

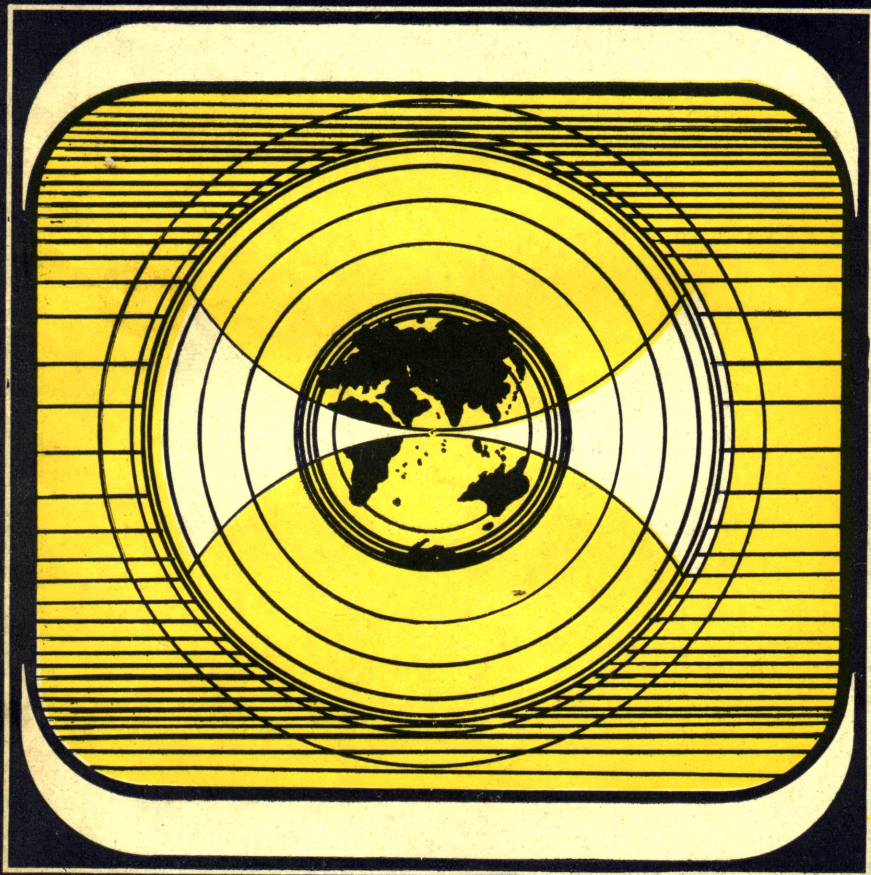
**ЗНАНИЕ**

НОВОЕ  
В ЖИЗНИ,  
НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ

СЕРИЯ  
ФИЗИКА

3'79

**Б.М.Смирнов**  
**АТМОСФЕРА**  
**ЗЕМЛИ**  
**И**  
**ЭНЕРГЕТИКА**



НОВОЕ  
В ЖИЗНИ,  
НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ

**Б. М. Смирнов,**

доктор физико-математических наук,  
профессор

Серия  
«Физика»  
№ 3, 1979 г.

# АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ И ЭНЕРГЕТИКА

Издается  
ежемесячно  
с 1946 г.

Издательство  
«Знание»  
Москва  
1979

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение . . . . .   | 3  |
| Энергетика, современность и будущее . . . .                            | 5  |
| Энергетика атмосферы и влияние на нее человека                         | 9  |
| Состав атмосферы и человек . . . . .                                   | 24 |
| Химическое загрязнение атмосферы . . . . .                             | 44 |
| Экологические проблемы энергетики в настоящем<br>и в будущем . . . . . | 50 |
| Литература . . . . .   | 64 |

**Смирнов Б. М.**

**С 50** Атмосфера Земли и энергетика. М., «Зна-  
ние», 1979.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Фи-  
зика», 3. Издается ежемесячно с 1947 г.)

Брошюра посвящена рассказу об антропогенном воздействии на атмосферу Земли. Автор подробно рассказывает о влиянии энергетики на климат и химический состав атмосферы, сравнивает различные источники энергии с точки зрения перспектив на будущее. Книга написана крупным специалистом в области физики атмосферы и безусловно принесет большую пользу широкому кругу читателей.

21002

28.08

## Введение

Мы живем в эпоху, когда основные усилия человеческого общества направлены на расширение производства материальных благ. Успехи человечества в этом отношении значительны, и современный объем производства, как и ежегодный прирост его, в последние десятилетия достиг таких масштабов, каких не знали предыдущие поколения. Вместе с тем возросли масштабы влияния человека на окружающую природу, и актуальное значение приобрела проблема защиты окружающей среды.

Эта проблема выходит за рамки обсуждений и становится предметом правительственных решений и международных соглашений. Примером тому являются международный договор о запрещении испытаний ядерного оружия, договор между США и СССР о запрещении использования атмосферы и космоса в военных целях, правительственные решения СССР относительно бассейнов Азовского и Каспийского морей и озера Байкал, грандиозный по стоимости проект США, связанный с восстановлением Великих озер в штате Мичиган, и т. д. Принимаются местные меры для сохранения окружающей среды. Например, вода в Москве-реке и в реке Потомак (г. Вашингтон) в настоящее время чище, чем несколько лет назад.

Все эти шаги свидетельствуют о серьезном отношении к окружающей среде и направлены на то, чтобы предотвратить ущерб, наносимый природе производственной деятельностью человека. Поскольку масштабы производства растут, в дальнейшем придется затрачивать больше усилий для предотвращения последствий нежелательного влияния человека на окружающую среду. Затраты на проведение конкретных мер по защите окружающей среды и их результаты в значительной сте-

пени зависят от того, насколько своевременно они будут приняты. Поэтому становится особо важным понимание различных явлений, происходящих в природе, влияния на них производственной деятельности человека в настоящем и в будущем и последствий, к которым эта деятельность может привести.

В настоящей брошюре наше внимание будет сосредоточено на одном из элементов окружающей среды — атмосфере Земли. С точки зрения условий жизни человека атмосфера Земли представляет чрезвычайный интерес в двух отношениях. Во-первых, совокупность процессов, протекающих в атмосфере, определяет погоду. В частности, климат Земли зависит от оптических свойств атмосферы. Во-вторых, химический состав воздуха жизненно важен для человека, а также животного и растительного мира.

Особенность атмосферы как элемента окружающей среды состоит в том, что для нас существенны весьма малые изменения в ее составе. Концентрация примесей в атмосфере, способная заметно изменить ее оптические свойства, а следовательно, повлиять на климат, может составлять величину порядка  $10^{-8}$ — $10^{-7}$ . Такова же концентрация основных примесных молекул при фотохимическом смоге, когда химический состав воздуха становится неприемлемым как для самого человека, так и для живого мира.

В данной брошюре мы остановимся на наиболее существенных атмосферных явлениях, влияние деятельности человека на которые может проявиться в ближайшем будущем или уже проявляется. Основное внимание будет уделено глобальным явлениям, т. е. таким, которые проявляются по всему земному шару. В последние годы эти проблемы широко исследуются и получена основная информация по многим кардинальным вопросам. Поскольку масштаб производства определяется величиной потребляемой энергии, то проблемы влияния человека на атмосферу связаны с экологическими проблемами энергетики. В связи с этим заметное место в брошюре уделено энергетике: ее структуре, перспективам развития, экологическим проблемам.

# Энергетика, современность и будущее

Одной из характеристик развития цивилизации, человеческого общества, страны является их энергетический потенциал. Чем выше потребляемая энергия в том или ином обществе, тем на более высокой ступени развития оно находится. Различные параметры, характеризующие состояние производства и экономики страны, находятся в соответствии с ее энергетическим потенциалом. В качестве наглядного подтверждения этого на рис. 1 представлен рост производимой в Советском Союзе энергии и годового бюджета страны за последние полстолетия. В зависимости от общей обстановки развитию энергетики в разное время уделялось неодина-

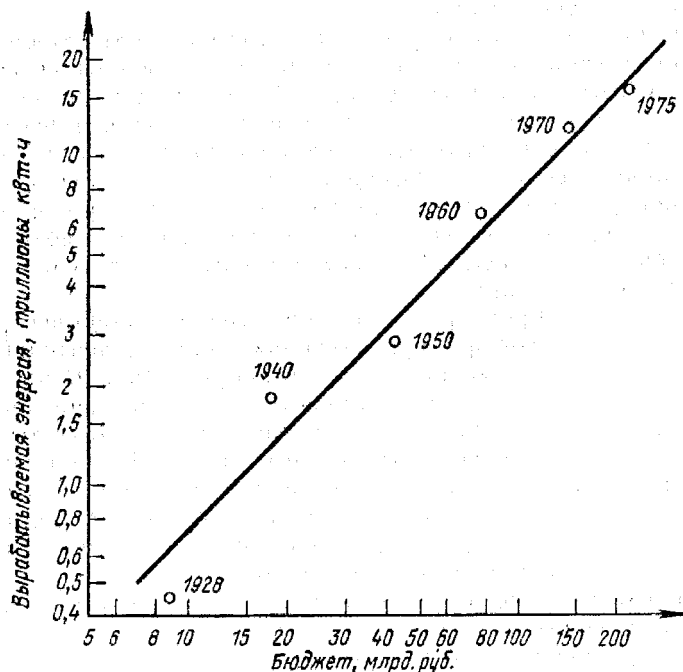


Рис. 1. Полная вырабатываемая в СССР энергия, полученная из ежегодно добываемых горючих полезных ископаемых (угля, нефти, газа), а также гидро- и атомной энергии, и ежегодный бюджет страны

наковое внимание. Однако, как видно, в среднем развитие энергетики соответствовало бюджету страны.

Мы будем использовать энергетический потенциал (величину ежегодно потребляемой энергии) как характеристику развития человеческого общества. Основываясь на ней, можно оценивать меру влияния человека на отдельные параметры окружающей среды в соответствующий период. Современные темпы роста энергетики были недоступны всем предыдущим цивилизациям. Жизнь опровергла утверждение Т. Р. Мальтуса, согласно которому рост средств существования отстает от роста народонаселения. В настоящее время население увеличивается примерно на 2% в год, тогда как потребление энергии — на 4% в год<sup>1</sup>. А ведь сейчас рост населения происходит более высокими темпами, чем раньше. Так, средний ежегодный прирост населения за первую половину нынешнего тысячелетия составлял 0,1%, за прошлый век — 0,58%, за 75 лет этого века — 1,2%, за последние 25 лет — 1,9%.

Прежде чем говорить о влиянии производства на окружающую среду, рассмотрим кратко состояние современной энергетики. Мировое потребление энергии в 1977 г. составляет примерно  $3,0 \cdot 10^{17}$  кДж/год, что соответствует средней мощности около  $10^{10}$  кВт. В 1977 г. в СССР было добыто такое количество топлива (угля, нефти, газа), при сжигании которого выделится энергия  $6,5 \cdot 10^{16}$  кДж<sup>2</sup>, что отвечает средней мощности  $2,0 \cdot 10^9$  кВт. Электроэнергия, вырабатываемая в СССР гидро- и атомной энергетикой, составляет  $1,5 \cdot 10^{15}$  кДж.

Характер потребляемой энергии представлен в табл. 1. Как видно, основная ее доля связана со сжиганием ископаемых видов топлива (нефти, угля, газа). В

<sup>1</sup> Еще более резкое различие между этими цифрами в Советском Союзе, где за последние 25 лет население увеличивалось в среднем на 1,4% в год, а ежегодное увеличение вырабатываемой энергии составляло 7%.

<sup>2</sup> Согласно планам развития народного хозяйства в 1980 г. в Советском Союзе будет добыто 620—640 млн. т нефти и газового конденсата, что отвечает энергии  $(2,80—2,89) \cdot 10^{16}$  кДж, 790—810 млн. т угля, что соответствует энергии  $(2,37—2,43) \cdot 10^{16}$  кДж и 400—435 млрд. м<sup>3</sup> газа, который даст энергию  $(1,61—1,75) \cdot 10^{16}$  кДж. Мощность атомных станций 20 млн. кВт соответствует энергии перерабатываемого урана  $1,1 \cdot 10^{15}$  кДж. Выработанная электроэнергия составит  $(4,82—4,97) \cdot 10^{15}$  кДж, или 6,5—7% от всей используемой энергии. При этом гидроэлектростанции дадут около  $10^{15}$  кДж электроэнергии.

настоящее время происходит переоценка значения отдельных источников энергии, которая сопровождается резким ростом цен на мировом рынке на ископаемые виды энергии. Это стало причиной так называемого энергетического кризиса, который потряс капиталистическую систему хозяйства, резко затормозив его развитие. Оставив в стороне политическую сущность этой проблемы, остановимся на ее объективных причинах, обусловленных ограниченностью ископаемых видов топлива.

Таблица 1

| Источник энергии           | Его доля в потребляемой энергии, % |               |
|----------------------------|------------------------------------|---------------|
|                            | Мир в целом, 1977 г.               | СССР, 1980 г. |
| Нефть                      | 43—45                              | 38—40         |
| Уголь, органические отходы | 31—33                              | 32—34         |
| Газ                        | 20—22                              | 22—24         |
| Энергия урана *            | 1,2—1,3                            | 1,4—1,7       |
| Гидроэнергия               | 1,4                                | 1,3—1,4       |

\* Энергия урана, перерабатываемого на атомных электростанциях.

Общая энергия ископаемых видов топлива — нефти, угля, газа — оценивается в  $10^{20}$  кДж. При этом на долю угля приходится примерно 80% этого запаса энергии, на долю нефти и газа — примерно по 10%<sup>3</sup>. Как видно, если современный темп роста добычи горючих ископаемых сохранится, то запасы нефти и газа истощатся к середине следующего века. Ограниченность запасов горючих ископаемых влияет на характер развития современной энергетики. С одной стороны, страны —

<sup>3</sup> Обеспеченность горючими ископаемыми, т. е. отношение количества разведанных горючих ископаемых на начало года к их годовой добыче в 1973 г., составляла 37 лет для нефти, 41 год — для газа и 1720 лет — для угля. Эти цифры относятся ко всему миру в целом.



производители нефти и газа умышленно сдерживают добычу этих ископаемых, учитывая, что их ценность в будущем сильно возрастет. С другой стороны, развитые страны планируют перестройку своей экономики таким образом, чтобы она в меньшей степени ориентировалась на нефть и газ. Например, согласно правительственным проектам США ежегодное увеличение потребления нефти в США ограничивается 2%, тогда как ежегодное увеличение добычи угля будет составлять около 5%.

Другое следствие ограниченности запасов нефти и газа проявляется в удорожании их добычи. Добыча этих ископаемых смещается в более труднодоступные районы, происходит в более сложных условиях. Так, в Советском Союзе, где ранее основными районами добычи нефти и газа были побережье Каспийского моря и Поволжье, центр добычи этих ископаемых переносится в Западную Сибирь. Если ранее добыча нефти и газа производилась только на суше, то уже в настоящее время более 20% мировой нефти добывается в прибрежных районах морей и океанов.

Эти условия определяют тенденции в развитии энергетики. В конце XX в. основная доля потребляемой энергии, как и ранее, будет связана со сжиганием горючих ископаемых. Однако более быстрыми темпами будет развиваться атомная энергетика, на долю которой на рубеже XXI в. будет приходиться около половины вырабатываемой электроэнергии. Кроме того, большие усилия будут затрачены на освоение новых способов получения энергии. В частности, по существующим проектам в 2000 г. должны уже работать промышленные термоядерные электростанции.

Степень влияния производственной деятельности человека на окружающую среду определяется не только масштабом потребления энергии, но и способом ее использования. Пути расходования энергии в настоящее время и в ближайшем будущем представлены в табл. 2.

Таблица 2

|  |        |
|--|--------|
| Тепловые электростанции и теплофикация | 30—35% |
| Промышленность                         | 30—35% |
| Транспорт                              | 25—30% |
| Бытовые нужды                          | 5—10%  |

Использование ископаемых видов топлива для выработки энергии представляет собой сжигание нефти, угля, газа. При этом в атмосферу попадает углекислый газ, а также различные примеси, определяемые видом топлива и степенью очистки выпускаемых газов. Человек забирает полезные ископаемые из недр Земли и в том или ином виде выпускает их в атмосферу или рассеивает по поверхности Земли. При соответствующем масштабе производства он может существенно влиять на происходящие в природе явления. Наша последующая задача — проанализировать масштаб влияния человека на отдельные явления в атмосфере Земли.

## **Энергетика атмосферы и влияние на нее человека**

### **1. АТМОСФЕРА И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ЗЕМЛИ**

Чтобы оценить влияние человека на климат Земли, необходимо выяснить, какие энергетические процессы происходят в атмосфере и на поверхности Земли и какое участие принимает или может принять в них человек.

На рис. 2 представлена схема теплового баланса атмосферы и поверхности Земли. Излучение Солнца, попадающее в атмосферу Земли, частично отражается от ее поверхности и атмосферы, частично возвращается в окружающее Землю пространство в виде инфракрасного излучения атмосферы и поверхности. Земля находится в тепловом равновесии с окружающим пространством, так что солнечная энергия, попадающая в атмосферу Земли, равна полной энергии излучения, уходящей от Земли в окружающее пространство.

Важной особенностью теплового баланса Земли является излучение и поглощение фотонов атмосферой и поверхностью Земли. Это излучение приходится на инфракрасную область спектра.

Построим модель, на основании которой будем описывать тепловой баланс Земли. Пусть тепловые потоки равномерно распределены по поверхности Земли, т. е. все основные энергетические процессы усреднены. Далее будем считать, что в области инфракрасного спектра Земля испускает излучение как абсолютно чер-

ное тело, что достаточно хорошо отражает реальность. (Согласно закону Стефана — Больцмана энергия, испускаемая с единицы поверхности абсолютно черного тела в единицу времени, равна  $\sigma T^4$ , где  $\sigma = 5,69 \cdot 10^{-12}$ .

Вт/см. град<sup>4</sup> — постоянная величина, а  $T$  — температура поверхности, выраженная в градусах Кельвина. Если, основываясь на этой формуле, использовать взятый из рис. 2 средний поток инфракрасного излучения, выходящий с поверхности Земли, то получим, что средняя температура поверхности Земли составляет 288° К, или 15° С. В общем, это правильно отражает реальную ситуацию.)

Теперь проследим за ролью атмосферы как источника инфракрасного излучения в тепловом балансе планеты. Излучение и поглощение в инфракрасной части спектра происходят в слое атмосферы высотой в несколько десятков километров, в котором сосредоточена практически вся ее масса. Существенно, что температура атмосферы в этом слое падает с высотой. Представим себе, что длина пробега инфракрасных фотонов

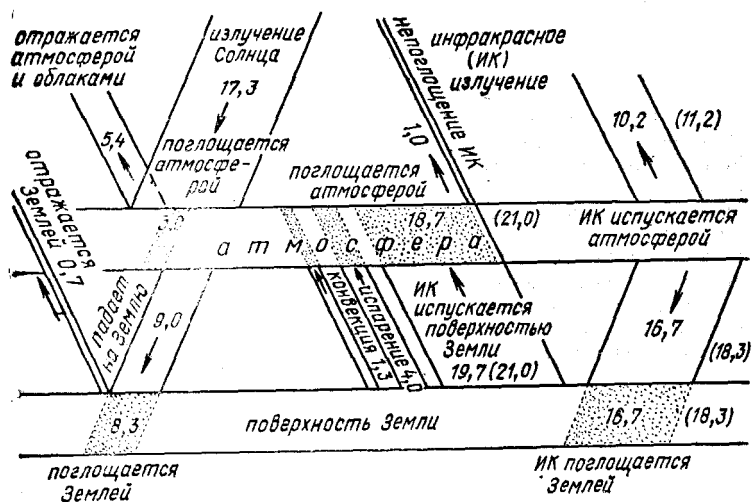


Рис. 2. Тепловой баланс Земли и атмосферы. Мощность энергии, перерабатываемая поверхностью Земли и атмосферой, выражена в  $10^{13}$  кВт. В скобках указаны новые параметры теплового баланса Земли, отвечающие гипотетическому изменению оптических свойств атмосферы. Заштриховано поглощенное излучение

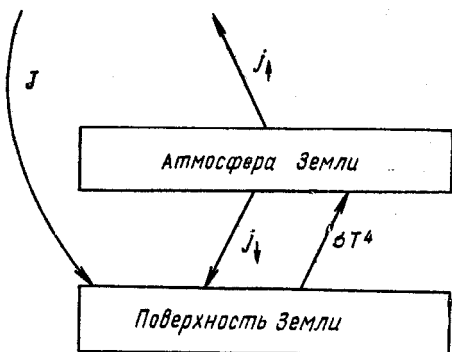
(т. е. расстояние, которое они проходят в атмосфере до поглощения) мала по сравнению с высотой излучающего слоя атмосферы. Тогда поток инфракрасного излучения атмосферы за пределы Земли, согласно закону Стефана — Больцмана, равен  $j_{\uparrow} = \sigma T_{\uparrow}^4$ , где  $T_{\uparrow}$  — температура верхней части излучающего слоя атмосферы. Поток излучения на поверхность Земли равен  $j_{\downarrow} = \sigma T_{\downarrow}^4$ , где  $T_{\downarrow}$  — температура приповерхностного слоя атмосферы. Поскольку температура атмосферы убывает с высотой, то  $j_{\downarrow} > j_{\uparrow}$ .

Выделим из реальной картины, изображенной на рис. 2, наиболее важные элементы и на их основе построим упрощенную модель теплового баланса Земли и атмосферы. Эта модель представлена на рис. 3. Источник энергии — поток солнечного излучения  $I$ , сосредоточенный в оптической части спектра и для нашей упрощенной модели свободно проходящий через атмосферу<sup>4</sup>.

Используем условие равновесия в рассматриваемой системе планета — атмосфера — окружающее пространство. Это дает

$$\begin{aligned} j_{\uparrow} &= I, \\ I + j_{\downarrow} &= \sigma T^4. \end{aligned}$$

Рис. 3. Качественная модель теплового баланса Земли (или другой планеты).  $I$  — поток солнечного излучения, поглощаемый поверхностью Земли;  $j_{\uparrow}, j_{\downarrow}$  — потоки инфракрасного излучения атмосферы, посылаемые за пределы Земли и на ее поверхность соответственно;  $\sigma T^4$  — поток инфракрасного излучения, испускаемого поверхностью Земли



<sup>4</sup> Рассматриваемую схему теплового баланса иногда называют парниковым эффектом по аналогии с парником, в который свободно проходит солнечное излучение в оптической части спектра, а инфракрасное излучение задерживается. Следует, однако, отметить, что теплообмен в парнике и для земного шара осуществляется разными механизмами.

Так как  $j_{\downarrow} > j_{\uparrow} = I$ , то  $\sigma T^4 > 2I$ , или  $T > 1,2 (I/\sigma)^{1/4}$ . Теперь представим себе, что атмосфера отсутствует или же она оптически прозрачна в инфракрасной области спектра. Тогда условие теплового равновесия планеты с окружающим пространством дает  $I = \sigma T^4$ , т. е.  $T = (I/\sigma)^{1/4}$ . Как видно, присутствие атмосферы приводит к нагреванию земной поверхности. Наличие потока инфракрасного излучения из атмосферы на поверхность планеты приводит к увеличению обратного потока, что соответствует увеличению температуры поверхности планеты. Как следует из диаграммы для теплового баланса Земли (см. рис. 2), полная энергия, попадающая на поверхность Земли в единицу времени, примерно в 1,5 раза превышает попадающую в атмосферу солнечную энергию и более чем в 3 раза превышает солнечную энергию, поглощенную поверхностью Земли<sup>5</sup>. Это свидетельствует о большой роли атмосферы в формировании климата Земли.

## 2. ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС

Оценим, при каких мощностях искусственных источников энергии влияние человека на климат Земли станет существенным. Будем считать, что заметное изменение климата соответствует изменению температуры поверхности Земли на величину порядка 1 град. Примем, что относительный вклад в тепловой баланс испарения и конвекции длинноволнового излучения с поверхности при повышении температуры Земли будет тот же, что и при реальных условиях. Наша задача — определить, какие мощности, выделяемые на Земле, приводят к изменению ее температуры на заданную величину  $\Delta T = 1$  град.

При повышении температуры поверхности Земли на величину  $\Delta T$ , согласно закону Стефана — Больцмана, поток испускаемого поверхностью излучения окажется равным  $j = \sigma (T + \Delta T)^4 = \sigma T^4 (1 + 4\Delta T/T)$ , где  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана,  $T$  — первоначальная температура поверхности. Отсюда относительное изменение потока испускаемого излучения равно  $\Delta j/j = 4\Delta T/T$ .

<sup>5</sup> Для поверхности Венеры это соотношение равно 25.

Поскольку при рассматриваемых условиях отношение мощности дополнительных источников на поверхности Земли к первоначально рассеиваемой ею мощности равно этой же величине, то мощность дополнительных источников должна быть равна  $3,6 \cdot 10^{12}$  кВт  $\Delta T$  (град). Это означает, что при появлении на Земле дополнительных источников энергии мощностью  $3,6 \cdot 10^{12}$  кВт температура поверхности Земли поднимается на 1 градус.

Полученная цифра для мощности дополнительных источников энергии в современных масштабах очень велика. Она на два с половиной порядка превышает мощность энергии, потребляемой в настоящее время. При современных темпах роста потребления энергии указанный уровень может быть достигнут в XXII в. Однако поскольку в реальном случае наряду с выделением энергии происходит загрязнение атмосферы, полученная цифра может снизиться.

Один из наиболее возможных путей воздействия человека на климат Земли может быть связан с изменением оптических свойств атмосферы. Особенность атмосферы Земли заключается в том, что основные ее компоненты — азот (78,9%), кислород (20,1%) и аргон (1%) — прозрачны как в оптической, так и в инфракрасной части спектра. Поэтому излучательные и поглощательные свойства атмосферы полностью определяются примесями. В инфракрасной области спектра излучательные свойства атмосферы в основном обусловлены колебательно-вращательными переходами молекул воды, углекислого газа и озона. Молекула каждого сорта поглощает и излучает энергию в строго заданной области длин волн — инфракрасной. Поэтому спектр излучения и поглощения атмосферы состоит из набора полос, т. е. атмосфера интенсивно поглощает инфракрасное излучение в отдельных интервалах длин волн в соответствии с составом присутствующих в ней примесей.

Выясним, какое количество вводимой молекулярной добавки может отразиться на тепловом балансе Земли. Для этого сделаем следующий мысленный эксперимент. Будем считать, что до введения некоторой молекулярной добавки атмосфера прозрачна в той области длин волн, которые эффективно поглощает и излучает эта компонента. Поэтому излучение в этой области длин волн не задерживается атмосферой и свободно

уходит за ее пределы. Появление рассматриваемой молекулярной добавки приводит к тому, что некоторая доля этого излучения поглощается атмосферой, а затем, после высвечивания возбужденных молекул, частично возвращается на поверхность Земли. Таким образом увеличивается энергия, поглощаемая поверхностью Земли, и температура самой поверхности.

Этот эффект, естественно, будет тем сильнее, чем большее количество рассматриваемой молекулярной компоненты будет введено в атмосферу. В табл. 3 приведены результаты расчета концентрации разных молекулярных компонент, введение которых в атмосферу при выполнении вышеуказанных условий приведет к повышению температуры атмосферы на 1 градус.

Как видно из табл. 3, влияние примесей может отразиться на тепловом балансе Земли уже при очень малых их концентрациях ( $10^{-8}$ — $10^{-7}$ ). Поэтому инфракрасное излучение атмосферы и тепловой баланс Земли могут зависеть от примесей, которые содержатся в атмосфере в малом количестве.

Таблица 3

| Молекулярная компонента                  | CO <sub>2</sub> | NH <sub>3</sub> | H <sub>2</sub> O | SO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | SO <sub>2</sub> | O <sub>3</sub> | NH <sub>3</sub> | SF <sub>6</sub> | CO <sub>2</sub> | SF <sub>6</sub> | SO <sub>2</sub> |
|--|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Длина волны для центра зоны поглощения * | 4,26            | 6,16            | 6,27             | 7,37            | 7,66            | 8,69            | 9,60           | 10,3            | 10,7            | 15,0            | 16,3            | 19,3            |
| Концентрация, $10^{-8}$                  | 30              | 60              | 30               | 4               | 2               | 2               | 4              | 2               | 0,3             | 4               | 3               | 7               |

\* Максимальное излучение абсолютно черного тела при комнатной температуре имеет место на длине волны примерно 17 мкм.

Оценим теперь, как изменится температура Земли при полностью «загрязненной» атмосфере, потерявшей оптическую прозрачность в инфракрасной области спектра. Это может произойти, если мы добавим различные молекулярные примеси в атмосферу в таком количестве, что перекроем весь инфракрасный спектр. Проследим, как при таком воздействии изменится диаграмма теплового баланса Земли, представленная на рис. 2.

Из условия теплового равновесия Земли и атмосферы следует, что полная мощность их излучения в окружающее пространство должна быть равна мощности солнечного излучения, попадающего в атмосферу. Тогда «загрязненная» атмосфера должна дополнительно испускать  $1,0 \cdot 10^{13}$  кВт инфракрасного излучения, которые ранее испускались поверхностью Земли и не поглощались атмосферой. Будем считать, что при «загрязненной» атмосфере сохранятся существовавшие ранее пропорции между потоками инфракрасного излучения атмосферы в сторону Земли и космоса, между потоками энергии с поверхности Земли, отдаваемыми ею в результате теплового излучения, испарения и конвекции. Кроме того, примем, что при новых условиях характер взаимодействия коротковолнового излучения с поверхностью Земли и атмосферой не изменится. Тогда новые параметры теплового баланса приведут к увеличению температуры поверхности Земли менее чем на 5 градусов. На диаграмме теплового баланса Земли потоки энергии для «загрязненной» атмосферы, полученные при указанных предположениях, даны в скобках.

Подводя итоги проведенному анализу, мы приходим к выводу, что введение в атмосферу молекулярных примесей с концентрацией  $10^{-8}$ — $10^{-7}$  способно привести к заметному изменению температуры Земли. При этом особенно опасно, если имеется набор молекулярных примесей, спектр поглощения которых приходится на «окна прозрачности» атмосферы.

### 3. СОСТАВЛЯЮЩИЕ КЛИМАТА ЗЕМЛИ

Тепловой режим, а следовательно, и климат нашей планеты зависят от совокупности целого ряда непрерывно меняющихся факторов. На рис. 4 представлено из-

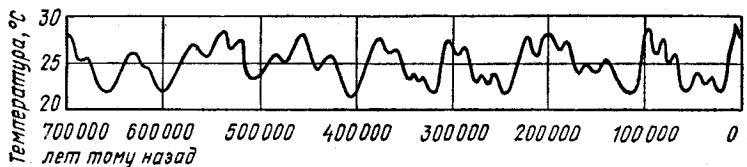


Рис. 4. Температура Карибского моря в прошлом, восстановленная из отношения количества изотопов кислорода ( $O^{16}$  и  $O^{18}$ ), которое содержится в окаменелостях отложения моря



менение температуры Карибского моря за последние 700 тысяч лет. Видно, что колебания температуры составляют несколько градусов, а характерный период ее изменения — порядка сотни тысяч лет. Вероятно, эти изменения в основном связаны с процессами на Солнце или в Солнечной системе. Интересно, что человеческие цивилизации, возникшие в последние тысячелетия, развились в эпоху очередного максимума температуры.

Менее значительные изменения климата заметны даже в масштабах времени, соизмеримых с человеческой жизнью, и могут быть связаны с различными факторами временного характера. Так, первая половина XX в. характеризовалась малым количеством вулканических извержений. Средняя температура в Северном полушарии с конца XIX в. до 40-х годов XX в. увеличилась примерно на 0,6 градуса. С 40-х годов наблюдается похолодание климата — средняя температура в Северном полушарии упала за последние 30 лет примерно на 0,3 градуса. На рис. 5 приведена средняя годовая темпера-

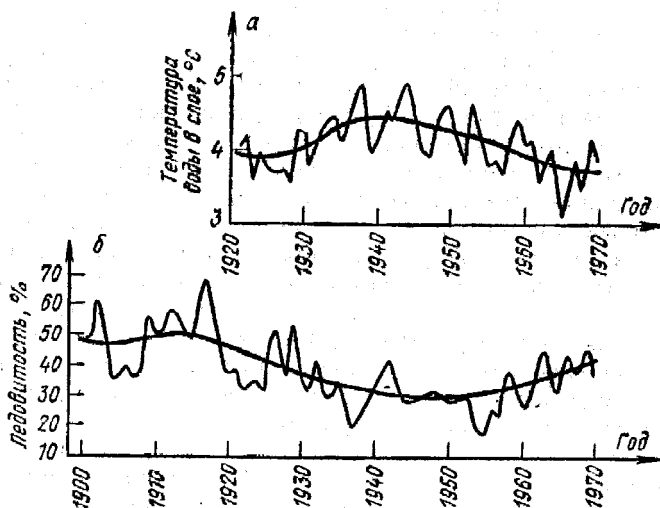


Рис. 5. Колебания средней температуры воды 200-метрового поверхностного слоя на Кольском меридиане (а) и средней за летний период ледовитости Баренцева моря (б). Плавные кривые — средние многолетние значения, нерегулярные кривые — среднегодовые значения температуры и ледовитости

тура воды и ледовитость (т. е. часть моря, покрытая льдом) для Баренцева моря. Следует отметить, что изменение средней температуры Земли происходит по-разному в Северном и Южном полушарии, а также на разных широтах.

Какие же факторы определяют климат Земли? Один из них, рассмотренный ранее, связан с количеством молекулярных примесей в атмосфере, способных поглощать и испускать инфракрасное излучение. Наиболее важной компонентой атмосферы, определяющей ее излучательные свойства в инфракрасной области спектра, является вода. Молекула воды поглощает и испускает инфракрасное излучение в нескольких широких интервалах инфракрасной области спектра; концентрация паров воды при умеренной влажности на несколько порядков может превышать концентрации других оптически активных молекул, так что присутствие воды в атмосфере в значительной мере определяет климат. Следствием этого является существенное отличие климата прибрежных областей (морской климат) от климата областей, находящихся вдали от океанов и содержащих мало влаги в атмосфере (континентальный климат).

Наряду с молекулярными примесями важную роль в формировании климата играет присутствие в атмосфере частичек пыли и аэрозолей. Твердые частицы, поднимаемые в атмосферу с поверхности Земли ветром или выбрасываемые туда при извержениях вулканов, отражают солнечное излучение и способствуют понижению температуры Земли. Аэрозоли — капельки микроскопических размеров, в состав которых могут входить сульфат аммония или другие сульфаты, нитраты, продукты распада вулканического пепла и метеоритов, а также вода. Аэрозоли частично отражают солнечное излучение, частично поглощают его. При этом в зависимости от состава аэрозоля отражение может превышать поглощение или наоборот, т. е. присутствие аэрозоля может способствовать как понижению, так и повышению температуры Земли. Аэрозоли нагреваются под действием солнечного излучения, и на их поверхности эффективно протекают различные химические процессы. Роль атмосферных аэрозолей в тепловом режиме планеты существенна. С их участием перерабатывается несколько процентов солнечной энергии, попадающей в атмосферу, хотя точность современных исследований

еще не позволяет количественно определить участие атмосферного аэрозоля в тепловом балансе Земли.

Важную роль в формировании климата Земли играют внешние факторы, связанные с процессами, происходящими на Солнце. Сама полная мощность солнечного излучения, попадающего в атмосферу Земли, — величина довольно стабильная. Однако интенсивность излучения в далекой ультрафиолетовой области, интенсивность заряженных частиц, испускаемых Солнцем, зависят от его состояния. Эти потоки содержат в себе гораздо меньшую энергию, чем солнечное излучение в видимой и прилегающей к нему частях спектра, но именно ими определяются некоторые параметры атмосферы. Так, образование окислов азота в верхних слоях атмосферы обусловлено потоком заряженных частиц, испускаемых Солнцем, а образование ионов происходит под действием излучения в далеком ультрафиолете. Количеством окислов азота в стратосфере определяется и

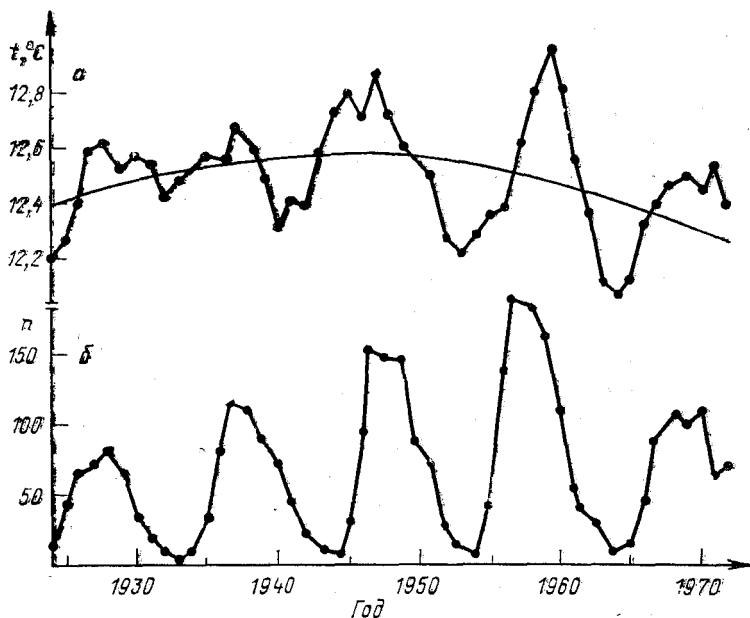


Рис. 6. Среднегодовая температура поверхности моря вблизи международной гидрографической станции ЕІ (20 миль южнее Плимута) (а) и среднегодовое количество пятен на Солнце (б)

**количество** находящегося там озона, который поглощает часть солнечного излучения и тем самым влияет на тепловой баланс Земли. Таким образом, процессы, происходящие на Солнце, косвенно отражаются на климате Земли.

Нестационарные явления на Солнце связаны с выходом горячей солнечной плазмы на его поверхность из внутренних областей в результате возникающих там неустойчивостей. Эти явления сопровождаются появлением на поверхности Солнца так называемых солнечных пятен или групп пятен, которые наблюдаются с Земли. Одновременно с появлением солнечных пятен происходит выброс потоков горячей плазмы за пределы Солнца. Чем большее количество пятен или групп пятен возникает на Солнце, тем больший поток быстрых заряженных частиц испускается с поверхности Солнца. Поэтому солнечную активность характеризуют средним числом пятен или групп пятен, наблюдаемых на его поверхности.

Солнечная активность — условно-периодическая функция времени с характерными периодами в 11 и 80 лет. Среднегодовое число пятен на Солнце в последние десятилетия дано на рис. 6. Там же представлены значения средней годовой температуры моря вблизи одной из метеостанций (гидрографическая станция Е1, Англия, 20 миль южнее Плимута). Видно, что между этими величинами существует корреляция, т. е. солнечная активность влияет на погоду. Амплитуда колебания температуры, так же как и за счет влияния пыли, составляет десятые доли градуса.

Обратим внимание еще на одно обстоятельство, которое может повлиять на климат отдельных областей Земли. Важную роль в формировании местного климата играют ветры, возникающие из-за неравномерного нагревания Земли. Через гидродинамическое движение атмосферы — посредством ветра — перерабатывается около 0,6% энергии солнечного излучения, попадающего в атмосферу Земли (более  $10^{12}$  кВт). Наряду с этим ветры переносят большое количество паров воды, которая испаряется в одних местах, а выпадает в виде осадков в других. Тем самым переносится энергия и влага.

Например, устойчивыми ветрами являются пассаты — ветры, дующие от тропиков к экватору. У экватора теплый воздух, насыщенный влагой вблизи океана,

поднимается на высоту в несколько километров и на этой высоте движется к тропикам. По мере движения этого воздуха содержащийся в нем водяные пары конденсируются в капельки, в результате чего выделяется тепло. Некоторые устойчивые ветры в нижней атмосфере Земли представлены на рис. 7.

Ветры в большой степени определяют погоду. Под действием различных факторов, влияющих на тепловой режим данной и соседних областей, характер ветров в этой местности может измениться. Это повлечет за собой и изменение климата данной местности. Особенно опасно изменение устойчивых воздушных течений, охватывающих большие расстояния, что может привести к изменению погодных условий в большом масштабе.

Сложность явлений, влияющих на климат Земли, можно продемонстрировать на следующем примере. Поглощение света поверхностью характеризуется величиной альбедо — отношением интенсивности отраженного света к интенсивности падающего. В частности, альбедо воды равно 0,03, альбедо свежего снега — 0,9. Среднее значение альбедо поверхности Земли согласно диаграмме теплового баланса Земли (см. рис. 2) со-

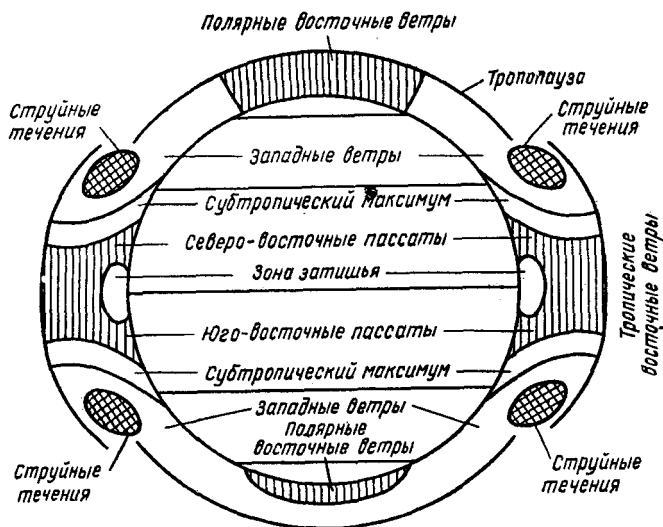


Рис. 7. Преобладающие ветры в тропосфере (поперечный разрез)

ставляет 0,074, т. е. по характеру поглощения и отражения солнечного света поверхность Земли ближе к воде. Теперь представим себе, что поверхность Земли покрыта льдом, так что альбедо поверхности Земли составляет  $0,7 \approx 0,9$ . При таких условиях поверхность Земли поглотит только  $0,1 \approx 0,3$  попадающей на нее энергии солнечного излучения. Определим в этом случае температуру поверхности Земли, считая, что при заданных условиях мощность, рассеиваемая поверхностью Земли на конвекцию и испарение, а также мощность инфракрасного излучения, создаваемая атмосферой и поглощаемая поверхностью Земли, та же, что и в реальном случае. Тогда мы получим, что поверхность Земли поглощает мощность (в единицах  $10^{13}$  кВт)  $17,5 + (8,7 + 0,7) \times (0,1 \approx 0,3) = 18,4 \approx 20,3$  и испускает посредством инфракрасного излучения  $(18,4 \approx 20,3) - 5,6 = 12,8 \approx 14,7$ . Отсюда на основании закона Стефана — Больцмана получим, что температура поверхности Земли в рассматриваемом мысленном эксперименте составляет  $258 \approx 267^\circ \text{K}$ , или  $-15 \approx -6^\circ \text{C}$ .

Рассмотренный тепловой режим Земли также является устойчивым, т. е. если бы Земля была покрыта льдом, то характер обмена энергией между поверхностью Земли, атмосферой и Солнцем не привел бы к таянию льдов. В этом случае Земля была бы покрыта льдом и имела среднюю температуру примерно на 20 градусов ниже, чем сейчас. Возможность существования такого теплового режима атмосферы — лишний пример сложности связей, влияющих на климат Земли. Даже временное изменение отдельных составляющих климата может привести к существенному его изменению.

#### **4. ВЛИЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА НА КЛИМАТ ЗЕМЛИ**

Ранее проведенные оценки показали, что современное потребление энергии при производственной деятельности человека недостаточно, чтобы повлиять на тепловой режим Земли. Полное загрязнение атмосферы как молекулярными примесями, так и твердыми частицами (пылью и аэрозолями) в результате производственной деятельности человека в настоящее время меньше, чем естественные выбросы в атмосферу. Поэтому в настоя-

щее время глобальное влияние человека на тепловой режим нашей планеты мало. Однако поскольку промышленность неравномерно распределена по поверхности нашей планеты, то в отдельных областях из-за высокой плотности потребления энергии возможны локальные изменения климата. В частности, климат больших городов заметно отличается от климата окружающей местности.

Согласно диаграмме теплового баланса Земли (см. рис. 2) средний поток энергии инфракрасного излучения с ее поверхности составляет  $4 \cdot 10^5$  кВт/км<sup>2</sup>. Для увеличения температуры поверхности на величину  $\Delta T$  градусов при тех же оптических свойствах атмосферы необходимо выделение дополнительного потока энергии с поверхности Земли, равного  $6 \cdot 10^3 \Delta T$  кВт/км<sup>2</sup>. Исходя из этого, оценим среднее изменение температуры в большом городе или промышленном районе. При этом будем считать, что тепловыделение пропорционально числу проживающих в нем жителей. Средняя мощность потребления энергии на человека в Советском Союзе согласно полной энергии ископаемого горючего, гидро- и атомной энергии ( $2 \cdot 10^9$  кВт) и числа жителей (250 млн. человек) равна 8 кВт/чел. Отсюда для Москвы с населением 7,5 млн. человек мы получаем мощность потребляемой энергии 60 млн. кВт и ее плотность  $6 \cdot 10^5$  кВт/км<sup>2</sup>, что соответствовало бы изменению температуры на 10 градусов. Для Московской области (площадь 50 тыс. км<sup>2</sup>, население 14 млн. человек) и для штата Нью-Йорк (площадь 130 тыс. км<sup>2</sup>, население 18 млн. человек) проведенная оценка дает среднее изменение температуры 0,3 градуса.

Климат большого города создается не только дополнительным выделением тепла, но и еще целым рядом факторов и отличается от климата окружающей местности. Важную роль в формировании климата большого города играет загрязнение атмосферы и связанное с этим изменение ее оптических свойств. Количество пыли здесь примерно в 10 раз больше, чем над сельской местностью, и в 100 раз больше, чем над океаном. Поэтому интенсивность солнечного излучения, достигающего поверхности Земли в городе, на 10—20% меньше, чем в сельской местности. Из-за сильного загрязнения атмосферы различными молекулярными компонентами парниковый эффект в городе проявляется гораздо силь-

нее, чем вне его. Дымность здесь примерно в 2—3 раза выше, чем в сельской местности, а количество осадков больше на 5—10%. Это связано с наличием большого количества молекулярных компонент, которые служат центрами конденсации воды. В воздухе над городом имеется повышенное количество аэрозолей, ухудшающих видимость и, поскольку они содержат химически активные молекулы, оказывающих вредное действие на растительность, здоровье человека и даже на городские постройки.

Все указанные факторы и дополнительные источники энергии в городе приводят к тому, что средняя температура воздуха в городе выше, чем за его пределами, примерно на 1,5—2 градуса<sup>6</sup>. Это расхождение гораздо больше зимой, чем летом, и ночью по сравнению с днем.

Рассмотренные особенности приводят и к тому, что над городом образуется «тепловая шапка» — купол, состоящий из воздуха более теплого и более влажного, чем над окружающей местностью. Тепловая шапка ограничивает обмен воздухом между городом и его окрестностями, в результате чего скорость ветра и частота его появления в городе на 20—30% меньше, чем вне его.

Образование тепловой шапки может привести к инверсному распределению температуры воздуха по высоте, т. е. к росту температуры воздуха с высотой. Инверсное распределение температуры устойчиво; в этом случае не возникает вертикальная конвекция воздуха, приводящая к перемешиванию слоев. В результате все выбрасываемые в атмосферу загрязнения могут накапливаться в ней, что создает неприемлемые условия жизни человека.

Следует отметить, что в Москве и центральной части Советского Союза господствуют устойчивые ветры, что предотвращает застой воздуха. В более тяжелом положении находятся города Соединенных Штатов Америки, где устойчивые ветры отсутствуют. То же относится к некоторым городам Средней Азии, которые окружены горами. Эти города защищены от ветра, и при дальнейшем развитии промышленности и транспорта атмосфера этих городов может оказаться сильно загрязненной.

---

<sup>6</sup> В ясные зимние ночи разность между температурой центра Москвы и ее пригородов достигает 10 градусов.



Наблюдение за изменениями климата большого города представляет большой интерес с точки зрения влияния деятельности человека на тепловой баланс Земли. Большие города и некоторые промышленные районы — это отдельные островки на земном шаре, климат которых создается под влиянием человека. По мере увеличения масштабов производства площадь этих островков будет увеличиваться, так что изучение климата большого города позволяет получить представление о тенденциях изменения климата Земли под действием человека.

## Состав атмосферы и человек

### 1. СОСТАВ АТМОСФЕРЫ В ПРОШЛОМ

Атмосфера Земли не всегда была такой, какой мы ее видим сейчас. На первой стадии существования Земли основными компонентами ее атмосферы, как и атмосферы ближайших планет Венеры и Марса, были углекислый газ и азот. Согласно оценкам первоначально в атмосфере Земли давление углекислого газа составляло 3,2 атм, а давление азота — 0,8 атм.

Анализ горных пород показывает, что кислород начал появляться в атмосфере Земли примерно 1,8 млрд. лет назад (возраст Земли 4,6 млрд. лет) в результате жизнедеятельности бактерий, перерабатывающих углекислый газ в кислород. Наличие кислорода в атмосфере Земли привело к возникновению озонового пояса, который мог защитить живые организмы от губительного действия ультрафиолетового излучения с длиной волны менее 3000 Å. Создались условия для появления разнообразных живых организмов и растений, жизнедеятельность которых связана с переработкой под действием солнечной энергии углекислого газа атмосферы в углерод органических веществ и кислород.

Современный состав атмосферы представлен в табл. 4. Наличие кислорода в атмосфере привело к возникновению живых организмов (в том числе и человека), основа жизни которых связана с окислительными процессами, сопровождающимися превращением кислорода и углерода органических веществ в углекислый газ. Такие же превращения происходят в процессах гниения и горения, которые поддерживают равновесие

между кислородом и углекислым газом атмосферы. Человек, активно включившийся в эти процессы в последнее время, начинает изменять сложившееся в природе равновесие.

Таблица 4

| Компонента *   | Объемное содержание, % |
|----------------|------------------------|
| Азот           | 78,084                 |
| Кислород       | 20,948                 |
| Аргон          | 0,934                  |
| Углекислый газ | 0,0326                 |
| Неон           | 0,0218                 |
| Гелий          | 0,035                  |
| Метан          | 0,032                  |
| Криптон        | 0,031                  |

\* Указано содержание основных компонент сухой атмосферы. Среднее содержание паров воды в атмосфере 0,44%.

## 2. НАКОПЛЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ

Углекислый газ, присутствующий в атмосфере, определяет ее излучательные свойства в инфракрасной области спектра и тем самым влияет на тепловой баланс атмосферы и Земли. Этот газ в небольших количествах не действует на жизненные процессы в организме человека и поэтому не относится к числу вредных химических компонент атмосферы. В то же время он играет важную роль в жизнедеятельности растений, превращаясь в результате фотосинтеза в их клетках в органическое вещество и таким образом обеспечивая рост растений. Углекислый газ образуется в процессах окисления органических веществ, гниения и горения, т. е. при его участии осуществляется круговорот углерода в природе.

Выделение углекислого газа в атмосферу — наиболее интенсивный процесс, сопровождающий деятельность человека. Почти все энергопотребление связано со сжиганием горючих ископаемых — нефти, угля, газа, а также дров и органических отходов. Все такие процессы сопровождаются выбросом углекислого газа в атмосферу, и именно в этом проявляется наиболее сильное влияние производственной деятельности человека на состав атмосферы.

В атмосфере средняя концентрация углекислого газа составляет в настоящее время  $3,28 \cdot 10^{-4}$ . Общее количество углерода в составе атмосферного углекислого газа немногим менее 700 млрд. т. Ежегодно при фотосинтезе на суше и в океане, а также при растворении углекислого газа в океане из атмосферы поглощается около 150 млрд. т углерода и примерно такое же количество его выделяется в процессах гниения и дыхания. Человек заметно влияет на баланс углекислого газа, находящегося в атмосфере Земли. Годовая добыча угля, нефти и газа в настоящее время превышает 6 млрд. т. Эти горючие ископаемые после сжигания переходят в атмосферу в виде углекислого газа, в составе которого содержится немногим более 5 млрд. т углерода.

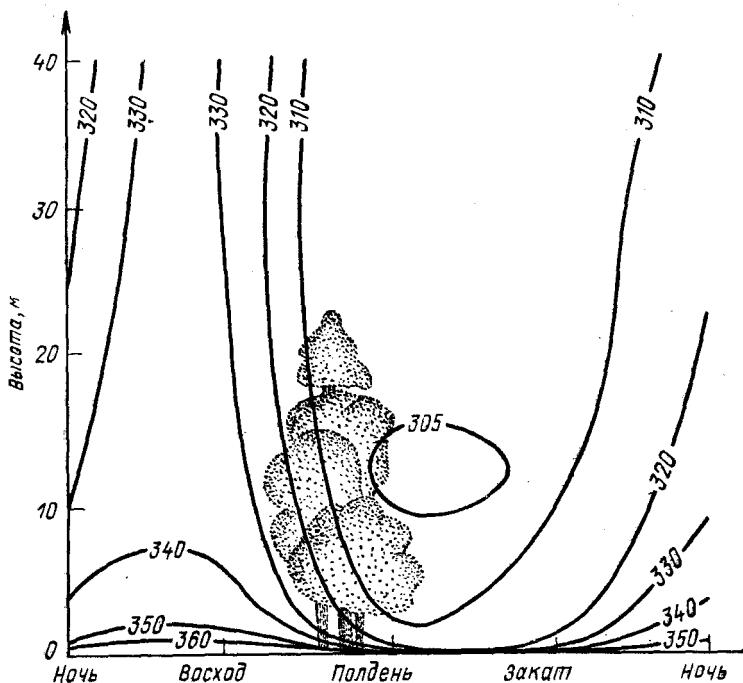


Рис. 8. Распределение по высоте концентрации углекислого газа ( $10^{-6}$ ) в лесу летом в течение суток

Точное измерение концентрации углекислого газа в атмосфере — проблема сложная. Нестационарность процессов выделения и поглощения углекислого газа на Земле приводит к тому, что его концентрация в выбранной точке земного шара может значительно меняться в зависимости от времени суток, сезона и характера окружающей местности. На рис. 8 приводится распределение концентрации углекислого газа по высоте в лесу в течение суток.

Для определения устойчивости тенденций в изменении глобальной концентрации углекислого газа необходимо иметь большое количество замеров в местах, удаленных от источников и поглотителей углекислого газа (городов, океанов и лесных массивов), например, брать пробы воздуха на больших высотах. Что касается наземных наблюдений, то для подобной цели уникальным местом является обсерватория Мауна-Лоа (Гавайи-

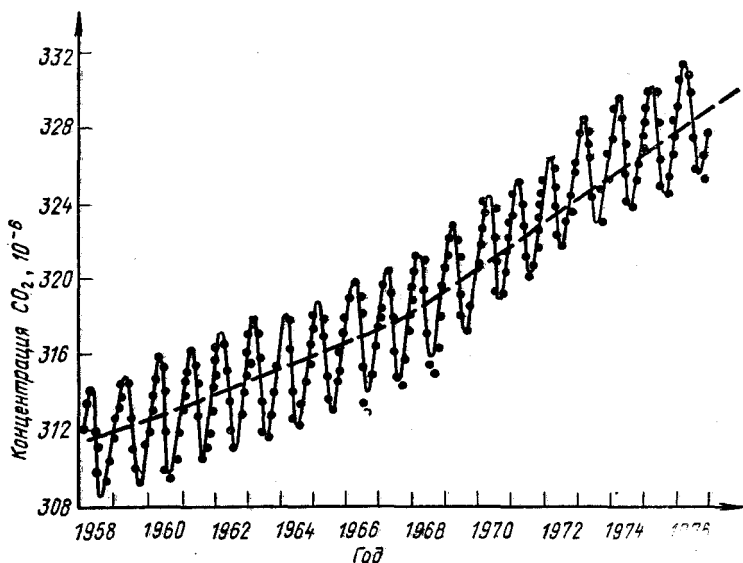


Рис. 9. Концентрация углекислого газа в атмосфере согласно измерениям в обсерватории Мауна-Лоа (Гавайские острова). Осцилляции связаны с процессом фотосинтеза летом в северной полушфере. Пунктир — средняя годовая концентрация

ские острова), где начиная с 1958 г. проводятся тщательные измерения концентрации углекислого газа. Благодаря характеру ветров и высоте расположения обсерватории (около 3800 м над уровнем моря), а также удаленности ближайших источников загрязнения атмосферы, которые находятся от обсерватории на расстоянии нескольких тысяч километров, это место сделалось центром наиболее достоверной информации относительно количества углекислого газа в атмосфере. На рис. 9 приведены средние месячные концентрации углекислого газа в атмосфере, полученные в обсерватории Мауна-Лоа.

Согласно этим измерениям за период с 1958 по 1978 г. среднегодовая концентрация углекислого газа в атмосфере возросла примерно на 5%. Если бы весь искусственно созданный за это время углекислый газ оставался в атмосфере, его концентрация за указанный период возросла бы на 11%. Следовательно, часть индустриального углекислого газа поглощается другими сферами обращения.

Основываясь на этих данных, построим модель баланса углерода между поверхностью Земли и атмосферой. При этом используем следующие соображения. Поток углекислого газа из атмосферы в другие сферы обращения в результате фотосинтеза и растворения в верхних слоях океана возрастает пропорционально его содержанию в атмосфере. С другой стороны, обратный поток углекислого газа в атмосферу в результате процессов гниения, разложения органического вещества, дыхания растений, окисления изменяется пропорционально количеству углерода в соответствующих сферах обращения углерода<sup>7</sup>. Тем самым в процессе накопления углекислого газа в атмосфере сохраняется соотношение между количеством углерода в атмосфере и другими сферами обращения углерода.

Составим прогноз о накоплении углекислого газа в атмосфере в течение ближайших нескольких десятков

<sup>7</sup> Распределение углерода по различным сферам обращения такое: атмосфера содержит примерно 700 млрд. т углерода в составе углекислого газа, в биосфере содержится 800 млрд. т углерода, в органическом веществе почвы имеется 1000—3000 млрд. т углерода, в океане — примерно 40 000 млрд. т, причем в верхних слоях (глубиной до 100 м) — примерно 600 млрд. т. Лишь часть углерода, содержащегося в биосфере и верхних слоях океана, эффективно участвует в обмене с углеродом атмосферы.

лет. При этом мы будем опираться на исследования известного американского энергетика Р. Ротти, согласно которым в 2025 г. в результате сжигания горючих ископаемых и затвердевания цемента в атмосферу Земли будет выпущено 26 млрд. т углерода в составе углекислого газа (это соответствует ежегодному приросту потребления топлива 3,4%). Будем считать, что соотношение между количеством индустриального углекислого газа, остающегося в атмосфере и попадающего в другие сферы обращения, сохранится в дальнейшем таким же, как и в предыдущие 20 лет. В табл. 5 приведены полученные на основе этих данных значения концентрации углекислого газа в ближайшие десятилетия.

Заметим, что период в несколько десятков лет наиболее благоприятен для прогноза. С одной стороны, он достаточно продолжителен, чтобы можно было пренебречь кратковременными (порядка года) вариациями процессов образования и разрушения углекислого газа, которые связаны с погодой. С другой стороны, за это время мало сказывается изменение растительного покрова Земли, частично связанное с хозяйственной деятельностью человека, и другие глобальные изменения такого же плана. Естественно, предполагается, что изменение содержания углерода в атмосфере и других сферах обращения за рассматриваемые времена относительно невелико.

Таким образом, человек включается в процессы обмена углеродом между атмосферой и поверхностными слоями Земли, увеличивая количество углерода, находящегося в обращении. К каким же изменениям это приведет в дальнейшем и как эти изменения отразятся на условиях жизни человека? Наиболее важное значение атмосферного углекислого газа связано с его участием в биологических процессах. Без углекислого газа атмосферы был бы невозможен фотосинтез — наиболее интенсивный биологический процесс. В настоящее время мощность солнечной энергии, перерабатываемой при фотосинтезе, почти на порядок выше полной мощности всех мировых энергетических установок. Оптимальные условия для фотосинтеза достигаются при концентрации углекислого газа в атмосфере в несколько процентов. Поскольку естественная концентрация углекислого газа в атмосфере далека от оптимума, рас-

тения испытывают недостаток в углекислом газе. При прочих благоприятных условиях (количество влаги и минеральных удобрений в почве) увеличение содержания углекислого газа в атмосфере вызывает пропорциональное ускорение фотосинтеза. Поэтому увеличение количества углекислого газа в атмосфере будет способствовать росту урожаев. Тем самым накопление углекислого газа в атмосфере является благоприятным для человека фактором. Следует отметить, что изменение содержания углекислого газа на несколько сотых процента не отражается на здоровье человека. В воздухе, который выдыхает человек, содержится несколько процентов углекислого газа, и на этом уровне рассматриваемые изменения несут существенны.

Другим следствием накопления углекислого газа в атмосфере является изменение теплового баланса Земли. Полосы поглощения молекулы углекислого газа попадают в спектр теплового излучения Земли. Поэтому углекислый газ атмосферы сильно влияет на тепловой баланс Земли. Будем считать, что спектр поглощения молекулы углекислого газа в инфракрасной области спектра не перекрывается поглощением других молекул атмосферы или аэрозоля. Тогда если углекислый газ удалить из атмосферы Земли, температура планеты понизится на 10—12 градусов. Если же удвоить количество углекислого газа в атмосфере, то температура Земли повысится на 1,5—2 градуса. Это связано с природой инфракрасного поглощения, ибо увеличение концентрации углекислого газа проявляется только на краях полос поглощения молекулы. Изъятие же углекислого газа изменяет поглощение излучения во всей полосе.

По этой же причине влияние изменения концентрации углекислого газа атмосферы на тепловой баланс Земли ослабляется, если в атмосфере имеются компоненты, спектр поглощения которых перекрывается со спектром поглощения углекислого газа. В частности, таковы спектры поглощения молекул углекислого газа и воды, а потому изменение концентрации углекислого газа во влажной атмосфере меньше сказывается на тепловом балансе Земли, чем в случае сухой атмосферы.

В табл. 5 представлены изменения температуры Земли в связи с прогнозируемым увеличением концентрации углекислого газа для сухой и средневлажной ат-

мосферы. Как видно, изменение температуры Земли к концу XX в. мало по сравнению с естественными многолетними колебаниями температур. Эти цифры еще более снизятся, если принять во внимание загрязненность атмосферы аэрозолями, пылью и молекулярными компонентами, которые поглощают излучение в области спектра поглощения молекулы углекислого газа. Тем самым изменение температуры Земли на рубеже XXI столетия в результате накопления индустриального углекислого газа в атмосфере оказывается слабым и его можно не принимать в расчет. Через 50 лет этот эффект станет заметным и сравнится с естественными колебаниями температуры.

Подводя итог сказанному, отметим, что накопление индустриального углекислого газа в атмосфере в первую очередь является благоприятным фактором, ибо ускоряет процессы фотосинтеза и как следствие этого ускоряет созревание урожаев. Другой результат рассматриваемого явления, связанный с повышением температуры Земли, менее существен и станет заметным гораздо позже.

Таблица 5

| Год   |               | 1958 | 1978 | 2000 | 2025 |
|---|---------------|------|------|------|------|
| Количество углерода в сожженных горючих ископаемых с 1958 г., млрд. т |               | —    | 75   | 260  | 680  |
| Увеличение количества CO <sub>2</sub> в атмосфере с 1958 г., %        |               | —    | 5    | 16   | 42   |
| Концентрация углекислого газа в атмосфере, 10 <sup>-6</sup>           |               | 313  | 328  | 363  | 444  |
| Увеличение температуры  | $\eta^* = 0$  | —    | 0,08 | 0,29 | 0,74 |
| поверхности Земли, град.  | $\eta = 70\%$ | —    | 0,05 | 0,17 | 0,46 |

\*  $\eta$  — влажность воздуха.

### 3. ПРОБЛЕМА АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА

Важную роль для жизни на Земле играет озон, который задерживает ультрафиолетовое излучение, губительно действующее на живые организмы. Озон погло-



щает примерно 99% ультрафиолетового излучения Солнца с длиной волны короче 3200 Å, что составляет примерно 2—3% потока солнечной энергии, попадающей в атмосферу Земли. За счет этого температура атмосферы на высотах, где сосредоточен озон, увеличивается на несколько десятков градусов. Кроме того, молекула озона имеет несколько полос поглощения в инфракрасной области спектра, а потому присутствие озона в атмосфере влияет на излучательную способность атмосферы в инфракрасной части спектра. Тем самым присутствие озона в атмосфере отражается на тепловом балансе и климате Земли.

Количество озона в атмосфере невелико, его максимальная концентрация составляет примерно 0,001%. На рис. 10 для стандартной атмосферы на широте 45° в Северном полушарии приводится распределение концентрации и плотности озона по высоте (усредненное по колебаниям в течение суток и времени года, а также по долготе). Как видно, озон в основном сосредоточен в стратосфере на высотах выше 10 км.

Содержание озона в атмосфере сильно колеблется в зависимости от времени суток, времени года, широты и долготы выбранной точки и т. д. На рис. 11 представлены средние месячные значения содержания озона в атмосфере на разных широтах. В качестве единицы измерения полного количества озона принимается высота столба, которую занимал бы весь находящийся над сечением этого столба атмосферный озон при нормальном давлении. Средняя высота такого столба 3 мм. Амплитуда колебания количества озона в выбранной географической точке в течение суток доходит до 30%, от сезона к сезону меняется в пределах 10%, а среднегодовое содержание озона изменяется на проценты и коррелирует со солнечной активностью.

Несмотря на малую концентрацию озона в атмосфере ( $\sim 10^{-8}$ ), он играет важную роль в окислительных процессах, протекающих в клетках тканей живых организмов. В этом отношении поучителен опыт использования кондиционированного воздуха. Использование кондиционеров, несмотря на подбор, казалось бы, оптимальных параметров употребляемого в них воздуха (его состава и влажности), вызывало более частые заболевания людей по сравнению с обычным случаем.

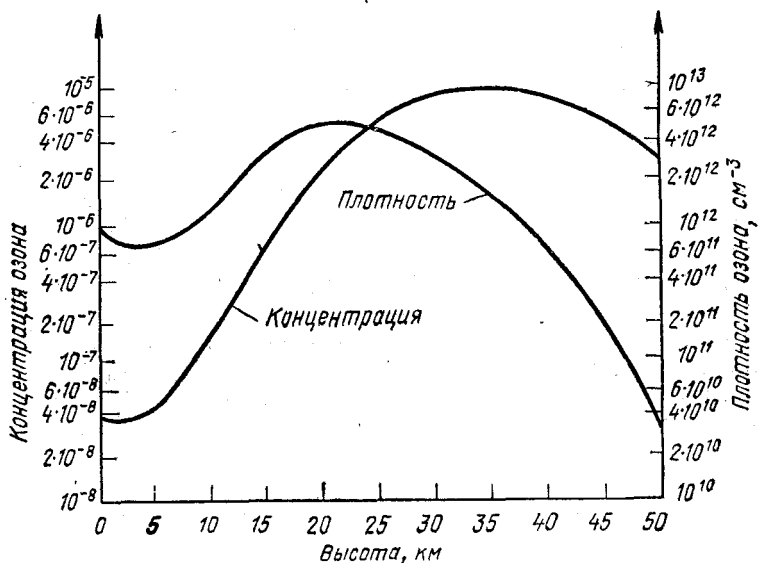


Рис. 10. Распределение концентрации и плотности озона по высоте для стандартной атмосферы на 45° северной широты. Стандартная атмосфера использует усредненные по времени параметры атмосферы

Как показали исследования, причина этого связана с отсутствием озона в кондиционированном воздухе.

Озон — метастабильное соединение, молекула его состоит из трех атомов кислорода. Однако энергия, запасенная в атмосферном озоне, невелика. Если в некоторой области атмосферы на тех высотах (30—40 км), где концентрация озона максимальна, превратить озон в кислород, то температура этой области атмосферы повысится не более чем на 0,1 градуса. Тем не менее присутствие озона в атмосфере приводит к повышению ее температуры на тех высотах, где он сосредоточен, на несколько десятков градусов, что связано с интенсивностью процессов, в которых принимает участие озон. Для выяснения возможности влияния деятельности человека на атмосферный озон необходимо разобраться в основных процессах образования и разрушения озона в атмосфере в естественных условиях. Этим мы далее и займемся.

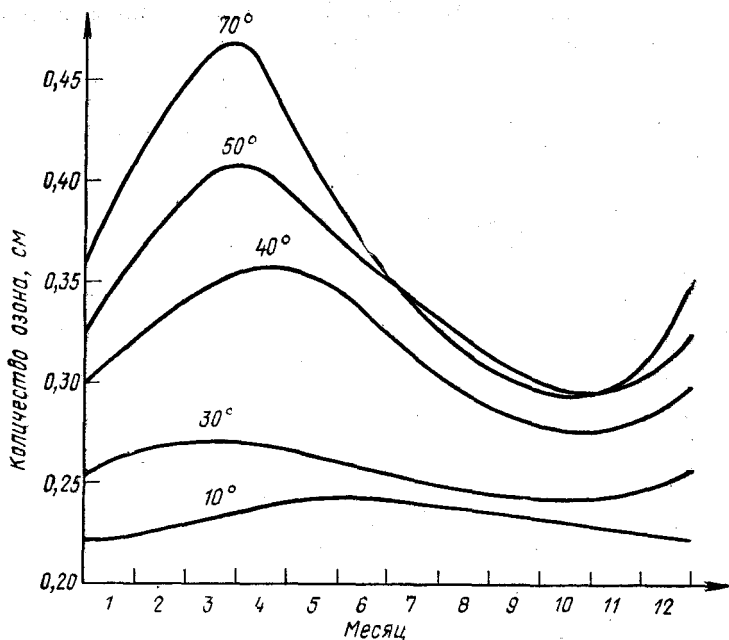
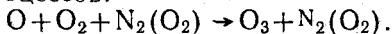


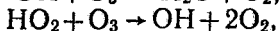
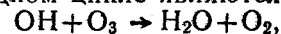
Рис. 11. Средние месячные значения полного количества озона при 10°, 30°, 40° и 70° северной широты. По оси абсцисс указан порядковый номер месяца

Атмосферный озон образуется из атомарного кислорода, который, в свою очередь, появляется в результате разрушения молекулярного кислорода под действием жесткого ультрафиолетового излучения Солнца. Атомарный кислород диффундирует в нижние слои атмосферы и на высотах ниже 60 км, где плотность воздуха достаточно велика, превращается в молекулу озона в результате процессов:

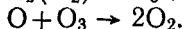
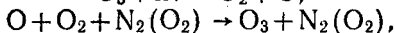
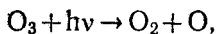


Особенность необратимого разрушения озона состоит в том, что отсутствует прямая химическая реакция между молекулами озона, приводящая к образованию кислорода (хотя она энергетически выгодна). Разрушение озона в стратосфере происходит в результате ряда процессов, которые носят название циклов. Наиболее важными являются азотный, хлорный, кислородный (или цикл Чемпена) и водородный циклы. Суммарным результатом каждого из этих циклов являются реакции

разрушения озона  $2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$ . Например, основными процессами в водородном цикле являются:



а основные процессы в кислородном цикле описываются уравнениями:



Другие циклы состоят из большего числа процессов.

Интенсивность разрушения озона в атмосфере определяется совокупностью процессов, которые протекают с участием примесей, в малом количестве содержащихся в атмосфере. Производственная деятельность человека может привести к изменению количества этих примесей, а тем самым и к уменьшению количества озона в атмосфере. Пока такие изменения невелики, их невозможно определить экспериментальным путем, ибо они завуалированы большими изменениями содержания озона, вызванными случайными, но естественными процессами. Поэтому влияние человека на содержание озона в атмосфере устанавливается расчетным путем.

В основном сокращение количества атмосферного озона может определяться двумя видами воздействия: полетами сверхзвуковых самолетов на больших высотах, а также производством фреонов. Оценки показывают, что в настоящее время это сокращение составляет около 1%.

При работе двигателей в высокотемпературных установках при сжигании топлива азот и кислород воздуха образуют небольшое количество окислов азота, которые выбрасываются в атмосферу вместе с продуктами сгорания. Если этот процесс происходит на поверхности Земли или на небольших высотах в атмосфере, то образующиеся окислы азота вымываются водой и возвращаются на Землю. Если же он происходит гораздо выше облаков — в стратосфере, то окислы азота долго (порядка года) находятся в атмосфере и принимают участие в разрушении стратосферного озона<sup>8</sup>. По этой причине полеты сверхзвуковых самолетов или других

---

<sup>8</sup> Для поддержания существующего количества окислов азота, которые вносят основной вклад в разрушение озона, достаточно нахождения там двигателей общей мощностью  $10^6$  кВт. Это на четыре порядка ниже современных мощностей энергопотребления.

летательных аппаратов в высоких слоях атмосферы могут создать угрозу стратосферному озону. Оценки показывают, что ежедневное нахождение в течение 7 ч на высоте 17 км примерно 300 сверхзвуковых самолетов типа «Конкорд» или ТУ-144 приведет к уменьшению количества стратосферного озона на 1%.

Другая возможность образования окислов азота в стратосфере связана с ядерными испытаниями на больших высотах. Согласно выполненным расчетам ядерные испытания в атмосфере в 1961—1962 гг. привели к сокращению количества озона в Северном полушарии на 3—6%. Окислы азота находятся в стратосфере примерно в течение одного года. Поэтому через 2—3 года после резкого сокращения ядерных испытаний в атмосфере их влияние на стратосферный озон практически не проявлялось.

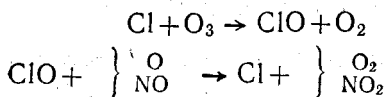
Наиболее сильное разрушение атмосферного озона связано с производством фреонов — химически инертных веществ, содержащих углерод и галогены. Наиболее активными разрушителями озона являются фреоны  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  и  $\text{CFCl}_3$ . Попадая в атмосферу в результате производственной деятельности человека и поднимаясь на высоты в несколько десятков километров, эти соединения под действием жесткого ультрафиолетового излучения Солнца разлагаются на составляющие их компоненты. Одна из образующихся компонент — атомарный хлор — активно способствует разложению озона. Мировое ежегодное производство первого из фреонов с 1958 по 1973 г. увеличилось с 59 до 469 тыс. т, второго — с 23 до 313 тыс. т. Как видно, производство фреонов имеет тенденцию удваиваться за 4—5 лет.

Фреоны используются как наполнители аэрозолей (около 60%), как растворители или как пенящая компонента смеси (15%), а также в качестве рабочего вещества холодильников всевозможных классов (25%). Способы использования фреонов таковы, что в конечном итоге они попадают в атмосферу (либо сразу, как в первом случае, либо в результате утечек спустя некоторое время, как в последнем). С точки зрения химического воздействия на человека такая ситуация вполне допустима, так как эти соединения химически пассивны и потому безвредны. К тому же концентрация фреонов невелика и составляет  $(0,5—1) \cdot 10^{-10}$  для атмосферы над океанами и сельской местностью и  $(1—2) \cdot 10^{-10}$

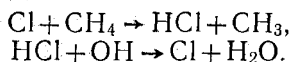
для атмосферы городов. Однако даже при малой концентрации они участвуют в разрушении стратосферного озона, и поэтому их присутствие в стратосфере может оказать косвенное влияние на условия жизни человека.

Необходимо отметить, что фреоны не образуются естественным образом, их содержание в атмосфере вызвано только производственной деятельностью человека. Измерения свидетельствуют об увеличении количества фреонов в атмосфере, коррелирующем с увеличением количества фреона, произведенного за последние годы.

Цикл разрушения озона в стратосфере под действием атомарного хлора протекает по схеме:



Наиболее важные процессы, определяющие баланс хлора в стратосфере,



Последняя реакция специфична только для хлора. Из-за отсутствия такого типа реакции фтор в стратосфере находится в соединении HF, которое не реагирует с озоном. Хлор же в основном присутствует в соединении ClO, принимающем участие в разрушении озона.

Соединения хлора, попадающие в атмосферу в естественных условиях, химически активны. Они легко образуют аэрозоли и вымываются водой\*. Поэтому до стратосферы доходит очень малая часть этих соединений. Химически пассивные фреоны свободно достигают стратосферы. Поэтому их вклад в баланс стратосферного хлора может быть существенным при относительно малом вкладе в баланс хлора, поступающего в атмосферу Земли.

Ежегодно из тропосферы в стратосферу переносится примерно 40 тыс. т хлора в составе различных соединений, извержения вулканов в среднем сопровождаются выбросом 100 тыс. т хлора в год, хотя за одно мощное извержение может быть выброшено до 3 млн. т

хлора прямо в стратосферу<sup>9</sup>. Однако через 1—2 года соединения хлора, как уже говорилось, уходят из стратосферы, и обусловленное их воздействием сокращение количества озона прекращается.

Человек ежегодно производит около 800 тыс. т хлора в соединениях  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{CFCl}_3$  и  $\text{CCl}_4$ , что уже превышает естественное поступление хлора в верхние слои атмосферы. Ввиду большого времени жизни фреонов ежегодное поступление антропогенного атомарного хлора в стратосферу составляет 10—20 тыс. т, т. е. на порядок меньше естественного потока. За счет произведенных человеком фреонов еще много лет будет создаваться атомарный хлор. Согласно расчетам, проведенным в ряде лабораторий США, атомарный хлор, образующийся при разрушении находящегося в стратосфере фреона, уменьшит количество стратосферного озона примерно на 3% к 1980 г. и на 15—20% к 2000 г. При этих расчетах предполагалось, что современные тенден-

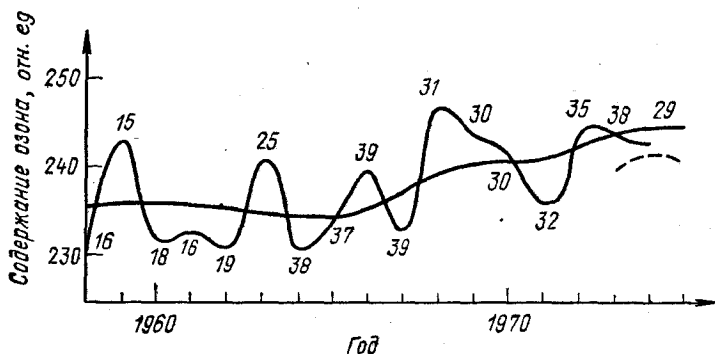


Рис. 12. Изменение полного количества озона в Северном полушарии (в относительных единицах) с 1958 по 1975 г. Тонкая сплошная кривая учитывает полное количество озона в Северном полушарии с усреднением за год. Цифры около нее указывают, данные какого количества станций использовались. Толстая сплошная кривая представляет усреднение за несколько лет, пунктир учитывает данные 14 метеостанций

<sup>9</sup> Поскольку образование стратосферного хлора в основном обусловлено действием вулканов, то вместе с извержениями заметно изменяется содержание озона в стратосфере. Так, оценки показывают, что при извержении вулкана Агунг в 1963 г., когда в стратосферу попало около 1 млн. т хлора, количество озона в атмосфере уменьшилось примерно на 5%.

ции роста производства фреонов и их использования сохранятся и в дальнейшем. Необходимо отметить, что время нахождения фреона в стратосфере составляет несколько десятков лет. Поэтому фреон, производимый и выпускаемый в атмосферу в настоящее время, накапливается в атмосфере и создает угрозу будущему.

Мы видим, что проблема влияния фреонов на стратосферный озон приобретает международное значение. Примерно половина синтезированного к настоящему времени количества фреонов произведена в США. Поэтому данная проблема привлекает серьезное внимание общественности и правительства и неоднократно рассматривалась в конгрессе США. Только в 1975 г. на научные работы, связанные с исследованием этой проблемы, в США было выделено 25 млн. долларов.

Отметим еще одну особенность проблемы стратосферного озона. В то время как надежно установлены пути влияния человека на содержание стратосферного озона и оценена степень этого влияния, до сих пор не ясно, к каким последствиям может привести сокращение количества озона. Следует отметить, что анализу поддается только исследование влияния на количество стратосферного озона отдельных явлений. Согласно проведенному анализу все компоненты, вводимые человеком в атмосферу, способствуют сокращению общего количества озона. Тщательное изучение полного количества озона, опирающееся на измерения нескольких десятков озонных станций, свидетельствует об обратном. За период с 1958 по 1975 г. полное содержание озона в Северном полушарии увеличилось на 4% (рис. 12). Это лишний раз свидетельствует о сложности природных явлений, влияющих на атмосферный озон. Уменьшение содержания озона в атмосфере на 1% приводит к увеличению на 2% интенсивности проходящего через верхние слои атмосферы ультрафиолетового излучения в области длин волн короче 3200 Å<sup>10</sup>. Это излучение сильно воздействует на живую клетку и может легко разрушить ее. Однако на современном этапе исследований мы не можем с уверенностью утверждать, что ожидаемое сокращение количества стратосферного

---

<sup>10</sup> Для того чтобы стратосфера стала прозрачной по отношению к этому излучению, необходимо уменьшить содержание озона в стратосфере по крайней мере на два порядка.



озона отразится на условиях жизни человека и живых организмов. Видимо, среди населения может увеличиться количество заболеваний раком кожи, но это не доказано убедительно. Во всяком случае остается общее опасение, что изменение установившихся в природе связей под влиянием производственной деятельности человека приведет к нежелательным последствиям.

#### 4. СВЯЗАННЫЙ АЗОТ В АТМОСФЕРЕ

Важное значение для нормальных условий жизни человека имеет присутствие в атмосфере различных компонент, содержащихся в ней в небольшом количестве. Малая концентрация их в атмосфере благоприятно действует на жизненные процессы в организме человека, большие дозы могут стать вредными.

Одним из существенных для жизни элементов является азот. Азот входит в состав биологических молекул, занимая четвертое место по распространенности в химических соединениях живых клеток. При этом атомарный азот, как и многие его соединения, химически активен, в то время как молекулярный азот, составляющий основную часть массы атмосферы, химически инертен. Молекула азота очень прочна, энергия ее диссоциации превышает потенциалы ионизации многих элементов. Другие соединения азота в отличие от его мо-

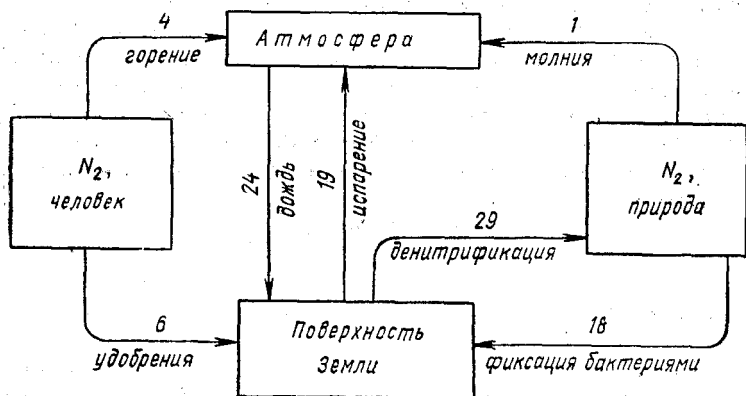
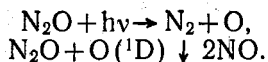


Рис. 13. Ежегодный баланс связанного азота для атмосферы и приповерхностных слоев Земли. Потоки даны в десятках млн. т в год

лекулы обладают высокой химической активностью. Поэтому мы будем рассматривать их отдельно от молекулярного азота, называя азот, входящий в эти соединения, связанным.

Масса связанного азота, находящегося у поверхности Земли и принимающего участие в происходящих на ней процессах, оценивается в  $10^{12}$  т (для сравнения — масса молекулярного азота в атмосфере составляет примерно  $4 \cdot 10^{15}$  т). Основная часть связанного азота находится в океане. Содержание связанного азота в биомассе, в основном сосредоточенной на суше, близка к  $10^{10}$  т. На рис. 13 представлены потоки связанного азота при его образовании и разрушении в атмосфере и на поверхности Земли, а также обмен связанным азотом между ними. Связанный азот в верхних слоях почвы и в океане образуется под действием бактерий и превращается в молекулярный азот при разложении органического вещества. Летучие соединения азота (главным образом аммиак и его соединения) попадают в атмосферу в результате испарения, но оттуда вымываются дождем и возвращаются в почву или в океан. Следует отметить, что эти соединения (главным образом  $\text{HNO}_3$  и  $\text{HNO}_2$ ) составляют основу одного из наиболее распространенных в атмосфере аэрозолей.

Особое место среди соединений азота занимает закись азота  $\text{N}_2\text{O}$ . Это соединение обладает невысокой химической активностью, не растворяется в воде и поэтому не вымывается из атмосферы. Закись азота образуется вместе с другими соединениями в процессах фиксации азота в верхних слоях почвы и океана. Ежегодно в результате деятельности бактерий образуется примерно 10 млн. т  $\text{N}_2\text{O}$ . Только в таком виде связанный азот достигает верхних слоев атмосферы, где закись азота разлагается:



Закись азота является одним из источников окислов азота в стратосфере, который, в свою очередь, определяет количество стратосферного озона.

Как следует из диаграммы 13, важную роль в процессах образования связанного азота играет человек. Его влияние в первую очередь связано с производством минеральных удобрений, которое имеет тенденцию расти со скоростью 7% в год. Кроме того, сам сельско-

хозяйственный процесс отражается как на фиксации азота, так и на денитрификации (образование молекулярного азота из связанного). На площадях, занятых сельским хозяйством, фиксируется приблизительно 90 млн. т связанного азота в год.

Еще один антропогенный источник связанного азота — сжигание горючих ископаемых. При высоких температурах в двигателях транспортных средств, в высокотемпературных установках образуются окислы азота, которые выбрасываются в атмосферу вместе с продуктами сгорания. Количество выбрасываемых в атмосферу окислов азота, которое составляет примерно 40 млн. т в год, почти пропорционально количеству используемого топлива и имеет тенденцию расти примерно на 4% в год.

Как следует из рис. 13, человек вносит заметный вклад в баланс связанного азота. Тем не менее из-за большого количества связанного азота в почве и в океане человек не может существенно изменить там его содержание. Например, количество связанного азота в приповерхностных слоях почвы составляет около 100 млрд. т, так что ежегодное добавление около 100 млн. т — примерно столько азота привносит сейчас в почву человек — скажется только через сотни лет. Что же касается содержания связанного азота в атмосфере, то здесь вклад человека существен. В атмосфере содержится примерно 3 млн. т связанного азота, глав-

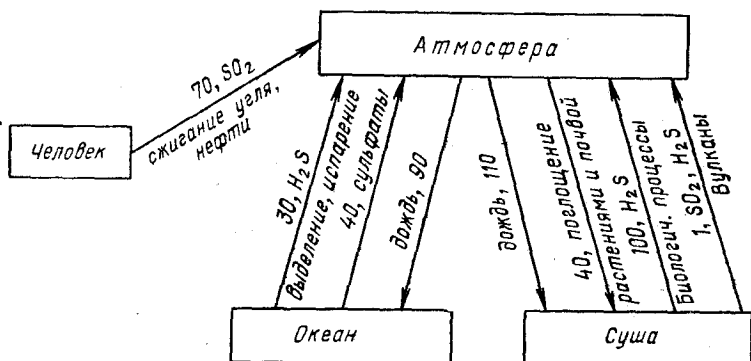


Рис. 14. Ежегодный баланс серы для атмосферы и поверхности Земли. Потоки даны в миллионах тонн в год. Указаны величины потоков и в каком соединении переносится сера

ным образом в виде аэрозолей. Связанный азот в виде соединений вымывается из атмосферы дождями примерно за 5 суток (т. е. вдвое быстрее, чем осаждаются пары воды) независимо от количества азота в атмосфере. Поэтому с увеличением потока связанного азота в атмосферу возрастает его содержание в ней, которое пропорционально этому потоку. Отсюда на основе рис. 13 мы можем сделать вывод, что около 20% связанного азота поступает в атмосферу в результате деятельности человека — сжигания горючих ископаемых.

Еще одной важной компонентой атмосферы Земли является сера, которая входит в состав сульфатных аэрозолей, одного из наиболее распространенных видов аэрозолей в атмосфере. На рис. 14 представлен баланс серы в атмосфере Земли, причем, как и на предыдущем рисунке, приведенные цифры носят приближенный характер. Видно, что вклад человека в образование сернистых соединений в атмосфере (как и в образование азотных соединений) уже заметен. Примерно 80% сернистого ангидрида выделяется в атмосферу при сжигании угля и нефти, остальное — при плавлении меди и других металлургических процессах. Считается, что загрязнение атмосферы сернистыми соединениями вредно для человека. В этом отношении имеются реальные возможности сильно сократить такое загрязнение, о чем свидетельствует опыт последних лет.

В последнее десятилетие использование совершенных фильтров при сжигании угля привело к резкому сокращению относительного загрязнения воздуха сернистыми соединениями в развитых странах. США и страны Западной Европы, использующие более половины мирового количества добываемых горючих ископаемых, выбрасывают в воздух лишь четвертую часть сернистого ангидрида искусственного происхождения. Этот пример показывает, что совершенствование производства может привести к существенному сокращению количества выбрасываемой в атмосферу серы.

Внесенные человеком азотные и сернистые соединения составляют около 20% от полного загрязнения атмосферы. Видимо, такое положение в глобальном масштабе должно неблагоприятно влиять на человека, однако в настоящее время мы не в состоянии определить характер и степень этого воздействия. Такова же антропогенная доля окиси углерода и углеводородов, од-

нако мы значительно хуже изучили естественные процессы загрязнения атмосферы этими компонентами.

Все обсуждаемое до сих пор относилось к глобальному загрязнению атмосферы, усредненному по поверхности планеты. Загрязнения атмосферы в отдельных районах могут быть значительно выше, особенно для компонент с малым временем жизни в атмосфере. Наиболее ярким проявлением загрязнения атмосферы местного характера является смог.

## Химическое загрязнение атмосферы

### 1. ОСОБЕННОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Условия жизни человека на Земле в существенной степени зависят от физико-химических свойств атмосферы. При этом человек чувствует весьма малые примеси различных химических соединений в атмосфере. Однако в настоящее время отсутствуют четкие представления о том, какие концентрации вредных примесей опасны для здоровья человека. В качестве демонстрации этого в табл. 6 приведены значения предельно допустимых концентраций ряда вредных химических соединений, которые приняты в разных странах. Превышение указанных в табл. 6 значений запрещается законом со-

Таблица 6

| Вредная компонента | Предельно допустимая объемная концентрация, 10 <sup>-6</sup> |               |              |              |              |                 |
|--------------------|--|---------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
|                    | ЧССР, 1969 г.  | СССР, 1972 г. | ГДР, 1973 г. | США, 1974 г. | ФРГ, 1974 г. | Швеция, 1975 г. |
| CS <sub>2</sub>    | 8  | 3             | 14           | 17           | 17           | 8               |
| CO                 | 24   | 16            | 44           | 44           | 44           | 32              |
| CCl <sub>4</sub>   | 7  | 3             | 7            | 9            | 9            | 9               |
| Cl <sub>2</sub>    | 0,9  | 0,3           | 0,3          | 0,9          | 0,5          | 0,9             |
| HCl                | 5  | 3             | 3            | 4            | 4            | 4               |
| HF                 | 1  | 0,6           | 1            | 2            | 2            | 2               |
| H <sub>2</sub> S   | 7  | 7             | 10           | 20           | 10           | 10              |
| NO <sub>2</sub>    | 7  | 3             | 7            | 6            | 6            | 6               |
| O <sub>3</sub>     | 0,05   | 0,05          | 0,09         | 0,09         | 0,09         | 0,09            |
| SO <sub>2</sub>    | 3  | 3             | 3            | 4,5          | 4,5          | 1,7             |
| Гидразин           | 0,03   | 0,03          | —            | 0,4          | 0,04         | 0,04            |
| Серная кислота     | 0,2  | 0,2           | 0,2          | 0,2          | 0,2          | 0,2             |
| Фенол              | 0,1  | 0,1           | 5            | 4,5          | 4,5          | 4,5             |
| Формальдегид       | 2  | 0,5           | 2            | 3            | 1,2          | 3               |
| Фосген             | 0,02   | 0,02          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,05            |

ответствующей страны. Из табл. 6 можно сделать вывод, что вредные химические соединения могут действовать на здоровье человека при их концентрации порядка  $10^{-7}$ .

Другая особенность химического загрязнения состоит в том, что вклад человека в образование химических соединений в атмосфере незначителен. Исключение составляют фреоны и подобные им соединения, которые в природе не образуются. Однако локальное воздействие человека на химический состав атмосферы может быть существенным. В табл. 7 представлены цифры, характеризующие попадание отдельных примесей в атмосферу естественным образом и при участии человека. Видно, что вклад человека в глобальное загрязнение атмосферы невелик для основных вредных химических компонентов. Однако локальное загрязнение значительно, так что характерные концентрации большинства вредных примесей в большом городе заметно превышают соответствующие средние значения для земного шара.

## **2. ФОТОХИМИЧЕСКИЙ СМОГ**

Поскольку наиболее сильное загрязнение атмосферы за счет производственной деятельности человека происходит в больших городах, в промышленных районах, именно там в первую очередь должны проявляться его последствия. Наиболее опасным результатом загрязнения атмосферы большого города является фотохимический смог. Термин «смог» происходит от английских слов «smog» — «курить» и «fog» — «дым». Смог появляется при неподвижном воздухе, когда, с одной стороны, отсутствуют горизонтальные ветры, и с другой — распределение температуры по высоте атмосферы таково, что отсутствует вертикальное перемешивание атмосферных слоев. В результате все выделения, попадающие в атмосферу при работе промышленных предприятий и транспорта, остаются в ней.

Смоги бывают двух типов. Один из них, который называется лондонским, наблюдается в туманную безветренную погоду. В этом случае весь дым большого города не уносится ветром, а задерживается туманом и остается над городом. Это явление очень скверно отражается на здоровье человека. Так, в 1952 г. в момент последнего сильного смога в Лондоне за четыре дня умерло на 4000 человек больше обычного. С этим типом смо-

га можно бороться, заменяя уголь недымными видами топлива. В самом Лондоне в результате такой замены дымность города уменьшилась примерно в 3 раза.

Более опасным является фотохимический смог, который впервые наблюдался в Лос-Анджелесе в 30-х годах. Этот смог появляется в больших южных городах в безветренную ясную погоду. Фотохимический смог вызывается окислами азота и другими компонентами, выделяемыми из выхлопных труб автомобилей. Эти соединения под действием солнечного излучения проходят цепь химических превращений. Основными компонентами фотохимического смога, как было доказано биохимиком Э. Гейгеном-Смитом в 1950 г., являются озон, двуокись азота и закись азота. Скапливаясь в больших количествах, эти вещества и продукты их распада под действием ультрафиолетового излучения вступают в химическую реакцию с находящимися в атмосфере углеводородами. В результате образуются канцерогенные химически активные органические вещества, которые оказывают вредное влияние на живые организмы: раздражают слизистую оболочку, разрушают ткани дыхательных путей и легких, обесцвечивают зелень растений и т. д. Вредное воздействие на окружающую среду оказывает и озон, концентрация которого в смоге близка к  $10^{-7}$ .

Находящиеся в атмосфере углеводороды частично имеют естественное происхождение. Средняя концентрация метана (т. е. отношение в выделенном объеме числа его молекул ко всему числу молекул воздуха) составляет  $1,5 \cdot 10^{-6}$ . Этот газ выделяется при разложении и гниении растений. Такой же величины достигает концентрация ядер углерода в молекулах сложных углеводородов, которые попадают в атмосферу промышленного города, выделяясь в результате работы нефтеперегонных заводов, двигателей внутреннего сгорания. Так как тип образующихся канцерогенных органических молекул в фотохимическом смоге зависит от структуры начальных углеводородных молекул и других реагирующих молекул и радикалов, то в зависимости от характера промышленности в данном городе качественные проявления смога и даже вид его могут быть разными. Например, в Лос-Анджелесе наблюдаются смоги с сизой дымкой, в Японии — белые смоги.

Оценим, при какой плотности выделения энергии на

Земле может возникнуть смог. Будем считать, что начало смогу дают окислы азота, их накопление происходит в течение дневного времени, т. е. за время порядка 10 ч, и что в течение этого времени отсутствует горизонтальное перемешивание воздуха, т. е. ветры не уносят загрязнения за пределы города. В то же время происходит полное вертикальное перемешивание, т. е. концентрация примесей одинакова на разных высотах.

Для проведения рассматриваемой оценки учтем, что энергия, затрачиваемая на образование одной молекулы окиси азота, составляет 20 эВ и число молекул воздуха, приходящихся на единицу поверхности Земли, равно  $2,1 \cdot 10^{25}$  1/км<sup>2</sup>. Получим, что для создания концентрации окиси азота порядка  $10^{-7}$  мы должны затратить удельную энергию  $7 \cdot 10^7$  кДж/км<sup>2</sup>. При времени порядка 10 ч это отвечает потоку выделяемой энергии порядка  $2 \cdot 10^3$  кВт/км<sup>2</sup>. Поток энергии, выделяемой большим городом, значительно превышает эту величину, поэтому его достаточно для возникновения фотохимического смога при подходящих природных условиях.

### **3. ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ**

Современное промышленное производство сопровождается выбросом в атмосферу различных химических соединений. Их количество невелико, тем не менее они способны влиять на важные процессы, протекающие в атмосфере, а следовательно, и на условия жизни человека. Это влияние, как видно из ранее рассмотренных примеров, весьма существенно в больших городах, в которых и создается основная часть загрязнений атмосферы. Ежегодное загрязнение атмосферы в США — около 300 млн. т. Около 60% всех загрязнений атмосферы создает транспорт; также примерно 60% всех загрязнений составляет окись углерода. Ежегодно в атмосферу выбрасывается свыше 100 млн. т двуокиси серы, свыше 50 млн. т углеводородов и т. д. Поскольку вредные примеси отрицательно сказываются на здоровье человека, то устанавливаются предельно допустимые их концентрации, превышение которых запрещается законом (табл. 6).

Основные проблемы загрязнения атмосферы города связаны с транспортом. Во-первых, абсолютное загрязнение атмосферы транспортом выше, чем тепловыми



станциями и промышленностью. Во-вторых, наличие большого числа подвижных источников вредных примесей — машин делает невозможным применение организационных мер. Если от промышленного предприятия можно потребовать выполнения определенных санитарных норм и при нарушении этого условия даже снизить объем производства, то для транспорта такой подход невозможен. Таким образом, единственный путь борьбы с рассматриваемым видом загрязнения воздуха — ус-

Таблица 7

| Компонент         | Концентрация, $10^{-6}$ |                    | Эмиссия, млн. т в год |                                    | Время нахождения в атмосфере у поверхности Земли |
|-------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|--|
|                   | Большой город           | Сельская местность | Естественная          | В результате деятельности человека |  |
| Углекислый газ    | 328                     | 325                | $5 \cdot 10^5$        | $2 \cdot 10^4$                     | 5 лет  |
| Оксид углерода    | 5                       | 0,1                | $10^3$                | 300                                | 0,1—3 года                                       |
| Водяной пар       | $(0,3-6) 10^3$          | $(0,3-6) 10^3$     | $4 \cdot 10^8$        |                                    | 10 дней  |
| Двуокиси серы     | 0,02                    | 0,0004             | 260                   | 140                                | 3 дня  |
| Озон              | 0,3                     | 0,02               | $10^5$                |                                    | 10 дней  |
| Хлористый водород | 0,002                   | 0,001              | $10^3$                | 4                                  | 3—5 дней   |
| Оксид азота       | 0,2                     | 0,001              | 500                   | 100                                | 5 дней   |
| Двуокись азота    | 0,1                     | 0,001              |                       |                                    |  |
| Закись азота      | 0,5                     | 0,26               | 10                    |                                    | 120 лет  |
| Аммиак            | 0,01                    | 0,006—0,02         | $6 \cdot 10^3$        | 4                                  | 2—5 дней   |
| Углеводороды      | 2,0                     | 0,001              | 200                   | 40                                 |  |
| Метан             | 3                       | 1,5                | 1400                  | 100                                | 3 года   |
| Фреоны            | $(1-2) 10^{-4}$         | $(0,5-1) 10^{-4}$  |                       | 0,8                                | 50—70 лет  |

вершенствование двигателя автомобиля с учетом экологических требований.

Загрязнение воздуха при работе двигателя автомобиля происходит за счет того, что продукты сгорания топлива выбрасываются из него прямо в воздух. Наиболее вредными из компонент выхлопных газов являются окись углерода, углеводороды и окислы азота. Последние две компоненты в основном ответственны за химические превращения в воздухе, приводящие к возникновению фотохимического смога.

Наряду с этими компонентами существенную роль играют примеси, действие которых проявляется при малых концентрациях. Такой примесью является тетраэтил свинца, который используется в качестве присадки к бензину и служит для предотвращения детонации топлива в двигателе. Количество его по весу немногим менее 0,1%. Работающие двигатели автомобилей ежегодно выбрасывают в атмосферу 2—3 млн. т свинца. За счет этого процесса в течение последних 100 лет концентрация свинца в водах океана возросла в 10 раз.

Таким образом, современный бензиновый двигатель не удовлетворяет экологическим требованиям. Его работа вызывает возникновение фотохимического смога, является причиной различных загрязнений атмосферы и окружающей среды. Поэтому одной из насущнейших технических задач нашего времени стала разработка нового типа двигателя, более чистого в экологическом отношении. Эта задача очень сложна. Современный бензиновый двигатель существует уже несколько десятков лет, в течение которых проводились и сейчас проводятся различные исследования, позволяющие использовать при совершенствовании двигателя все конструкторские и технические достижения, а также успехи современной технологии. Поэтому современный бензиновый двигатель еще долгое время будет превосходить другие типы двигателей по разным параметрам.

Сейчас имеются два типа двигателя, которые могут прийти на смену бензиновому. Источником энергии одного из них является электрический аккумулятор, другого — водород. Первый из них получил некоторое распространение в последние годы, хотя будущее, как нам кажется, за водородными двигателями. Оба типа двигателя не загрязняют атмосферу. Основным недостатком электромобиля является большой вес аккумулятора

ров. Самые лучшие из существующих аккумуляторов позволяют хранить энергию на единицу веса аккумулятора, примерно в 10 раз меньшую, чем энергия, выделяемая при сгорании бензина того же веса. Отсюда получается, что вес аккумуляторов составляет заметную часть веса автомобиля, тогда как пробег его от одной заправки реально не может превышать 100 км. Этот недостаток усугубляется стоимостью аккумуляторов, так что электромобиль по техническим и экономическим показателям сильно уступает современному автомобилю. Тем не менее в настоящее время в разных странах эксплуатируется целый парк электромобилей различного класса. Опыт использования этих электромобилей позволит правильно оценить их место в транспорте будущего.

Электромобиль и автомобиль на водородном топливе являются потребителями энергии одного класса. В обоих типах автомобиля энергия должна браться от электростанций, но в первом случае она используется для зарядки аккумуляторов, а во втором — для производства водорода, который в данном случае является носителем энергии. Если проблемы веса и стоимости аккумулятора электрической энергии сохранятся в будущем, а на пути реализации двигателя на водородном топливе (или другом синтетическом топливе) не возникнет принципиальных проблем, то предпочтение будет отдано водородному двигателю.

## **Экологические проблемы энергетики в настоящем и в будущем**

### **1. АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЕЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ**

Ранее уже отмечалось, что основным наиболее быстро развивающимся видом энергетики является атомная. Энергия в реакторах на атомных электростанциях выделяется при делении ядер урана на более легкие в результате реакций с участием медленных нейтронов. Одно из преимуществ атомной энергетики связано с малым весом используемого топлива. Каждое ядро изотопа урана-235 при делении выделяет энергию в 200 МэВ. Поэтому, например, современное количество потребляемой человечеством энергии можно обеспечить, перера-

бывшая 100 г урана-235 в секунду, или 3 тыс. т в год (по сравнению с 6 млрд. т горючих ископаемых).

Основным недостатком атомной энергетики является радиоактивность используемого топлива и продуктов его деления. Это требует создания защиты от различного типа радиоактивных излучений, что значительно повышает цену энергии, полученной от атомных электростанций. Следует отметить, что в экологическом отношении атомная энергетика намного опередила энергетику, использующую химические виды топлива<sup>11</sup>. Если за счет усовершенствования оборудования снизить загрязненность от тепловых электростанций до уровня атомных, то стоимость единицы энергии, получаемой с тепловой электростанции, окажется заметно выше, чем энергии атомных электростанций.

Оценим, в каком соотношении радиоактивность, создаваемая атомными электростанциями, находится с естественной радиоактивностью. Будем считать, что в соответствии с современной технологией твердые радиоактивные остатки не выносятся наружу, и пренебрежем возможностью аварии АЭС. Тогда радиоактивность будет создаваться газообразными продуктами ядерной реакции, в основном криптоном. На каждый киловатт-час энергии, производимой на атомных электростанциях, образуется некоторое количество криптона с общей радиоактивностью  $10^{-7}$  Кюри<sup>12</sup>.

Согласно существующим в настоящее время прогнозам к 2000 г. суммарная мощность атомных электростанций превысит 4 млрд. кВт, и вырабатываемая на атомных электростанциях энергия в 2000 г. приблизится к  $2 \cdot 10^4$  млрд. кВт · ч. За счет накапливаемого в атмосфере криптона радиоактивность атмосферы, связанная с работой атомных электростанций, в 2000 г. составит  $6 \cdot 10^6$  Кюри. Естественная радиоактивность атмосферы равна  $2,4 \cdot 10^{13}$  Кюри, т. е. значительно выше. Таким образом, глобальное радиоактивное заражение

---

<sup>11</sup> При одинаковой мощности атомной и тепловой электростанции воздух, выходящий за пределы тепловой электростанции, следует разбавить в несколько тысяч раз сильнее по сравнению с воздухом, выходящим за пределы атомной электростанции, чтобы получить одинаковые предельно допустимые концентрации вредных примесей. Предельно допустимые концентрации в данном случае устанавливаются по их биологическому действию.

<sup>12</sup> Кюри — радиоактивность, соответствующая  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов в 1 сек.

атмосферы за счет работы атомных электростанций не представляет принципиальной опасности, что, конечно, не снижает проблем местного характера, связанных с радиоактивным заражением окружающей среды.

Серьезной проблемой, связанной с радиоактивным загрязнением Земли, является уничтожение радиоактивных отходов. По мере развития атомной энергетики эта задача становится все более трудной.

В качестве одного из способов решения предлагалось выбрасывать радиоактивные отходы в космическое пространство. В принципе такой подход энергетически выгоден. При используемом в настоящее время химическом ракетном топливе для выноса единицы массы за пределы поля притяжения Земли необходимо затратить примерно в 2000 раз большее количество горючего. Считая, что теплотворная способность горючего (как и у бензина) равна 11 ккал/кг, получим отсюда, что с помощью этого горючего для выноса одного атома урана за пределы Земли следует затратить энергию примерно 0,2 МэВ. Один атом  $U^{235}$  дает энергию 200 МэВ, но содержание этого изотопа в горючем атомных электростанций составляет несколько процентов. Вместе с радиоактивным ураном следует удалять часть загрязненного оборудования. Но и в этом случае получается, что при современном типе ракетной техники выбрасывать радиоактивные отходы атомных электростанций в космическое пространство энергетически выгодно. Поэтому, оставив в стороне трудности такого варианта «хранения» радиоактивных отходов, мы можем сделать вывод, что он принципиально возможен.

Другим недостатком атомных электростанций является так называемое тепловое загрязнение воды, попросту говоря, ее нагревание. Коэффициент полезного действия атомных электростанций в настоящее время составляет около 30%, что значительно ниже коэффициента полезного действия тепловых электростанций. Во время работы атомных электростанций происходит сброс тепловой энергии в окружающее пространство. Эта энергия передается воде. При работе атомной электростанции с электрической мощностью 1 млн. кВт и при охлаждении ее, к примеру, водами реки (с расходом в устье 900 м<sup>3</sup>/с) температура воды повысится на 0,6 градуса. Такое нагревание воды может изменить растительность и животный мир в реке.

Однако необходимо учесть, что на одной реке можно построить несколько атомных электростанций, т. е. использовать ее для отвода тепла с атомных электростанций многократно. Поэтому в ближайшее время в СССР не должно возникнуть недостатка воды для отвода тепла с атомных электростанций. Тем не менее остаются локальные проблемы, связанные с нагреванием местности, близлежащей к атомной электростанции, изменением микроклимата этой местности из-за повышенного испарения воды и изменением условий жизни живых организмов.

Существует много других специфических проблем атомной энергетики. Однако все они, как и рассмотренные, решаются ценой определенных затрат и не могут остановить быстрого развития атомной энергетики.

## **2. ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО**

Чистота атмосферы и окружающей среды в существенной степени определяется способом выработки энергии. Основы энергетики будущего закладываются в настоящее время, и поэтому мы можем составить себе представление о том, какова она будет в ближайшие несколько десятилетий.

Быстрыми темпами в настоящее время развивается атомная энергетика. На рубеже XXI в. существенная часть производимой электрической энергии будет вырабатываться на атомных электростанциях. Другим источником энергии, который займет важное место в энергетике XXI в., являются управляемые термоядерные реакции. В настоящее время доказана принципиальная возможность создания термоядерного реактора. В этом реакторе энергия будет создаваться за счет синтеза тяжелых изотопов водорода — дейтерия и трития — в ядра гелия.

Основным источником изотопов тяжелого водорода — ядер дейтерия — является вода. Ядер дейтерия в воде в 6000 раз меньше, чем протонов — легких ядер атомов водорода. Но даже такое малое количество их создает огромный запас энергии. Переработка тяжелого водорода, содержащегося в 1 л обычной воды, приведет к выделению такой же энергии, которую можно получить при сжигании свыше 300 л бензина. Таким

образом, мы обладаем практически неисчерпаемым запасом дешевой энергии на Земле, так что стоимость энергии, полученной на термоядерной электростанции, будет целиком определяться стоимостью установок и обслуживания.

По существующим прогнозам первые промышленные термоядерные электростанции заработают в конце XX в. после решения целого ряда физических и инженерно-технических задач. Далее, согласно проведенным оценкам термоядерная энергетика будет развиваться еще более высокими темпами, чем атомная энергетика, и займет важное место в энергетике XXI в. Минимальная мощность термоядерного реактора составляет миллионы киловатт, т. е. мощность отдельной термоядерной электростанции еще выше, чем атомной. В экологическом отношении, по существующим представлениям, термоядерная энергетика оказывается еще более чистой, чем атомная энергетика. Таким образом, в середине XXI в. энергетический потенциал нашей планеты в большой степени будет определяться атомной и термоядерной энергетикой.

Однако атомные и термоядерные электростанции не могут обеспечить все энергетические потребности планеты. Одним из важных потребителей энергии является транспорт, который требует компактных источников энергии. В этом отношении весьма перспективной является так называемая водородная энергетика. Основой водородной энергетики является электрическая энергия, получаемая от атомного или термоядерного реактора и используемая для получения молекулярного водорода. Молекулярный водород далее может быть использован как источник энергии в двигателях транспорта, где в результате реакции окисления он превращается в воду.

Молекулярный водород как промежуточное звено при переработке ядерной и термоядерной энергии удобен и для передачи ее на большие расстояния. Использование газопроводов с молекулярным водородом для этой цели гораздо выгоднее, чем создание линий электропередачи. Молекулярный водород как топливо очень удобен в экологическом отношении, ибо при его сжигании образуется вода. Благодаря указанным положительным факторам водородная энергетика в настоящее время привлекает к себе серьезное внимание.

Водородная энергетика может заменить существующие виды химической энергии в том случае, если получение энергии из молекулярного водорода окажется дешевле, чем из угля, нефти, газа. Такая ситуация в будущем вполне реальна, ибо со временем ископаемые виды горючего дорожают, а электроэнергия от атомных реакторов становится дешевле. В конечном итоге мы придем к ситуации, когда электрическая энергия, вырабатываемая на атомном (или термоядерном) реакторе, окажется значительно дешевле химической, заключенной в ископаемых видах топлива. В этом случае удобно использовать часть получаемой электрической энергии для образования водорода, и энергия, выделяемая при сжигании водорода, может оказаться дешевле энергии, содержащейся в ископаемых видах топлива. Тогда использование водорода в качестве горючего будет не только оправдано с экологической точки зрения, но и экономически более выгодно.

Наличие такой тенденции можно показать, исходя из современной ситуации. В результате экономического кризиса с начала 70-х годов к настоящему времени топливо в странах Запада подорожало почти на порядок. Электрическая энергия в связи с общим повышением цен также дорожает, но разрыв между стоимостью химической и электрической энергии в результате экономического кризиса все же несколько сократился.

В нашей стране, богатой горючими ископаемыми, разрыв между стоимостью электрической и химической энергии значителен. Так, в сфере коммунального хозяйства для частного пользования 1 кВт·ч электрической энергии стоит 4 коп., 1 кВт·ч, энергии, получаемой из газа, — 0,18 коп. (1 м<sup>3</sup> газа стоит 2 коп.), а на 1 кВт·ч энергии, полученной из бензина, — менее 0,2 коп. (1 л бензина стоит 20 коп.). Поэтому водородная энергетика может стать рентабельной не скоро.

Отметим еще одно обстоятельство, относящееся к экономике водородной энергетики. Молекулярный водород планируется получать из воды путем электролиза или термохимическими методами, используя электрическую энергию. При таком подходе водородная энергетика окажется экономически выгодной, если во всяком случае электрическая энергия дешевле, чем энергия, получаемая при сжигании химических видов топлива. А такая возможность существует только при том усло-



вии, что для этой цели не будет использоваться электрическая энергия тепловых электростанций. В настоящее же время тепловые электростанции дают примерно 80% всей электрической мощности.

Таким образом, водородная энергетика может стать рентабельной только в век атомных и термоядерных электростанций. Но допустим, что для нас несущественна экономическая сторона проблемы. Будем считать, что нас устраивает водородная энергетика, поскольку она удобна в экологическом или другом отношении. Допустим, создан эффективный водородный двигатель. Но и в этом гипотетическом случае мы не способны провести перестройку в автотранспорте, поскольку современный уровень производства водорода этого не позволит.

В настоящее время ежегодное производство молекулярного водорода составляет примерно 30 млн. т. Эта величина удваивается примерно за 10 лет, ежегодно увеличиваясь примерно на 7%. Если сжечь весь этот водород, то выделится энергия около  $5 \cdot 10^{12}$  кДж, что все-таки почти на пять порядков ниже энергии, потребляемой в настоящее время. Поэтому для перевода двигателей на новый вид топлива, кроме всего прочего, необходимо по крайней мере на четыре порядка поднять производство водорода, чтобы удовлетворить современные потребности в горючем.

Сам способ производства водорода в настоящее время нарушает основную идею водородной энергетики, призывающую обойтись без органических видов топлива. Планируется, что водород для водородной энергетики будет производиться из воды за счет энергии от атомного или термоядерного реактора. В таком случае экологические требования будут выполнены. В настоящее время основную часть водорода получают из метана и других углеводородов, смешивая их с парами воды при высокой температуре. В результате протекающих при этом химических реакций образуется углекислый газ и водород. Путем электролиза воды производят примерно 2% водорода.

### **3. ФОТОСИНТЕЗ И ПРОИЗВОДСТВО ЭНЕРГИИ**

В настоящее время основное производство энергии связано с использованием химических видов топлива — нефти, угля, газа. Эти вещества образовались в процессе фотосинтеза, в результате которого энергия солнеч-

ного излучения в листьях растений перерабатывает углекислый газ в материал растительных тканей. В каком же соотношении естественный процесс накопления энергии находится с процессом потребления энергии человеком?

Ежегодно в результате фотосинтеза на Земле образуется примерно  $1,5 \cdot 10^{11}$  т сухого органического вещества, две трети которого создается на суше и одна треть — в океанах. Если это вещество непрерывно сжигать, то будет выделяться  $9 \cdot 10^{10}$  кВт энергии, что почти на порядок превышает потребляемые в настоящее время мощности энергии за счет сжигания ископаемых видов топлива (нефти, угля, газа).

Коэффициент полезного действия для преобразования солнечной энергии при фотосинтезе невысок и составляет 0,02% для океанов<sup>13</sup>, 0,1—0,2% для суши. Однако в некоторых случаях коэффициент полезного действия фотосинтеза гораздо выше. Так, при благоприятных условиях для лесов он достигает 1—3%, для сельскохозяйственного производства — 0,5—2%, а в небольшие интервалы времени может быть еще выше. Например, КПД кукурузы в момент созревания достигает 7%, что ненамного меньше коэффициента полезного действия некоторых энергетических установок. Если фотосинтез протекает при условиях, оптимальных по всевозможным параметрам — концентрация кислорода и углекислого газа, температура, влажность почвы и содержание в ней различных минеральных веществ, — то коэффициент преобразования солнечной энергии в химическую в короткие промежутки времени в период роста зеленой массы растения или листа может достигать 30%.

Принцип переработки солнечной энергии, подобный фотосинтезу, оказывается наиболее удобным с экологической точки зрения. Поэтому в настоящее время разрабатывается целый ряд способов накопления энергии, использующих идею фотосинтеза. Однако рабочими телами, преобразующими солнечную энергию, в этих случаях являются не растения, а физические, химические или физико-химические элементы, позволяющие повы-

---

<sup>13</sup> Низкий КПД фотосинтеза океанов связан с обратным процессом, приводящим к разложению органического вещества. Если исключить обратный процесс, то КПД фотосинтеза в океане окажется того же порядка, что и на суше.

сить КПД преобразования до десятков процентов. Существенным достоинством такого способа получения энергии является то, что он идет параллельно процессам природы и не нарушает их.

Недостатком этого способа производства энергии оказывается необходимость использовать большие площади поверхности Земли для размещения химических преобразователей солнечной энергии. Так, будем считать, что КПД рассматриваемых преобразователей составляет 30%. Тогда для обеспечения современных мощностей энергии, потребляемой человеком на Земле (около  $10^{10}$  кВт) в настоящее время, необходимо занять химическими преобразователями площади около 150 тыс. км<sup>2</sup>. Предполагается, что эти преобразователи находятся на широте южной части Советского Союза. Для сравнения укажем, что площадь Англии составляет 240 тыс. км<sup>2</sup>, а Франции — 550 тыс. км<sup>2</sup>.

Человек в своей сельскохозяйственной деятельности довольно существенно использует фотосинтез. Ежегодный мировой урожай составляет примерно  $(6-8) \cdot 10^9$  т органического вещества. Полное использование содержащейся в нем химической энергии дает величину порядка  $10^{17}$  кДж<sup>14</sup>, что соответствует мощности преобразования энергии порядка  $(3-4) \cdot 10^9$  кВт. Как видно, эта величина сравнима с мощностью, потребляемой в промышленности в результате сжигания нефти, угля, газа ( $10^{10}$  кВт).

Оценим энергию, необходимую для прокормления людей. При нормальном питании ежедневно человек расходует в среднем 3000 ккал энергии. Учитывая, что на Земле живет 4 млрд. человек, получим отсюда среднюю мощность от потребляемой человеком пищи, которая оказывается порядка  $6 \cdot 10^8$  кВт. Необходимо далее принять во внимание, что для нормального своего питания человек должен прокормить еще и домашних животных, число которых в настоящее время около 3 млрд. голов (крупный рогатый скот, овцы, свиньи и др.). На пропитание домашних животных потребуется гораздо большее количество пищи, чем для самого человека. Далее следует учесть, что при превращении урожая в пищевые продукты, как правило, часть урожая переводится в отходы. На основе всех этих соображений по-

---

<sup>14</sup> Тепловая способность полагается равной 4 ккал/г.

лучим, что для своего пропитания в настоящее время человек должен использовать энергию, хотя и меньшую по сравнению с потребляемой в промышленности, но составляющую заметную ее часть (рис. 15).

Большую роль в производстве органического вещества играют леса. Леса занимают 29% суши (8% всей поверхности земного шара), или 440 млн. км<sup>2</sup>. Ежегодное производство органического вещества в лесу составляет 6—10 т/га для лесов умеренных широт и достигает 30 т/га для тропических лесов. Эти цифры соответствуют КПД при фотосинтезе, равному нескольким десятым процента. Для сравнения укажем, что средний (в мире) урожай зерновых культур около 2 т/га, средний урожай кукурузы 4 т/га. Приведенные данные учитывают только массу зерна, а если сюда добавить массу стебля и листьев, то эти величины вырастут в несколько раз. Поэтому средний урожай массы леса и сельскохозяйственных растений составляет величины одного порядка.

Человек ежегодно использует примерно 2 млрд. м<sup>3</sup> древесины. Химическая энергия, запасенная в ней и выделяемая при ее сжигании, составляет около  $2 \cdot 10^{16}$  кДж, что меньше величины, соответствующей сжиганию угля, нефти, газа. Поэтому промышленный вывоз древесины не существен для баланса энергии, потребляемой человеком.

Сельское хозяйство также вносит заметный вклад в производство органических веществ. Площадь, занятая под сельскохозяйственное производство, составляет 4,4 млрд. га, несколько больше, чем занято лесом. Из этой площади только 1,5 млрд. га приходится на пашню и многолетние растения. Следует отметить, что большая часть всей этой площади была взята у леса. Еще один существенный факт — урожаи наиболее важных сельскохозяйственных культур непрерывно растут. Это связано как с использованием новых сортов, так и с внесением минеральных удобрений в почву. Например, средний мировой урожай зерна за последние 20 лет увеличился на 50%, а в Советском Союзе — почти вдвое.

Таким образом, фотосинтез играет большую роль в хозяйственной деятельности человека, обеспечивая его растительной и мясной пищей. Использование подобных фотосинтезу процессов, в которых растения будут замещены физическими или химическими элементами, не-

целесообразно для большой энергетики. Для этой цели придется занять большие площади поверхности Земли. В результате мы, с одной стороны, теряем полезную площадь, а с другой — нарушаем естественные процессы на выбранной площади Земли, а этого-то мы и пытаемся всячески избежать.

Более правильным было бы использование для большой энергетики естественных процессов фотосинтеза, к которым человек и животный мир привыкли за долгое время своего существования. Такой способ заключается в использовании фотосинтеза растений для накопления энергии. Другими словами, энергию следует получать из органического вещества, накопленного в результате фотосинтеза. Для этой цели необходимо использовать или создавать новые сорта растений и деревьев, которые обеспечивают большой коэффициент преобразования солнечной энергии в химическую при фотосинтезе и удобны при переработке запасенной в них энергии. В этом отношении положение сходно с начальной стадией

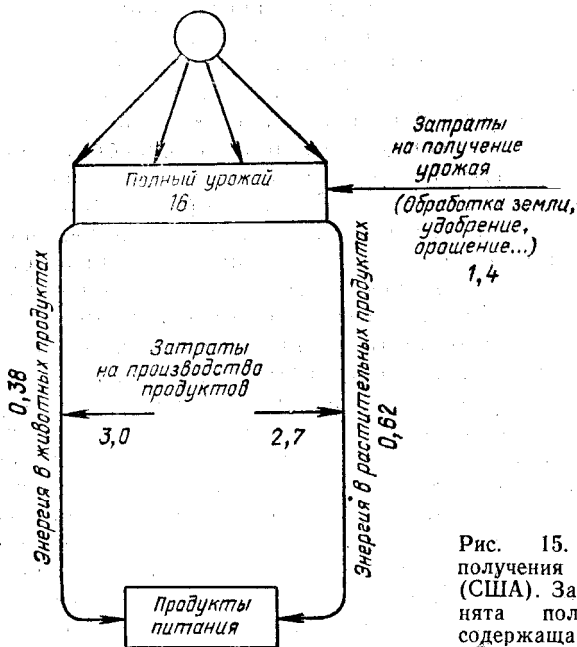


Рис. 15. Энергетика получения продуктов (США). За единицу принята полная энергия, содержащаяся в произведенных продуктах

развития сельского хозяйства, когда человек начал высаживать культурные растения. В живом мире заложены большие возможности, и человек их использует для получения высокого урожая. Они могут позволить оптимальным образом преобразовывать солнечную энергию.

Если подобрать подходящие растения, для которых средний КПД преобразования солнечной энергии в химическую составит 1%, и этими растениями занять 1% всей суши, то перерабатываемые ими мощности окажутся равными мощностям, которые использует человек в настоящее время. Поэтому рассматриваемый способ преобразования энергии открывает большие возможности. Тем более что засаживая поверхность Земли культурными растениями, человек не изменяет принципиально привычных ему природных процессов.

#### **4. ПУТИ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ**

Таким образом, существуют вполне определенные тенденции развития энергетики, не учитывающие экологических проблем. В ближайшие десятилетия центр тяжести сместится в сторону атомной и термоядерной энергетики. Эти виды энергетики и в экологическом отношении наиболее удобны, что должно способствовать их быстрому развитию. Автономные источники энергии, используемые в основном на транспорте, в будущем, очевидно, будут ориентироваться на водородную энергетику. Ее топливом будет служить молекулярный водород или другое подходящее искусственное горючее. Создание водородной энергетики может стать выгодным еще до того, как ископаемые виды горючего будут в основном исчерпаны, и их цена резко возрастет.

Современное производство сопровождается загрязнением окружающей среды, масштабы которого в будущем могут стать угрожающими. Иногда в качестве способа решения этой проблемы предлагается сократить или ограничить производство. Такое решение противоречит потребностям человека, а потому нереально. Однако сама проблема загрязнения окружающей среды требует серьезного внимания, ибо на определенном этапе она может стать вопросом жизни человека. Поэтому по мере увеличения масштабов производства необходимо развивать более «чистые» в экологическом отноше-

нии его направления. При этом не должно останавливать то обстоятельство, что цена продукта при «чистых» способах производства выше, чем при традиционных. Положение существенно меняется, если в цену продукта включить издержки, связанные с необходимой уже сейчас очисткой окружающей среды. Таким образом, на современном уровне развития производства следует изменить отношение к стоимости производства, включив в нее тот ущерб, который мы наносим природе, загрязняя ее. Тогда повышение стоимости продукта в результате использования более «чистой» в экологическом отношении технологии окажется естественным.

Какой же характер носят более «чистые» способы производства? В первую очередь это традиционные способы производства, которые включают в себя использование различных фильтров, задерживающих отходы производства. Стоимость фильтров может составлять заметную часть стоимости производства. Так, на Байкальском целлюлозном комбинате стоимость фильтров составляет 25% стоимости комбината.

Наряду с изменениями, не нарушающими структуру производства, при новом отношении к загрязнению окружающей среды весьма перспективным оказывается принципиально новый подход к самому характеру производства. Для металлургии и химического производства такой подход может быть связан с плазменным способом введения энергии. В химическом производстве это означает использование плазмотрона для осуществления химических реакций, т. е. пропускание исходного вещества через дуговой разряд. Температура в плазмотроне составляет несколько тысяч градусов. При такой температуре любая молекула распадается на составляющие ее атомы. Из этих атомов далее можно построить другие молекулы и таким способом осуществить химическую реакцию. Плазмохимический способ производства имеет определенные преимущества перед обычным химическим. Обычно химический процесс проходит в несколько стадий, использует немалое количество воды и образует ряд ненужных побочных продуктов, которые выбрасываются в окружающую среду и засоряют ее. Плазмохимический способ производства в силу своей природы лишен этих недостатков.

Однако цена этих преимуществ — большая энерго-

емкость плазмохимического процесса. Поэтому хотя первые плазмотроны появились в начале этого века, они начали внедряться в промышленность лишь в последнее десятилетие. И сейчас для многих химических процессов их использование не рентабельно. Тем не менее поскольку по мере развития производства ценность единицы энергии падает, а цена, которую необходимо платить для предотвращения загрязнения природы, растет, плазмохимический способ производства имеет тенденцию становиться более рентабельным по мере роста масштабов производства.

При плазмохимическом способе производства под действием электрической энергии вещество переводится в состояние плазмы, где и происходят химические превращения. Таким же способом планируется перерабатывать как твердые отходы промышленности и быта, так и элементы ненужных установок. Плазмохимическое производство и переработка материалов происходят замкнутым образом без привлечения воды и других дополнительных веществ, т. е. они являются «чистыми» производствами.

Таким образом, борьба с загрязнением окружающей среды может идти как по пути усовершенствования современного производства, так и по пути изменения его структуры. Такого типа изменения в производстве могут быть проведены и частично ведутся в настоящее время. В каждом случае рассматриваемая перестройка производства сопровождается его удорожанием. Однако если учесть выигрыш, который получается из-за предотвращения загрязнения окружающей среды, такая замена оказывается рентабельной. Поэтому в каждом конкретном случае при определении целесообразности перехода на новую технологию следует учитывать и те преимущества, которые мы получаем благодаря сохранению чистоты окружающей среды.

Время поставило перед человечеством целый ряд глобальных проблем, связанных с энергетикой будущего, с ограниченностью различных ископаемых, в том числе и горючих, а также с окружающей средой. При этом особенность атмосферы как элемента окружающей среды состоит в том, что на ее физико-химические, как и на оптические, свойства оказывают влияние весьма



малые концентрации примесей. Это требует внимательного и детального исследования атмосферных явлений с учетом хозяйственной деятельности человека. Цель данной брошюры — привлечь внимание читателя к этим проблемам.

## Литература

Семенов Н. Н. Об энергетике будущего. — «Наука и жизнь», 1972, № 9.

Кириллин В. А. Фундамент роста экономики. — «Наука и жизнь», 1975, № 4.

Лисичкин С. М. Энергетические ресурсы мира и нефтегазовая промышленность. М., «Недра», 1974.

Будыко М. И. Изменение климата. Л., Гидрометеониздат, 1974.

Кондратьев К. Я. Новое в теории климата. Л., Гидрометеониздат, 1976.

Чандлер Т. Воздух вокруг нас. Л., Гидрометеониздат, 1974.

Детри Ж. Атмосфера должна быть чистой. М., «Прогресс», 1973.

Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеониздат, 1975.

Биосфера. Сб. статей. М., «Мир», 1972.

Семенов Н. Н. Использование солнечной энергии. — «Вестник АН СССР», 1977, № 4.

Капица П. Л. Глобальные проблемы и энергия. — «Успехи физических наук», 1977, т. 122.

*Борис Михайлович СМЕРНОВ*

## АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ И ЭНЕРГЕТИКА

Гл. отраслевой редактор В. П. Демьянов. Редактор К. А. Кутузова. Мл. редактор Н. А. Львова. Обложка художника М. А. Дорохова. Худож. редактор М. А. Гусева. Техн. редактор Л. А. Кирякова. Корректор В. В. Каночкина.

ИБ № 2232

Т 00918. Индекс заказа 94003. Сдано в набор 1.12. 78 г. Подписано к печати 14.02. 79 г. Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская № 3. Бум., л. 1. Печ. л. 2. Усл. печ. л. 3.36. Уч.-изд. л. 3.44. Тираж 46 920 экз. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 2292. Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Цена 11 коп.