с увеличением содержания в атмосфере Земли углекислого газа, метана, закиси азота и водяного пара.

Possible factors of the global climate change are briefly presented. Its multifactor nature and a role of anthropogenic factor are discussed. On the basis of the up-to-date spectroscopic data, an increase in surface temperature caused by enrichment of the Earth's atmosphere with carbon dioxide, methane, nitrous oxide and water vapor is quantified.

В последние десять – пятнадцать лет в климатологической литературе и публикациях более общего характера оживилась полемика по проблеме изменения глобального климата, в особенности глобального потепления последней трети XX в. Первопричиной этого оживления стали меры, принимаемые мировым сообществом для ограничения антропогенных эмиссий парниковых газов в атмосферу, и весьма разное отношение к их обоснованности и эффективности, которое существует и среди специалистов, и в обществе в целом. В частности, звучат мнения «отрицателей» о том, что потепления климата вследствие усиления парникового эффекта из-за антропогенного обогащения атмосферы парниковыми газами вовсе не существует или же оно является несущественным в сравнении с эффектами других, естественных факторов изменения климата. Дискуссия ведется в основном на качественном уровне, в терминах корреляций разных наблюдаемых событий или же исторических аналогий, а физическая теория парникового эффекта практически не используется. Этим мы считаем полезным привести в этой работе наиболее типичные аргументы «отрицателей» и дать комментарии, которые, быть может, поспособствуют разрешению недоразумений. Дальнейший текст разделен на разделы, в каждом из которых обсуждается один из таких аргументов, сформулированный в начале раздела; он выделен жирным курсивом.

**1. Эффект увеличения содержания в атмосфере «антропогенных» парниковых газов (т. е. тех, которые в существенных объемах эмитируются в ходе хозяйственной деятельности:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и т. д.)пренебрежимо мал, поскольку парниковый эффект, вызванный «главным» естественным парниковым газом – водяным паром  $\text{H}_2\text{O}$ , – и так является максимальным. Поэтому дальнейшее увеличение концентрации водяного пара и/или других парниковых газов не приведет к заметному росту глобальной температуры в приповерхностном слое.**

Основы физической теории парникового эффекта были заложены в трудах Фурье (1824, 1827), Тиндалла (1863, 1872), Аррениуса (1896), Фридмана (1913).

Напомним, как возникает парниковый эффект на следующем простейшем модельном примере гори-

зонтально-однородной атмосферы (рис. 1). В этой модели солнечное излучение, распространяясь в земной атмосфере вертикально, совершенно не поглощается и не рассеивается атмосферой и полностью поглощается земной поверхностью. Инфракрасное излучение земной поверхности и горизонтальных атмосферных слоев распространяется вертикально.  $M_0$  – масса атмосферы над элементом земной поверхности единичной площади. Поглощение инфракрасного излучения слоем массы  $dM$  (над такой площадкой) пропорционально этой величине. Если обозначить поток солнечного излучения через  $S_0$ , а восходящий и нисходящий потоки инфракрасного излучения через  $J^\uparrow(M)$  и  $J^\downarrow(M)$ , где  $M$  – масса воздуха в столбе от земной поверхности до той высоты, на которой рассматриваются потоки, то можно составить следующую систему уравнений для состояния равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{dJ^\uparrow(M)}{dM} &= -w(M)J^\uparrow(M) + \\ &+ 0.5w(M)(J^\downarrow(M) + J^\uparrow(M)), \\ \frac{dJ^\downarrow(M)}{d(-M)} &= -w(M)J^\downarrow(M) + \\ &+ 0.5w(M)(J^\downarrow(M) + J^\uparrow(M)), \end{aligned}$$

где  $w$  – коэффициент поглощения. Первые члены в правых частях характеризуют ослабление соответствующих потоков за счет поглощения, а вторые – излучение поглощенной лучистой энергии вверх и вниз в равных долях. При этом  $S_0 + J^\downarrow(M) = J^\uparrow(M)$  – выполняется условие равновесия потоков лучистой энергии на любой заданной высоте и  $J^\downarrow(M_0) = 0$  – инфракрасное излучение не приходит от Солнца. Эта система уравнений имеет следующие решения:

$$\begin{aligned} J^\uparrow(M) &= S_0(1 + 0.5 \int_M^{M_0} w(x)dx); \\ J^\downarrow(M) &= 0.5S_0 \int_M^{M_0} w(x)dx. \end{aligned}$$

Если для дальнейшего упрощения предположить, что коэффициент поглощения линейно возрастает с повышением концентрации с некого обобщенного парникового газа в атмосфере:

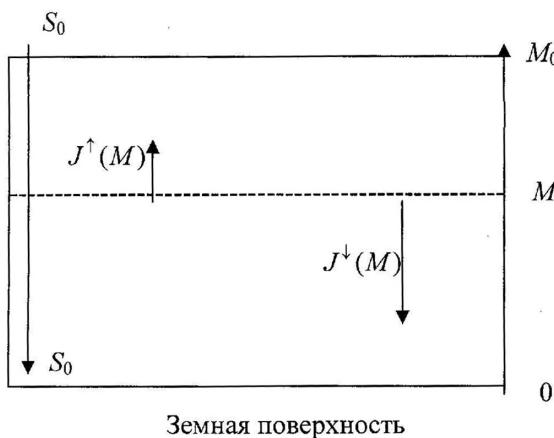


Рис. 1. Схема радиационных потоков в иллюстративной радиационной модели.

$$w=w_0c,$$

где  $w_0$  – константа, то решения принимают следующий вид:

$$J^{\uparrow}(M) = S_0(1 + 0.5w_0c(M_0 - M));$$

$$J^{\downarrow}(M) = 0.5S_0w_0c(M_0 - M).$$

На рис. 2 схематически изображены эти решения. Заметим, что восходящий поток инфракрасного излучения на верхней границе атмосферы не меняется при росте  $c$ . В состоянии равновесия он обязан всегда уравновешивать поток солнечного излучения  $S_0$ , поступающий на верхнюю границу атмосферы. Однако восходящий поток инфракрасного излучения на уровне земной поверхности растет с увеличением  $c$ , а вместе с ним и температура  $T_0$ :

$$J^{\uparrow}(0) = S_0(1 + 0.5w_0cM_0),$$

$$T_0 = (J^{\uparrow}(0)/\sigma)^{1/4},$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана. Это и есть парниковый эффект в этой упрощенной схеме.

Такая упрощенная модель пригодна лишь для объяснения сути явления, а не для количественных оценок. Чтобы оценить количественно парниковый эффект для реальной атмосферы (или для близкой к реальности) и его изменение при изменении ее состава, необходимо учитывать совокупность радиационно-активных газов. Кроме того, необходимо более детально охарактеризовать спектральный состав излучения (а не только рассматривать два типа – солнечное и инфракрасное), поскольку свойства поглощения/излучения сильно зависят от длины волны. И наконец, способность атмосферных слоев к поглощению/излучению должна оцениваться на основе реальных данных о составе атмосферы и сечениях поглощения молекул газов (традиционное название коэффициентов поглощения). Лишь результаты именно такого прямого расчета могут служить серьезными аргументами в дискуссии о том, велики ли парниковые свойства реальной земной атмосферы и существует ли потенциал для дальнейшего усиления парникового эффекта. Такие вычисления были нами проведены и опубликованы в работе [Семенов, Попов, 2011].

Для расчетов была использована модель атмосферы, основанная на следующих допущениях:

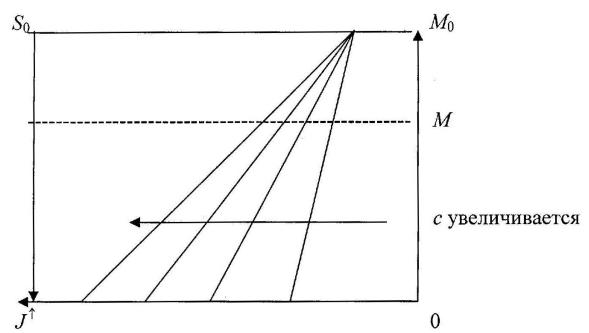


Рис. 2. Изменение восходящего потока инфракрасного излучения  $J^{\uparrow}$  в зависимости от высоты (по переменной  $M$ ) и концентрации парникового газа (по переменной  $c$ ).

1. Горизонтально-однородная атмосфера: 10 000 горизонтальных слоев одинаковой массы над 1  $\text{м}^2$  земной поверхности.

2. Состав горизонтальных атмосферных слоев соответствует стандартной атмосфере (US Standard Atmosphere); характеризует ситуацию примерно 1970-х гг.

3. Энергия передается только излучением вверх или вниз.

4. Каждый горизонтальный слой в системе «атмосфера+земная поверхность» находится в состоянии равновесия: сколько поглощает лучистой энергии, столько и излучает.

5. Потоки лучистой энергии в модели представлены излучением в 410 спектральных интервалах. Границы первых тринадцати из них (в  $\text{мкм}$ ): 0.1975–0.2075; 0.2075–0.2175; 0.2175–0.2275; 0.2275–0.2375; 0.2375–0.2475; 0.2475–0.2575; 0.2575–0.2675; 0.2675–0.2775; 0.2775–0.2875; 0.2875–0.2975; 0.2975–0.3125; 0.3125–0.45; 0.45–0.75. Остальные 397 имеют одинаковую ширину 0.25  $\text{мкм}$ : от 0.75–1.0 до 99.75–100.0  $\text{мкм}$ .

6. Ученные в модели радиационно-активные газы:  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ .

7. Значения коэффициентов (сечений) поглощения,  $\text{см}^2/\text{молекула}$ :

– для первых тринадцати спектральных интервалов взяты из работы [Андронова и др., 1986];

– для остальных 397 спектральных интервалов оценивались с использованием спектроскопической базы данных HITRAN (High-Resolution Transmission Molecular Absorption Database) в версии 2008 г. Ее структура описана в [The HITRAN molecular spectroscopic database..., 1998], а использованные нами данные 2008 г. были взяты с ресурса [<http://www.spectralcalc.com/>].

Расчетный алгоритм имитировал реальный процесс становления равновесия по излучению; временной шаг – 150 с; полное время расчета соответствовало примерно 0.5 года (109 700 итераций).

В результате вычислений были, в частности, получены оценки, сведенные в таблицу. Во втором столбце приведены исходные концентрации парниковых газов (соответствуют примерно 1970-м гг.); в третьем столбце – полученное значение чувствительности, т. е.  $\Delta T_0/\Delta c$ , вычисленное для этой исходной точки; в четвертом – приращение температуры при десятикратном увеличении базовой концентрации.

Базовые концентрации ( $c^*$ ), чувствительность радиационно-равновесной температуры земной поверхности к увеличению содержания парниковых газов и прирост  $\Delta T_0$  радиационно-равновесной температуры  $T_0$  при переходе от  $c^*$  к  $c^* \times 10$

Газ	$c^*$ , ppm	$\Delta T_0/\Delta c$ (К/ ppm)	$\Delta T_0$ при переходе от $c^*$ к $(c^* \times 10)$ , К
$\text{H}_2\text{O}$ (водяной пар)	7750	0.001	—
$\text{CO}_2$	330	0.006–0.007	7.9
$\text{CH}_4$	1.7	0.08–0.09	0.8
$\text{N}_2\text{O}$	0.32	0.7–0.9	1.3

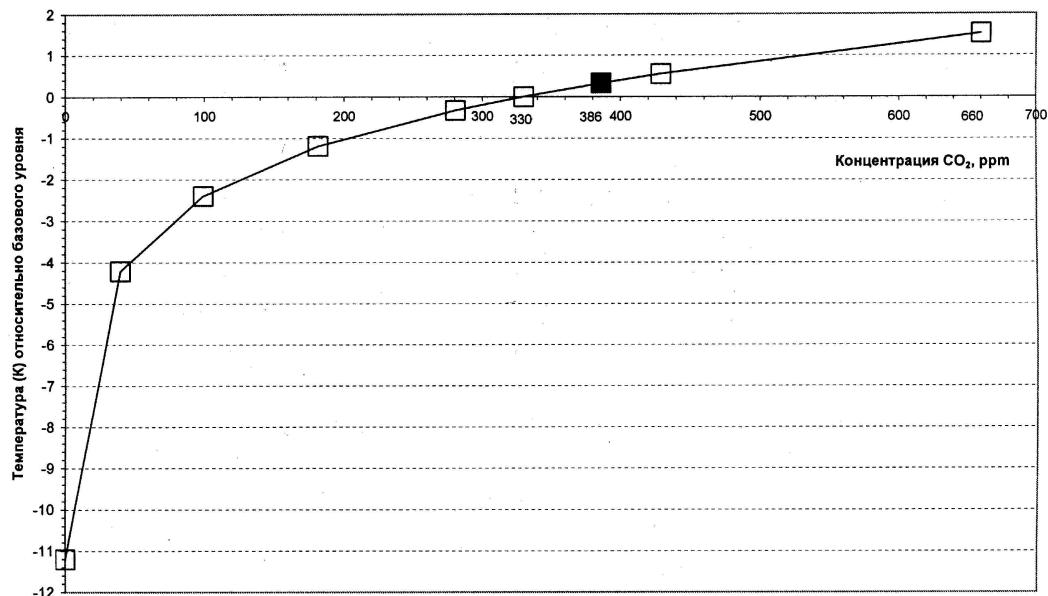


Рис. 3. Изменение радиационно-равновесной температуры в приповерхностном слое относительно базового уровня в зависимости от концентрации  $\text{CO}_2$  (результаты экспериментов с расчетной моделью).

Чтобы более полно охарактеризовать изменение радиационно-равновесной температуры при изменении концентрации  $\text{CO}_2$ , приведем рис. 3. Как видно на рисунке, полному изъятию углекислого газа из атмосферы при сохранении базовых значений концентраций остальных газов соответствует уменьшение температуры более чем на 11 К. Увеличению концентрации  $\text{CO}_2$  от уровня 1970-х гг. (примерно 330 ppm) до современного уровня (386 ppm) соответствует увеличение температуры на  $\approx 0.3$  К. Хотя каждое дальнейшее одинаковое увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  приводит ко все меньшему подъему температуры, это увеличение все же остается заметным. Например, оно составляет примерно 1 К при увеличения современной концентрации до 660 ppm.

Из полученных в работе [Семенов, Попов, 2011] количественных оценок сделаны следующие выводы:

- в формировании базового естественного парникового эффекта основную роль играют водяной пар  $\text{H}_2\text{O}$  и углекислый газ  $\text{CO}_2$ ;
- рост концентрации углекислого газа – главная причина антропогенного усиления парникового эффекта; метан и закись азота имеют меньшее значение;
- потенциал  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  в отношении усиления парникового эффекта был значительным и остается заметным;
- дальнейший рост концентрации  $\text{CO}_2$  будет иметь все меньшее значение в аспекте усиления

парникового эффекта; в отношении метана и закиси азота это замедление пока не существенно; в отношении водяного пара такое замедление проявляется в большей степени, чем для  $\text{CO}_2$ .

К этому можно добавить, что нерадиационные механизмы оттока тепла с земной поверхности в атмосферу и переноса тепла в атмосфере (конвекция, скрытое тепло), по-видимому, будут играть смягчающую, демпфирующую роль: равновесные значения температуры будут меньше и их изменения в ответ на заданное изменение состава атмосферы будут меньше.

**2. Увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере в XX – начале XXI в. было монотонным, т. е. спадов практически не было. А среднегодовая среднеглобальная температура в приповерхностном слое росла немонотонно: при общей тенденции к увеличению были и периоды заметного спада. Поэтому современное потепление не связано с ростом концентрации  $\text{CO}_2$ , а следовательно, и с хозяйственной деятельностью человека.**

На рис. 4 приведены данные с ресурса [<http://cdiac.ornl.gov>], характеризующие среднегодовую концентрацию  $\text{CO}_2$  (ppm) на станции Мауна-Лоа (Гавайи) в 1965–2008 гг. Видно, что концентрация монотонно растет (несмотря на принятие в 1997 г. Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН об изменении климата; этому году на графике соответствует белый

треугольник). Однако среднегодовая среднеглобальная температура в приповерхностном слое, оцененная по данным инструментальных измерений на сети станций мониторинга, ведет себя в этот период времени несколько иначе (см. рис. 5). В 1965–1975 гг. тенденция к росту не наблюдалась. Затем до конца XX в. наблюдался рост температуры, а в самом конце XX и в начале XXI в. опять возникла некоторая «заминка» – тенденция к росту опять не прослеживается. (Заметим, что приведенные на рис. 5 средние значения температуры за предыдущие 11 лет, включая текущий год, пока не убывают (сплошная жирная линия).) А ведь концентрация  $\text{CO}_2$  продолжает заметно расти! Это сопоставление и явное отсутствие корреляции между концентрацией  $\text{CO}_2$  и температурой на этом и нескольких других интервалах времени дали повод некоторым специалистам отрицать парниковые свойства этого газа и в целом его роль в потеплении климата.

Это заключение неправомерно, поскольку процесс изменения климата является многофакторным, что принципиально для подобного анализа. Современные изменения глобального климата  $\Delta$  во времени ( $t$ ) складываются из двух компонентов – естественного ( $\Delta_N$ ) и антропогенного  $\Delta_A$  (выраженного суммой в квадратных скобках):

$$\Delta(t) = \Delta_N(t) + [\Delta_{A \text{ albedo}}(t) + \Delta_{A \text{ GHG}}(t)].$$

Антропогенное изменение может быть связано с изменением альбедо земной поверхности или же атмосферы ( $\Delta_{A \text{ albedo}}$ ), а также с изменением содержания парниковых газов (GHG, greenhouse gases) в атмосфере ( $\Delta_{A \text{ GHG}}$ ).

Антропогенное изменение альбедо может происходить:

- в ходе изменения землепользования, например, из-за преобразования лесных ландшафтов в агроландшафты или в урбанизированные ландшафты;
- вследствие антропогенных аэрозольных выбросов в атмосферу, а также осаждения аэрозолей на земную поверхность (на снег, лед).

Увеличение альбедо будет вызывать охлаждение приповерхностного слоя.

Как уже говорилось, антропогенное изменение содержания парниковых газов в атмосфере происходит вследствие их эмиссии в ходе хозяйственной деятельности. Кроме прямой эмиссии, такое изменение может быть вызвано эмиссией предшественников. Например, сам озон практически не поступает в атмосферу по антропогенным причинам, но поступают его химические предшественники – оксиды азота и летучие органические соединения. Возможны также косвенные физические эффекты. Так, на содержание водяного пара человек напрямую, через эмиссию, не может оказать существенного воздействия – его и так очень много в атмосфере (~1 %). Однако вследствие потепления, вызываемого другими парниковыми газами, содержание которых заметно меняется из-за антропогенных выбросов, испарение с земной поверхности может существенно меняться, что будет приводить к изменению содержания водяного пара в атмосфере.

Естественное изменение ( $\Delta_N$ ) складывается из множества компонентов. В наблюдаемых изменениях климата присутствуют «ненаправленные», циклические составляющие, обладающие специфическими характерными временами и амплитудами. Среди факторов, вызывающих такие циклические изменения, хорошо известны два:

– одиннадцатилетние колебания светимости Солнца (циклически меняется солнечная постоянная);

– изменения параметров земной орбиты с характерными временами порядка  $10^4$  лет и более; они вызывают циклическое перераспределение потока солнечного излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы, в пространстве (в частности, по широте).

К сожалению, естественные факторы, вызывающие изменения земного климата с характерными временами от нескольких десятков до сотен и тысяч лет, пока изучены недостаточно, хотя их наличие признается все более широким кругом специалистов. Так, например, было бы очень важно получить убедительное объяснение колебаний климата с характерным временем примерно 60 лет, которые особенно четко проявляются в высоких широтах Северного полушария, в Арктике [Фролов и др., 2008]. Однако согласия в этом вопросе среди климатологов пока не достигнуто.

Наложение процесса нарастания среднеглобальной температуры вследствие увеличения содержания парниковых газов в атмосфере в последние 100–150 лет и циклических естественных изменений климата, вызванных естественными факторами, приводит к тому, что рост температуры не является монотонным. При общей тенденции к повышению температуры в масштабах сотен лет на меньших интервалах времени возможны стабилизация температуры и даже ее временное уменьшение. Для иллюстрации на рис. 6 изображены графики трех кривых:

$$\begin{aligned} T &= 0.5 \cos(2\pi t/30) + 0.02t; \\ T &= 0.1 \cos(2\pi t/30) + 0.02t; \\ T &= 0.005 \cos(2\pi t/30) + 0.02t. \end{aligned}$$

Они имитируют линейный рост температуры  $T$  со временем  $t$  со скоростью 0.02 градуса в год, сопровожденный синусоидальными колебаниями с периодом 30 лет и амплитудами 0.5; 0.1; 0.005 °C. Заметим, что при малой амплитуде колебаний 0.005 °C мы наблюдаем практически линейный рост температуры со временем. При увеличении амплитуды до 0.02 °C периоды роста перемежаются периодами стабилизации. А при большой амплитуде колебаний 0.5 °C периоды роста температуры сменяются периодами ее временного спада. Все это никак не отменяет общей вековой тенденции к возрастанию температуры со временем. Возможно, именно такой эффект наблюдается в отношении роста глобальной температуры в последнее десятилетие. В [фигуре 5](#) было показано, что эффект роста концентрации  $\text{CO}_2$  в последней трети XX в. может приводить к увеличению температуры на несколько десятых °C. Вклад от увеличения концентраций других

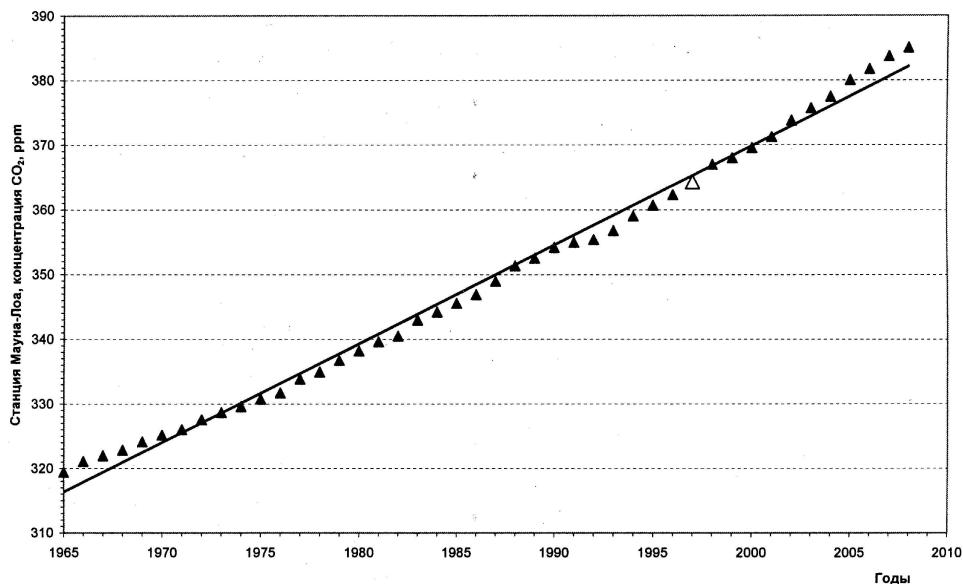


Рис. 4. Концентрация  $\text{CO}_2$  (ppm) в приповерхностном слое атмосферы по данным измерений на ст. Мауна-Лоа [http://cdiac.ornl.gov]; белый треугольник соответствует 1997 г. – году подписания Киотского протокола.

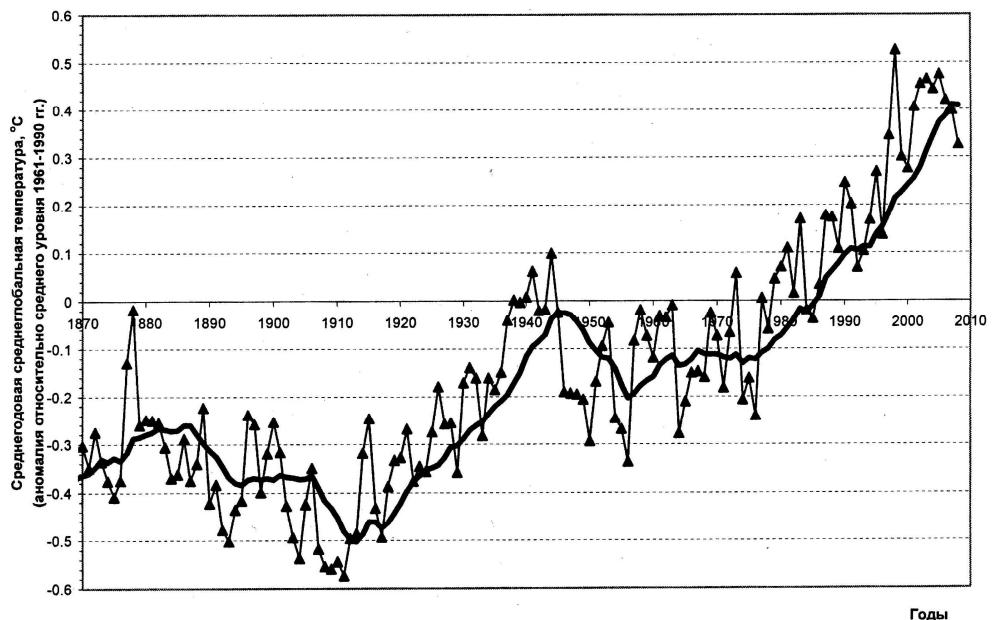


Рис. 5. Среднеглобальная температура,  $^{\circ}\text{C}$  (аномалия по отношению к среднему уровню 1961–1990 гг.): средние за год (треугольники, соединенные обычной сплошной линией) и за 11-летний период, заканчивающийся этим годом (сплошная жирная линия), по данным работы [Jones et al., 2009].

парниковых газов, эмитируемых в ходе хозяйственной деятельности (метан, закись азота и др.), тоже оценивался. Он меньше, чем от  $\text{CO}_2$ , но также замечен. Сейчас следует с не меньшей определенностью охарактеризовать вклады естественных факторов, которые вызывают циклическую изменчивость климата в масштабах десятилетий – столетий, в том числе факторов солнечно-земного взаимодействия и космических факторов.

**3. Антропогенные эмиссии  $\text{CO}_2$  не играют существенной роли в формировании уровня содержания углекислого газа в атмосфере, поскольку  $\text{CO}_2$  достаточно хорошо растворим в океанской воде. Дополнительно поступающий в атмосферу «антропогенный» углекислый газ будет практи-**

**чески весь поглощен океаном. Ведь содержание способного к переходу в атмосферу углерода в Мировом океане примерно в 50 раз больше, чем количество углерода в атмосферном  $\text{CO}_2$ . Роль антропогенных выбросов углекислого газа в изменении его содержания в атмосфере преувеличена. Наблюдаемые изменения – это проявления в большей степени естественной изменчивости, в основном связанной с океаном, который выделяет в атмосферу гораздо больше углекислого газа, чем все мировое хозяйство.**

На рис. 7 представлены запасы углерода в природных резервуарах в Гт(С) и потоки между ними в Гт(С) год $^{-1}$  [Land Use ..., 2000]. Эти числа характеризуют средние значения за период 1989–1998 гг.

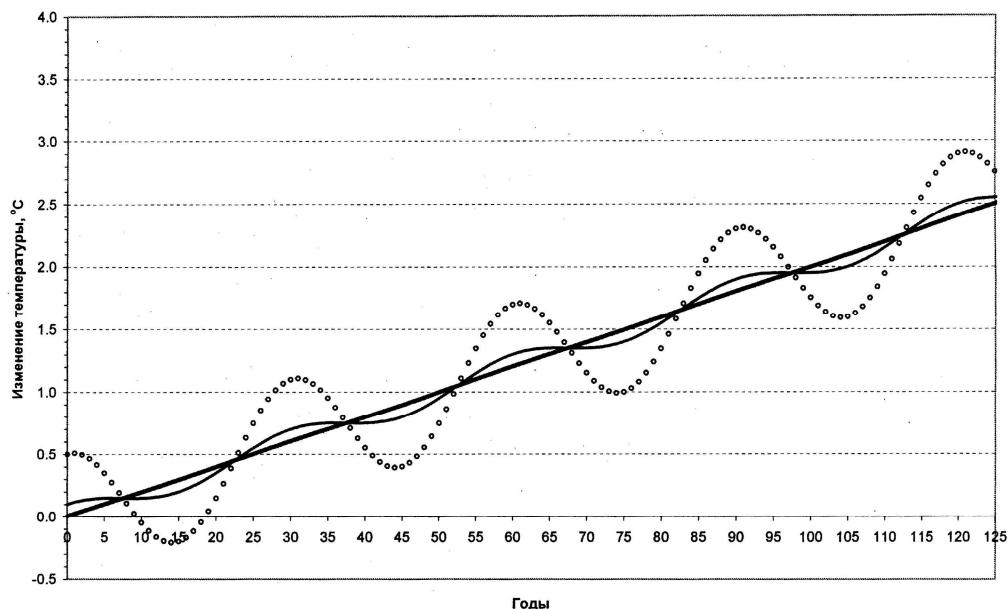


Рис. 6. Эффект наложения линейного роста температуры со скоростью  $0.02^{\circ}\text{C}/\text{год}$  и циклических колебаний разной амплитуды:  $0.005^{\circ}\text{C}$  – жирная прямая;  $0.1^{\circ}\text{C}$  – сплошная кривая;  $0.5^{\circ}\text{C}$  – полые круги.

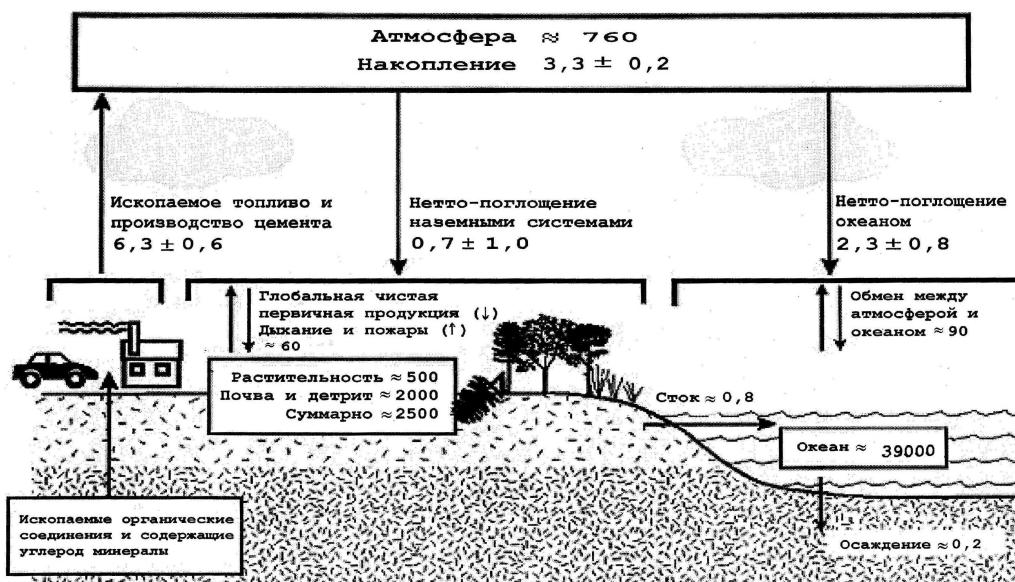


Рис. 7. Глобальные запасы углерода в природных резервуарах в Гт(С) и потоки между ними в Гт(С) год $^{-1}$  [Land Use ..., 2000]: средние значения за период 1989–1998 гг.; оценки базируются на работе [Schimel et al., 1996].

Оценки базируются на работе [Schimel et al., 1996] и, таким образом, на определенной процедуре учета временных трендов. В прямоугольниках приведено содержание углерода в соответствующих резервуарах, а стрелки указывают на потоки углерода.

Указанный на рис. 7 уровень обмена углеродом между атмосферой и океаном –  $90 \text{ Гт(С) год}^{-1}$  – лишь приближенная характеристика потоков, данная с целью показать степень их сбалансированности. На самом деле есть некоторый дисбаланс: поток из атмосферы в океан равен  $\sim 90 \text{ Гт(С) год}^{-1}$ , а обратный поток –  $\sim 88 \text{ Гт(С) год}^{-1}$ . Обратим внимание также на то, что нетто-поток из атмосферы в наземные системы весьма неопределенный, а именно  $0.7 \pm 1.0 \text{ Гт(С) год}^{-1}$ . По этой оценке нельзя даже судить о том, являются ли наземные системы нетто-

источниками или же нетто-стоками углерода. К настоящему моменту в понимании этого вопроса произошли некоторые сдвиги, чего мы в этой статье касаться не будем.

Поток, описывающий выведение углерода из океана в отложения, намного меньше остальных приведенных потоков. Он существенен при анализе исторической эволюции запасов углерода в различных природных резервуарах и потоков между ними, но на временном отрезке в несколько сотен лет его можно не рассматривать, поскольку этот процесс не способен заметно изменить содержание углерода в океане – 39 000 Гт(С).

Заметим, что на рис. 7 единственный антропогенный поток  $\text{CO}_2$  в атмосферу –  $(6.3 \pm 0.6) \text{ Гт(С) год}^{-1}$  – связан со сжиганием ископаемого топлива и производством цемента. На рисунке не приведен поток

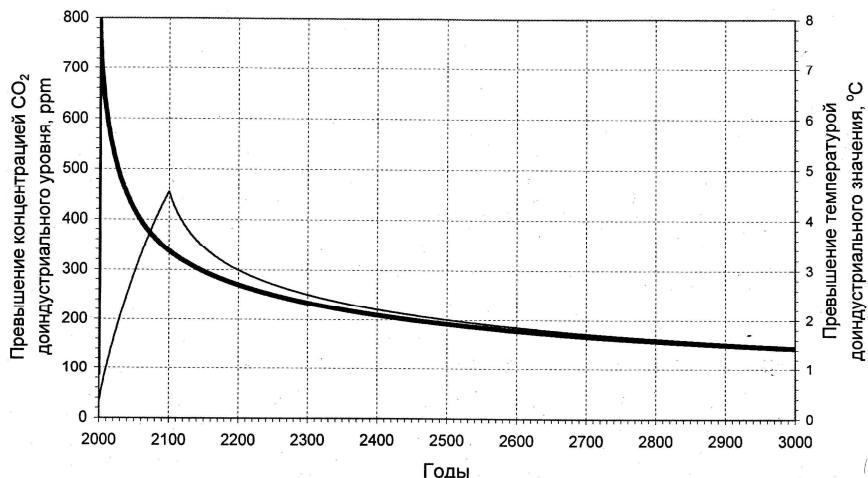


Рис. 8. Изменения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере (ррт, жирная линия) и среднегодовой среднеглобальной температуры в приповерхностном слое ( $^{\circ}\text{C}$ , тонкая линия) по сравнению с доиндустриальным значением при теоретическом сценарии – единовременном выбросе в атмосферу в начале 2000 г. количества диоксида углерода, образующегося при сжигании всех разведанных запасов нефти, газа и угля, и полном прекращении эмиссий, связанных с изменением типа и способов землепользования и производством цемента [Семенов, 2004].

углерода с земной поверхности в атмосферу, связанный землепользованием, изменением землепользования и лесным хозяйством. Однако он существенно меньше приведенного «промышленного».

Поток, связанный с антропогенным изъятием  $\text{CO}_2$  из атмосферы за счет специальных «киотских» проектов (целевое создание лесонасаждений и т. д.), пока весьма скромный. Поэтому приведенная выше цифра ( $6.3 \pm 0.6$ ) Гт( $\text{C}$ ) год $^{-1}$  практически является оценкой антропогенного нетто-потока. Заметим, что этот поток примерно в три раза превышает нетто-поток  $\text{CO}_2$  из атмосферы в океан. Таким образом, утверждение о том, что вклад океана в изменение содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере существенно больше вклада антропогенных эмиссий, неправомерно. Эта иллюзия возникает, если сравнивать антропогенный нетто-поток с брутто-потоком углерода из океана в атмосферу ( $\sim 88$  Гт( $\text{C}$ ) год $^{-1}$ ), что методически неверно.

Что касается почти полного поглощения океаном дополнительных объемов углекислого газа, эмитируемого мировым хозяйством в атмосферу, то в этом вопросе весьма заметную роль играют природа обмена углеродом между атмосферой и океаном и характерные времена процессов. Если, например, поступившая в атмосферу молекула метана за 10–12 лет «погибает» в атмосферных химических реакциях, то углерод, находящийся в составе молекулы  $\text{CO}_2$  в атмосфере, может перейти в океан или в наземные системы за счет процессов поглощения, а затем снова оказаться в атмосфере в результате естественной эмиссии. Это может происходить многократно. Вследствие этого уменьшение массы  $\text{CO}_2$ , дополнительно поступившей в атмосферу, за счет поглощения океаном может занять значительное время. Приведем следующий пример.

Разведанные мировые запасы нефти и угля оцениваются сейчас в 157 и 1000 Гт (экономически эффективные месторождения); освоенные ре-

сурсы газа к 2001 г. составляли 164 трлн м $^3$ , а разведанные и невскрытые – до 530 трлн м $^3$  [Путилов, 2003]. Если принять коэффициент 0.7 кг/м $^3$  для оценки массы газа, то суммарные мировые запасы всех трех видов топлива оцениваются как  $(157+1000+0.7(164+530))=1642.8$  Гт. Будем полагать, что это – чистый углерод, что приведет, естественно, к получению несколько завышенных оценок. Если мгновенно добавить эквивалентное количество  $\text{CO}_2$  в атмосферу, когда система, изображенная на рис. 7, находилась в доиндустриальном состоянии, то после достижения нового равновесия (в предположении о линейности процессов перераспределения углерода по представленным там резервуарам) содержание диоксида углерода в атмосфере увеличится всего на 24 Гт( $\text{C}$ ). Это 4 % от доиндустриального содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере ( $\sim 600$  Гт( $\text{C}$ )). Таким образом, по отношению к доиндустриальной концентрации диоксида углерода – 280 ррт – увеличение составит 11 ррт, что весьма незначительно и не может дать повода для беспокойства в плане усиления парникового эффекта. Однако процесс поглощения океаном будет происходить довольно медленно, и в течение нескольких столетий концентрация  $\text{CO}_2$ , а также температура в приповерхностном слое будут значительно превышать доиндустриальные значения (см. рис. 8).

В заключение этого раздела заметим, что некоторые специалисты говорят о том, что даже в существенном превышении доиндустриального уровня  $\text{CO}_2$  (и других парниковых газов) ничего негативного быть не может. Ведь в геологическом прошлом Земли наблюдались и уровни  $\text{CO}_2$  гораздо выше современных, и гораздо более высокие значения температуры, и никаких природных катастроф это не вызывало. Это справедливо в отношении физического компонента нашей планеты и биосфера. Но человек создал социально-экономическую систему, которая весьма чувствительна к изменению климата. Конечно, ее не было в геологическом прошлом Земли. И утрата,

например, современной береговой инфраструктуры вследствие возможного повышения уровня океана из-за потепления и таяния крупных ледниковых щитов не может рассматриваться как приемлемое последствие изменения глобального климата.

### Заключение

Выше были приведены некоторые распространенные суждения, отрицающие возможность существенного усиления парникового эффекта за счет дальнейшего обогащения атмосферы парниковыми газами, существенную роль CO<sub>2</sub> в глобальном потеплении XX – начала XXI в., роль антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> в формировании уровня содержания углекислого газа в атмосфере. Мы надеемся, что приведенные комментарии в достаточной мере показали, что эти суждения основаны на недоразумениях.

Представляется целесообразным оставить попытки объяснения наблюдаемых изменений глобального климата каким-то одним фактором – антропогенным или же естественным – и сосредоточиться на количественной оценке вкладов каждого из существующих факторов. В том числе необходимо разработать физические основы и модельный аппарат для описания влияния факторов, связанных с солнечно-земными взаимодействиями, и космических факторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андронова Н.Г., Барабанова В.В., Кароль И.Л. и др. Радиационно-фотохимические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 192 с.  
Экология энергетики: Учебное пособие / Под ред. В.Я. Путилова. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 716 с.

Семенов С.М. Парниковые газы и современный климат Земли. М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология», 2004. 174 с.

Семенов С.М., Попов И.О. Сравнительные оценки влияния изменения концентрации диоксида углерода, метана, закиси азота и водяного пара на радиационно-равновесную температуру земной поверхности // Метеорология и гидрология. 2011. № 8. С. 34–44.

Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Шестидесятилетняя цикличность в изменениях климата полярных регионов // Материалы гляциологических исследований. М., 2008. Т. 105. С. 158–165.

Jones P.D., Parker D.E., Osborn T.J., Briffa K.R. Global and hemispheric temperature anomalies – land and marine instrumental records // A Compendium of Data on Global Change / Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge. 2009. doi:10.3334/CDIAC/cli.002.

Land Use, Land-use Change, Forestry. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin, et al. Cambridge University Press, 2000. 377 p.

Schimel D., Alves D., Enting I., et al. Radiative forcing of climate change // Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1996. P. 65–131.

The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN Atmospheric Workstation): 1996 edition // J. Quant. Spectrosc. Radiat. 1998. V. 60, N 5. P. 665–710.

<http://www.spectralcalc.com/>.

<http://cdiac.ornl.gov>.

<sup>1</sup>Институт глобального климата и экологии Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия