

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

551,510.5

ОБРАЗОВАНИЕ CO_2 ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО ТОПЛИВА
В НАСТОЯЩЕМ И БУДУЩЕМ *)
(Глобальная оценка)

Р. М. Ротти

Как и в ряде более ранних работ ^{1,3,5}, расчет количества двуокиси углерода, образуемой при сгорании минерального топлива, основывался на данных статистики ООН о производстве различных видов топлива (см., например, ⁶). Предварительные показатели производства топлива за 1975 г. также затабулированы в цитированном выше сборнике ⁶, однако в эти данные нами внесены незначительные изменения, основывающиеся на более поздней информации со стороны Бюро статистики ООН (А. Рамсделл, частное сообщение ²).

Килинг ¹ произвел оценку количества углерода, содержащегося в образуемой двуокиси углерода, исходя из опубликованных данных о производстве ископаемого топлива. Расчет количества CO_2 , образовавшегося из учтенных источников, был выполнен по оригинальной программе Килинга для минеральных топлив (в которой учитывался незначительный вклад от производства цемента) с использованием оценочных значений сжигаемого в факелах природного газа ^{3,4}. На рис. 1 приведены полученные в итоге результаты. С выходом в свет нового статистического сборника ООН (World Energy Supply Statistical Papers. Ser. J, № 19. — N.Y.: United Nations, 1974) данные о производстве топлива за 1950—1974 гг. были исправлены, дополнены более современными сведениями и приведены в соответствие с остальным материалом в этой серии. Именно эта информация использовалась при оценке количества выброшенного в атмосферу CO_2 , которая была представлена на конференции Отдела научных исследований ВМС в январе 1976 г. ⁵. Мы в незначительной степени исправили данные за несколько последних лет и расширили их на рис. 1 вплоть до 1976 г.

Уровень производства топлива за 1976 г. оценивался автором, исходя из данных за первые три квартала 1976 г., опубликованных под эгидой ООН ⁷. Поскольку наблюдаются сезонные вариации в уровне добычи минерального топлива и его потребления, то наша оценка для IV квартала 1976 г. основывалась на использовании соотношения между уровнями производства каждого из видов топлива в отдельности (уголь, лигнит, сырая нефть и природный газ) за III и IV кварталы трехлетнего периода, начиная с 1973 и по 1975 г.

Так, например, суммарное производство каменного угля за третьи кварталы 1973, 1974 и 1975 гг. составило 1325 млн. т., тогда как аналогичный показатель за четвертые кварталы равнялся 1372 млн. т. Исходя из этого, оценка количества добытого

*) Rotty Ralph M. Present and Future Production of CO_2 from Fossil Fuels — Global Appraisal. — March 1977. — Перевод с рукописи выполнен А. А. Радцигом.

© Ralph M. Rotty, 1977.

© Перевод на русский язык,
Главная редакция физико-математической
литературы издательства «Наука»,
«Успехи физических наук», 1978.

угля за IV квартал 1976 г. производилась по соответствующему показателю за III квартал 1976 г., равному 467 млн. т., так что в итоге получаем

$$\frac{1372}{1325} \cdot 467 = 484 \text{ млн. т.}$$

Полученные таким путем показатели (они основывались на статистических данных ежемесячных бюллетеней ООН) учитывали количества произведенного минерального топлива во всех странах мира, исключая Китай. Для глобального подсчета необходимо к указанным показателям уровня производства топлива добавить оценочные

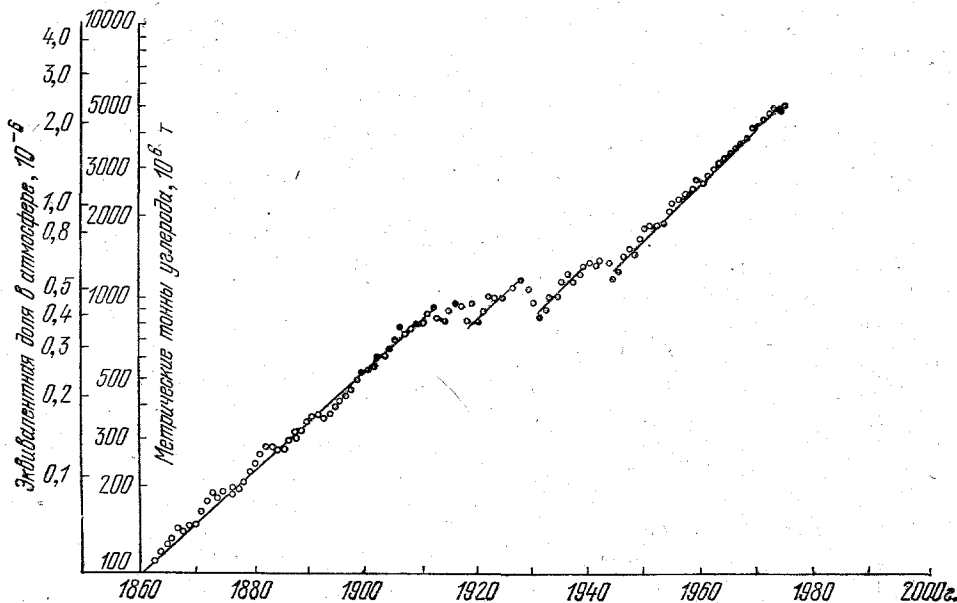


Рис. 1. Образование CO_2 из минерального топлива и цемента.

значения для Китая. Бюро статистики ООН (А. Рамсделл, частное сообщение) располагает такими данными для каждого из видов минерального топлива. В итоге, например, общее производство каменного угля в 1976 г. оценивалось согласно учету следующих показателей:

I кв. + II кв. + III кв. + IV кв. + Китай = Общее производство

$$489 + 488 + 467 + 484 + 490 = 2418 \text{ млн. т.}$$

Для сравнения приведем аналогичные показатели за 1975 г.:

$$474 + 473 + 447 + 483 + 470 = 2347 \text{ млн. т.}$$

При оценке количеств произведенных в 1976 г. сырой нефти, природного газа и бурого угля (лигнита) мы пользовались аналогичной процедурой подсчета. В случае с бурым углем статистические данные ООН, включаемые в сборники «Energy Supply», учитывают также производство торфа, используемого в качестве топлива в Ирландии и СССР, однако эти данные не входят в публикации ежемесячных бюллетеней. Поскольку доля этого вида топлива невелика, можно без заметного ущерба для точности привести для 1976 г. экстраполированное значение за 1975 г. Китай никогда не публиковал данных о производстве лигнита.

Представляется очевидным, что количество образуемого при сгорании топлива CO_2 нарастает по экспоненциальному закону, и если исключить годы мировых войн и экономической депрессии 30-х годов, то ежегодный прирост в 4,3 % достаточно хорошо описывает наблюдаемую здесь картину. Некоторого дополнительного анализа требует изучение роста образуемого CO_2 за текущее десятилетие. Из таблицы видно, как распределены

Рост количества образующегося CO₂, млн. т

	1970 г.	1971 г.	1972 г.	1973 г.	1974 г.	1975 г.	1976 г.
1. Уголь	2160	2134	2163	2203	2237	2347	2418
Образование CO ₂	1497	1479	1499	1527	1550	1626	1676
2. Лигнит	855	864	876	886	887	898	940
Образование CO ₂	237	239	243	246	246	249	260
3. Сырая нефть	2270	2402	2532	2777	2791	2650	2801
4. Газовый конденсат	74	77	83	88	87	90	91
Образование CO ₂	1803	1907	2011	2203	2213	2107	2224
5. Природный газ	1040	1113	1172	1233	1257	1269	1288
Образование CO ₂	545	583	614	646	659	665	675
6. Сжигаемый в факелах природный газ	167	173	186	204	209	198	210
Образование CO ₂	90	94	100	110	113	105	113
7. Цемент	598	639	678	690	692	728	723
Образование CO ₂	82	88	93	95	95	100	99
Общее количество образующегося CO ₂ (в пересчете на C)	4253	4389	4559	4826	4876	4852	5047
Доля CO ₂ в атмосфере, 10 ⁻⁶	2,00	2,07	2,15	2,27	2,29	2,28	2,38

результаты расчетов для периода между 1970 и 1976 г. и насколько сказался на цифрах замедленный экономический рост 1973—1975 гг.

На рис. 2, а построена кривая ежегодного количества образующегося CO₂, а рис. 2, б иллюстрирует объем ежегодного энергопотребления в США. Пропорциональное изменение уровня глобального образования CO₂ существенно меньше по сравнению с вариациями энергопотребления в США. Еще больший интерес, по всей видимости, представляет изменение скорости роста рассматриваемых показателей. Отмеченный на верхней кривой рост в 3,7%, наблюдаемый за период 1970—1974 гг., не является статистически существенным отклонением от цифры 4,3%, характеризующей долгосрочный рост количества образующегося CO₂. Так, изменение количества образовавшегося CO₂ за единственный год 1975—1976 гг. характеризуется ростом в 3,9%. В целом периоде времени 1970—1975 гг. отвечает наблюдавшийся рост в 2,9% — показатель, отклонение которого от 4,3% уже статистически значимо. Правда, остается открытым вопрос: проводить ли линию на графике с существенно иным наклоном, или же строить два отрезка с одинаковыми наклонами, разделенные точкой разрыва кривой? В каждом из этих случаев предполагается учесть наблюдаемые существенные перемены в скорости роста объема образующегося CO₂. На мой взгляд, предпочтительнее поступить так, как это сделано на рис. 2, поскольку имеется исторический прецедент для возобновления роста после периода спада.

Для того чтобы ответить на вопросы: «С чем столкнется ERDA *)?» и «Любой ли сдвиг в источниках энергопотребления США приведет к не-

*) ERDA — US Energy Research and Development Administration — правительственное управление по вопросам развития энергетики (США), функционировавшее в 1974—1977 гг. и ответственное за анализ и развитие всех возможных источников энергии и международную кооперацию в этой области. Бюджет ERDA на 1977 г. составлял 7 млрд. долларов. В конце 1977 г. ERDA была преобразована в отдел при DOE — Department of Energy. (Прим. перев.)

значительному изменению глобального количества образующегося CO_2 ? — представляется необходимым прежде всего определить глобальное распре-

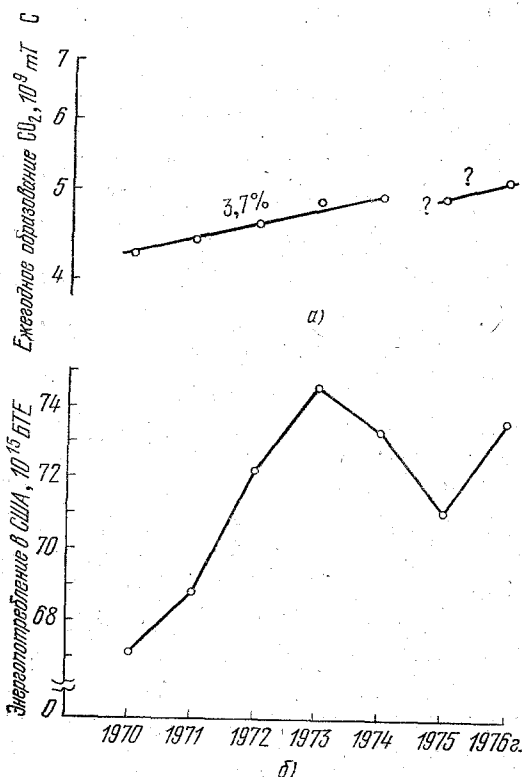


Рис. 2. а) Глобальное образование CO_2 ;
б) энергопотребление в США.

(1БТЕ = 0,25165 ккал = 2,9267 · 10⁻⁴ квт-ч.)

Японию; Австралию и Новую Зеландию; развивающиеся страны Африки; развивающиеся страны Азии; развивающиеся страны Среднего Востока; социалистические страны Азии.

2. При анализе данных о потреблении топлива все виды твердого топлива рассматриваются едино со средней теплотворной способностью 7000 ккал/г. (Тем самым не учитывается вклад некоторых видов угля с теплотворной способностью, превышающей введенный средний показатель.) Поскольку теплотворная способность твердых видов топлива тесно связана с количеством неокисленного углерода в топливе, то тем самым обеспечивается адекватная основа для оценки количества углерода в топливе. В итоге это приводит к занижению глобального количества образуемого CO_2 приблизительно на 1 % по сравнению с тем, что получилось бы при расчете количества CO_2 из данных о добыче топлива.

3. При анализе данных о потреблении жидкого топлива автор исходил из следующего уравнения:

потребляемый эквивалент жидкого топлива = перегоняемое топливо +
+ газовый конденсат + 1,0905 [нефтепродукты (импорт — экспорт)];

здесь введены обозначения: «потребляемый эквивалент жидкого топлива» — эквивалентное количество сырой нефти, потребляемой данной страной; «перегоняемое топливо» — количество жидкого топлива, поступившего на переработку, которое составляет из внутренней добычи сырой нефти и излишка импорта сырой нефти над его экспортом; «газовый конденсат» — конденсат природного газа, обычно добавляемый к нефти на некоторой стадии ее очистки. Международная торговля газовым конденсатом очень невелика, так что автор просто использовал цифры его добычи внутри каждой страны. (За исключением США и Канады соответствующие показатели малы.); 1,0905 — пере-

деление CO_2 , образующегося при сгорании минерального топлива. В случае, если конечным результатом анализа должно быть установление общего количества выбросов этого газа в атмосферу, то проще всего и, вероятно, наиболее правильно было бы исходить из данных об уровне добычи ископаемого топлива. Если, однако, ставится цель «приписать вину» каким-то отдельным странам, то здесь наиболее логично воспользоваться данными о потреблении топлива. При этом возникает необходимость в анализе импортных и экспортных показателей, а в случае с нефтью — разграничение между импортом сырой нефти и нефтепродуктов.

С этой целью мною предложены следующие процедуры классификации:

1. Весь мир подразделяется на 12 «политико-экономических» регионов, включающих в себя: США; Канаду; Западную Европу (по определению сюда входят страны Европейского экономического сообщества и Европейской ассоциации свободной торговли); СССР; социалистические страны Восточной Европы и ряд оставшихся европейских стран (Гибралтар, Греция, Мальта, Испания);

водной множитель между количеством нефтепродуктов и количеством сырой нефти. Этот множитель (по данным 1974 г.) представляет собой отношение количества поступившей на переработку сырой нефти к полному количеству пригодных для извлечения энергии нефтепродуктов, т. е.

$$\frac{2\,743,9}{1\,516,3} = 1,0905;$$

«нефтепродукты (импорт — экспорт)» — излишек импортируемых нефтепродуктов над их экспортом.

4. Топливо в «бункерах» — топливо, потребляемое при международных перевозках (корабли и самолеты), — автор относил к той стране, которая поставляет это топливо.

Используя указанную выше классификацию, мною был произведен расчет количеств CO₂, образующегося при сгорании ископаемого топлива (без учета цементного производства), для каждого из 12 регионов (секторов на рис. 3) по данным за 1974 г. Итоговый результат для мира в целом

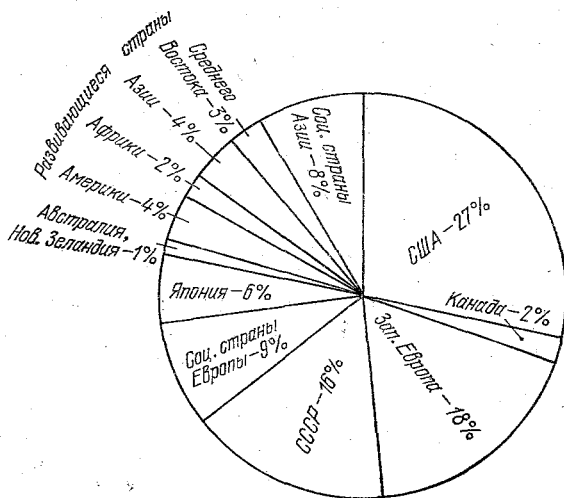


Рис. 3. Глобальное образование CO₂ регионами мира — 1974 г.

оказался на 4% ниже показателя, приведенного в таблице. Из них 2% (половина указанной разницы) приходится на исключенное нами из рассмотрения цементное производство, 1% падает на способ подсчета усредненного вклада от твердого топлива (в особенности это касается некоторых видов угля в СССР), и, наконец, еще 1% потерь обусловлен несовершенством бухгалтерских отчетов по международной торговле, утечкой нефти и т. д.

Полученные в итоге нашего расчета результаты представлены на рис. 3. Как и следовало ожидать, почти 3/4 общего количества образованного при сжигании топлива CO₂ приходится на Северную Америку, Западную Европу и социалистические страны Европы, включая СССР. Доля одних только США составляет около 1/4.

Что же может ожидать нас в будущем? Здесь я, сознательно ставя себя под удар, попытаюсь составить сценарий прогноза на 50 лет (на 2025 г.). С этой целью предлагается поделить весь мир на шесть регионов, образованных в результате комбинации введенных ранее (для анализа показателей 1974 г.) двенадцати регионов.

1. В отношении США мною предсказывается рост потребления энергии до 125 квод (1 квод (quad) = 10¹⁵ БТЕ) против 73 квод в 1974 г. Из них 15% приходится не на минеральное топливо.

2. Западная Европа будет ежегодно наращивать энергопотребление на 2%. Этого окажется достаточно, чтобы вплотную приблизиться к общему показателю для США. (В настоящее время Западная Европа использует около 60 % энергии, потребляемой в США.) Введенный показатель соответствует «медленному росту» — менее чем половине от текущего показателя для стран этого региона. Снова 15% энергии будем считать приходящимися на другие источники энергии, кроме ископаемого топлива.

3. Для социалистических стран Европы (включая СССР) прогноз основывается на 4%-м росте потребления энергии вместо 5,1%, характерного для последних 15 лет. Будем также считать, что 15% общего показателя соответствуют неминеральным источникам топлива.

4. Для Японии и Австралии положим ежегодный прирост потребления энергии равным 2%, как и в Западной Европе, и с той же долей в 15 % общего показателя, приходящейся на неископаемые виды топлива.

5. Социалистическим странам Азии (в основном Китаю) будем приписывать тот же ежегодный прирост энергопотребления в 5,1%, который был характерен для их развития в последние годы, причем отнесем всю потребляемую энергию к ископаемому топливу. Низкий современный показатель энергопотребления на душу населения делает цифры роста потребления близкими к тому, что необходимо иметь миру для его стабильности.

6. Развивающиеся страны во всем мире сталкиваются с наиболее серьезной проблемой — продолжающимся быстрым ростом населения. Мною предположен для этого региона средний показатель роста населения в 2% и уровень ежегодного потребления энергии на душу населения через 50 лет — равным $53 \cdot 10^6$ БТЕ/год, т. е. среднему мировому показателю за 1970 г., который каждый из нас даже сегодня найдет нецелесообразно низким. (Средний показатель для США превышает сейчас эту цифру, планируемую на 2025 г., более чем в шесть раз.) Хотя прогнозируемые показатели могут быть достигнуты при среднем росте потребления энергии в 5,5% для периода в 50 лет, рассматриваемые страны за последние два десятилетия достигли ежегодного прироста около 8%.

Используя сделанные выше предположения, мы рассчитали ежегодное количество высвобождаемой при сгорании минерального топлива

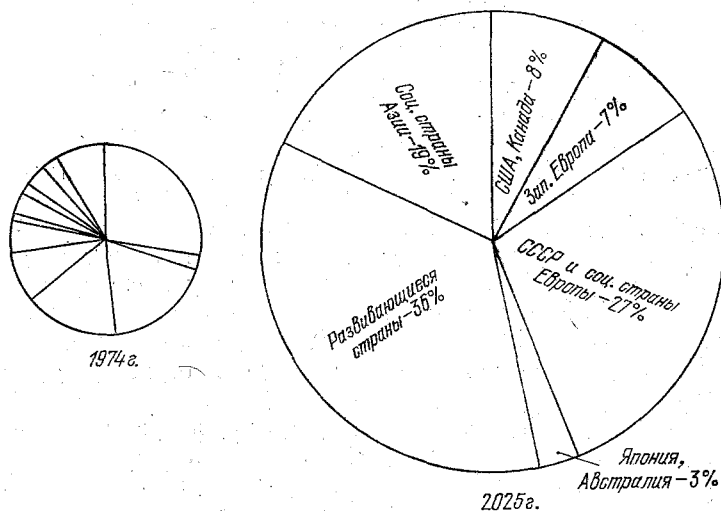


Рис. 4. Глобальное образование CO₂ регионами мира.

двуоксида углерода, содержащей $26 \cdot 10^9$ т углерода. Найденный результат в пять раз превышает аналогичный показатель за 1974 г. На рис. 4 проиллюстрировано прогнозируемое на 2025 г. распределение CO₂, образующегося при сгорании минерального топлива, по выделенным регионам мира. Площадь соответствующих кругов (1974 г. и 2025 г.) пропорциональна общему количеству углерода, содержащегося в выбросах двуоксида углерода при сгорании ископаемого топлива.

Из найденных нами результатов с очевидностью вытекает, что перед всем миром встает проблема обеспечения развивающихся стран такими энергоисточниками, которые бы, с одной стороны, не сдерживали прогресс в их развитии, а с другой, — не приводили бы к такой сильной их зависимости от минерального топлива. Возможно, именно в этой области ERDA сможет внести свой полезный вклад с помощью программ R&D для новых систем потребления энергии и небольших (децентрализованных) систем, использующих неминеральное топливо.

На первый взгляд может показаться, что рост энергопотребления до размеров, указанных на рис. 4 для 2025 г., в большой степени скажется на резервах минерального топлива в мире. Это, однако, вовсе не так; невозобновимые ископаемые топлива (включая нефть морских шельфов) содержат в себе $7,3 \cdot 10^{12}$ т углерода.

Ряд возможных распределений образующегося в будущем при сгорании минерального топлива CO₂ можно вывести из следующего математического соотношения:

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = 0,043 \left(1 - \frac{N}{N_{\infty}} \right)^A;$$

здесь введены обозначения: $N(t)$ — полное количество накопленного к моменту времени t в атмосфере CO₂, образованное выбросами использованного этого времени минерального топлива, N_{∞} — количество CO₂, которое можно было бы получить при полном использовании невозобновимого минерального топлива ($\sim 7,3 \cdot 10^{12}$ С); A — численный параметр, характеризующий в большей или меньшей степени долю остающегося невозобновимого ископаемого топлива (которое еще будет использоваться).

Величина $[1 - (N/N_{\infty})]^A$, которая всегда заключена между 0 и 1, позволяет учесть при анализе накопленного количества CO₂ снижение скорости потребления топлива при возможном исчерпании ресурсов или повышении цен за топливо. Данные о потреблении ископаемого топлива за последние годы (см. светлые кружки) использованы при построении кривых на рис. 5, характеризующих временной ход удельного накопления CO₂ в атмосфере. Поскольку значение множителя $1 - (N/N_{\infty})$ близко к 1,0 вплоть до 1975 г., наблюдаемый рост величины N хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью. Кривая на рис. 5 с $A = 1$ отвечает «свободному и легкому» доступу к остающимся резервам минерального топлива в мире, который также сопровождается ранним исчерпанием некоторых из ранее использовавшихся источников. Кривая с $A = 4$ может характеризовать сценарий потребления минерального топлива с пониженным на него спросом, что может быть обусловлено заблаговременной заботой об интенсивном использовании источников солнечной, ядерной или какой-либо другой энергии, а также высокими ценами на ископаемое топливо — результат правительственных мер (монополий и т. п.).

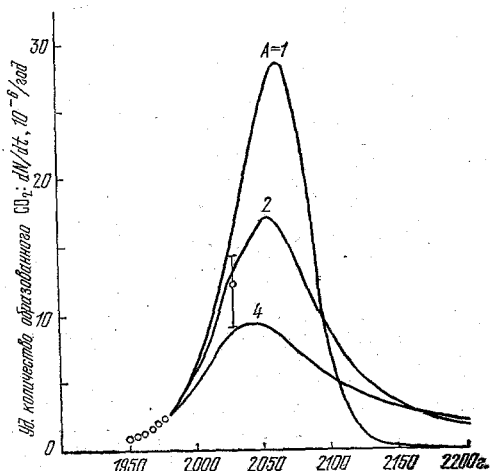


Рис. 5. Различные сценарии потребления ископаемого топлива.

Вертикальные линии на рис. 5 определяют интервал прогнозируемого количества CO_2 к 2025 г., определенный в результате розыгрыша одного из сценариев будущего спроса на энергию в Институте анализа энергоресурсов. На рис. 6 представлены данные о накоплении количества CO_2 с 1957 г., образованного в результате сжигания минерального топлива.

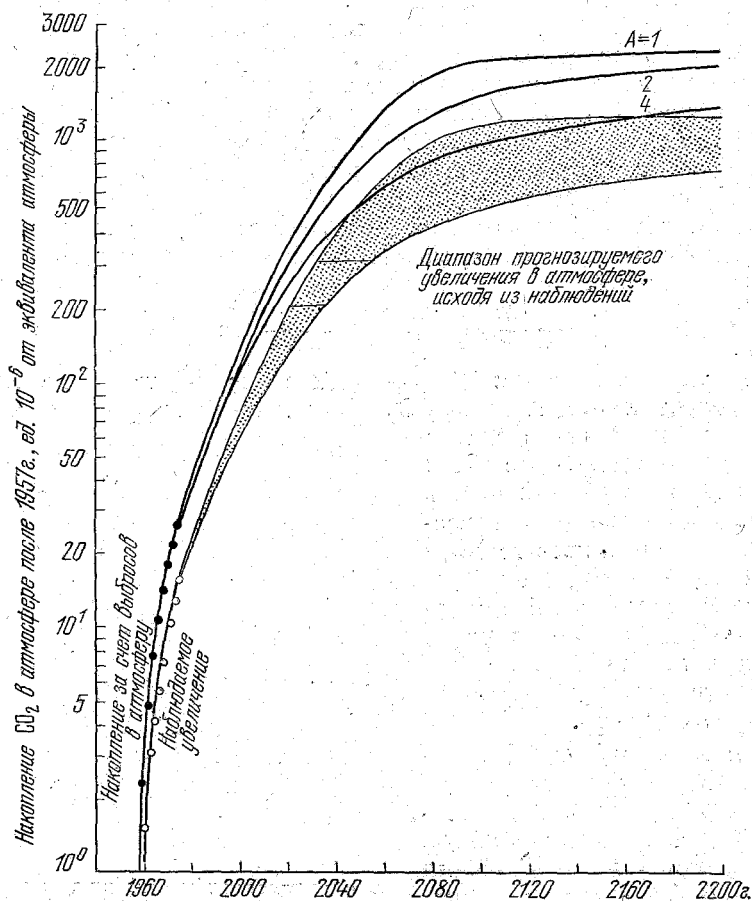


Рис. 6. Прогнозируемое количество CO_2 , накопленного при сгорании минерального топлива, и прогнозируемое увеличение CO_2 в атмосфере, исходя из наблюдений с 1957 г.

Темные кружки на графике соответствуют полученным нами расчетам, кроме того, приведены прогнозируемые значения, отвечающие сценариям потребления минерального топлива с $A = 1, 2$ и 4 на рис. 5. Ожидаемые в будущем значения концентраций CO_2 в атмосфере, которые исходят из результатов наблюдений за последние годы, получены в предположении о 50%-ном уровне накопления двуокиси углерода, выброшенной в атмосферу. Это значение доли остающегося CO_2 и характер возможного изменения ее со временем являются, конечно, одним из наиболее серьезных предположений, заложенных в данную процедуру расчетов. Однако для целей иллюстрации данных предположенный 50%-ный уровень представляется достаточным.

Концентрация CO_2 в атмосфере быстро растет после 2000 г., и для сценария, рассмотренного на рис. 4, она достигает к 2025 г. увеличения на $200 \cdot 10^{-6}$ против уровня 1958 г. Относительно узкий горизонтальный

размер заштрихованной области на рис. 6, приходящийся на значения концентрации CO_2 в $200 \cdot 10^{-6}$ и $300 \cdot 10^{-6}$, позволяет заключить, что почти любой сценарий прогноза с медленным ростом потребления ископаемого топлива (скажем, с $A = 4$) приведет к наблюдаемым заметным изменениям климата в течение первой половины XXI века.

Ясно, что рассмотренная проблема очень серьезна, встает перед миром в целом и в наиболее сильной степени будет определяться развивающимися странами в последующие 50 лет их истории. Эта проблема также создает возможности для ERDA обеспечить руководство и лидерство в данной области. Необходимость в развитии энергоисточников, не опирающихся на ископаемое топливо, быстро становится одной из критических проблем.

Институт анализа энергоресурсов
при Окриджском объединении университетов,
Окридж, шт. Теннесси, США

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Keeling C. D. Industrial Production of Carbon Dioxide from Fossil Fuels and Limestone. — *Tellus*, 1973, v. 25, No. 2, p. 174.
2. Ramsdell A. Private communication. — N. Y.: Statistical Office. U. N. Department of Economic and Social Affairs, February 1977.
3. Rotty R. M. Commentary on and Extension of Calculative Procedure for CO_2 Production. — *Tellus*, 1973, v. 25, No. 5, p. 508.
4. Rotty R. M. First Estimates of Global Flaring of Natural Gas. — In: *Atmospheric Environment*: v. 8. — 1974, p. 681.
5. Rotty R. M. Global Carbon Dioxide Production from Fossil Fuels and Cement A. D. 1950—A. D. 2000. — Presented at Office of Naval Research Conference on the Fate of the Fossil Fuel Carbonates. Honolulu, Hawaii. — January 19—23, 1976. — (Proceedings in Press).
6. United Nations. World Energy Supplies, 1950—1974: Statistical Papers. Series J. No. 18. — N. Y.: Statistical Office. U. N. Department of Economic and Social Affairs, 1976.
7. United Nations. Monthly Bulletin of Statistics. — N. Y.: U. N. Department of Economic and Social Affairs: February 1977.