

# Почему CO<sub>2</sub> охлаждает поверхность Земли

Д-р Тео Айхтен, Мюнхен; д-р Герхард Штелик<sup>1</sup>, Гану;  
Проф. д.т.н. Вольрат Хопп<sup>2</sup>, Драйайх; д.т.н. Эдмунд Вагнер, Висбаден;  
© Январь 2014

Национальное Управление по Воздухоплаванию и Исследованию Космического Пространства (англ. National Aeronautics and Space Administration, NASA) опубликовало наиболее достоверную диаграмму ежегодных потоков энергии, направленных от Солнца к Земле и от Земли в Космос, отражающую годовой баланс энергии Земли (Рис. 1)<sup>3</sup>. Подобные оценки проводила и Межправительственная Группа Экспертов по Изменению Климата (МГЭИК, англ. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)<sup>4</sup>. Экспериментальные данные по интенсивности энергетических потоков, предоставленные НАСА и МГЭИК, количественно сходны. Более того, некоторые различия численных величин, полученных НАСА и МГЭИК, несущественны для доказательства того, что углекислый газ (CO<sub>2</sub>) способствует охлаждению поверхности Земли.

Рис. 1:



<sup>1</sup> Ответственный автор: д-р Герхард Штелик ([gerhard.stehlik@gmx.de](mailto:gerhard.stehlik@gmx.de)), [GDCh Senior Expert Chemist \(https://www.gdch.de\)](http://www.gdch.de)

<sup>2</sup> [Convenor Working Group Environment Engineering, VDI Darmstadt - Frankfurt am Main \(http://www.vdi.de\)](http://www.vdi.de)

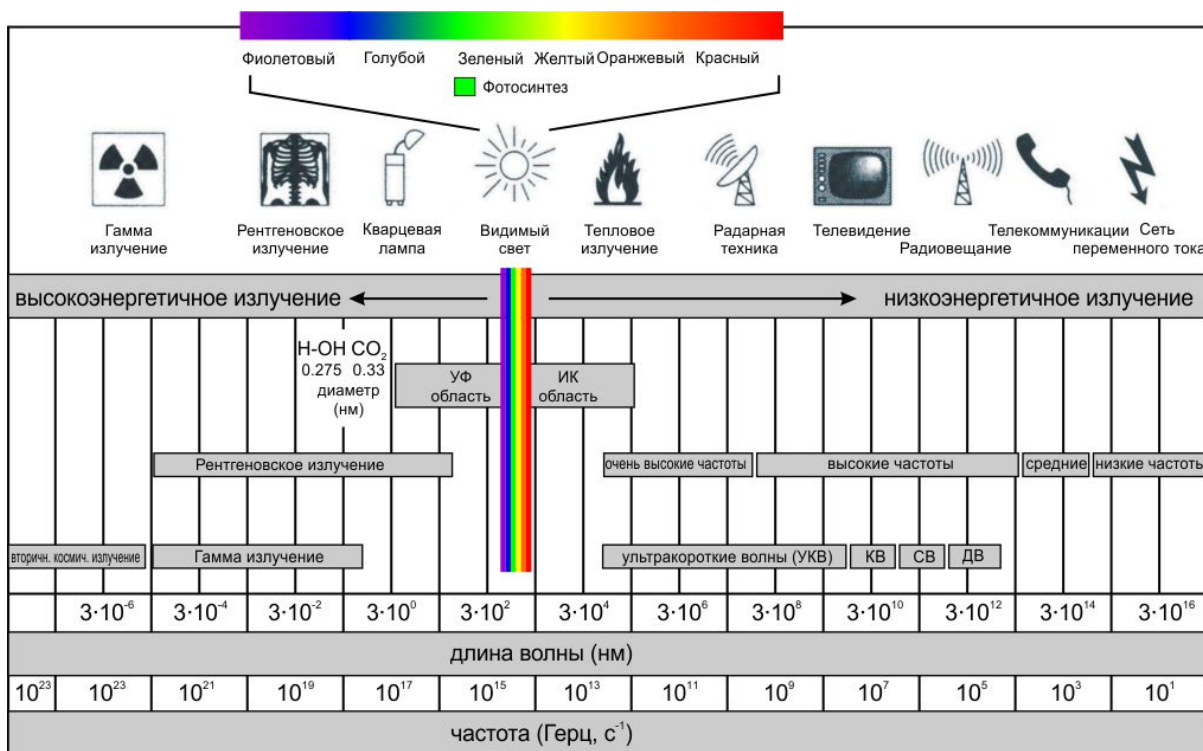
<sup>3</sup> [NASA - National Aeronautics and Space Administration, USA http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/47/NASA\\_Earth\\_energy\\_budget.gif](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/47/NASA_Earth_energy_budget.gif)

<sup>4</sup> IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Frequently Asked Question 1.1 „What Factors Determine Earth’s Climate“ Page 94 [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Желтые и оранжевые стрелки на Рис. 1 показывают различные составляющие потока солнечного излучения (в процентах), достигающего Земли. Часть потока отражается атмосферой (6%), облаками (20%) и поверхностью Земли (4%) (три желтые стрелки, 6% + 20% + 4% = 30%). Другая часть потока (оранжевые стрелки) поглощается верхними слоями атмосферы (16%), облаками (3%) и поверхностью Земли (16% + 3% + 51% = 70%). Любое поглощение солнечного излучения атмосферой или земной поверхностью является фактором нагрева Земли. Тепловое излучение Земли (красные стрелки) направлено исключительно вверх.

Очевидно, что Земля нагревается Солнцем. Солнечный свет является электромагнитным излучением, и его положение в электромагнитном спектре показывает Рис. 2. Также очевидно, что Земля не может нагревать себя сама. Это справедливо и для химических соединений, из которых состоит Земля, никакое вещество не может нагреваться само по себе<sup>5</sup>. Это касается, в том числе, и CO<sub>2</sub>. Если CO<sub>2</sub> нагревается сам и нагревает среду, то это означает, что энергия должна быть подведена извне.

Рис. 2:



Спектр электромагнитного излучения в нанометрах (нм)

Единственным фактором нагрева является Солнечное излучение. В противоположность этому, охлаждение Земли не сводится исключительно к излучению. В охлаждении Земли важную роль играют процессы переноса тепла и испарения воды. Таким образом, процесс охлаждения является более сложным. На

<sup>5</sup> Может показаться, что белый фосфор может разогреваться сам по себе вплоть до самовоспламенения. На самом деле температура возрастает в результате преобразования химической энергии белого фосфора и кислорода в тепло. Это является правилом для любого процесса горения.

Рис. 1 показаны три охлаждающих потока энергии (красные стрелки), направленные от поверхности Земли в Космос.<sup>6</sup>

Охлаждение Земли начинается на поверхности, где можно выделить три основных охлаждающих тепловых потока. Первый поток (7 %) соответствует механическому переносу тепла, в том числе, восходящими потоками воздуха. Второй и самый важный тепловой поток (23 %) представляет собой охлаждение посредством испарения воды. Кроме того, сама поверхность тоже является источником теплового излучения (21 %). Это излучение можно разделить на две составляющие: излучение в атмосферу (15 %) и излучение непосредственно в космическое пространство (6 %). Сумма всех трех охлаждающих потоков (51 %) на поверхности равняется нагреву поверхности Солнцем.

За вычетом трех отражений (30 %), тепловые потоки Солнечного излучения всегда направлены вниз (70 %) к поверхности Земли. Тепловое излучение с поверхности Земли всегда направлено вверх: 64 % в атмосферу и 6 % в космическое пространство. Не существует нисходящего теплового излучения атмосферы. В тоже время, именно такой направленный вниз поток теплового излучения требуется для реализации парникового эффекта в +33 °С.

**Восходящий поток теплового излучения от поверхности в атмосферу (15 %, позиция 2) является ключевым аргументом того, что CO<sub>2</sub> охлаждает поверхность Земли. Поскольку это тепло уходит от поверхности Земли, то оно не может являться фактором ее нагрева.**

Далее обсудим различные свойства важнейших составляющих атмосферы (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>). На основе этих свойств и будет установлен охлаждающий эффект CO<sub>2</sub>.

Существуют несколько важных научных правил, описывающих потоки энергии. Один из таких законов – закон сохранения энергии<sup>7</sup>. Этот закон действует для Земли, но не для Солнца, как производителя энергии, и не для космического пространства, как поглотителя энергии неограниченной емкости. Таким образом, этот закон действует только для энергетического обмена между поверхностью и атмосферой Земли. Другой фундаментальный научный закон утверждает, что материалы становятся холоднее, когда выделяют энергию, и теплее, когда они получают энергию. Энергия излучения может быть преобразована в тепловую энергию только при взаимодействии с материей. Второй Закон Термодинамики утверждает, что тепловая энергия не может быть полностью преобразована в полезную энергию («Работу»). Все эти законы важны только для горизонтального обмена энергии на Земле, но не для восходящих и нисходящих энергетических потоков между Солнцем, Землей и космическим пространством, показанных на Рис. 1.

Нагрев посредством излучения возможен только в том случае, если излучение поглощается, а не просто проходит сквозь вещество, как в случае прозрачных материалов, таких как стекло или вода. Основные компоненты атмосферы, азот (N<sub>2</sub>) и кислород (O<sub>2</sub>), пропускают почти все нисходящее солнечное излучение<sup>8</sup> к

---

<sup>6</sup> Стрелка 2 на Рис. 1 является исключением.

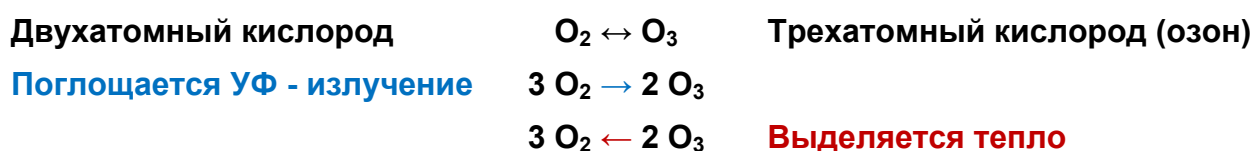
<sup>7</sup> Горизонтальные потоки энергии параллельно поверхности Земли, например, охлаждение участка поверхности холодным ветром или его нагрев теплым ветром, не вносят никакого вклада в энергетический баланс Земли, поскольку для этих случаев выполняется Закон Сохранения Энергии.

<sup>8</sup> Исключением является озоновый процесс (стрелка 3 на Рис. 1) с участием ультрафиолетового излучения Солнца.

поверхности Земли и позволяют восходящим потокам теплового излучения земной поверхности уйти в космическое пространство. Эти газы не нагреваются ни солнечным излучением, ни тепловым излучением Земли, поскольку не могут их поглощать. Излучение и поглощение любого излучения являются движением (вибрацией, вращением) определенной химической связи, делающимся более интенсивным (теплым) при поглощении излучения или менее интенсивным (холодным) при испускании.  $N_2$  и  $O_2$  не могут поглощать или испускать излучение, поскольку они обладают нулевым дипольным моментом (см. ниже).

Тем не менее, как показывает Рис. 1, два потока солнечного излучения (16 % и 3 %) поглощаются атмосферой и облаками. Возникает вопрос, какие именно молекулы поглощают это излучение?

Основной поток поглощаемой энергии (16 %, стрелка 1 на Рис. 1) связан с ультрафиолетовым (УФ) излучением Солнца. Оно поглощается молекулами кислорода ( $O_2$ ) и превращается в тепло в результате следующего озонного процесса:



После озонного процесса молекулы  $O_2$  и  $O_3$  остаются в том же неизменном виде, что и до него. Это называется химическим равновесием. Таким образом, озонный процесс – это не что иное, как стопроцентное превращение энергии ультрафиолетового излучения Солнца в тепловую энергию атмосферы. Озонный процесс не подпадает под формулу Планка для абсолютно черного тела.

Поток солнечного излучения, поглощаемый облаками (3 %), представляет собой инфракрасное излучение (ИК), задерживаемое водяными каплями облаков. Вода в жидкой форме имеет более высокую плотность, поэтому поглощение ИК излучения молекулами воды в жидкой форме гораздо сильнее, чем в газообразной форме.

Теперь вернемся к ключевой аргументации охлаждающей роли  $CO_2$ . Это требует более пристального взгляда на поток теплового излучения Земли в атмосферу (стрелка 2 на Рис. 1). Этот поток существует в силу того, что у углекислого газа коэффициент излучения выше, чем коэффициент поглощения теплового излучения поверхности Земли.

Выше было отмечено, что Земля, а, следовательно, и все вещества на Земле, не могут нагреваться сами по себе. В противоположность этому, практически все материалы могут охлаждаться в соответствии с законом Ньютона-Рихмана, путем необратимого излучения тепла в космическое пространство. Необходимо отметить, что существует несколько исключений из данного правила. Такими исключениями, в частности, являются симметричные молекулы азота ( $N_2$ ) и кислорода ( $O_2$ ), составляющие 97 % атмосферы. Указанные молекулы обладают нулевым

электрическим дипольным моментом<sup>9</sup>. Как следствие, их термическое движение не способно ни излучать, ни поглощать электромагнитные волны, будь то солнечный свет или тепловое излучение Земли. Таким образом, атмосфера на 97 % не может охлаждаться сама по себе.

Тем не менее, в приземном слое атмосферы наблюдается ночное понижение температуры. Причиной является то, что ночью поверхность Земли сильно охлаждается посредством теплового излучения. Атмосфера, в свою очередь, косвенно охлаждается от контакта с поверхностью.

В то же время закон Ньютона-Рихмана применим к асимметричным трехатомным молекулам газов  $H_2O$  и  $CO_2$ , обладающими ярко выраженным электрическим дипольным моментом, и потому весьма активными в инфракрасном диапазоне (см. Рис. 3). Образно говоря, неактивная в ИК диапазоне масса атмосферы (97 %) смешана с «ИК активным нормальным земным веществом» (~ 2 %), что делает атмосферу «открытой для охлаждения в космическое пространство». Численная величина 2 % является суммой средних концентраций  $H_2O$  (0 ~ 4 %) и  $CO_2$  (0.04 %).  $H_2O$  and  $CO_2$  могут быть отнесены к «нормальным земным веществам», потому что они охлаждаются путем излучения. Метеорологические измерения обычно производятся на высоте около 2 метров, где главную роль играет косвенное охлаждение воздуха за счет контакта с поверхностью земли. На такой высоте прямое охлаждение воздуха за счет теплового излучения  $H_2O$  и  $CO_2$  оказывается несущественным вследствие их низкой концентрации (~ 2 %).

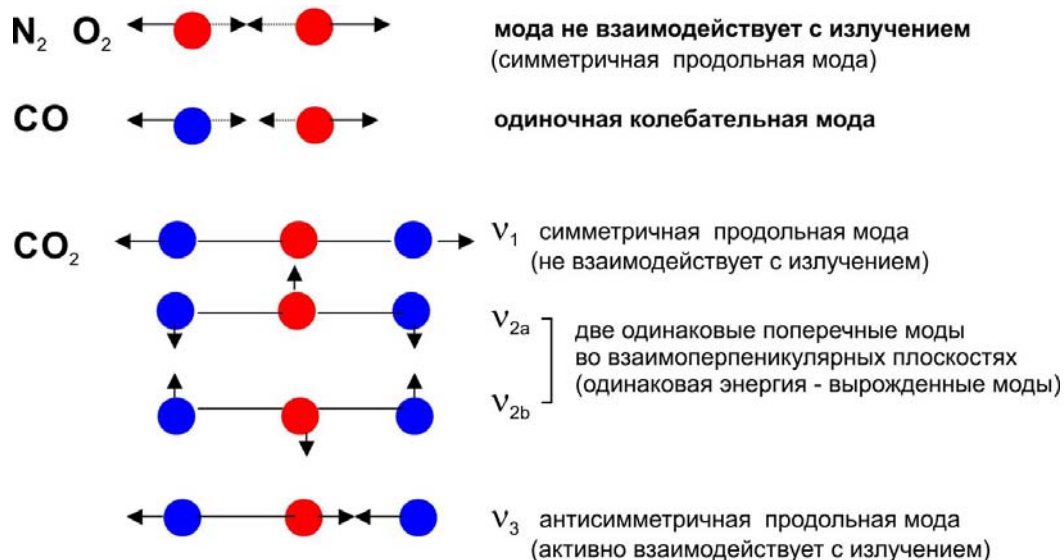
Однако ситуация выглядит иначе, если рассматривать энергетический баланс для всего атмосферного столба, вплоть до высоты турбопаузы (~ 75 км). В этом отношении, 2 % примеси  $H_2O$  и  $CO_2$  оказывается достаточным для охлаждения всей атмосферы таким образом, чтобы она становилась холоднее и холоднее с высотой по мере приближения к космическому пространству. В то время как атмосфера охлаждается всем своим объемом вплоть до высоты ~ 75 км, область охлаждения поверхности Земли ограничена несколькими сантиметрами в глубину. Это объясняет значительную охлаждающую способность атмосферы (63 %) и относительно слабую охлаждающую способность (6 %) поверхности Земли (включая как материки, так и океаны).

В отношении потока солнечного излучения можно отметить, что подвод тепла в атмосферу осуществляется не только косвенно через нагрев поверхности Земли (51 %), но и непосредственно путем прямого поглощения атмосферой солнечного излучения (16 % + 3 % = 19 %). Таким образом, на долю атмосферы приходится 70 % всей солнечной энергии, что намного больше, чем получает земная поверхность (51 %). Тем не менее, атмосфера оказывается холоднее чем поверхность Земли! Анализируя охлаждающую способность всей Земли (70 % общего потока солнечного излучения) можно отметить, что охлаждающая способность атмосферы (64 %) на порядок превышает охлаждающую способность нескольких сантиметров приповерхностного слоя Земли (6 %).

---

<sup>9</sup> Химическая связь обладает электрическим дипольным моментом тогда, когда она связывает разные атомы. При этом один из атомов отбирает часть положительного электрического заряда у другого, который таким образом приобретает точно такой-же по величине отрицательный заряд. Молекула в целом остается электрически нейтральной. Тепловое движение такой химически связанной пары атомов, обладающих дипольным моментом, вызывает электромагнитное тепловое излучение.

Рис. 3:<sup>10</sup>



Возвращаемся к нашему ключевому аргументу. Оранжевая стрелка (позиция 2) на Рис. 1 представляет охлаждение посредством теплового излучения (15 %) с поверхности Земли в атмосферу. Однако, ни  $N_2$ , ни  $O_2$  не способны поглотить это тепловое излучение. Это могут сделать только  $H_2O$  и  $CO_2$ , присутствующие в атмосфере лишь в очень малых концентрациях. Охлаждение посредством теплового излучения полностью противоречит гипотетическому «парниковому эффекту», в соответствии с которым должен существовать дополнительный нагрев Земли на +33 °C за счет так называемых «парниковых газов».

Более того, самый важный поток теплового излучения из атмосферы в космическое пространство (64 %), доминирующий в общем тепловом балансе Земли, – это тепловое излучение самой атмосферы, показанное широкой красной стрелкой (стрелка 4 на Рис. 1), которое транспортирует в космическое пространство всю энергию, полученную атмосферой. Рис. 1 показывает резкое начало стрелки постоянной толщины где-то в атмосфере. В действительности подобного резкого начала не существует, скорее толщина линии, отображающая интенсивность охлаждения, должна плавно увеличиваться с высотой вплоть до 75 км. Влияние гравитации на плотность и температуру атмосферы соответствует снижению температуры на 0.6 °C - 1 °C каждые 100 метров высоты. Однако, в действительности температура атмосферы снижается с высотой быстрее.

Как может  $CO_2$  выступать в роли самого важного охладителя Земли, если он присутствует в атмосфере в очень низкой концентрации (~ 0.04 %)? На высоте более 12 км вода конденсируется в лед, и ее концентрация в газовой фазе падает до 0.001 %. Между 12 км и 75 км излучение тепла в космическое пространство производится практически только за счет  $CO_2$ .

Более того, вывод, что  $CO_2$  является важнейшим охладителем, подтверждается не только на основе рассмотрения потоков энергии между Солнцем, Землей и Космосом, но и исключительной активностью  $CO_2$  в инфракрасном диапазоне. Благодаря высокому электрическому дипольному моменту C=O связей спектр

<sup>10</sup> <http://www.heliosat3.de/e-learning/remote-sensing/Lec7.pdf>

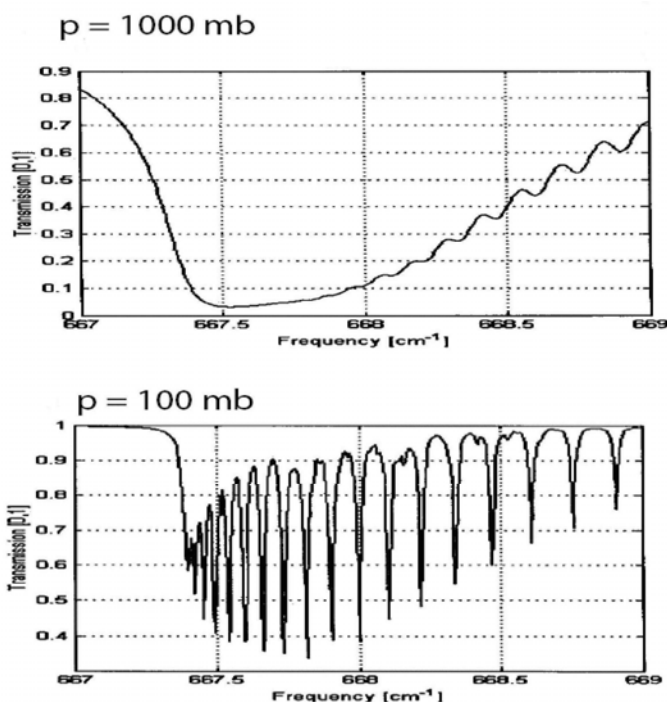
углекислого газа характеризуется выраженными ИК линиями при 15 мкм и 10 мкм (Рис. 4).

Сделанная на основании недобросовестных физических предположений подмена охлаждающего эффекта  $\text{CO}_2$  на нагревающий, так называемый парниковый эффект, является одной из самых больших ошибок ученых.

Самым важным фактором увеличения излучения тепла «**всей** атмосферой» с высотой является сильная зависимость ИК активности  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  от давления. При низком давлении в верхних слоях атмосферы ИК-линии являются узкими и интенсивными. В условиях высокого давления приповерхностных слоев атмосферы ИК-линии становятся менее интенсивными и значительно более широкими. За счет этого тепловое излучение с длинами волн, соответствующими краям уширенных ИК-линий, проходит сквозь разряженные высокие слои атмосферы без поглощения.

Рис. 4:<sup>11</sup>

*Атмосферное давление оказывает сильное влияние на спектры поглощения газов (при повышении давления линии уширяются). Это представляет большую проблему при расчетах пропускающей способности атмосферы для инфракрасного излучения при изменении ее состава, давления и температуры.*



*Пример спектра пропускания в высоком разрешении для одного метра воздуха с типичной концентрацией  $\text{CO}_2$  при атмосферном давлении (1000 мбар) и пониженном давлении (100 мбар).*

Дальнейшие детали обсуждаются в этой книге.<sup>12</sup>

<sup>11</sup> [http://irina.eas.gatech.edu/EAS8803\\_Fall2009/Lec6.pdf](http://irina.eas.gatech.edu/EAS8803_Fall2009/Lec6.pdf)

<sup>12</sup> Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 15, Nr. 256, Hopp, V., Stehlik, G., Thüne, W. u. Wagner, E., Atmosphäre, Wasser, Sonne, Kohlenstoffdioxid, Wetter, Klima, Leben - Einige Grundbegriffe. ISBN: 978-3-18-325615-0.