

Проблема двуокиси углерода

Ф. Нихаус

ВВЕДЕНИЕ

Решения относительно систем производства энергии в будущем следует принимать с учетом имеющихся возможностей. Поэтому необходимо иметь информацию относительно риска использования этих систем и пользы от них. Проблема риска, в связи с использованием ядерной энергии, подробно обсуждалась; в этом обсуждении ядерная энергетика играла роль символа, на примере которого обсуждались проблемы общего технологического развития [1]. Однако, для того чтобы найти рациональные решения, необходимо рассмотреть ядерную энергетiku в перспективе, то есть в сравнении с пользой и риском других альтернатив. Одним из видов риска, который может иметь глобальное значение в течение длительного времени, является выделение двуокиси углерода (CO_2) в результате сжигания ископаемого топлива.

ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ CO_2 В АТМОСФЕРЕ

За прошедшее столетие наблюдалось постоянное увеличение концентрации углерода в атмосфере. Наиболее надежные систематизированные данные были получены в Мауна Лоа (Гавайские о-ва) и охватывают период начиная с 1958 года. Они изображены (частично) на обложке этого выпуска бюллетеня. Сезонные колебания вызваны естественным циклом роста и разложения растений, изменениями растворимости в поверхностных слоях воды океана и колебаниями в выделениях этого газа в результате производства энергии. Поэтому максимальные колебания происходят в весенний период. Эти колебания снижаются в зависимости от высоты и увеличиваются по мере продвижения на север. На рисунке 1 приводятся данные измерений глобальной концентрации CO_2 повсеместно [2]. Увеличение концентрации в южном полушарии происходит с задержкой в 2 года после увеличения концентрации в северном.

Ранее полученные данные менее надежны. Однако они свидетельствуют, что уровень концентрации CO_2 в атмосфере до начала эры промышленного развития составлял около 295 ± 5 част. на млн. по объему. Таким образом, за период с начала индустриализации произошло увеличение концентрации более чем на 10%.

В ЧЕМ СОСТОИТ ПРОБЛЕМА?

Если говорить о приводимых в данной статье уровнях, то CO_2 не является токсичным и его не следует смешивать с высокотоксичной окисью углерода. Напротив, CO_2 способствует увеличению роста растений, поскольку он обеспечивает вместе

Д-р Нихаус является руководителем проекта (Объединенный проект МАГАТЭ/МИПСА по оценке риска).

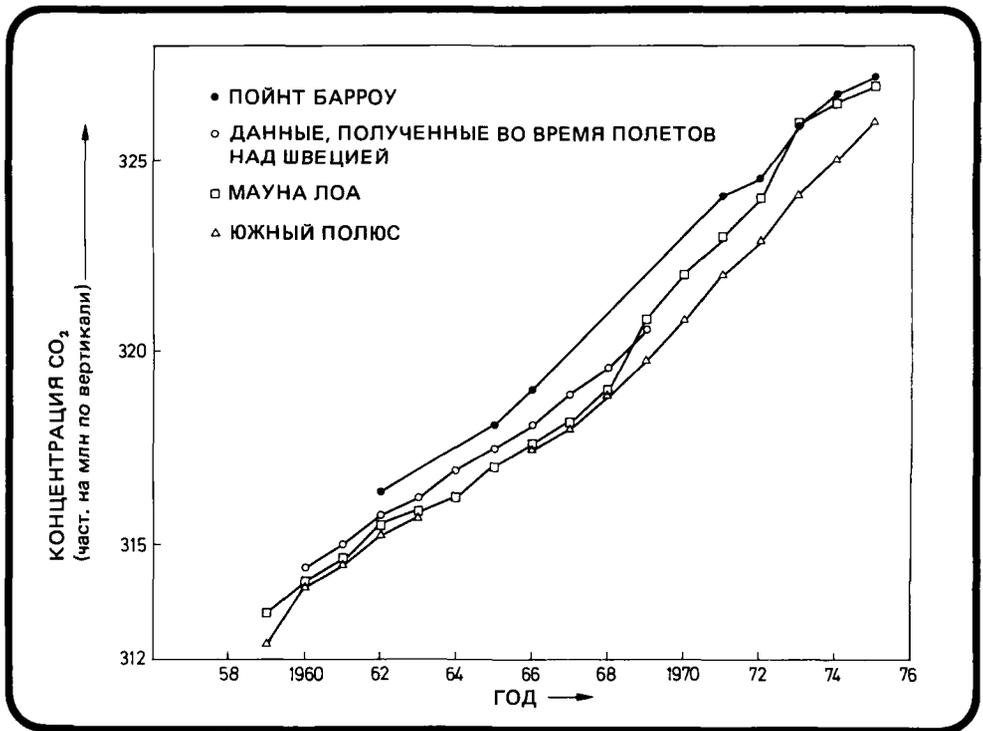
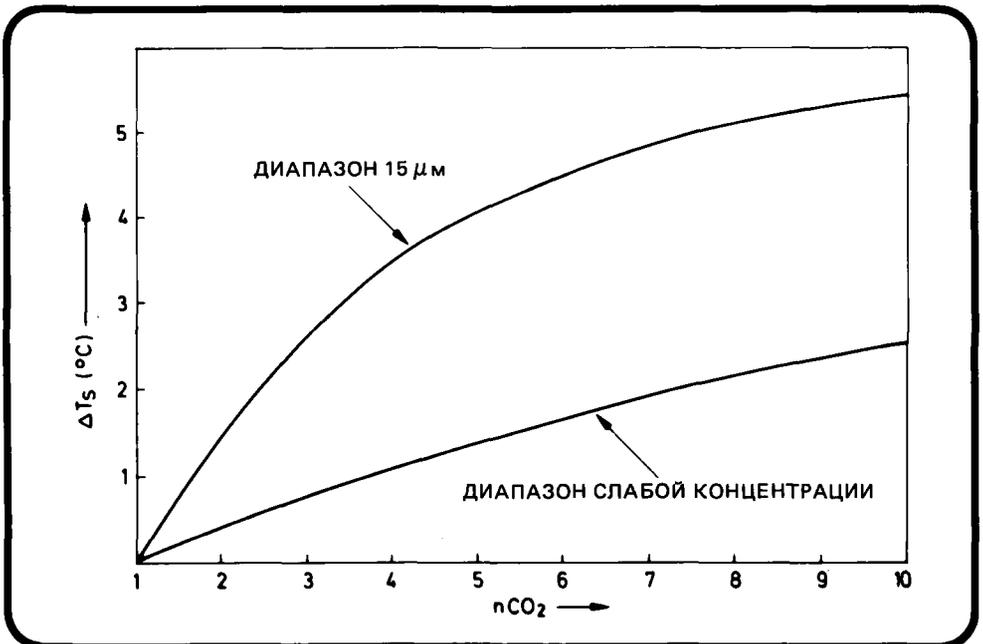


Рисунок 1. Глобальное увеличение концентрации CO₂ в атмосфере [2].

Рисунок 2. Температурный эффект увеличения концентраций CO₂ в атмосфере. Оба вклада составляют 1,98°С на удвоение. (2 пCO₂ = 640 част. на млн.) [3].



с водой основные материалы, необходимые для фотосинтеза. Основной риск, связанный с увеличением концентрации CO_2 в атмосфере, состоит в воздействии CO_2 на радиационный баланс атмосферы, в так называемом "тепличном" эффекте.

Поскольку коэффициент отражения атмосферы (альbedo) составляет около 29%, теоретически равновесную температуру можно принять за -19°C , или на 34°C меньше, чем наблюдаемая средняя, которая составляет приблизительно $+15^\circ\text{C}$. Эта важная разница, которая необходима для жизни на земле, вызвана тем фактом, что атмосфера создает окно (48% прозрачности) для входящей солнечной радиации, но поглощает (20% прозрачности) инфракрасные лучи, излучаемые с поверхности земли. Таким образом атмосфера является как бы одеялом, служащим для сохранения тепла на земном шаре. Этот эффект подобен той роли, которую играют стеклянные крыши теплиц, — отсюда и его название. Он происходит главным образом за счет испарения воды и выделения двуокиси углерода.

Для того, чтобы определить влияние изменения концентрации двуокиси углерода, использовались модели, имитирующие поведение атмосферы. Все расчеты хорошо согласуются в том, что увеличение температуры, вызванное удвоением концентрации CO_2 в атмосфере, будет находиться в пределах около 2°C и 3°C , в зависимости от предпосылок, касающихся других параметров (фиксированная высота верхней границы облака или фиксированная температура верхней границы облака). На рисунке 2 приводится более низкая зависимость температуры от концентрации CO_2 [3]. На этом рисунке представлен вклад двух диапазонов поглощения, причем один выравнивается при более высоких концентрациях. До момента удвоения концентрации CO_2 в атмосфере кривая остается почти линейной.

Эти данные относятся к температурным изменениям в более низких слоях тропосферы. На рисунке 3 показано, что изменение температуры уменьшается в зависимости от высоты и на высоте около 10 км становится даже отрицательным [4]. Эта зависимость в прошлом приводила к серьезным ошибкам, поскольку отмечалось [5], что к настоящему времени концентрация CO_2 уже должна была бы поглощать 98,5% излучения в соответствующих диапазонах. Это приводило к неправильному выводу о том, что эффект CO_2 может быть только незначительным. Однако на рисунке 3 показано, что хотя это и справедливо для атмосферы в целом, в более низких слоях тропосферы происходит значительное нагревание, потому что при удвоенной концентрации CO_2 требуется лишь половина того расстояния, которое необходимо для такой же степени поглощения.

Данные, приведенные в таблице 2, справедливы для низких и средних широт. Более стабильные условия в полярном и субполярном районах требуют, чтобы для этих широт учитывался коэффициент усиления около 3 [6].

ЧТО ЯВЛЯЕТСЯ ПРИЧИНОЙ УВЕЛИЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА?

Несколько сот миллионов лет назад солнечная энергия накапливалась с помощью фотосинтеза в форме органических соединений. В результате сгорания ископаемого топлива эта энергия выделяется главным образом за счет превращения угле-

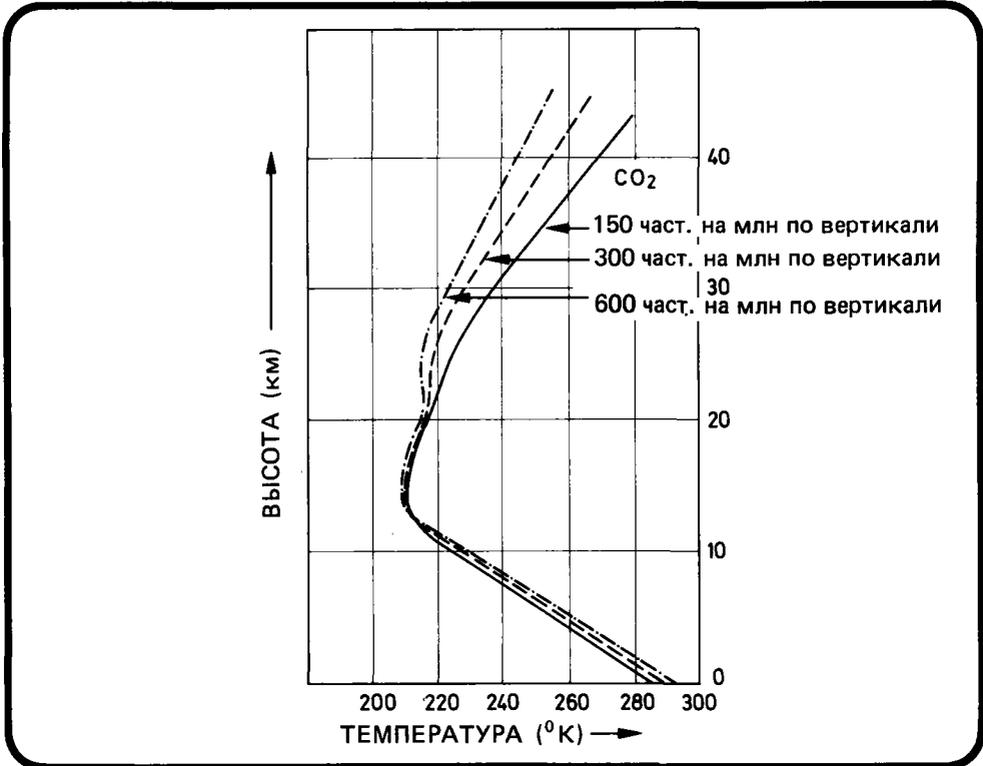
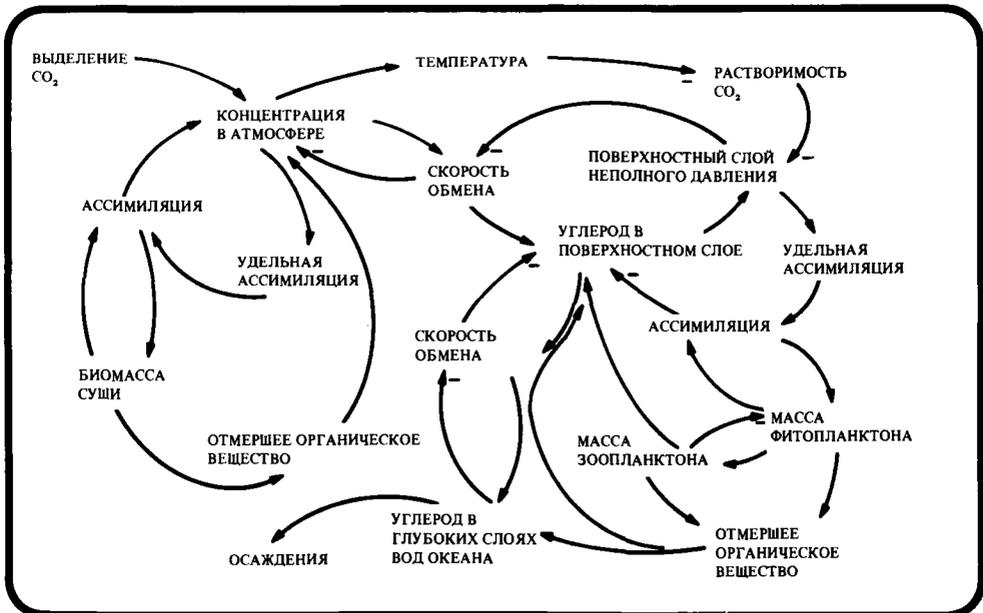


Рисунок 3. Вертикальные атмосферные температурные профили для различных концентраций CO_2 [4].

Рисунок 4. Петлевая структура цикла углерода.



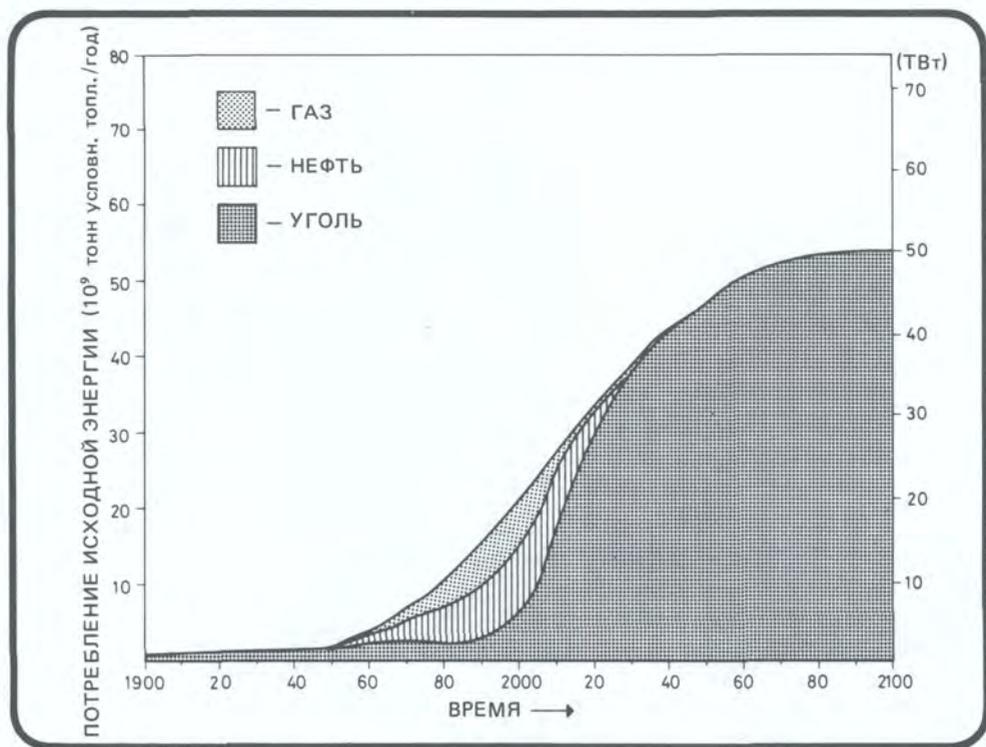
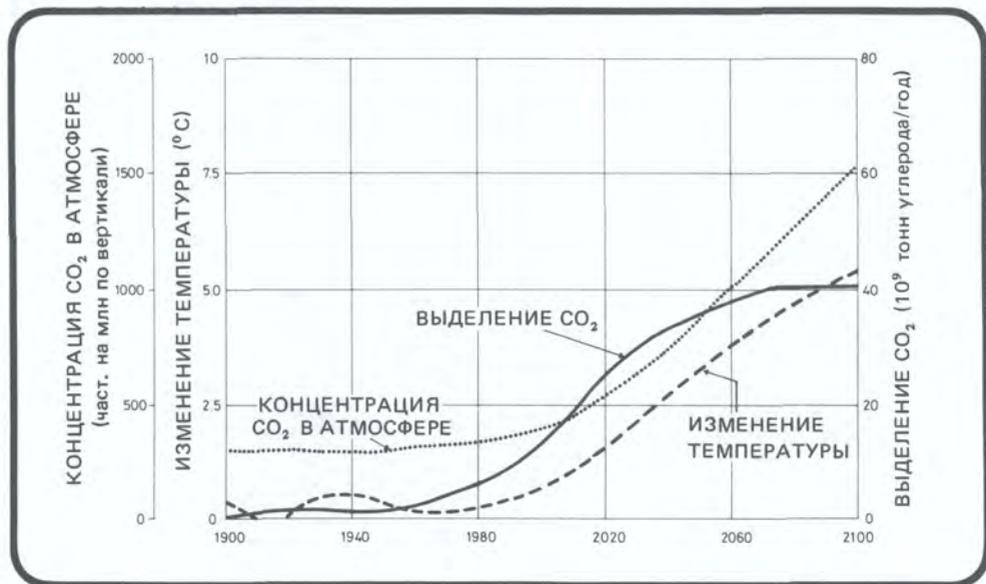


Рисунок 5. Сценарий производства 50 ТВт энергии с помощью ископаемого топлива.

Рисунок 6. Воздействие сценария производства 50 ТВт энергии с помощью ископаемого топлива на CO_2 .



рода в двуокись углерода. Диапазон удельного превращения колеблется от 3,4 т двуокиси углерода на тонну условного топлива при использовании лигнита до 1,9 т CO_2 на тонну условного топлива при использовании природного газа. Эти данные можно использовать для суммарного подсчета выхода CO_2 . В настоящее время в атмосферу выбрасывается приблизительно 20×10^9 т CO_2 в год и общее количество, выделенное с 1850 года, составляет около 500×10^9 т CO_2 . Двуокись углерода в атмосфере (около 2600×10^9 т) находится в постоянном состоянии обмена с углеродом, накопленным в морской воде (сто метров поверхностного слоя накапливает около 840×10^9 т углерода; в глубоких морских слоях содержится около 36000×10^9 т углерода и 830×10^9 т в органическом веществе) и с углеродом, накопленным в биомассе на суше (около 1500×10^9 т углерода). Исходя из их молекулярных весов, 12 г углерода эквивалентны 44 г двуокиси углерода. Поскольку около 50% выделенного CO_2 остаётся в атмосфере, то предполагается, что большая часть оставшегося газа поглощается водами мирового океана. Это было подтверждено несколькими расчетами моделей глобального цикла углерода. Однако последние измерения концентраций углерода-13 в кольцах древесины, по-видимому, указывают на то, что кроме этих выделений CO_2 в результате сгорания ископаемого топлива, приток CO_2 в атмосферу возможно произошел в результате крупномасштабной разработки лесных массивов. Эти расчеты являются не вполне надежными, поскольку измерения проводились по нескольким стволам деревьев, данные по лесоразработкам являются только экстраполяцией по очень ограниченному району и не известен процесс, который мог бы объяснить дополнительное поглощение CO_2 мировым океаном, в чем и должна лежать причина.

Поэтому приводимые ниже расчеты основаны на модели [7] глобального цикла углерода, которая должна предполагать, подобно другим моделям [8], небольшое увеличение роста растений благодаря более высоким темпам усвоения CO_2 растениями.

УРОВНИ КОНЦЕНТРАЦИИ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА В БУДУЩЕМ

Используемая здесь модель рассматривает глобальный цикл углерода как он изображен на рисунке 4 в виде петлевой структуры. Эта модель проверялась историческими данными по увеличению концентрации CO_2 , сравнительным разбавлением изотопной концентрации (эффект Зюсса) углерода-14/углерода-12, и данными об уменьшении углерода-14 в атмосфере после прекращения испытаний атомной бомбы в атмосфере.

В качестве исходных данных для вычисления предполагаемых концентраций двуокиси углерода в будущем и температурных изменений в результате осуществления той или иной стратегии в области энергии, в модели могут затем быть использованы различные сценарии энергетики будущего.

Давайте рассмотрим два сценария, при использовании которых в конце следующего столетия общая норма потребления энергии составит 50 тераватт (50000000 МВт). Для населения земного шара в 10 млрд. человек такой сценарий обеспечит среднее потребление энергии на душу населения, равное потреблению

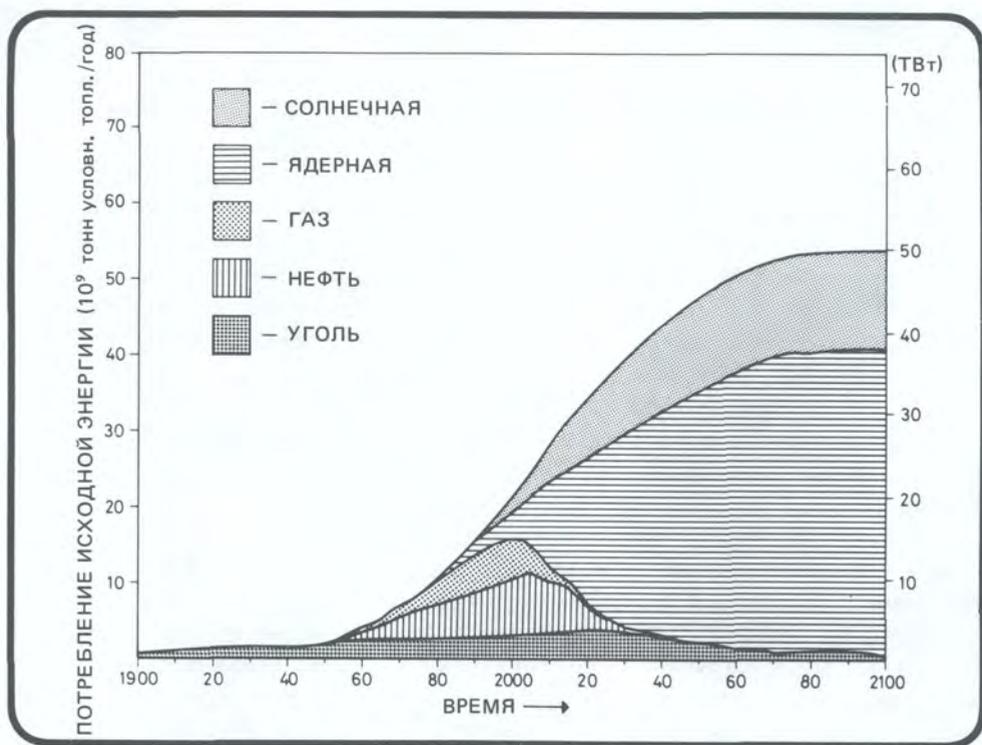
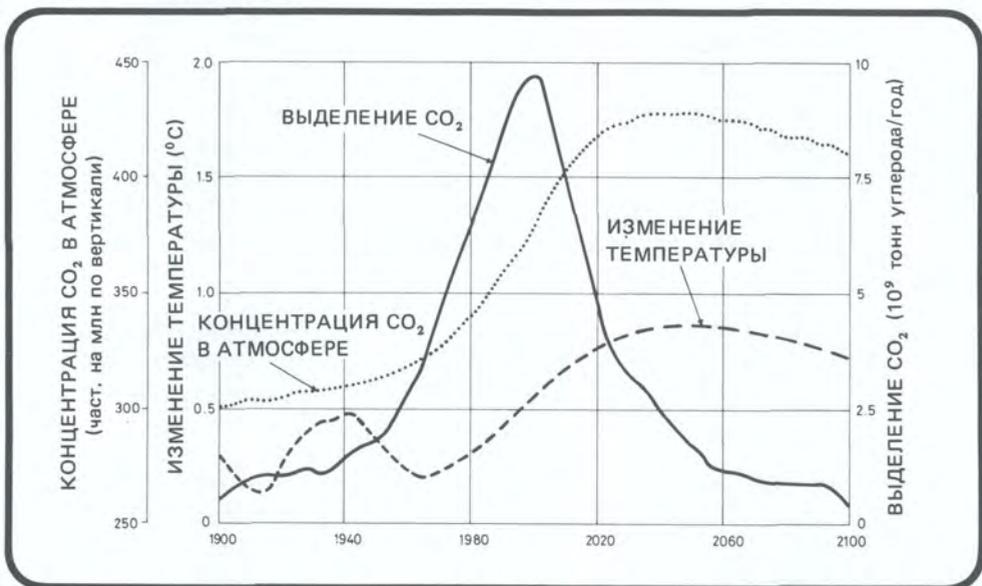


Рисунок 7. Сценарий производства 50 ТВт энергии с помощью солнечной и ядерной энергий.

Рисунок 8. Воздействие сценария производства 50 ТВт энергии с помощью солнечной и ядерной энергий на CO₂.



энергии в европейских странах в настоящее время. Для большей ясности эту цифру можно сравнить приблизительно с 8 тераваттами (ТВт) энергии, которые мы потребляем в настоящее время.

СТРАТЕГИЯ ПРОИЗВОДСТВА 50 ТВт ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ ИСКОПАЕМОГО ТОПЛИВА

На рисунке 5 дается сценарий, при котором вся энергия производится за счет ископаемого топлива. Это приведет к истощению почти всех запасов угля, который, как было подсчитано, составляет около 4300×10^9 тонн условного топлива [9]. На рисунке 6 показана модель, являющаяся результатом такой стратегии. Максимальное выделение CO_2 составит около 40×10^9 тонн углерода в год, и подсчитано, что концентрация CO_2 в атмосфере увеличится приблизительно в пять раз по сравнению с уровнем, существовавшим до начала промышленного развития. На основании данных, приведенных на рисунке 2, среднее изменение температуры на земном шаре превысит 5°C . Если исходить из сценария, согласно которому общее потребление энергии составит только 30 ТВт, то концентрация CO_2 к концу следующего столетия превысит приблизительно в четыре раза ту концентрацию, которая наблюдается в настоящее время, и температура на земном шаре изменится на 4°C .

СТРАТЕГИЯ ПРОИЗВОДСТВА 50 ТВт ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ СОЛНЕЧНОЙ И ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИЙ

В соответствии с настоящими оценками "тепличного" эффекта CO_2 , такие сценарии были бы причиной серьезных климатических изменений. Поэтому был создан сценарий, согласно которому температура изменялась бы менее чем на 1°C . Было сделано предположение, что в 2000 году можно будет обнаружить "сигнал CO_2 " и принять решение, направленное на уменьшение выделений CO_2 . Такая стратегия графически изображена на рис. 7 для сценария производства 50 ТВт энергии с помощью солнечной и ядерной энергий. Результаты такой стратегии приведены на рис. 8. Максимальные выделения, составляющие приблизительно 10×10^9 тонн углерода в год, произойдут на рубеже столетия. Концентрация CO_2 в атмосфере достигнет максимума в 430 част. на млн. в 2050 году и затем вновь медленно понизится. Температура увеличится максимально на $0,6^\circ\text{C}$ по сравнению с уровнем, существующим в настоящее время.

ВОЗДЕЙСТВИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Температуры, приведенные здесь, вычислены на основании расчетов радиационного баланса атмосферы. Однако очень мало известно о том, какие произошли бы климатические изменения с точки зрения зон давления, облачности, осадков и т.д. Анализ истории климата указывает на то, что в прошлом значительные

климатические изменения происходили очень быстро. На рис. 9 показано, что эти изменения были связаны с температурными сдвигами в $2-4^{\circ}\text{C}$ и происходили через постоянные промежутки времени, составляющие всего несколько десятилетий, до тех пор пока климат вновь не стабилизировался на совершенно другом уровне [10]. Поэтому возможно, что незначительные изменения могли вызвать серьезные последствия.

Возможные последствия повышения температуры можно подразделить на четыре категории:

а. Влияние на мировое производство пищевых продуктов

Было подсчитано, что изменение температуры на 1°C может привести к глобальному уменьшению мирового производства пищевых продуктов на 1-3% [11]. Но это приведет к тому, что некоторые районы земного шара окажутся в значительно более худшем положении, а положение других может даже улучшиться. Вообще, по-видимому, проблема будет состоять в приспособлении к изменившимся условиям, поскольку изменения могут происходить непостоянно, обнаружение таких изменений будет происходить замедленно и переход к новым сельскохозяйственным приемам будет занимать много времени.

б. Таяние ледяного покрова Северной Атлантики

Поскольку этот ледяной покров недостаточно мощный, его таяние, вызванное изменением температуры, могло бы произойти в течение нескольких десятилетий. Ранее отмечалось, что полярные районы окажутся более чувствительными к изменениям концентрации двуокиси углерода в атмосфере. Такое таяние значительно изменит альбедо и, вероятно, приведет к сдвигу климатических зон к северу.

в. Дезинтеграция ледяного покрова Западной Антарктики

Эта дезинтеграция повысила бы уровень океана примерно на четыре метра. Однако постоянная времени составит приблизительно тысячу лет [12].

г. Таяние полярных ледниковых куполов

Такое таяние повысило бы уровень океана приблизительно на шестьдесят метров. Однако постоянная времени составляла бы приблизительно 10000 лет.

МОЖНО ЛИ УДАЛИТЬ ДВУОКИСЬ УГЛЕРОДА ИЗ АТМОСФЕРЫ?

Предположим, что концентрация CO_2 в атмосфере увеличилась вдвое приблизительно до 600 част. на млн. По первому сценарию это могло бы произойти примерно через 50 лет. Далее предположим, что произошли значительные климатические изменения и было принято решение удалить 100 част. на млн. CO_2 из атмосферы. Насколько трудно это сделать? Это означало бы, что из одной шестой атмосферы необходимо было бы удалить CO_2 .

Черновые расчеты показывают, что если предположить, что более тысячи химических заводов высотой 100 м и длиной 1 км забирают воздух со скоростью 30 км/час, то для удаления такого количества CO_2 потребуется 30 лет работы.

ВЫВОДЫ

Эти расчеты служат доказательством серьезного потенциального риска увеличения концентрации CO_2 в атмосфере. В настоящее время, по-видимому, нет прямой необходимости сократить потребление ископаемого топлива. Необходимо провести намного больше исследований, чтобы понять данные углерода-13, и понять возможные последствия климатических изменений. Большинство ученых считает, что человечеству потребуется еще десятилетие, чтобы решить эту проблему. С другой стороны, по-видимому, нет оснований для увеличения потребления ископаемого топлива в большей степени, чем это абсолютно необходимо.

Эта статья не рассчитана на то, чтобы вызвать беспокойство или страх, а скорее на то, чтобы предоставить больше необходимой информации, с тем чтобы принять рациональное решение по поводу будущего производства энергии. Такое решение должно быть основано на сравнении всех видов риска и пользы альтернативных систем энергии.

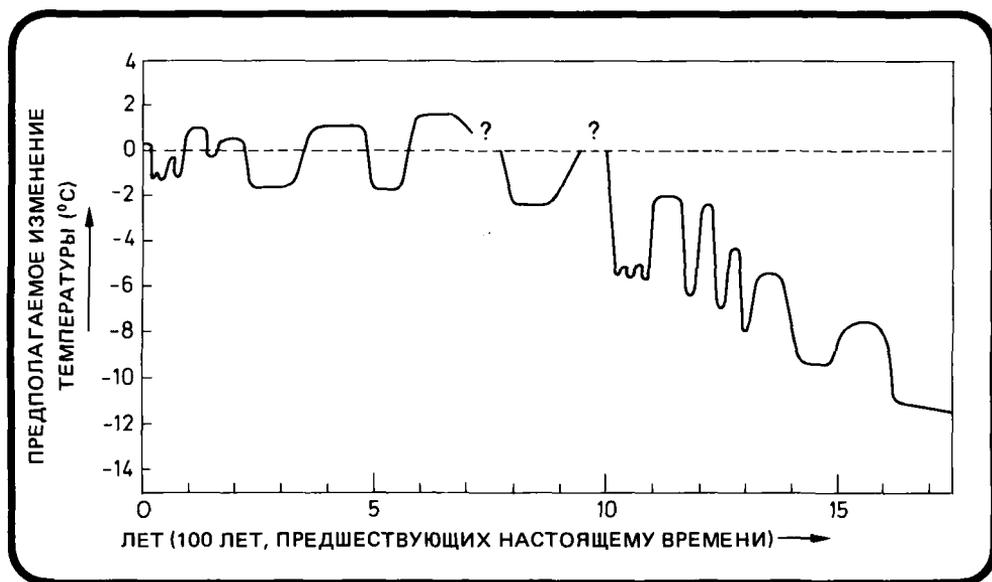


Рисунок 9. Климатические изменения в Центральной Европе [10].

Литература

- [1] Otway, H.J., Fishbein, M., Public Attitudes and Decision Making, International Institute for Applied Systems Analysis Research Memorandum-77-54, Laxenburg, Austria (1977).
- [2] Kellogg, W.W., "What If Mankind Warms the Earth?" Bulletin of the Atomic Scientists (February 1978).
- [3] Augustsson, T., Ramanathan, V., "A Radiative-Study of the CO₂ Climate Problem", Journal of Atmospheric Science, **34** (1977) 448–51.
- [4] Manabe, S., Wetherald, R.T., "Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity", Journal of Atmospheric Science, **24** (1967) 241–59.
- [5] Schack, A., "Der Einfluss des Kohlendioxyd-Gehaltes der Luft auf das Klima der Welt", Physikalische Blätter, **1** (1972) 26–8.
- [6] Manabe, S., Wetherald, R.T., "The Effects of Doubling the CO₂-Concentration on the Climate of a General Circulation Model", Journal of Atmospheric Science, **32** (1975) 3–15.
- [7] Niehaus, F., Computersimulation langfristiger Umweltbelastung durch Energieerzeugung (Kohlendioxyd, Tritium und Radio-Kohlenstoff), Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart (1977).
- [8] Oeschger, H., et al., A Box Diffusion Model to Study the Carbon Dioxide Exchange in Nature, *Tellus XXVII* (1975).
- [9] Riedel C., Zero Order Evaluation of the Supply/Demand Situation in the Various World Regions (1975–2025), Discussion paper, IIASA Workshop on Energy Strategies: Conception and Embedding, May 17–18, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria (1977).
- [10] Flohn, H., "Stehen wir vor einer Klima-Katastrophe?", Umschau 77, Heft 17 (1977).
- [11] Bach, W., The Potential Consequences of Increasing CO₂ Levels in the Atmosphere, IIASA Workshop on Carbon Dioxide, Climate and Society, February, 1978, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria (1978).
- [12] Hughes, T., "Is the West Antarctic Ice Sheet Disintegrating?", Journal of Geophysical Research, **78**, **33** (1973) 7884–8910.