

Атмосферный углекислый газ - благо или зло для человека

Б.М.Смирнов

Аннотация

Представлена физическая картина процессов в атмосфере и на поверхности Земли с участием углекислого газа, цифровые параметры которой получены из анализа результатов многолетних программ НАСА и международных проектов. Построено энергетическое равновесие атмосферы и поверхности Земли, а также углеродное равновесие между ними в настоящее время и в прошлом. Эволюция глобальной температуры (усредненной по земному шару и времени) за последние полтора столетия, но с восьмидесятых годов наблюдается ее рост, так что увеличение на 1°C происходит за 60 лет. Рост концентрации атмосферного углекислого газа происходит монотонно, так что ее удвоение при современной скорости роста происходит примерно через 120 лет. Этот рост определяется деятельностью человека, главным образом, в результате сжигания горючих полезных ископаемых, причем с начала индустриального периода концентрация углекислого газа в атмосфере увеличилась в полтора раза. Показано, что в силу характера фотосинтеза в последние полвека именно этот рост, а не зеленая революция, приводят к сохранению массы урожая сельскохозяйственных продуктов на душу населения. Показано, что рост концентрации углекислого газа в атмосфере дает вклад примерно одну треть в рост температуры, а также ошибочность универсальных климатических моделей при анализе парникового эффекта, в которых пренебрегается законом Кирхгоффа, что приводит к завышению роста температуры в пять раз. Продемонстрировано, что водородная энергетика как замена углеродной энергетике, основанной на сжигании горючих ископаемых, мало эффективна и связана с большими рисками. Отмечено, что средства массовой информации пропагандирует ложное понимание проблем, относящихся к атмосферному углекислому газу и к изменению климата, что ведет к рискам и неоптимальной стратегии в развитии энергетики.

1 Введение

В соответствии с названием статьи ее целью является ответить на вопрос, является ли наблюдаемый рост углекислого газа в атмосфере злом или благом для человека на современном этапе развития цивилизации. А это определяется тремя факторами. Первый из них - рост глобальной температуры Земли в результате парникового эффекта с участием дополнительного углекислого газа, инжектируемого в атмосферу в результате сжигания горючих полезных ископаемых (угля, нефти и газа) в рамках углеродной энергетике. Второй фактор - влияние роста концентрации углекислого газа на здоровье человека. Третий фактор - рост урожая благодаря увеличению концентрации атмосферного углекислого газа, который в процессе фотосинтеза перерабатывается в сельскохозяйственные продукты питания.

Казалось бы результат действия первого фактора распространится средствами массовой информации, согласно которым главной угрозой человечеству является изменение климата, которое, в свою очередь, определяется парниковым эффектом за счет инжектируемого в атмосферу углекислого газа. Вызывает уважение, с каким мастерством сильные мира сего организовали пропаганду этой концепции в своих интересах, что является

полуправдой и следование этой концепции ведет к неоптимальному развитию энергетики. Однако, в отличие от политических концепций, в случае точных наук справедливость концепции может быть проверена на основании числовых параметров. Это не является задачей данной статьи, но в процессе проведенного анализа указанные действия средств массовой информации будут разоблачены.

Проведенный ниже анализ использует результаты разных атмосферных исследований, выполняемых, главным образом, учреждениями НАСА, а также в рамках международных программ. Полученные данные, недоступные предыдущим поколениям, являются достоянием современной цивилизации и представляют достоверные значения для разных параметров атмосферы, как и характер эволюции этих параметров. Объединяя разные аспекты физики атмосферы на основе принципов теоретической физики позволяет построить физическую картину атмосферы, т.е. совокупность процессов в атмосфере, описывающим ее реальное состояние и эволюцию. Другими словами, объединяя современное понимание свойств нижней атмосферы и измерения для отдельных параметров атмосферы, получаем численные значения параметров, описывающих ее свойства и эволюцию. На основании этого мы отвечаем на поставленные в статье вопросы в численной форме.

Contents

1 Введение	1
2 Энергетика нижней атмосферы	2
2.1 Модель стандартной атмосферы	2
2.2 Циркуляция воды через атмосферу	5
2.3 Энергетический баланс Земли и атмосферы	6
2.4 Эволюция глобальной температуры	12
3 Углеродные процессы в атмосфере Земли	21
3.1 Углеродное равновесие между поверхностью Земли и атмосферой	21
3.2 Углекислый газ в атмосфере	23
3.3 Процесс фотосинтеза на Земле	28
3.4 Углерод в жизнедеятельности человека	32
3.5 Углекислый газ в парниковом эффекте атмосферы Земли	33
4 Экологические проблемы атмосферы	41
4.1 Особенности экологических проблем атмосферы	41
4.2 Особенности развития углеродной энергетики	41
4.3 Проблема стратосферного озона	45
5 Заключение	49

2 Энергетика нижней атмосферы

2.1 Модель стандартной атмосферы

Нашей задачей является анализ наиболее интенсивных глобальных процессов в атмосфере, которые являются важными для рассматриваемых аспектов нижней атмосферы. Предметом последующего анализа являются глобальные интенсивные процессы в тропосфере, которые определяют энергетику Земли и ее атмосферы. В процессе этого анализа учитываются

разные аспекты атмосферной физики, содержащиеся в книгах [1, 2, 3, 145, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Наша цель - обобщить результаты для нижней тропосферы, где происходят основные глобальные энергетические процессы, и представить их вместе с численными параметрами в простой форме.

При анализе отдельных проблем физики атмосферы, мы используем простые модели, включающих наиболее важные элементы проблемы. Это позволяет установить основные закономерности, описывающих реальные системы, простым и наглядным образом. При исследовании я глобальных атмосферных процессов для упрощения анализа удобно заменить распределения по основным параметрам атмосферы их средними значениями. Это усреднение проводится как по земному шару, так и по времени, включающее усреднение по сезону и по времени суток. Такое усреднение атмосферных параметров приводит нас к модели стандартной атмосферы [17], на основе которой далее будем анализировать рассматриваемые свойства атмосферы. В этом случае различные параметры атмосферы зависят только от высоты. Ниже мы представим основные параметры атмосферы в рамках модели стандартной атмосферы.

Таблица 1.

Атмосферные параметры вблизи поверхности Земли согласно модели стандартной атмосферы Parameters of the atmosphere near the Earth's surface according to the model of standard atmosphere [17].

Параметр, единицы	Знаение
p кРа	101
T_E , К	288
m , а.е.м.	28.96
$N_a, 10^{19} \text{см}^{-3}$	2.55
ρ_a , кг/м ³	1.22
C_p , кДж/(г · К)	1.005
C_V , кДж/(г · К)	0.718
v_s , м/с	340
g , см/с ²	981
λ , нм	66
η , Па · с	0.18
κ , 10^{-4} Вт /см · К	2.5
ν , см ² /с	0.15
χ , см ² /с	0.21

В табл.1 приведены параметры атмосферного воздуха вблизи поверхности Земли в рамках модели стандартной атмосферы [17]. Эти параметры приведены в наиболее часто используемых единицах. Здесь p - среднее давление воздуха у поверхности Земли, T_E - глобальная температура, т.е. температура, усредненная по земному шару и времени, m - средняя масса молекул воздуха, выраженная в атомных единицах массы, N_a - средняя плотность молекул воздуха, ρ_a - их средняя массовая плотность, C_p , C_V - теплоемкости воздуха вблизи поверхности Земли при постоянном давлении и объеме соответственно.

Наряду с вышеуказанными статическими параметрами атмосферы, в табл.1 представлены некоторые средние динамические параметры атмосферы вблизи поверхности Земли. Они включают скорость звука v_s , ускорение свободного падения g , среднюю длину

свободного пробега молекул воздуха в атмосферном воздухе λ , коэффициент вязкости η , а также коэффициент теплопроводности κ , коэффициент кинематической вязкости ν , а также коэффициент температуропроводности χ .

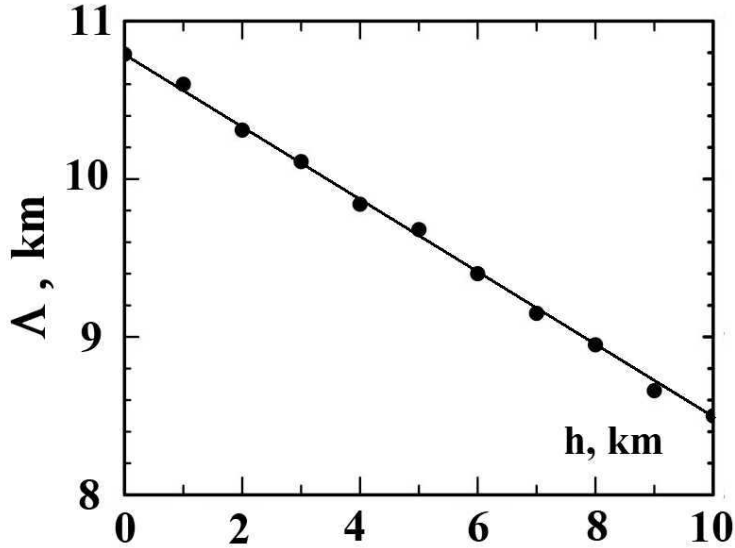


Figure 1: Зависимость параметра масштаба Λ от высоты, определенная на основе формулы (2) в рамках модели стандартной атмосферы [17].

Отметим, что нижняя атмосфера Земли - тропосфера представляет собой плоский слой воздуха, находящийся над ее поверхностью, поскольку толщина этого слоя (~ 10 км) мала по сравнению с радиусом Земли (6400 км). Температура воздуха в тропосфере снижается с увеличением высоты. Объединяя молекулы азота и кислорода в молекулы воздуха, удобно представить зависимость плотности молекул воздуха от высоты $N_a(h)$ в иде формулы Больцмана

$$N_a(h) = N_o \exp\left(-\frac{h}{\Lambda}\right) \quad (2.1)$$

При этом плотность молекул воздуха вблизи поверхности Земли равна $N_o = 2,55 \cdot 10^{19-3}$ для модели стандартной атмосферы. Соответственно, параметр масштаба может быть восстановлен на основе зависимости $N_a(h)$ как

$$\Lambda = - \left[\frac{d \ln N_a(h)}{dh} \right]^{-1}, \quad (2.2)$$

Основываясь на измерениях плотности атмосферного воздуха и проводя усреднение измеренных параметров по времени и географической координате, можно определить параметр масштаба Λ на основе измерений, которые представлены на рис.2.1. Эта зависимость дает для параметра масштаба [18]

$$\Lambda = (10.4 \pm 0.4) km \quad (2.3)$$

Другим важным параметром модели стандартной атмосферы является зависимость температуры атмосферного воздуха от высоты. Эта зависимость имеет вид

$$T(h) = T_E - h \cdot \frac{dT}{dh} = -6.5 \frac{K}{km}, \quad T_E = 288K, \quad \frac{dT}{dh} = -6.5 \frac{K}{km} \quad (2.4)$$

Здесь T_E - глобальная температура, т.е. средняя температура на поверхности Земли, dT/dh - градиент температуры. Эта зависимость справедлива вплоть до высот $h = 11km$, где средняя температура атмосферного воздуха равна $217K$. Эти параметры отвечают границе тропосферы.

2.2 Циркуляция воды через атмосферу

Хотя процессы с участием воды в атмосфере не связаны с вопросами, поставленными в этой статье, мы включим их в рассмотрение, поскольку без них невозможно описать атмосферу как физический объект. Однако, концентрируясь на физике исследуемых процессов, мы используем для их описания простые модели, объединяя их со средними измеряемыми параметрами, относящимися к данной проблеме. Конечно, это приводит к потере точности описания, но позволяет понять физику объекта или процесса. В данном случае в рамках рассматриваемой модели вода испаряется с открытых резервуаров на поверхности Земли, захватывается вихрями воздуха в его конвективном движении и атмосфере и таким способом поднимается вверх. Там она в соответствии с общей моделью циркуляции воды [19] конденсируется и далее в виде осадков, т.е. дождя и снега, возвращается на поверхность Земли.

Расширим эту модель, включив в нее также возвращение воды на землю в виде молекул. Тогда в стационарном режиме имеем следующее уравнение баланса плотности молекул воды N_w в атмосфере

$$j_{ev} = l_w + j_c, \quad (2.5)$$

При этом поток испаряющихся молекул воды j_{ev} и возвращающихся на поверхность земли j_w , которые как и молекулами воды распространяются в вихрях воздуха, даются теми же выражениями, что и в случае молекул воздуха, именно,

$$j_{ev} = -D_L \frac{dN_w}{dh}, \quad l_w = wN_w \quad (2.6)$$

Соответственно, поток молекул воды j_c , образующих конденсированную воду в атмосфере, дается выражением

$$j_c = w_c N_w, \quad (2.7)$$

где w_c - параметр, характеризующий переход находящейся в атмосфере молекулы воды из свободного в связанное состояние.

Решение уравнения (2.5) с учетом соотношений (2.6) и (2.7) дает следующее распределение плотности молекул воды по высоте h

$$N_w(h) = N_o \exp\left(-\frac{h}{\lambda}\right), \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\Lambda} + \frac{w_c}{D_L} \quad (2.8)$$

Численные значения параметров этих формул следует из глобальных измерений [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26]. Как результат этих измерений, суммарная масса воды dM/dt , выпавшая на поверхность Земли в единицу времени в виде осадков, равна

$$\frac{dM}{dt} = 4,8 \cdot 10^{20} g/yr = 1,5 \cdot 10^{13} g/s$$

В дополнение к этому имеем, что если превратим всю атмосферную воду в жидкость и равномерно распределить ее по поверхности Земли, то высота h_w образовавшегося слоя составит [27, 28]

$$h_w = 2.5cm \quad (2.9)$$

Другим параметром, описывающим равновесие воды между поверхностью Земли и атмосферой, является среднее время τ_{res} для пребывания молекулы воды в атмосфере [24, 25, 27]. Как следует из проведенных измерений имеем $\tau_{res} \approx 9$ суток [27, 28].

Используя эти значения и решая уравнение(2.5) , получим численные значения для параметров задачи [18]

$$\lambda = (2.0 \pm 0.1)km, D_L \approx (5 \pm 1) \cdot 10^4 cm^2/s \quad (2.10)$$

Отсюда получим для относительных значений для потоков молекул воды [18]

$$\frac{j_w}{j_{ev}} = \frac{\lambda}{\Lambda} = 0.2, \frac{j_c}{j_{ev}} = \frac{\Lambda - \lambda}{\Lambda} = 0.8 \quad (2.11)$$

Отсюда получим, что основная часть ($\approx 80\%$) потока молекул воды на поверхность Земли на поверхность Земли обязана осадкам в соответствии с упрощенной схемой циркуляции воды через атмосферу [19]. Кроме того, отсюда можно найти значения средних потоков молекул воды при циркуляции через атмосферу, выраженных в единицах $cm^{-2}s^{-1}$, которые равны [18]

$$j_{ev} = 1.1 \cdot 10^{17}, j_w = 2 \cdot 10^{16}, j_c = 9 \cdot 10^{16} \quad (2.12)$$

Однако, в отличие от распределения молекул воздуха в атмосфере в распределение молекул воды характеризуются большими флуктуации Для демонстрация этого используем результаты измерений, проведенных в рамках "Глобального проекта по климатологии осадков" [29] с использованием метеостанций, спутников и аэростатов. На рис.2 представлены данные измерений среднемесячного количества глобальных осадков, разделенного на площадь земной поверхности [30] проведенных в 1979-2010 гг. Большие флуктуации для потоков молекул воды снижают точность полученных результатов.

На рис.3 дается средняя по времени интенсивность выпадения осадков как функция географической от широты. Как видно, приполярные регионы не вносят никакого вклада в количество осадков. Кроме того, количество осадков в регионах, расположенных вблизи экватора, превышает среднее значение. Причина - более высокая температура в регионах вблизи экватора, что приводит к более интенсивному испарению с поверхности Земли для этих регионах.

2.3 Энергетический баланс Земли и атмосферы

Тепловое состояние Земли определяется энергетическими процессами, происходящими на Земле и в ее атмосфере. Энергетический баланс Земли описывается суммарной мощностью каждого процесса, которая делится на площадь земной поверхности. Средние энергетические потоки основных процессов, которые характеризуют энергетический баланс Земли и атмосферы и выражаются в единицах $Вт/м^2$. Наиболее интенсивные энергетические процессы вместе с относящимися к ним потокам энергии приводятся

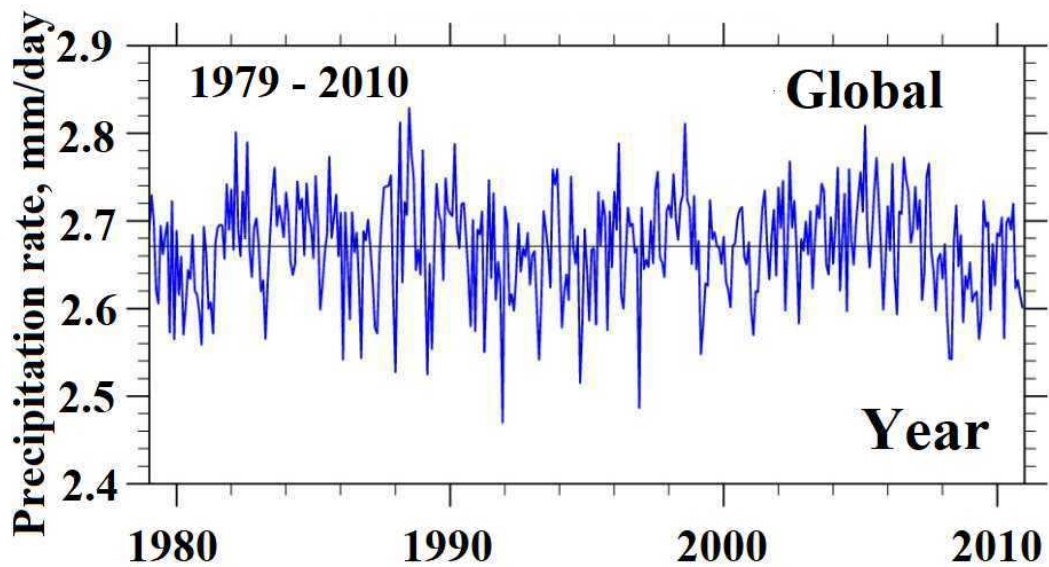


Figure 2: Скорость выпадения осадков, усредненная по земному шару и времени в течение каждого месяца за период с 1979 г. по 2010 г. Среднее значение скорости осаджения воды, отмеченное тонкой прямой линией, составляет 2.67 мм/сутки [30].

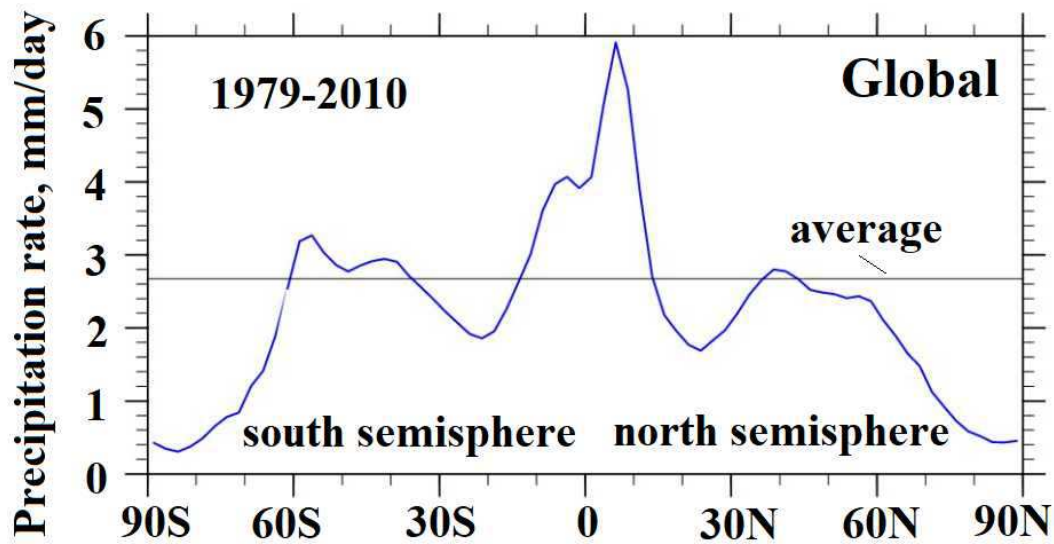


Figure 3: Усредненная по измерениям 1979-2010 г.г.интенсивность выпадения осадков в зависимости от географической широты [30]. Среднее значение скорости осаджения воды, отмеченное тонкой прямой линией, составляет 2.67 мм/сутки.

на рис.4 [18]. Для этого мы рассматриваем поверхность Земли, атмосферу как целое и окружающее Землю пространство как отдельные физические объекты, которые обмениваются энергией. Для сравнения отметим, что суммарный поток энергии, относящийся к мировому производству, составляет $0,04 \text{ Вт/м}^2$.

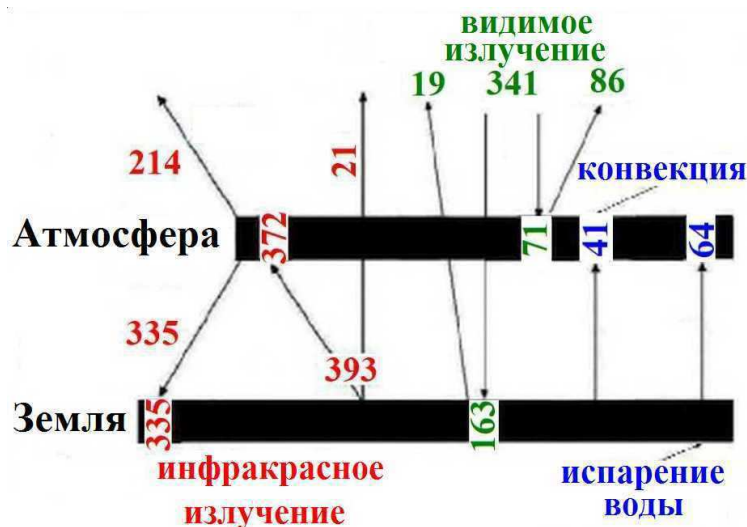


Figure 4: Энергетический баланс Земли и ее атмосферы в форме средних потоков энергии, выраженных в Вт/м^2 для указанных каналов [18]. Поглощенные энергетические потоки даны внутри соответствующих прямоугольников, значения энергетических потоков приведены вблизи стрелок.

Глобальные процессы, протекающие в атмосфере Земли и на ее поверхности, можно разделить на три группы. К первой из них относятся излучательные процессы в видимой области спектра. Эти процессы инициируются солнечным излучением, попадающим в атмосферу Земли. Далее оно отражается от атмосферы или поверхности Земли или поглощается ими, переходя в другие виды энергии. Вторая группа интенсивных процессов на поверхности Земли и в ее атмосфере включает в себя процессы теплового излучения, т.е. излучения в инфракрасной области спектра.

В третью группу интенсивных процессов входят процессы обмена энергией между атмосферой и поверхностью Земли в результате процессов переноса. Эти процессы включают перенос тепла от нагретых к холодным слоям атмосферы в результате конвекции. Поскольку температура атмосферы уменьшается с высотой, этот механизм ведет к переносу энергии от поверхности Земли в атмосферу. Другой механизм переноса так называемой скрытой энергии связан с испарением молекул воды с поверхности открытых водоемов на поверхности Земли. Находясь в атмосфере, свободные молекулы воды образуют конденсированную фазу в виде капель и снежинок, а выделяемая при этом энергия остается в атмосфере.

Ясно, что построение диаграммы энергетического баланса Земли и атмосферы требует большой работы и достоверных источников. Такая работа проводится, начиная с 1917 года [31]. Представленная на рис.4 диаграмма энергетического баланса Земли основана на 5 источниках, которые включают данные НАСА, Национальной Академии Наук США и ВМО. Рис.4 содержит средние значения параметров, взятых из этих пяти

источников. Естественно, что эти данные несколько расходятся, так что статистическое усреднение данных позволяет оценить погрешность данных рис.4. В частности, в таблице 2 приводятся статистически усредненные значения потоков инфракрасного излучения, включенных в энергетический баланс Земли. Отсюда следует, что погрешность для значений отдельных потоков в энергетическом балансе Земли и атмосферы превышает $1\text{Вт}/\text{м}^2$.

Таблица.2.

Средние потоки инфракрасного излучения в энергетическом балансе Земли, выраженные в единицах $\text{Вт}/\text{м}^2$ [18, 32].

Канал излучения	Поток энергии, $\text{Вт}/\text{м}^2$
Эмиссия атмосферы на поверхность Земли	335 ± 7
Эмиссия атмосферы в окружающее пространство	217 ± 8
Поглощение атмосферой Земли	372 ± 6
Эмиссия поверхности Земли	393 ± 8
Прохождение через атмосферу с поверхности Земли	21 ± 1

При построении энергетического баланса Земли и атмосферы, представленного на рис.4, считали, что имеет место энергетическое равновесие между поверхностью Земли, атмосферой и окружающим пространством, в результате которого Земля поглощает и отдает поток энергии $498 \text{Вт}/\text{м}^2$, поглощаемый и испускаемый поток энергии для атмосферы равен $548 \text{Вт}/\text{м}^2$, а для окружающего пространства эта величина составляет $341 \text{Вт}/\text{м}^2$. Тем не менее, имеется небольшой дисбаланс в потоках энергии между Землей и атмосферной как целого и окружающим пространством, который меньше $1\text{Вт}/\text{м}^2$, т.е. статистической ошибки для рассматриваемых потоков энергии. В настоящее время этот дисбаланс приводит к медленному остыванию планеты.

Отметим роль атмосферы для энергетики Земли. Если убрать атмосферу и считать Землю абсолютно черным телом с эффективным переносом энергии по ее поверхности, то при энергетическом равновесии температура поверхности Земли составит

$$T_E = \left(\frac{J_s}{4\sigma} \right)^{1/4} = 278\text{K}, \quad (2.13)$$

где $J_s = 341 \text{Вт}/\text{м}^2$ - поток солнечного излучения на уровне Земли, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$ - постоянная Стефана-Больцмана. Поскольку глобальная температура Земли $T_E = 288\text{K}$ несколько выше, атмосфера играет важную роль в установлении теплового баланса Земли.

Определим эффективную температуру излучения атмосферы, которая в силу термодинамического равновесия между излучением и атмосферным воздухом характеризует температуру атмосферного слоя, ответственного за это излучение. Такие температуры излучения определяются потоками излучения атмосферы в сторону Земли и наружу, которые в соответствии с энергетическим равновесием для атмосферы, представленном на рис.4, равны

$$J_{\downarrow} = (335 \pm 7)\text{W}/\text{m}^2, \quad J_{\uparrow} = (215 \pm 8)\text{W}/\text{m}^2 \quad (2.14)$$

На основе этого находим эффективные температуры T_{\downarrow} и T_{\uparrow} для слоев атмосферы, ответственных за атмосферное излучение в сторону Земли и наружу, используя закон Стефана-Больцмана для абсолютно черного тела. Эти температуры равны [15, 39]

$$T_{\downarrow} = (277 \pm 2)K, T_{\uparrow} = (248 \pm 2)K \quad (2.15)$$

На основе модели стандартной атмосферы для распределения температуры атмосферы по высоте (4) отсюда получим также высоту слоев атмосферы, ответственных за излучение на поверхность Земли h_{\downarrow} и в окружающее пространство h_{\uparrow}

$$h_{\downarrow} = (1.6 \pm 0.2)km, h_{\uparrow} = (6.1 \pm 0.3)km \quad (2.16)$$

Характеристикой взаимодействия солнечного излучения с поверхностью Земли и ее атмосферой является альbedo [33], отношение потока солнечного излучения, отраженного от полной системы Земля-атмосфера, к потоку излучения, падающему на нее. Заметим, что солнечное излучение состоит из электромагнитных волн с длиной волны (0.4 – 0.7) мкм. Альbedo зависит от материала земной поверхности и составляет 0.84, если земля покрыта снегом или льдом [34], а в случае, если поверхность Земли покрыта зеленым лесом, альbedo равно примерно 0.14 [34]. Альbedo зависит также от угла падения потока солнечного излучения на поверхность Земли. Среднее альbedo Земли, которое учитывает отражение солнечного излучения от атмосферы и поверхности Земли, равно приблизительно 0.3 [34]. В дополнение к этому, среднее альbedo Земли оценивается как 0.34 согласно [35] с минимумом 0.28 в субтропиках и максимумом 0.67 на полюсах. Для атмосферы эта величина определяется облаками, а без них атмосфера практически прозрачна для видимого света. Таким образом, альbedo зависит от определенных условий атмосферы, а также от оптических свойств земной поверхности. Согласно [18] среднее статистическое значение альbedo, как это следует из энергетического баланса Земли и атмосферы составляет 0.11 ± 0.02 для поверхности Земли и 0.25 ± 0.04 для ее атмосферы.

Альbedo атмосферы, в первую очередь, зависит от присутствия в ней микрочастиц и микрокапель. Для реальной атмосферы это связано с микрокаплями воды в атмосфере. Приведенная на рис.5 зависимость коэффициента поглощения электромагнитной волны от длины волны макроскопической жидкой водой позволяет понять характер поглощения облаков, которые состоят из микрокапель воды. Если размер микрокапли превышает длину волны излучения, то в этом случае поглощение идентично для микрокапель и макроскопической воды.

Поскольку $1/k_{\omega}$ является длиной пробега фотона в среде, согласно данным рис.5 облака не поглощают солнечное излучение, но являются эффективными поглотителями для теплового излучения, находящегося в инфракрасной области спектра. Как следует из рис.5, коэффициент поглощения воды в инфракрасной области спектра примерно на семь порядков величины больше, чем в видимой области спектра. Это означает слабое поглощение видимого света облаками. и альbedo атмосферы связано с рассеянием солнечного излучения облаками, а не с поглощением. Однако, имеются другие материалы с сильным поглощением света, в частности, угольная пыль.

Давайте оценим минимальное количество пыли в атмосфере, которая поглощает заметную часть солнечного излучения, т.е. оптическая толщина слоя находящейся в атмосфере пыли порядка единицы. Для большого размера пылинки r по сравнению с длиной волны излучения λ сечение поглощения излучения частицей равно поперечному сечению частицы πr^2 . При малом размере частицы по сравнению с длиной волны это сечение поглощения умножается на малый фактор λ/r [40]. Отсюда следует, что оптическая толщина атмосферы в этом предельном случае определяется массой пыли, находящейся над единицей площади столба, причем оптическая толщина атмосферы за счет поглощения рассматриваемой пыли порядка единицы, если толщина слоя осаждаемой пыли порядка длины волны поглощаемого излучения λ .

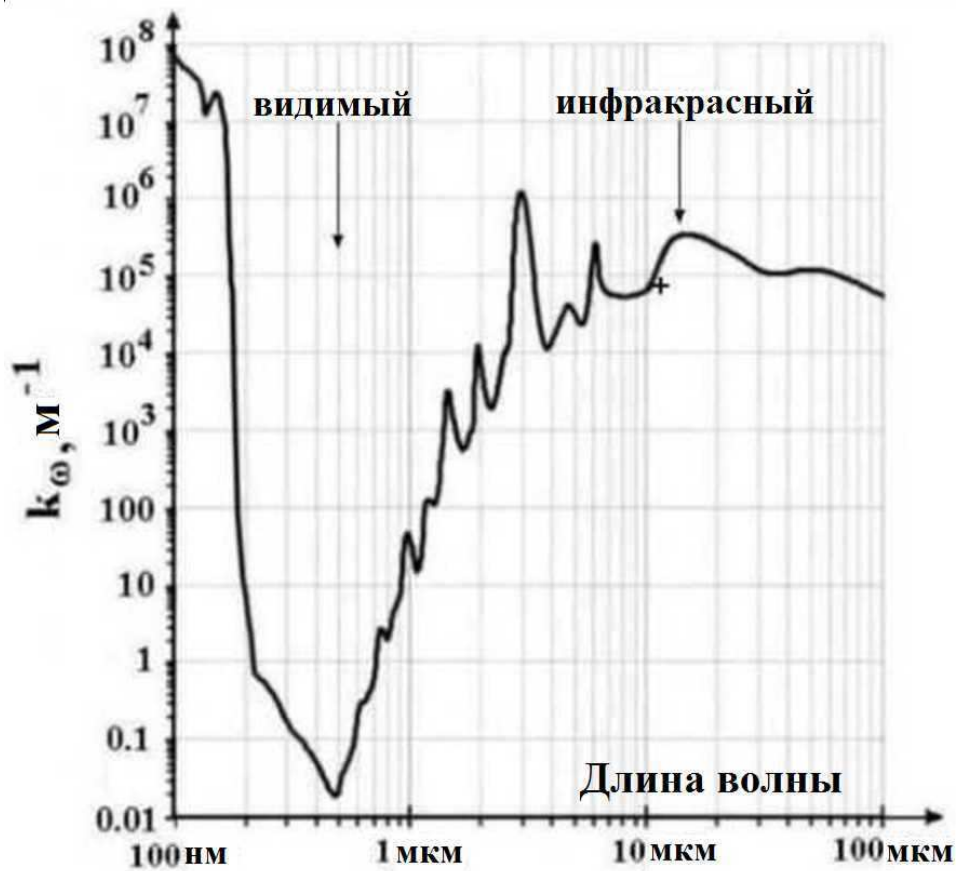


Figure 5: Коэффициент поглощения для жидкой воды при нормальных условиях [36, 37]. Стрелки показывают длину волны для солнечного излучения и инфракрасного (длинноволнового) излучения, крест - результат атмосферных измерений [38].

Эта оценка позволяет оценить массу мелкой пыли в атмосфере, которая обеспечивает заметное поглощение света. Считая, что длина волны излучения $\lambda \sim 1 \mu m$, получим типичную массовую плотность атмосферы порядка 1 г/м^2 , которая обеспечивает существенное поглощение солнечного света. Чтобы достигнуть этого по всему земному шару, необходимо выбросить в атмосферу примерно 1 км^3 мелкой пыли, что может быть достигнуто при выбросах материала при извержениях вулканов. Например, при извержении наиболее мощного вулкана Тамбора (Индонезия) в 1815 году было выброшено в атмосферу 50 км^3 магмы и 150 км^3 твердых выбросов [41, 42]. Мелкая пыль этих выбросов, попадая в стратосферу и оставаясь там в течение нескольких лет, может изменить климат в течение этого времени, что отражается на урожаях в течение этого времени.

Долгое нахождение пыли в стратосфере и нижних слоях атмосферы связано с малой скоростью падения частиц на поверхность Земли под действием их веса. Так, скорость движения к поверхности Земли для микрокапли воды радиуса 1 мкм составляет 0.01 см/с , а для микрокапель воды радиуса 10 мкм эта скорость составляет примерно 1 см/с . Поэтому время нахождения микронных частиц в неподвижном воздухе составляет годы, так что в течение этого времени энергетический баланс атмосферы, представленный на рис.4, изменяется.

Мелкая пыль в атмосфере может быть образована в результате ядерных взрывов, так что продукты взрыва не пропускают солнечное излучение. В результате наступает так называемая ядерная зима [43, 44, 45, 46, 47]. Полная масса твердого материала, выброшенного в атмосферу в результате я мощного ядерного взрыва, сравнима с выбросом при извержении вулкана Тамбора и приводит примерно к тем же последствиям,

2.4 Эволюция глобальной температуры

Рассматривая тепловое состояние Земли и ее эволюцию, будем ориентироваться на ее долговременные изменения. При описании местной погоды используется целый ряд параметров, включая температуру, интенсивность и направление ветра, влажность, облачность, осадки. При переходе к долговременному описанию, превышающих год, усредним по всем параметрам. Нас интересует тепловое состояние планеты, усредненное по земному шару. Тогда характеристикой теплового состояния Земли останется только один параметр - глобальная температура, а эволюция теплового состояния Земли станет эволюция глобальной температуры Земли, что является предметом последующего анализа.

Разделим анализ долговременного изменения глобальной температуры на две части, поскольку для них используются разные методы. К первому из них отнесем изменение глобальной температуры за времена, включающих жизнь нескольких поколений, тогда как масштаб времен для второй части изменений составляет тысячелетия. Эволюция глобальной температуры может быть надежно определена по усредненным результатам метеорологических измерений, которые сохраняются в виде записи измерений метеостанций, существующих с 19 века. Для далеких времен можно определить только локальные температуры на основе химических и изотопных исследований отложений в почве и ледниках.

Анализ температурных данных, полученных на метеорологических станциях, осложняется большими колебаниями измеряемой температуры во времени. Нетрудно видеть, что суточные и сезонные колебания местной температуры составляют десятки градусов, что приводит к флуктуациям глобальной температуры, полученных усреднением по земному шару и времени, составляют градусы, которые превышают средние изменения глобальной температуры. Простой метод [48] позволил сократить флуктуации в изменении глобальной температуры как функцию времени до десятых долей градуса. В этом случае за основу берутся не средние местные температуры, а их разность для данной

точки земного шара и времени года, но в разные годы. Усреднение разности местных температур по времени и земному шару приводит к флуктуациям изменения глобальной температуры, составляющих десятые доли градуса.

Такая программа была отработана и осуществлена в рамках проекта НАСА [Институт космических исследований имени Готгарда (GISS)] [49]; ее результаты представлены на международной модели изменения климата [50, 158]. Далее эта программа была проведена рядом других организаций. Она включает большую работу с огромным массивом данных и использует данные примерно 6 тысяч метеостанций в конце 19 века и остающихся 2 тысяч метеостанций в настоящее время, когда к ним добавились данные со спутников. Рис.6 представляет характер изменения глобальной температуры, начиная со второй половины 19-го века, когда метеорологические станции распространились по всему миру.

Анализ данных рис.6а показывает немонотонный характер изменения глобальной температуры в последнее время. Нет надежного объяснения ни причины флуктуаций, величина которых достигает $0,2^{\circ}C$, ни причины наблюдаемого изменения глобальной температуры, если исключить флуктуации, которые пропадают при усреднении за период более 10 лет. Тогда эволюция глобальной температуры за последнее время состоит из двух компонент, как это показано на рис.7. В течение десятилетий до восьмидесятых годов глобальная температура не менялась, если исключить флуктуации. Однако, начиная с восьмидесятых глобальная температура увеличивалась со временем со скоростью

$$\frac{d\Delta T}{dt} = (17 \pm 3)mK/yr, \quad (2.17)$$

где ΔT - изменение глобальной температуры. Эта скорость роста глобальной температуры соответствует ее повышению на $1^{\circ}C$ примерно за 60 лет. При этом со второй половины 19 века глобальная температура увеличилась примерно на $1^{\circ}C$ согласно обработке данных метеостанций.

Казалось бы причины такого характера эволюции глобальной температуры нетрудно установить, опираясь на энергетический баланс Земли и атмосферы, который представлен на рис.4. Для этой цели необходимо ввести чувствительность климата S - параметр, устанавливающий связь между изменением глобальной температуры ΔT и изменением потока энергии ΔJ_{\downarrow} , поглощаемой 790 м поверхностью Земли в соответствии с формулой [12, 55]

$$S = \frac{\Delta T}{\Delta J} \quad (2.18)$$

Однако, этот параметр характеризуется большой погрешностью. В частности, анализ [55] отложений дает эту величину в прошлом в различных географических точках Земли в пределах между 0.3 и $1.9 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, а обработка событий прошлого, собранных в [?], дает для коридора чувствительности климата S значения от 0.25 до $0.79 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Далее мы будем использовать следующее значение параметра чувствительности климата [56]

$$S = 0.5 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \quad (2.19)$$

Оно является статистическим усреднением результатов ряда вычислений этой величины. При этом следует учитывать большую погрешность этой величины, составляющей не менее 50% [56].

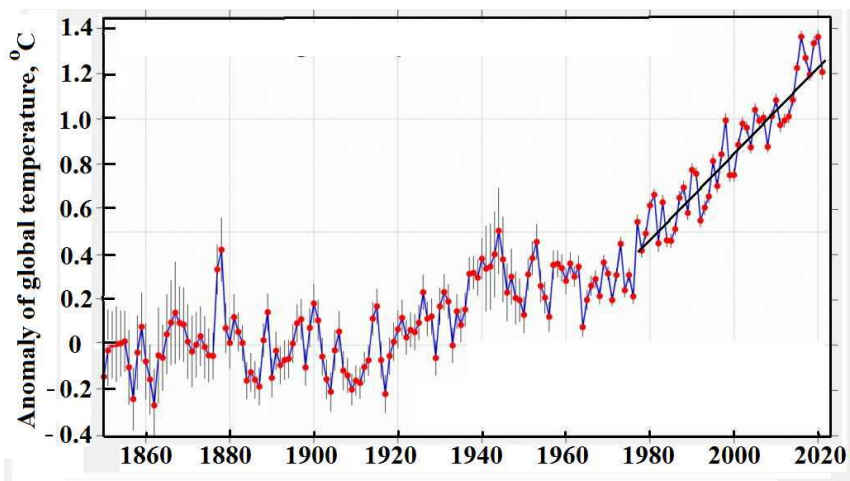
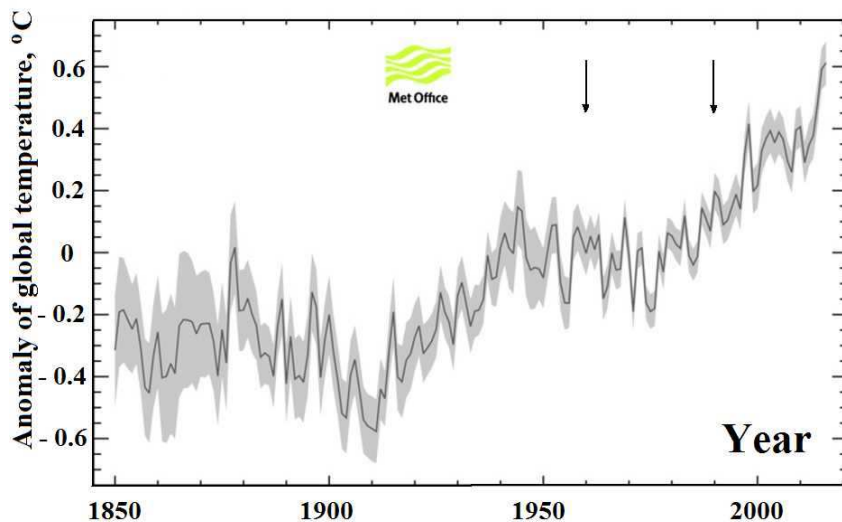
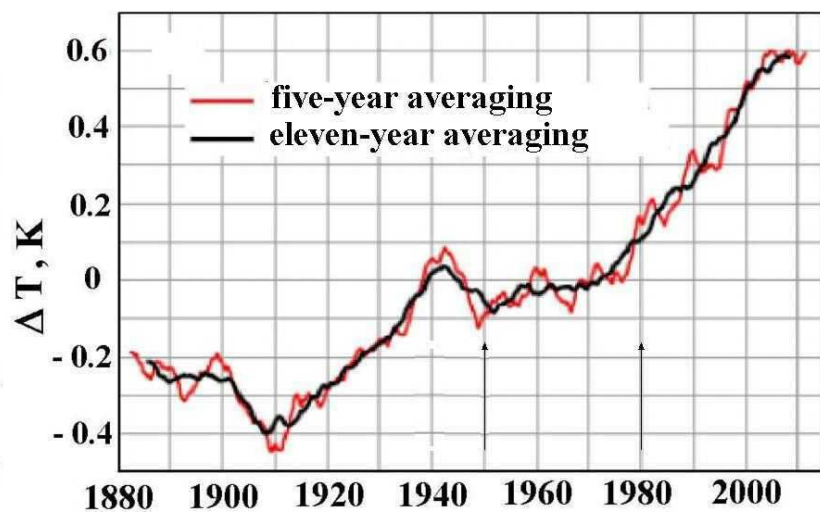


Figure 6: Аномалии глобальной температуры, полученные на основе данных метеостанций. Результаты Института Годдарда (США) [50], лаборатории Беркли (США) [51] (b) и центра Хэдли (Великобритания) [52, 53] (c). Температурные аномалии в (a) отсчитываются от среднего значения за 1951-1980 годы, отмеченного стрелками

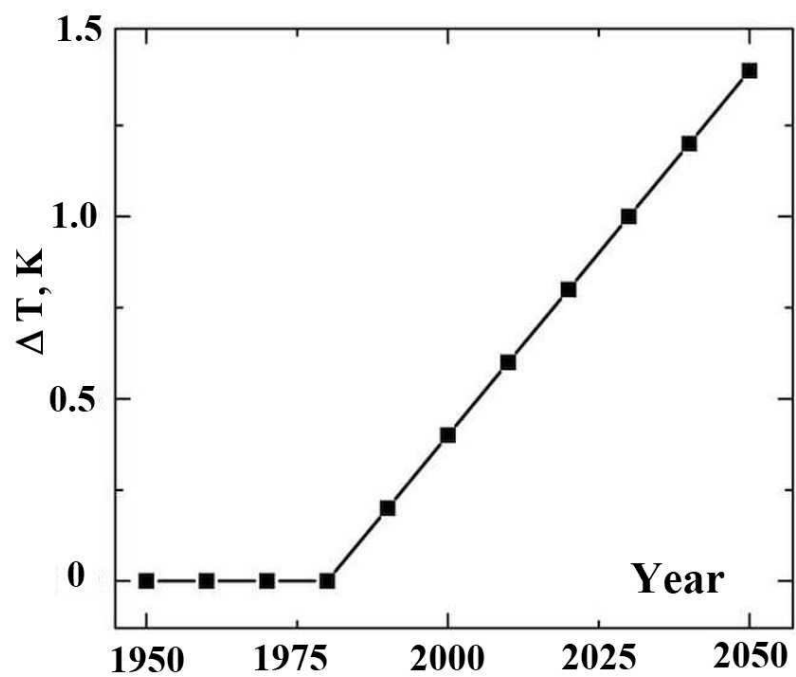


Figure 7: Упрощенный характер эволюции глобальной температуры в последние полтора века на основе данных рис.6 путем исключения флуктуаций [18].

Опираясь на это значение чувствительности климата, получим, что с конца девятнадцатого века поток энергии на поверхность Земли увеличился примерно на 2 Вт/м^2 . Эта величина сравнима с погрешностью потоков энергии, представленных на диаграмме энергетического баланса Земли и атмосферы, т.е. эта величина мала по сравнению с потоками энергии, составляющих энергетический баланс.

Рассмотрим пример, когда увеличение потока энергии на поверхность Земли происходит в результате уменьшения потока теплового излучения, испускаемого поверхностью Земли и проходящего через атмосферу в окружающее пространство, который согласно данным табл.2 равен $21 \pm 1 \text{ Вт/м}^2$. Этот уходящий поток излучения составляют фотоны, частоты которых находятся в окне прозрачности атмосферы, где основная часть излучения поглощается облаками. Увеличение массы облаков приводит к уменьшению уходящего потока и, соответственно, увеличению потока теплового излучения, падающего на поверхность Земли и поглощаемого ею. Увеличение этого потока излучения на 2 Вт/м^2 соответствует увеличению средней оптической толщины облаков, а также их массы на 10%. Погрешность этой величины несколько выше.

Таблица 3.

Изменение глобальной температуры по отношению к средней температуре Земли в 20 веке [57, 58, 59]. Температура выражается в $^{\circ}\text{C}$.

Регион	Время	Суша	Океан	Суша + Океан
Северное полушарие	май 2018	1,27	0,69	0,91
	Май 2019	1,25	0,81	0,93
	Январь-декабрь 2021	1,54	0,89	1,09
	Январь-июль 2022	1,54	0,81	1,09
Южное полушарие	май 2018	1,06	0,54	0,62
	Май 2019	1,13	0,69	0,77
	Январь-декабрь 2021	0,86	0,54	0,59
	Январь-июль 2022	0,88	0,57	0,62
Оба полушария	май 2018	1,21	0,60	0,77
	Май 2019	1,16	0,73	0,85
	Январь-декабрь 2021	1,35	0,65	0,84
	Январь-июль 2022	1,36	0,67	0,86

В дополнении к рассмотренному отметим, что рост средней температуры происходит неравномерно по земному шару. Это можно установить сравнив изменения температуры для разных регионов земного шара. Разделив поверхность Земли на северное и южное полушария, а также сушу и океаны, представим в таблице 3 парциальные изменения температуры по отношению к средней глобальной температуре в 20 веке. Из данных таблицы 3 следует, что наибольшее потепление земной поверхности происходит на суше в северном полушарии, где находится основная часть суши нашей планеты с наиболее эффективным фотосинтезом, Это является косвенным свидетельством того, что эти изменения происходят в результате деятельности человека, которая влияет на характер фотосинтеза. Кроме того, эти изменения происходят немонокотонным образом, а величина флуктуаций в процессе нагрева Земли достигает $0,2^{\circ}\text{C}$.

Исследуя эволюцию теплового состояния планеты в прошлом, можно восстановить только локальную температуру на основе изотопного анализа отложений, находящихся вблизи земной поверхности, что является предметом изучения различных направлений палеонтологии (например, [60, 61, 62, 63, 64, 65]). В земной коре изотопы кислорода ^{18}O

и ^{16}O содержатся в пропорции 0.2% и 99.76% [66]. Однако, поскольку энергия нулевых колебаний в молекулах углекислого газа и кислорода заметно различается для этих изотопов атома кислорода, то при наличии термодинамического равновесия в газе, содержащем кислород и углекислый газ, концентрация изотопа кислорода ^{18}O в этих молекулах разная. Конечно, эта разница мала, но изотопные методы характеризуются высокой точностью.

Будем учитывать, что изотопное равновесие устанавливается в результате реакций обмена с участием атомов кислорода, образующихся под действием космических лучей. Тогда изотопное распределение в молекулах углекислого газа и молекулах кислорода определяется температурой, которая реализуется в этих процессах. Хотя в силу низкой интенсивности космических лучей время установления изотопного равновесия велико, но и времена происходящих процессов при образовании отложений в коре Земли велики.

Суммирование изотопных исследований отложений в коре Земли, имеем, что средняя температура поверхности Земли за последний миллиард лет менялась, оставаясь в коридоре около 20 К [67]. Самая жаркое время на планете наблюдалось в период эоцена [68], который имел место примерно 50 миллионов лет назад. В частности, в начале периода эоцена средняя температура вблизи северного полюса составляла $(23 - 24)^\circ\text{C}$ [69, 70], а температура на южном полюсе была равна $(3 - 5)^\circ\text{C}$ [71]. Можно сравнить эти цифры с современными значениями температуры на полюсах и понять цену утверждения, заложенного в основу парижского соглашения 2015 года [72], что повышение глобальной температуры на 2°C является красной чертой, выше которой нагревание планетф произойдет необратимым образом.

Далее мы рассмотрим наиболее яркий пример измерений такого рода, поскольку данное исследование проведено наиболее подробно в рамках европейского проекта EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) [73]. Целью этого проекта является определение концентрации углекислого газа и температуры в прошлом в районе Антарктиды. В производимых измерениях анализируются пузырьки воздуха, извлекаемые из кусков льда, которые берутся с разной глубины. Глубина льда соответствует времени их формирования, так что концентрация углекислого газа в пузырьках соответствующих образцов представляет собой концентрацию углекислого газа в атмосфере в области Антарктиды в соответствующее время.

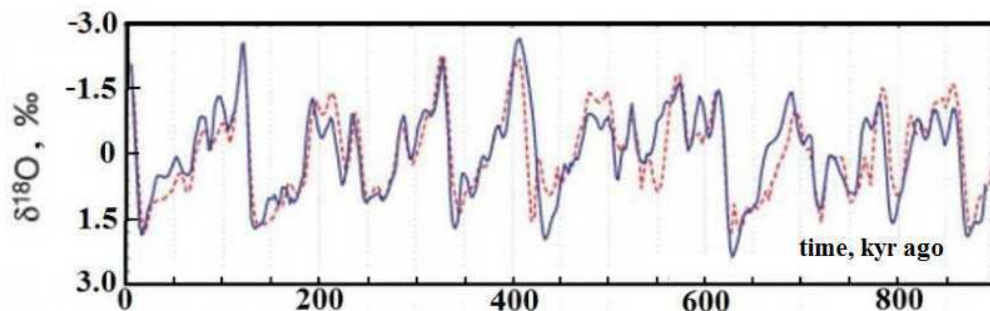


Figure 8: Относительные изменения концентрации изотопа кислорода ^{18}O в молекулах углекислого газа, находящегося в извлеченных из кусков льда пузырьках воздуха. Куски льда извлечены вблизи метеостанции Дом С (сплошная линия) и метеостанции Восток (точки) и свидетельствуют об эволюции температуры атмосферы в прошлом вблизи Антарктиды [77].

Результаты проведенных исследований основаны на анализе кусков льда, извлеченных вблизи антарктических метеостанций Восток [74, 76, 75], Dome C [77, 81, 82] и Dome F [80]. Рис.8 представляет эволюцию концентрации изотопа кислорода ^{18}O в молекулах углекислого газа, на основе которой восстанавливается эволюция температуры атмосферного воздуха в виде пузырьков, захваченных льдом. На рис.9 приведена полученная на основании анализа изотопного состава эволюция температуры атмосферного воздуха, захваченного льдом в виде пузырьков, а также концентрация углекислого газа в пузырьках.

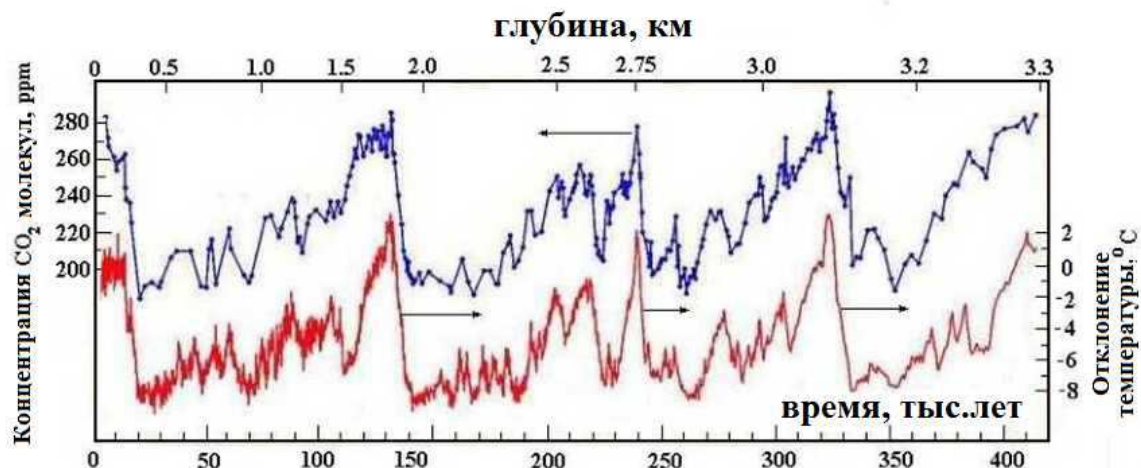


Figure 9: Эволюция температуры поверхности Земли и концентрации углекислого газа в атмосфере в прошлом в районе Антарктиды, которое получено из анализа ледовых отложений в Антарктиде вблизи метеостанций Восток и Dome C [74, 75].

Из анализа пузырьков воздуха в ледовых отложениях вблизи трех метеостанций в Антарктиде следует квазициклический характер эволюции температуры атмосферного воздуха с периодом одного цикла около 100 тысяч лет и средней амплитудой колебания температуры, равной $12^{\circ}C$. При этом каждый ледовый цикл состоит из медленного охлаждения поверхности Земли со скоростью около $10^{-4}C$ в год в течение почти всего времени одного цикла и быстрого процесса нагревания воздуха, подобному тепловому взрыву. Наблюдаемое охлаждение планеты следует из дисбаланса потоков энергии, поглощаемых Землей и атмосферой как целого и уходящих в окружающее атмосферу пространство. Как видно, этот дисбаланс потоков энергии составляет порядка 10^{-4} Вт/м^2 .

Параметры энергетического баланса для Земли, атмосферы и окружающего пространства показаны на рис.10. Метод получения этих параметров мы приводим ниже. Мы предполагаем, что поверхность Земли излучает как черное тело. Тогда, в соответствии с законом Стефана-Больцмана, получим для среднего потока излучения с поверхности Земли значение 329 Вт/м^2 вместо значения 393 Вт/м^2 для теплого периода ледникового цикла. Предполагая, что, как и в случае стандартной модели атмосферы, температурный градиент остается постоянным вплоть до границы тропосферы, расположенной на высоте 11 км, получим, что градиент температуры в холодной фазе ледникового цикла составляет $5,4 \text{ К/км}$ вместо $6,5 \text{ К/км}$ для теплого времени ледникового цикла. Считая, что коэффициент конвективной теплопроводности линеен по отношению к градиенту температуры, получим

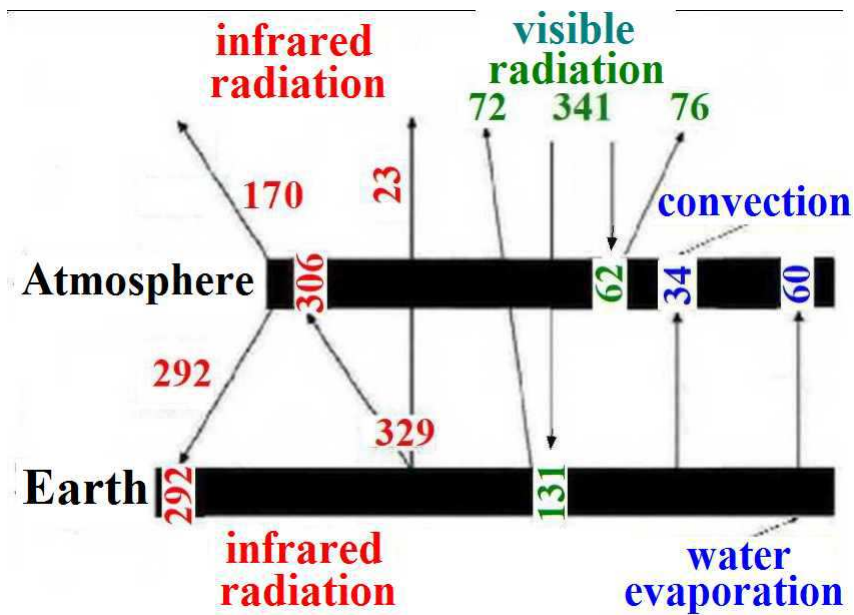


Figure 10: Энергетический баланс Земли и атмосферы в холодный период ледникового цикла, когда средняя температура поверхности на 12°C ниже современной. Поглощаемые потоки энергии, выраженные в W/m^2 , даны внутри соответствующих прямоугольников, значения самих потоков энергии приведены рядом со стрелками [84].

для среднего теплового потока, переносимого с поверхности Земли в атмосферу, значение 34 Вт/м^2 , тогда как для теплого периода ледникового цикла он составляет 41 Вт/м^2 .

Далее, при анализе процессов, связанных с водой, используется предположение [83], что при изменении температуры поверхности Земли влажность воздуха в атмосфере сохраняется. Отсюда следует, что масса атмосферной воды в холодный период ледникового цикла на 6% ниже, чем в теплый период. Отсюда следует, что средний поток энергии с поверхности Земли в атмосферу в результате испарения воды равен 60 Вт/м^2 вместо 64 Вт/м^2 в теплый период ледникового цикла.

Важной компонентой энергетического баланса Земли и ее атмосферы являются облака, состоящие в основном из микрокапель воды. Масса атмосферной воды, содержащейся в облаках, составляет небольшую часть атмосферной воды (менее 1% для современной атмосферы). Эта малость определяется природой конденсации воды в атмосфере [83], которая происходит в результате смешивания струй теплого воздуха из приповерхностной атмосферы и холодного воздуха из более высоких слоев атмосферы. Предполагая, что масса конденсированной воды в атмосфере пропорциональна квадрату плотности молекул воды в приповерхностной атмосфере, получаем, что масса конденсированной атмосферной воды в атмосфере в холодную фазу ледникового цикла примерно на 12% меньше этого значения для теплой фазы. Примем во внимание, что излучение, испускаемое поверхностью Земли и покидающее атмосферу, определяется в основном длинами волн в окне прозрачности атмосферы. Тогда получим для соответствующего этому среднего потока излучения значение 23 Вт/м^2 вместо 21 Вт/м^2 в теплую фазу ледникового цикла. Соответственно, поток инфракрасного излучения, испускаемый поверхностью Земли и поглощаемый атмосферой, составляет 306 Вт/м^2 вместо 372 Вт/м^2 в теплую фазу ледникового цикла. Эти данные использованы при построении диаграммы энергетического баланса Земли и ее атмосферы, представленного на рис.10.

Характеризуя состояние Земли и атмосферы альбедо, можно видеть, что переход между теплым и холодным состоянием Земли в течение ледникового периода приводит к изменению альбедо атмосферы от 0,25 до 0,22, тогда как альбедо поверхности меняется от 0,11 до 0,36 [84]. Для сравнения, альбедо абсолютно черного тела равно 0, а льда - 0,84. Отсюда следует, что в период холодной фазы ледникового периода лед покрывает около 40% поверхности Земли, что важно для сохранения активной жизни на Земле. Если охлаждение Земли в процессе ледникового периода можно объяснить слабым нарушением баланса между потоком солнечного излучения, поглощаемого Землей и атмосферой, и потоком испускаемого ити излучения в окружающее пространство, то быстрое нагревание планеты происходит за счет изменения оптических свойств земной поверхности и атмосферы в результате извержения вулканов [84]. Видимо, при сильном охлаждении планеты вода перестает проникать в глубокие слои земной коры, что приводит к их нагреванию и вызывает повышенное извержение вулканов.

Очень важно, во время холодной фазы ледникового цикла льдом покрыта только часть поверхности Земли, т.е.охлаждение планеты не нарушало развитие активной жизни на планете. Добавим к этому, что удельная мощность современной энергетики оценивается как 0.04 Вт/м^2 , что превышает дисбаланс средних потоков энергии, поглощаемого Землей и отдаваемому ею, что приводит к охлаждению Земли в основную часть ледникового периода, Поэтому хозяйственная деятельность человека прекращает характер эволюции глобальной температуры в виде ледниковых циклов. Более того, если считать, что нагревание планеты в последние десятилетия, определяемое формулой (2.17), определяется дисбалансом потоков энергии на Землю и от нее, то с учетом значения (2.19) для параметра чувствительности климата получим , что вырабатываемая человеком энергия, которая остается на Земле, объясняет наблюдаемый рост (2.17) глобальной температуры.

Однако, загадкой остается факт, почему это началось только в восьмидесятих годах двадцатого века (рис.6), 7).

3 Углеродные процессы в атмосфере Земли

3.1 Углеродное равновесие между поверхностью Земли и атмосферой

Целью данной статьи является ответить на вопросы, поставленные в ее заглавии, опираясь на научные исследования. Для этой цели необходимо построить физическую картину процессов в атмосфере и на поверхности Земли, в которых участвует углерод. Сопровождая эту картину численными параметрами свойств и процессов, включающих углерод, мы ограничиваемся наиболее интенсивными и глобальными процессами. Эти процессы устанавливают равновесие между атмосферой и поверхностью Земли.

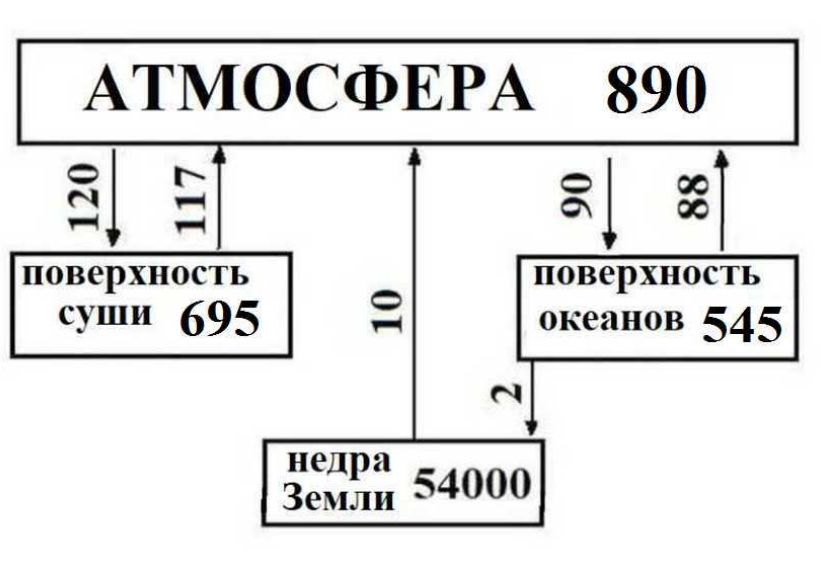


Figure 11: Углеродный баланс между атмосферой и биосферой суши и океанов. Потоки углерода выражены в единицах $GtC/год$ (гигатоннах углерода в год) и указаны рядом со стрелками, в то время как количество углерода указано внутри прямоугольников и выражено в GtC [18].

Углеродный баланс между поверхностью Земли и атмосферой представлен на рис.11, использованы данные [85, 86, 87, 88, 89, 90, 91] для углеродных процессов с соответствующими поправками. Углеродное равновесие между атмосферой и поверхностью Земли устанавливается в течение примерно 4 лет [101], которое является временем нахождения молекул углекислого газа в атмосфере. Равновесие углерода между поверхностью и недрами Земли поддерживается в течение времени порядка тысячи лет, что исключает участие углерода, находящегося в недрах Земли, в углеродном равновесии.

Углерод в этом равновесии включает атмосферный углерод в составе молекул углекислого газа, а углерод на поверхности Земли, который называем биомассой, в основном находится в растениях. Переход между этими формами углерода происходит под действием фотосинтеза, который переводит углекислый газ в биомассу, а также в результате

дыхания и гниения растений, что ведет к обратному переходу. При наличии рассматриваемого равновесия суммарная масса углерода, находящегося в атмосфере и на поверхности Земли, не изменяется в этом равновесии.

Однако, хозяйственная деятельность человека приводит к нарушению рассматриваемого равновесия. Наибольшее влияние человека на углеродное равновесие проявилось в течение индустриальной эры (около 300 лет). В результате этой деятельности человек берет углерод из недр Земли в виде горючих полезных ископаемых и сжигает их для производства энергии. Это ведет к увеличению общей массы углерода в атмосфере и на поверхности Земли.

Как следует из рис.11, вклад в поток углеродной массы с поверхности Земли в атмосферу за счет горючих полезных ископаемых составляет 5%, но этот эффект накапливается. В результате суммарная масса углерода, содержащегося в биомассе и углекислом газе атмосферы, за индустриальный период увеличилась в полтора раза. При скоростях обмена в настоящее время характерное время удвоения массы углерода, находящегося в атмосфере и биосфере, а также время удвоения массы углекислого газа в атмосфере, составляет порядка 100 лет.

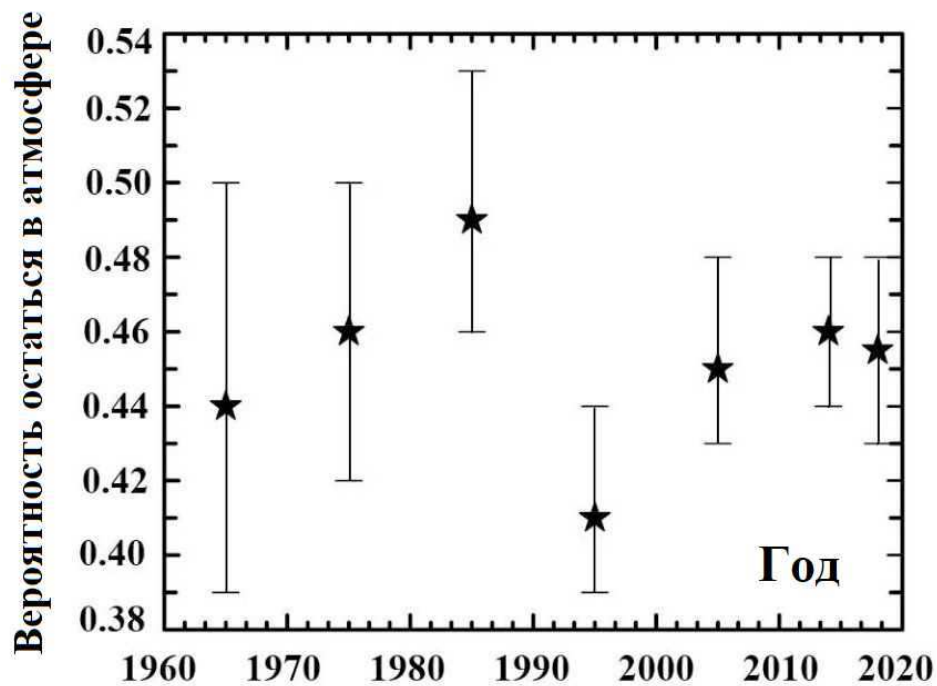


Figure 12: Доля углерода, который после извлечения из недр Земли в виде горючих ископаемых переходит в углекислый газ атмосферы. Используются данные по последующему переходу в атмосферу и биомассу выбросов углекислого газа в атмосферу, относящихся к соответствующему десятилетию и к 2018 году [92].

На рис.11 наряду со скоростями перехода между основными элементами Земли приводятся хранящиеся в них массы углерода в настоящее время. Отметим, что масса

углерода, находящегося в недрах Земли, найдена из предположения, что этот углерод пришел туда из атмосферы. Действительно, будем считать, что на начальной стадии своего развития атмосфера Земли, как и соседние планеты, содержала углекислый газ. Далее в результате процесса фотосинтеза этот углекислый газ превратился в кислород, а образовавшийся углерод ушел в недра Земли. Тогда, исходя из современной массы атмосферного кислорода можно определить массу углерода в недрах Земли. Это нижняя граница для массы углерода, находящегося внутри Земли.

Попадая в атмосферу в результате сжигания горючих ископаемых, атомы углерода частично остаются в ней в молекулах углекислого газа, продукта горения горючих ископаемых, а частично уходят в биомассу. Надежная информация, относящихся к потоком углерода между атмосферой и поверхностью Земли (суши и океанов), получена в рамках углеродного проекта (Global Carbon Project) [93] для потоков углерода с начала индустриального периода, т.е. за период с 1750 по 2018 год. Масса антропогенного углерода, инжестированного за этот период в результате сжигания горючих ископаемых, который оказался в атмосфере, в океанах и на суше, составляет соответственно $(275 \pm 5) \text{ ГтС}$ (ГтС-гигатонна), $(170 \pm 10) \text{ ГтС}$ и $(220 \pm 50) \text{ ГтС}$ [92]. Отсюда получим, что массы активного углерода в атмосфере, океанах и на суше составляют 41%, 26%, и 33% от его общей массы соответственно. Точность этих данных оценивается в 20%. На рис.12 приводится доля углерода, добавленного в равновесие между атмосферой и поверхностью Земли в разные годы [92].

Добавим к этому, что согласно данным глобального углеродного проекта (Global Carbon Project) [93] в 2018 году извлеченная из недр Земли масса углерода составила $(10.0 \pm 0.5) \text{ ГтС}$. Произведенная в этом году сельскохозяйственная продукция содержала $(1.5 \pm 0.7) \text{ ГтС}$ [92]. При этом $(5.1 \pm 0.2) \text{ ГтС}$ углерода добавилось в этом году к массе атмосферы, биомасса океанов увеличилась на величину $(2.6 \pm 0.6) \text{ ГтС}$, а в биомассу суши перешла масса углерода $(3.5 \pm 0.7) \text{ ГтС}$ [92]. Как видно, в атмосферу, в океаны и на сушу перешло примерно 50%, 23% и 27% добавленного в оборот углерода соответственно. Точность этих данных оценивается в 20%. К сказанному можно добавить.

3.2 Углекислый газ в атмосфере

Углерод содержится в атмосфере в составе молекул углекислого газа. При этом молекулы углекислого газа в атмосфере являются удобным объектом для исследования в силу низкой химической активности и в отсутствии фазовых переходов при атмосферных условиях, где углекислый газ находится в газовом агрегатном состоянии. Они легко перемешиваются с воздухом, и поэтому концентрация молекул углекислого газа в воздухе должна быть одинаковой в районах, далеких от источников генерации и поглощения углекислого газа.

При анализе эволюции концентрации углекислого газа в атмосферном воздухе, будем ориентироваться на данные обсерватории Мауна Лоа (Гавайи, США), где измерения проводятся с 1959 года [94]. Удачное расположение обсерватории Мауна Лоа на плоскогорье на высоте 3400 м. над уровнем океана в большой степени исключает влияние источников атмосферного CO_2 и позволяет оперировать со стабильной концентрацией углекислого газа в атмосферном воздухе в процессе измерений. При этом основное оборудование для мониторинга концентрации атмосферного углекислого газа включает 4 башни высотой 7 метров и одну башню высотой 27 метров, что позволяет предотвратить искажения в измерениях в результате взаимодействия углекислого газа с ближайшей поверхностью земли. Поэтому далее будем использовать только результаты измерений обсерватории Мауна Лоа и их анализ [95, 96, 97, 98, 99, 100].

На рис.14 представлена эволюция концентрации молекул углекислого газа в атмосфере

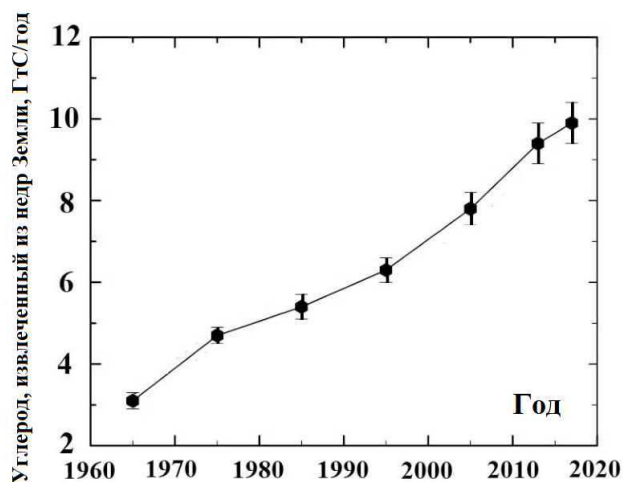


Figure 13: Масса углерода, который ежегодно добывается из недр Земли в виде горючих ископаемых и далее выбрасывается в атмосферу в виде углекислого газа в результате их сжигания в энергетических установках, а также выделяется при нагревании углеродсодержащих пород при производстве цемента [92].

согласно измерениям обсерватории Мауна Лоа. Она измеряется в *ppm*, так что *1ppm* означает одну молекулу углекислого газа на миллион молекул воздуха. Ранее полная масса углерода в его соединениях на поверхности Земли и в атмосфере выражалась в единицах *GtC*, что означает 1 миллиард тонн углерода или 10^{15} грамм. Для атмосферы Земли связь между этими единицами следующая

$$1ppm = 2.124GtC \quad (3.1)$$

Как следует из рис.14, концентрация молекул CO_2 в атмосфере растет со временем. На этот монотонный рост концентрации накладываются сезонные осцилляции этой величины. Действительно, процесс фотосинтеза приводит к переработке атмосферного углекислого газа в твердый углерод, который далее входит в состав растений на поверхности Земли, причем существенный вклад в этот процесс вносит суша северного полушария, где эффективность фотосинтеза примерно в три раза выше, чем в океанах. Это приводит к уменьшению концентрации молекул углекислого газа в летние месяцы для северного полушария. Однако, поскольку обсерватория Мауна Лоа находится близко к экватору (ее координаты $19^{\circ}32'N, 155^{\circ}35'W$), сезонные изменения концентрации атмосферного углекислого газа заметно сглаживаются по сравнению с областями вдали от экватора. Тем не менее, в районе обсерватории амплитуда сезонной осцилляции концентрации молекул углекислого газа в атмосфере более чем в два раза превышает годовое изменение этой концентрации.

Как следует из представленных измерений, проведенных в обсерватории Мауна Лоа, начиная с 1959 г., концентрация молекул CO_2 в атмосфере изменилась с $316ppm$ в 1959г. до $420ppm$ в 2023 году, а за время с начала индустриального периода концентрация атмосферного углекислого газа увеличилась примерно в полтора раза. Если исключить сезонные флуктуации, скорость изменения концентрации молекул углекислого газа в

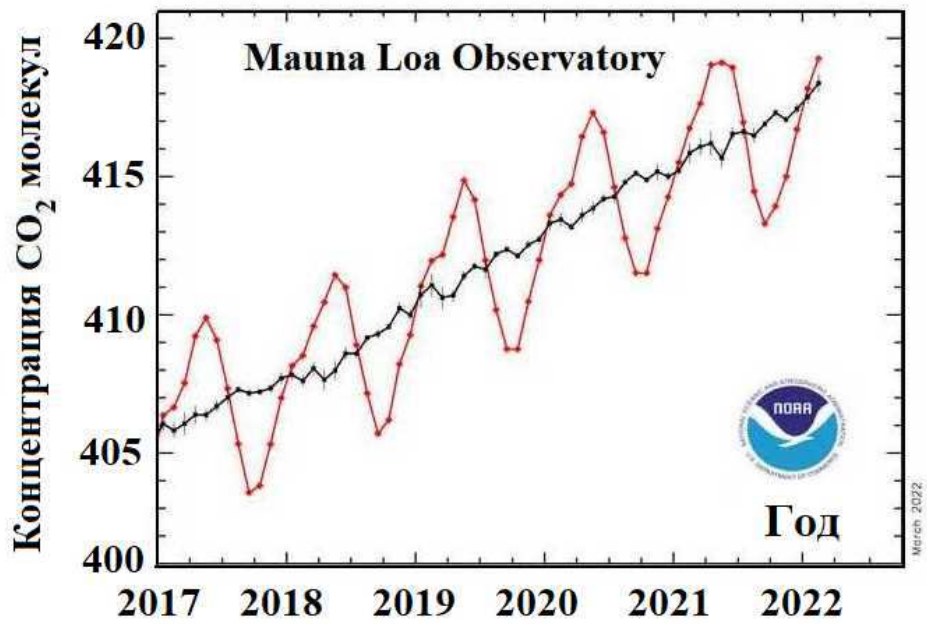
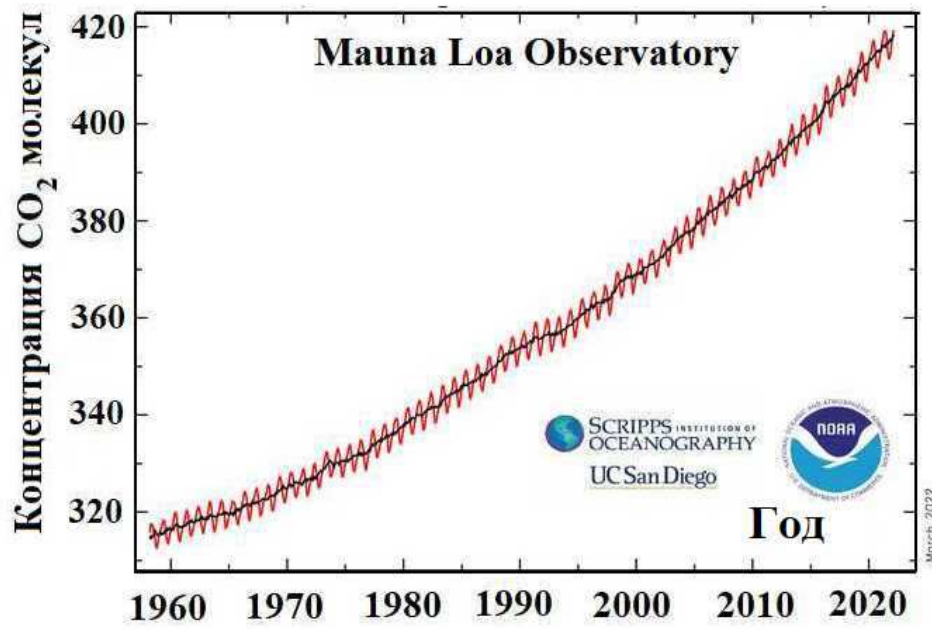


Figure 14: Концентрации углекислого газа в атмосфере Земли согласно мониторингу, выполняемому в обсерватории Мауна Лоа, с усреднением за месяц и за год как в течение всего времени существования обсерватории (а) и за последние пять лет (б) [102].

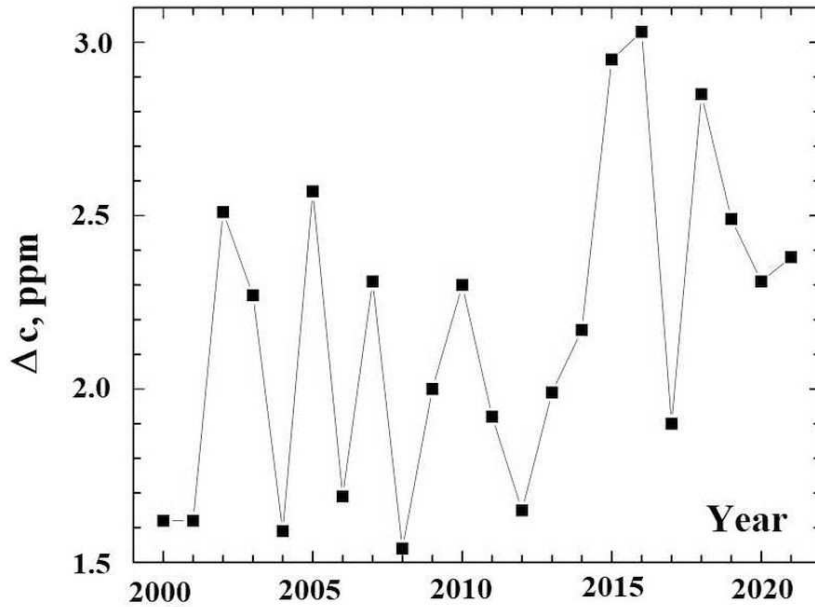


Figure 15: Годовой рост концентрации молекул углекислого газа в атмосфере в настоящее время [103].

атмосфере, как следует из рис.15, составляет в среднем в настоящее время

$$\frac{dc(CO_2)}{dt} = (2.4 \pm 0.4) ppm/yr \quad (3.2)$$

Скорость роста концентрации углекислого газа в атмосфере меняется со временем, начиная примерно от $0.7 ppm$ в год в 1959 г. При современной скорости роста концентрации углекислого газа в атмосфере время удвоения массы углерода в атмосфере составляет примерно 120 лет. Скорость роста концентрации атмосферного углекислого газа в соответствии с формулой (3.2) удобно представить в виде

$$\frac{d \ln c(CO_2)}{dt} = (6.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-3} yr^{-1} \quad (3.3)$$

Рост концентрации атмосферного углекислого газа можно связать с хозяйственной деятельностью человека, в основном, с добычей и сжиганием горючих полезных ископаемых. Действительно, согласно данным глобального углеродного проекта [93] в течение индустриального периода с 1750 года по 2018 год масса углерода, содержащегося в добытых горючих ископаемых и включенная в равновесие между атмосферой и поверхностью Земли, равнялась $(440 \pm 20) GtC$ [92].

Поскольку в доиндустриальный период концентрация молекул углекислого газа составляла около $280 ppm$ [104, 105]. Отсюда следует примерно $140 ppm$ для изменения концентрация молекул углекислого газа или около $300 GtC$. Если принять, что это изменение определяется выбросами углекислого газа в результате сжигания горючих ископаемых, получим отсюда долю углерода примерно 68%, который остается в атмосфере. Сравнивая эту величину с вероятностью инжестрированного в атмосферу углерода остаться

в ней, приведенного на рис.12, находим, что разность этих величин превышает их погрешности. Это означает, что для наблюдаемого роста концентрации углекислого газа в атмосфере необходимы дополнительные источники его генерации, интенсивность которых ниже, чем обеспечивает сжигание горючих ископаемых.

Действительно, как следует из рис.12, вероятность остаться в атмосфере для молекулы углекислого газа, инжектированной в атмосферу, составляет $(45 \pm 3)\%$. Согласно глобальному углеродных проектов [92] масса углерода, вовлеченного в 2018 году в углеродное равновесие между атмосферой и биосферой, составляло $10GTC$. Это соответствует массе $4.5GTC$, попадающей в атмосферу, или увеличению концентрации углекислого газа в атмосфере на $2.1ppm$, что дает

$$\frac{d \ln c(CO_2)}{dt} = 5 \cdot 10^{-3} yr^{-1} \quad (3.4)$$

Хотя точность представленных значений составляет примерно 20% и величин в формулах (3.3) и (3.4) с учетом указанных погрешностей можно считать идентичными, возможен дополнительный канал роста концентрации молекул углекислого газа в атмосфере.

Рассмотрим дополнительный канал роста концентрации молекул углекислого газа в атмосфере в соответствии с концепцией Паулинга [107, 106], согласно которой причиной роста концентрации углекислого газа является рост температуры океанов, через которую поддерживается равновесие между атмосферным и растворенном в океане углекислым газом [107, 106]. При этом масса растворенного в океанах углекислого газа значительно больше, чем в атмосфере. В этом случае зависимость концентрации c молекул CO_2 в атмосфере от глобальной температуры T , которая считается равной глобальной температуре, определяется формулой Больцмана

$$c \sim \exp\left(-\frac{\Delta H}{T}\right) \quad (3.5)$$

где ΔH - энтальпия растворения молекулы углекислого газа в океанской воде, T - глобальная температура, выраженная в единицах энергии. Это дает следующую связь между изменением концентрации атмосферного углекислого газа и изменением глобальной температуры

$$\frac{d \ln c}{dT} = \left(-\frac{\Delta H}{T^2}\right) \quad (3.6)$$

Отсюда получим для скорости изменения концентрации углекислого газа в атмосфере c в результате изменения температуры океанов T , которую считаем равной скорости изменения глобальной температуры

$$\frac{d \ln c}{dt} = \frac{dT}{dt} \left(-\frac{\Delta H}{T^2}\right) \quad (3.7)$$

Для определения энтальпии растворения молекулы углекислого газа в океанской воде этой величины в чистой океанской воде, которая наблюдалась десятки тысяч лет назад, воспользуемся данными рис.9, согласно которому концентрация атмосферного углекислого газа коррелирует с температурой атмосферы, причем в продолжении одного ледникового периода концентрация молекул углекислого газа в атмосфере изменялась в пределах от 180 ppm до 280 ppm, тогда как максимальное изменение температуры в этот период составило $\Delta T = 12^\circ C$. В этом случае формула (3.5) дает $\Delta H = 0.26$ эВ.

Далее, за время измерения концентрации углекислого газа обсерваторией Мауна Лоа с 1959 года концентрация углекислого газа в атмосфере изменилась с 316 ppm

до 417 ppm, а глобальная температура изменилась за это время на 0.6 К. При этих условиях формула (3.6) с учетом формулы (2.17) дает для скорости роста концентрации углекислого газа в атмосфере за счет увеличения глобальной температуры

$$\frac{d \ln c}{dt} = 4 \cdot 10^{-4} \text{yr}^{-1} \quad (3.8)$$

Эта величина на порядок величины меньше наблюдаемой скорости роста для концентрации углекислого газа в атмосфере, однако она может объяснить разницу в формулах (3.3) и (3.4). Таким образом, именно хозяйственная деятельность человека, связанная с добычей и использованием горючих полезных ископаемых, приводит к росту содержания углекислого газа в атмосфере, а происходящие в атмосфере и на поверхности Земли изменения могут стать причиной более слабых изменений в силу существующих связей между параметрами атмосферы и поверхности Земли.

3.3 Процесс фотосинтеза на Земле

Отметим, что современная атмосфера и рассматриваемый характер равновесия в атмосфере установился примерно 2.3 млрд.лет назад из 4.6 млрд. лет существования Земли. Появление кислорода в атмосфере Земли под действием фотосинтеза на поверхности Земли вызвало также создание озонового слоя в стратосфере. В результате ультрафиолетовое излучение Солнца, которое неблагоприятно действует на живой мир, не достигает поверхности Земли. Это создает подходящие условия для растений и живых организмов, которые могли бы разрушаться под действием ультрафиолетового излучения. Движущей силой для развития растений и живых организмов является процесс фотосинтеза, который далее будет рассмотрен.

Мы определяем биосферу как находящийся на поверхности Земли органический продукт, который участвует в процессе фотосинтеза. На суше основной вклад в биосферу вносят леса и травянистые растения, включая сельскохозяйственные культуры, в океанах - фитопланктон и водоросли. Живые организмы также относятся к биосфере, но поскольку их вклад в общую массу биосферы мал, при анализе энергетических процессов фотосинтеза ими можно пренебречь. Тем не менее, биосфера является питательной средой для живых организмов. Мы называем биомассой активный углерод, который образовался в результате фотосинтеза, находится в связанном состоянии на поверхности Земли и возвращается в атмосферу в виде углекислого газа в результате окисления содержащего его органического соединения. За времена $t \gg \tau$, где $\tau = 4$ года [101] - время нахождения молекулы углекислого газа в атмосфере, устанавливается равновесие между углекислым газом атмосферы и углеродом биосферы.

Как следует из углеродного равновесия, представленного на рис.11, фотосинтез играет в нем принципиальную роль. Именно благодаря фотосинтезу энергетика процессов на поверхности Земли отличается от происходящей на других планетах. В результате этого процесса углекислый газ атмосферы превращается в твердый углерод, входящий в основном, в состав растений. Из условий, при которых протекает процесс фотосинтеза, следует, что для осуществления этого процесса природа решает сложную задачу.

Во-первых, энергия связи атомов в молекуле углекислого газа значительно превышает энергию поглощаемого фотона. Поэтому для проведения этого процесса требуется накопитель энергии, который выполняет роль катализатора, поглощая фотоны и суммируя их энергию. Далее эта энергия передается для проведения химической реакции с участием молекулы углекислого газа. Во-вторых, образованный связанный углерод необходимо вывести из зона разрушения молекулы углекислого газа. Образованные органические молекулы выводятся из зоны их генерации протоком воды и далее являются

структурными элементами при создании разнообразных органических соединений или же питательной средой для самого растения [108, 109, 110, 111, 112].

Таким образом, фотосинтез - сложный химический процесс, в результате которого углекислый газ превращается в различные органические соединения. При описании этого процесса будем опираться на физические модели, что ведет к потере принципиальных биохимических и биологических особенностей этого процесса. Тем не менее, это позволяет понять природу этого процесса. Основным инструментом при переработке молекул углекислого газа в связанный углерод при оптимальных условиях протекания процесса фотосинтеза является молекула rubisco (ribulose biphosphate carboxylase) [113, 114, 115]), которая граничит с катализатором, поглощающим фотоны и суммирующим их энергию, которая затем передается для проведения химической реакции. Молекула rubisco являются матрицей, на которой штампуются отростки органических молекул, которые переносятся потоком воды в область, где из этих отростков собираются различные органические молекулы.

Химическая реакция фотосинтеза, в которой энергия солнечного излучения используется для переработки углекислого газа в органическую молекулу, происходит внутри клетки, окруженной оболочкой. Роль катализатора в этом процессе играет хлорофилл или пластид [116, 117], который присутствует в клетке в виде пачки пластинок микронного размера. При поглощении фотона происходит разведение положительного и отрицательного зарядов в катализаторе, и далее эта электрическая энергия передается участвующим в химическом процессе компонент.

Молекула rubisco имеет типичную структуры молекулы белка или фермента [113, 118]. Структурной единицей этих молекул являются аминокислоты, которые собираются в линию с боковыми отростками. Образованная линия сворачиваются в кольца, а кольца упаковываются в клубок. Молекула rubisco содержит внутри клубка 16 колец (8 больших и 8 малых), а полная масса этой молекулы составляет $5.5 \cdot 10^4$ а.е.м. [113, 118]. Тем самым молекула rubisco содержит примерно 3000 атомов углерода. Внутри клетки молекула rubisco граничит с пачкой пластинок пластида, и как единое целое они реализуют процесс фотосинтеза.

Будем ориентироваться на процессе фотосинтеза в листе растения, поскольку именно таким образом перерабатывается основная часть солнечной энергии при фотосинтезе. Тогда становится прозрачной другая проблема фотосинтеза, связанная с удалением образуемой органической молекулы из области ее образования. При этом новые органические молекулы производятся стандартным образом на матрице, представляющую собой часть белковой молекулы. Эти молекулы образуются с участием молекул углекислого газа в виде небольших отростков аминокислот и далее удаляются в жидком потоке, протекающим около матрицы.

Отметим, что представленное физическое описание не позволяет описать уникальность молекулы rubisco для процесса фотосинтеза, поскольку именно эта молекула обеспечивает высокую эффективность этого процесса. Роль разных структурных единиц в этих процессах при существующей конфигурации молекулы и последовательности структурных единиц может быть объяснено в рамках биохимии.

В соответствии с характером протекания процесса фотосинтеза растения, в которых происходит усваивание углекислого газа под действием солнечного излучения и переход углерода в состав органического вещества, можно разделить растения две группы, C_3 и C_4 [119] в соответствии с характером участия молекул CO_2 в процессе фотосинтеза. Именно, для группы растений C_3 , которые включают пшеницу, рис и фасоль, молекула CO_2 захватывается молекулой rubisco и участвует в фотосинтезе, находясь внутри клетки. К группе растений C_4 , в которых фотосинтез происходит с участием молекулы

CO_2 непосредственно из газовой фазы, относятся растения кукурузы, сахарного тростника и сорго [120].

Молекулы $rubisco$ являются основным ферментом для процесса фотосинтеза, то есть эти молекулы ускоряют химические реакции в растительных системах на первой стадии процесса фотосинтеза. Они обеспечивают наиболее высокую эффективность процесса фотосинтеза. При оптимальных условиях в листьях растений C_3 они обеспечивают содержание примерно 50% [121] растворенных пептидов (белка) и (20 – 30)% [122, 123, 124] активного азота, а в листьях растений C_4 они составляют 30% [125] растворенного белка и (5 – 9)% [126] активного азота.

Рассмотренный выше процесс фотосинтеза протекает на суше, в основном, в листьях растений. При протекании этого процесса в океане аналогом листьям растений является фитопланктон [131, 134]. Но эффективность процесса фотосинтеза на суше выше, чем в океанах, где процесс фотосинтеза протекает с участием растворенными в воде молекулами CO_2 . При растворении CO_2 молекул происходит образование связанных состояний молекул CO_2 с молекулами воды. Образующийся при этом раствор представляет собой слабый электролит, содержащий положительные ионы H_3O^+ и отрицательные ионы HCO_3^- .

Реально растворенные в океанской воде молекулы CO_2 находятся в разных химических состояниях. А именно, растворенный неорганический углерод имеет структуру HCO_3 в 90% случаев, растворенный неорганический углерод имеет структуру CO_3 в 9% случаев, и только 1% этого вещества представляет собой растворенную двуокись углерода CO_2 [135]. Следовательно, именно эти соединения впоследствии участвуют в процессе фотосинтеза вместо молекул CO_2 , а основными продуктами этого процесса в океанах являются водоросли и фитопланктон. Кроме того, растворенный неорганический углерод может переходить в отложения; и типичное время этого перехода составляет приблизительно 1700 лет [136], т.е. этот процесс является слабым.

Эффективность процесса фотосинтеза зависит как от группы растений, так и условий, при которых реализуется это процесс. При этом молекулы, участвующие в процессе репродукции органических молекул, наряду с атомами углерода, водорода и кислорода содержат атомы других элементов, таких как атомы хлора, натрия, калия, фосфора, железа. Поэтому эффективность процесса фотосинтеза существенно увеличивается при использовании удобрений.

Рассматривая процесс фотосинтеза с физической точки зрения, мы упрощаем его описание и игнорируем разнообразие химических продуктов, которые образуются как на промежуточных, так и на конечных стадиях этого процесса. Рассмотрим как модельную простейшую схему процесса фотосинтеза как химического процесса, когда конечным продуктом является глюкоза, т.е. процесс фотосинтеза моделируется как



В этой схеме мы суммируем несколько стадий производства глюкозы под действием света, а $n\hbar\omega$ - это энергия фотонов, которая необходима для образования одной молекулы глюкозы. Кроме того, в этом процессе образуется кислород, то есть процесс фотосинтеза создает атмосферу, одной из основных компонент которой является кислород.

Основываясь на энтальпию глюкозы $\Delta H = 468 \text{ кДж/моль} = 39 \text{ кДж/г}$ [127] в качестве энергетического параметра перехода от атмосферного CO_2 к твердому углероду в продуктах фотосинтеза, примем глюкозу в качестве конечного продукта процесса фотосинтеза в рассматриваемой модели. Если ориентироваться на излучение желтого цвета с энергией фотона $\hbar\omega = 2.1\text{eV} \approx 200 \text{ кДж/моль}$, то для образования молекулы глюкозы требуется энергия более двух фотонов. В рамках этой модели наряду с

образованием глюкозы на этой стадии процесса его продуктом является кислород, а сама молекула глюкозы $C_6H_{12}O_6$ может находиться в разных формах [128, 129].

Далее, поскольку суммарная скорость образования твердого углерода в результате процесса фотосинтеза по всему земному шару составляет примерно $J_C = 220GtC/год$, ориентируясь на образование глюкозы можно получить мощность глобального процесса фотосинтеза как $P = J_C \cdot \Delta H = 2 \cdot 10^{14}$ Вт, что на порядок величины превышает мировое производство в процессе хозяйственной деятельности человека. Сравнивая это значение с суммарной мощностью солнечного излучения $1.7 \cdot 10^{17}$ Вт, которое проникает в атмосферу Земли, получим, что эффективность естественного использования солнечного излучения для фотосинтеза на Земле составляет примерно 0,1%.

Отметим, что естественная эффективность процесса фотосинтеза является малой величиной, что свидетельствует о том, что условия протекания данного процесса далеки от оптимальных. Действительно, максимальная теоретическая эффективность этого процесса составляет 11% [130]. Более того, максимальная эффективность процесса фотосинтеза для растений группы C_3 равна 3.5% [130], тогда как для растений группы C_4 максимальная составляет 4.2% [130]. Отсюда можно заключить, что малость эффективности естественного процесса фотосинтеза на Земле можно связать с малой концентрации молекул углекислого газа в атмосфере при существующих условиях.

Наряду с этим определим эффективность использования молекул CO_2 для процесса фотосинтеза ξ как отношение

$$\xi = \frac{\Lambda^2}{D_L \tau} \quad (3.10)$$

Здесь Λ^2/D_L - время столкновения молекулы углекислого газа с поверхностью Земли, где $\Lambda = 10$ км, $D_L = 500$ м²/с. Считая, что молекулы CO_2 гибнут на поверхности Земли в результате процесса фотосинтеза, получим, что эффективность процесса фотосинтеза относительно использования молекул CO_2 составляет примерно 10%.

Анализ процессов фотосинтеза позволяет оценить концентрацию атмосферных молекул десятки миллионов лет назад. В этом случае время, соответствующее данному образцу, определяется из анализа изотопов бора, а концентрация молекул CO_2 в атмосфере, как и pH-фактор морской воды в то время, которое следует из анализа древних планктонных раковин. В частности, согласно [132] такой анализ дает, что концентрация атмосферного углекислого газа превышала 2000 ppm 60 млн.лет назад, а далее она уменьшалась. Другой пример относится к анализу остатков листьев четырех типов растений семейства гинкго [133]. Показано, что, начиная от 300 млн.лет и позже концентрация атмосферного углекислого газа как функция времени вела себя нерегулярно, но в этот период она в основном превышала 1000 ppm. В дополнение к этому на рис.11 приводится эволюция концентрации атмосферного углекислого газа в данный период времени согласно [127].

Таким образом, процесс фотосинтеза на поверхности Земли, где реализуются оптимальные условия для этого процесса, ответственного за протекание жизни на Земле и обеспечивает живые организмы на поверхности Земли продуктами. Природа выбирает оптимальный путь для этого процесса через молекулу rubisco, которая находится в контакте с пачкой пластидов (хлорофилла) микронного размера. Эта комбинация молекулы rubisco в контакте с катализатором в виде пластинок хлорофилла позволяет перерабатывать молекулы углекислого газа в органическое вещество с наибольшим коэффициентом преобразования солнечной энергии. Увеличение концентрации молекул углекислого газа в окружающем воздухе приведет к увеличению коэффициента преобразования солнечной энергии в энергию связанного углерода.

3.4 Углерод в жизнедеятельности человека

Проанализируем действие атмосферного углекислого газа на здоровье человека и мировой урожай. В процессе дыхания выдыхаемый воздух обычного человека в среднем содержит 5% углекислого газа. Во время полного покоя объем выдыхаемого воздуха для обычного человека составляет приблизительно 0,5 л на вдох при скорости дыхания 12 раз в минуту [137]. В результате скорость вентиляции легких составляет 6 л воздуха в минуту, а скорость выработки углекислого газа одним человеком оценивается в 0,3 л/мин при атмосферном давлении.

Сделаем простую оценку, позволяющую оценить чувствительность человека к концентрации углекислого газа в атмосфере. Пусть человек находится в комнате площадью 10 м^2 и высотой 3 м. Воздух этой комнаты содержит в среднем около 10 литров CO_2 при атмосферном давлении. Как видно, присутствие одного человека в этом помещении приводит к увеличению количества углекислого газа в 1,5 раза через 20 мин, если помещение не проветривается.

Очевидно, в реальной жизни человек может не заметить указанного изменения количества углекислого газа в помещении. Этот пример показывает, что произошедшее за период индустриализации изменение концентрации углекислого газа в атмосфере не только не влияет на здоровье человека, но он может даже не заметить этого. Из этого можно сделать вывод, что наблюдаемое изменение концентрации углекислого газа в атмосфере в просматриваемое время не представляет опасности для человека.

Рассмотренные выше процессы позволяют составить физическую картину для углеродного равновесия между атмосферой и поверхностью Земли. Это позволяет глубже понять влияние этих процессов на условия жизни человека. Ниже мы рассмотрим процессы с участием углерода как обеспечивающие население планеты продуктами питания. Одной из целей этого анализа является оценить емкость планеты относительно производства сельскохозяйственных продуктов питания. Ясно, что возможности Земли как источника производства продовольствия ограничены, и одной из наших задач является оценить, какое население способна прокормить Земля.

В частности, в конце 18 века Мальтус [138, 139] Проводя серьезный анализ на основе статистических данных для ряда европейских стран, он установил, что население растет экспоненциально с течением времени, в то время как собранный урожай растет линейно. Следовательно, на определенном этапе развития человечества произведенное продовольствие станет недостаточным, чтобы прокормить население. Это может привести к катастрофе.

Таблица 3.

Суммарные урожаи основных зерновых культур на всей Земле в миллионах тонн [?, 141].

Год	Урожай 1961 г.	Урожай 2022 г.
Кукуруза	205	1251
Рис	285	5031
Пшеница	222	784
Ячмень	72	150
Сумма	784	2688

Однако, во второй половине 20 века эти зависимости стали нарушаться, главным образом, в связи с так называемой зеленой революцией, которая привела к существенному росту урожаев, и данная проблема потеряла свою остроту. Это в большой степени

связано с использованием удобрений, разных для разных культур. В табл.3 приводятся мировые урожаи основных зерновых культур в начале зеленой революции и в настоящее время.

Как следует из данных табл.3, за прошедшие 60 лет суммарный урожай сельскохозяйственных продуктов вырос в 3.4 раза, а население земного шара с 1961 года по 2022 год выросло с $3.21 \cdot 10^9$ до $7.98 \cdot 10^9$ человек [142], т.е. в 2.4 раза. Как видно, рост продуктов питания в указанный период времени происходил эффективнее, чем рост населения, т.е. в ближайшее время недостаток пищи не угрожает населению планеты, и масса продуктов на душу населения за это время выросла. Однако, часть этого роста связана с увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере, которая за указанное время составила 1.4 раза. Если считать рост массы урожайных культур априори прочих равных условиях пропорционален росту концентрации углекислого газа в атмосфере и исключить из роста урожая фактор, связанный с ростом концентрации углекислого газа, получим, что связанное с зеленой революцией увеличение урожая за указанное время составит 2.4 раза, т.е. зеленая революция скомпенсировала рост населения. К тому же рост урожая в последнее десятилетие остановился.

Рассмотрим возможности нашей планеты для обеспечения населения продуктами питания. Будем исходить из энергетических потребностей человека в соответствии с данными ООН (UN Food and Agriculture Organization), согласно которым среднее ежедневное потребление пищи, приходящееся на одного человека, находится в интервале между 2500 и 3500 ккал/сутки [143], а внутри этого интервала зависит от конкретной страны.

Будем ориентироваться на среднюю величину 3000 ккал/сутки, что в случае процесса (3.9) соответствует примерно 320 г. углерода в составе глюкозы. Далее, мощность усвоения пищи 3000 ккал/сутки соответствует мощности 140 Вт, и поскольку глобальная мощность фотосинтеза составляет $2 \cdot 10^{14}$ Вт, фотосинтез в принципе может обеспечить энергией порядка $1 \cdot 10^{12}$ человек, что на два порядка величины превышает современное население земного шара. Ясно, что эта оценка завышена, поскольку наряду с растительной пищей человек потребляет животную пищу, которая энергетически в несколько раз дороже растительной. Эта оценка показывает, что в настоящее время фотосинтез используется для производства продуктов питания неэффективно.

3.5 Углекислый газ в парниковом эффекте атмосферы Земли

Суть парникового эффекта состоит в том, что наряду с солнечным излучением в видимой области спектра, попадающим на поверхность Земли и приводящим к ее нагреванию, определенный вклад в тепловой баланс Земли вносит излучение атмосферы в инфракрасной области спектра. Более того, мощность поглощенного Землей солнечного излучения вдвое меньше мощности излучения, приходящей на ее поверхность со стороны атмосферы (см. рис.4). Соответственно, изменение концентрации парниковых газов, которые создают это излучение, приводит к изменению теплового баланса Земли, а следовательно, и ее температуры.

Особенность излучения молекул атмосферы состоит в том, что спектр излучения, создаваемого молекулами, состоит из отдельных уширенных спектральных линий, причем ширина этих спектральных линий меньше, чем разность частот для отдельных линий. Поэтому поток излучения атмосферы в инфракрасной области спектра J_ω как функция частоты похож на частотный спектр, включающий сотни переходов, и интенсивность в максимуме определенной спектральной линии, по крайней мере, на порядок выше, чем в минимуме между соседними спектральными линиями. Распространенные климатологические модели не учитывают этот характер спектра излучения атмосферы, и поэтому далее мы не

будем их рассматривать. Соответственно, основу расчетов использующих основе физических подходов составляет модель "линия-за-линией" ("line-by-line") [144, 145], в рамках которой вычисления производятся на каждой частоте отдельно, что позволяет учесть особенности спектра эмиссии.

Другая особенность процесса эмиссии атмосферного газа связана с термодинамическим равновесием между состояниями молекул, а также между полем излучения и молекулами. Это равновесие определяется относительно высоким давлением воздуха в атмосфере и большими излучательными временами переходов для возбужденных колебательных и вращательных состояний молекул. Именно, возбужденные молекулы, образуемые при поглощении фотонов, распадаются далее в результате столкновений с молекулами воздуха, тогда как фотоны, составляющие поток излучения атмосферы, возникают в результате излучения возбужденных молекул, образуемых при столкновениях. Термодинамическое равновесие существенно упрощает характер рассматриваемого процесса, поскольку температура излучения, испускаемого из заданной области пространства, равно ее локальной температуре.

Основными парниковыми компонентами атмосферы, которые определяют излучение реальной атмосферы, являются молекулы воды и углекислого газа, а также микрокапли воды, которые образуют облака. Поскольку радиус Земли на три порядка превышает толщину слоя атмосферы, ответственного за ее эмиссию, то излучающий слой можно рассматривать как плоский слабо неоднородный (по температуре) слой воздуха. Слабая неоднородность позволяет привести поток излучения слабо неоднородного слоя газа к случаю слоя с постоянной температурой путем введения эффективной температуры T_ω , которая зависит от частоты излучения ω . В частности, в случае большой оптической толщины излучательная температура является температурой воздуха на высоте h_ω , для которой оптическая толщина равна [146, 147]

$$u_\omega(h_\omega) = \int_0^{h_\omega} k_\omega(h') dh' = \frac{2}{3}, \quad (3.11)$$

где k_ω - коэффициент поглощения атмосферного воздуха на данной частоте и высоте слоя.

Далее мы используем модель, в рамках которой облака присутствуют в атмосфере, начиная с определенной высоты h_{cl} , причем оптическая толщина резко возрастает с высотой, так что облака излучают как абсолютно черное тело с температурой T_{cl} , отвечающей указанной высоте. В результате в рамках рассматриваемой модели поток излучения атмосферы на поверхность Земли J_ω на частоте ω дается выражением [56, 155]

$$J_\downarrow = \int J_\omega d\omega = \int \{I_\omega(T_\omega)g(u_\omega) + I_\omega(T_{cl})[1 - g(u_\omega)]\} d\omega, \quad (3.12)$$

Здесь парциальный излучательный поток $I_\omega(T)$ абсолютно черного тела, температура которого равна T , дается формулой Планка [148, 149]

$$I_\omega(T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2c^2 [\exp(\frac{\hbar\omega}{T}) - 1]}, \quad (3.13)$$

а фактор непрозрачности слоя газа $g(u_\omega)$, который представляет собой отношение испускаемого слоем потока излучения на данной частоте ω к потоку излучения абсолютно черного тела I_ω зависит от оптической толщины слоя u_ω в области оптических толщин $u_\omega \sim 1$ фактор непрозрачности аппроксимируется зависимостью [150, 56]

$$g(u_\omega) = \exp(-1.6u_\omega), \quad (3.14)$$

Приведенные формулы дают алгоритм для определения парциального потока излучения атмосферы J_ω на поверхность Земли, а также суммарного потока излучения, испускаемого атмосферой в сторону Земли [56, 155]

$$J_\downarrow = \int J_\omega d\omega = \int \{I_\omega(T_\omega)g(u_\omega) + I_\omega(T_{cl})[1 - g(u_\omega)]\}d\omega, \quad (3.15)$$

Для использования представленного алгоритма [56, 155] вычисления потока излучения атмосферы в сторону Земли необходимы спектральные свойства атмосферы. При проведении этих вычислений будем опираться на физические законы, в частности, на закон Кирхгофа [154], согласно которому элементарный излучатель является одновременно и поглотителем. Это проявляется в принципе детального равновесия для излучательных процессов, которые связывают параметры процессов эмиссии и поглощения. По этой причине в формуле (??) используется коэффициент поглощения, т.е. параметр процесса поглощения для анализа детально противоположного процесса - эмиссии атмосферного слоя.

Главными парниковыми компонентами атмосферы, которые определяют излучение реальной атмосферы, являются молекулы воды и углекислого газа, а также микрокапли воды, которые образуют облака. Как видно, в вычисления потоков излучения должны быть заложены распределения парниковых компонент по высоте и их излучательные спектральные параметры. параметры элементарного излучательного акта для разных компонент, включая парниковые компоненты атмосферы, содержатся в банке данных HITRAN [151, 152, 153], важность существования которого трудно переоценить. Распределения плотности молекул по высоте можно измерить. В частности, усредненные параметры этих распределений могут быть получены в рамках модели стандартной атмосферы [17]. Однако, проблему в этом отношении представляют облака.

Действительно, облака обычно состоят из микрокапель воды среднего размера (6-10) мкм. Они являются эффективными излучателями в инфракрасной области спектра. Однако, облака образуются случайным образом, относительно быстро перемещаются в атмосфере и имеют ограниченное время жизни. Эту трудность можно частично преодолеть в случае стандартной атмосферы, учитывая, что поток излучения атмосферы, создаваемый молекулярными парниковыми компонентами, можно вычислить, а полный поток излучения (3.15) измеряется и является важным элементом энергетического баланса Земли и атмосферы (рис.4). Разность между этими величинами позволяет определить средний вклад облаков в излучение атмосферы. Это дает один параметр, связанный с облаками, которым в рамках модели (3.12) является граничная температура облаков T_{cl} .

Для демонстрации реализации описанной модели на рис.16 и рис.17 далее приводятся результаты расчета некоторых параметров излучения. Спектр излучения атмосферы, имеющий место в инфракрасной области спектра, состоит из сотен пиков в результате вращательных и колебательно-вращательных переходов, причем оптическая толщина атмосферного воздуха в центрах переходов и в промежутке между соседними пиками, отличается в десятки и сотни раз. Приведенные далее спектральные результаты получены на основании компьютерной программы, созданной моим коллегой Д.А.Жиляевым. На рис.16 приведена парциальная излучательная температура стандартной атмосферного воздуха, находящегося между поверхностью Земли и облаками. При этом используется значение высоты для границы облаков $h_{cl} = 4.6$ км, отвечающих среднему потоку энергии и соответствию с рис.4 и табл.2.

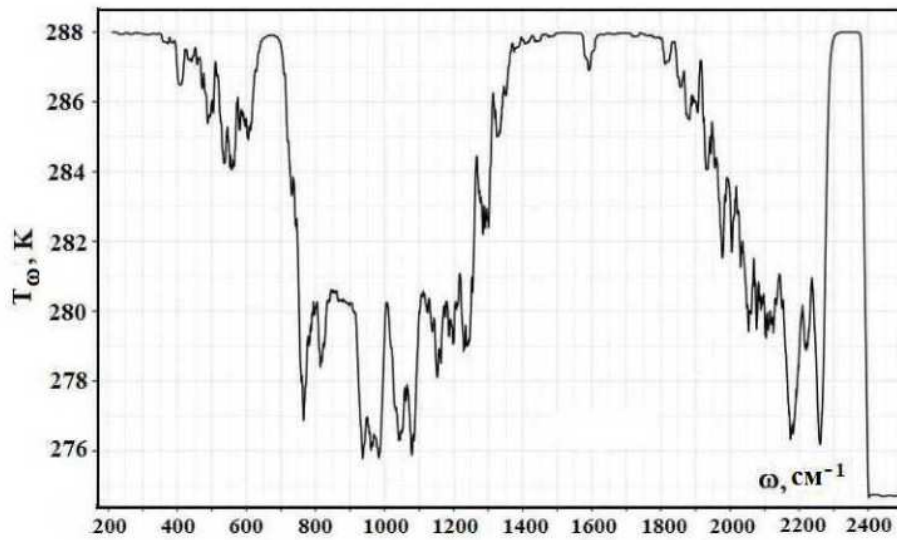
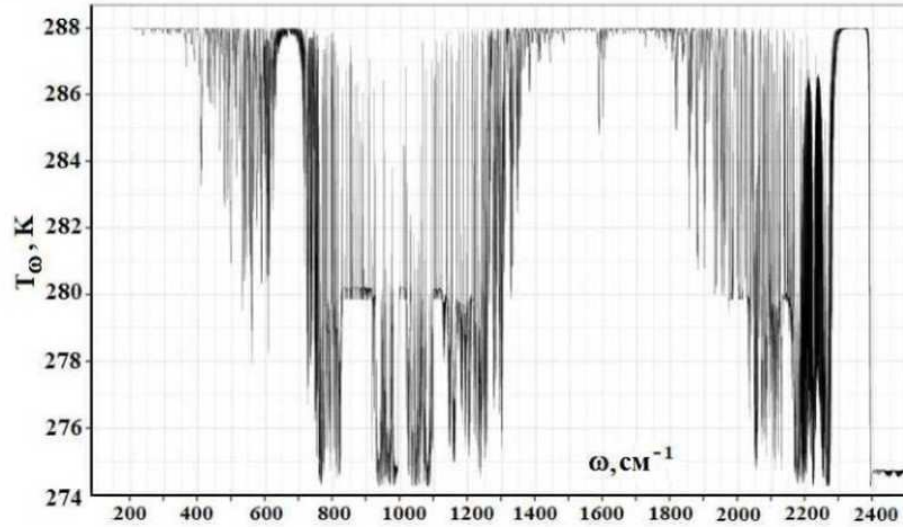


Figure 16: Излучательная температура T_ω для оптически активных молекул стандартной атмосферы (а), а также эта величина, усредненная по частотам с шириной усреднения 20см^{-1} , включающей несколько спектральных линий (б) [155].

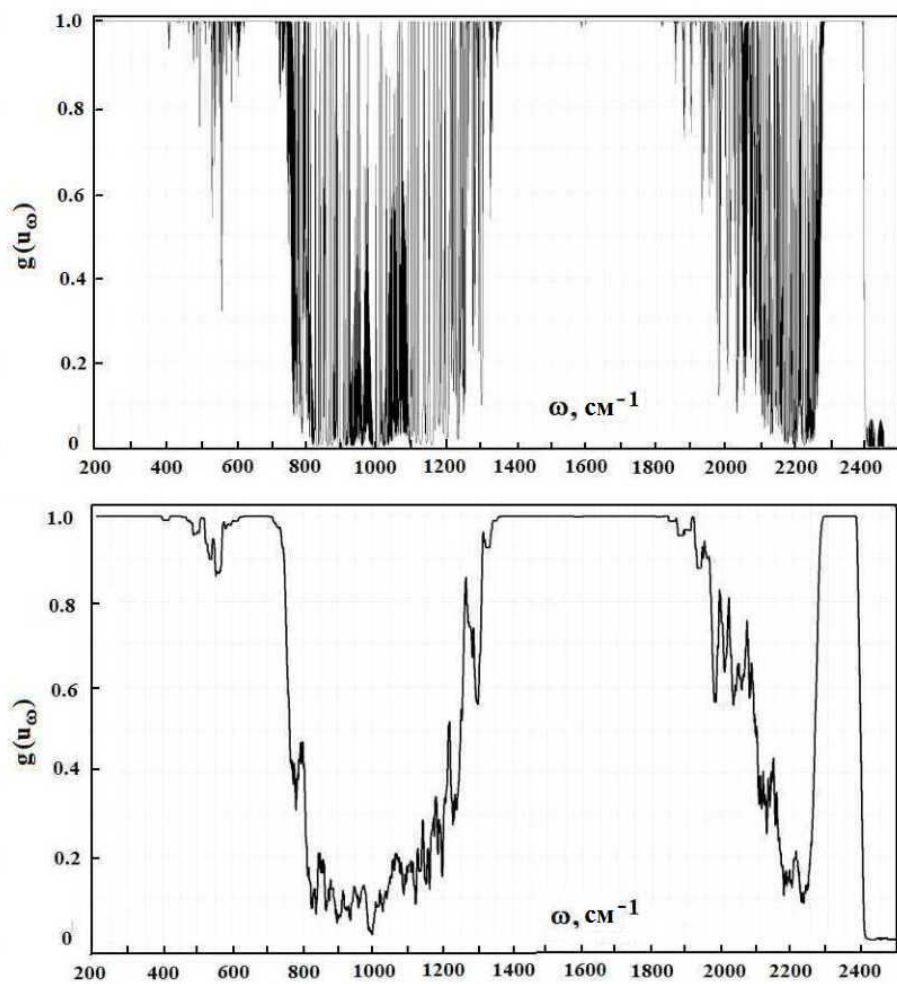


Figure 17: Фактор непрозрачности $g(u_\omega)$ за счет оптически активных молекул стандартной атмосферы (а), а также эта величина, усредненная по частотам с шириной усреднения 20cm^{-1} , включающей несколько спектральных линий (б) [155].

Другим параметром излучающей атмосферы является фактор непрозрачности, зависимость которого от частоты излучения для стандартной атмосферы представлена на рис.17. Отсюда, в частности, следует существование окна прозрачности в области частот между 800 см^{-1} и 1200 см^{-1} . Здесь в среднем 85% потока излучения, испускаемого поверхностью Земли, не поглощается атмосферным воздухом, находящимся в щели между поверхностью Земли и облаками. Разработанный алгоритм и компьютерная программа позволяют вычислить также интегральные характеристики излучения атмосферы. В табл.4 приводятся потоки излучения, создаваемые соответствующими парниковыми компонентами атмосферы.

Таблица 4.

Потоки излучения, которые создаются указанными оптически активными компонентами атмосферы и поглощаются поверхностью Земли, а также вклад этих компонент в поток излучения, формируемый атмосферой [56, ?].

Компонента	Концентрация	Поток, Вт/м ²	Доля, %
H_2O -молекулы	1.7%	214	64
Облака	-	61	18
CO_2 -молекулы	416 ppm *)	56	17
CH_4 -молекулы	1.9 ppm	1.6	0.5
N_2O -молекулы	0.25 ppm	1.2	0.4
O_3 -молекулы	25 ppb *)	0.5	0.1

*) 1 ppm означает концентрацию, равную одной молекулы данной компоненты на миллион молекул воздуха, а 1 ppb соответствует одной молекуле данной компоненты на миллиард молекул воздуха.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в силу резонансного характера теплового излучения атмосферы, которое складывается из определенных излучательных переходов в молекулах. Поэтому для расчета параметров излучения атмосферы необходимо использовать численные методы, и аналитические аппроксимации этих параметров, используемых в некоторых климатических программах, противоречит природе излучательных переходов.

Изменение потоков излучения, обусловленное изменением концентрации одной из парниковых компонентов атмосферы, в соответствии с законом Кирхгофа разное для газа, содержащего одну или несколько парниковых компонент [156, 157]. Действительно, согласно закону Кирхгофа, излучатель одновременно является и поглотителем. В случае однокомпонентного слабо неравновесного излучающего газа изменение концентрации излучающей компоненты ведет к изменению эффективной температуры излучения, что вызывает изменение потока излучения слоя газа, тогда как в газе с несколькими парниковыми компонентами рост потока излучения за счет компоненты с изменяемой концентрацией ведет к уменьшению потока излучения, создаваемого другими компонентами.

Рассмотрим эту проблему более детально. Введем изменения потоков в данной области спектра $\Delta J(H_2O)$, $\Delta J(CO_2)$ и ΔJ_{cl} изменение потоков излучения, создаваемого молекулами H_2O , CO_2 и облаками соответственно в результате изменения концентрации одной из парниковых компонент, в качестве которой для определенности возьмем молекулы углекислого газа. Очевидно. изменение суммарного потока излучения ΔJ рассматриваемого слоя газа удовлетворяет закону сохранения

$$\Delta J_t = \Delta J(CO_2) + \Delta J(H_2O) + \Delta J_{cl}, \quad (3.16)$$

Таблица 5.

Изменения потоков излучения в сторону Земли для стандартной атмосферы в результате удвоения концентрации молекул CO_2 в указанном интервале частот инфракрасной области спектра [56, 155].

Область частот, cm^{-1}	$\Delta J(CO_2)$, Вт/м ²	$\Delta J(H_2O)$, Вт/м ²	ΔJ_{cl} , Вт/м ²	ΔJ , Вт/м ²
580 – 700	2.94	-2.62	-0.04	0.22
700 – 800	2.87	-0.96	-1.11	0.80
800 – 2400	1.38	0.01	-0.99	0.40
сумма	7.19	-3.57	-2.20	1.42

В табл.5 приведены параметры этой формулы в случае удвоения концентрации углекислого газа в стандартной атмосфере. Отметим, что в универсальных климатических моделях излучающий атмосферный воздух моделируется однокомпонентной системой, что приводит к существенной ошибке в изменении потока излучения, создаваемого атмосферном слое. Эта ошибка составляет [159]

$$\frac{\Delta J(CO_2)}{\Delta J} = 5.2 \pm 0.2 \quad (3.17)$$

Столь большая ошибка может привести к принципиальному изменению вывода относительно парникового эффекта. Действительно, как следует из формул (2.17) и (3.3) удвоение концентрации углекислого газа в атмосфере сопровождается изменением глобальной температуры ΔT , которое равно

$$\Delta T = (2.1 \pm 0.4)^\circ C \quad (3.18)$$

Вклад парникового эффекта в эту величину составляет [56]

$$\Delta T = (0.6 \pm 0.3)^\circ C \quad (3.19)$$

Климатические модели, где вместо ΔJ используется $\Delta J(CO_2)$, ведут к следующему изменению глобальной температуры при удвоении концентрации молекул углекислого газа в атмосферном воздухе в результате статистического усреднения результатов, представленных на международной панели изменения климата (IPCC) [158]

$$\Delta T = (3.0 \pm 1.5)^\circ C \quad (3.20)$$

Как видно, в результате корректного расчета имеем, что парниковый эффект за счет роста концентрации углекислого газа в атмосфере не является основным фактором потепления планеты, тогда как климатические модели ведут к другим выводам. Отметим также, что близкие к результатам, описываемых формулами (3.19) и (3.20), могут быть получены на основе чувствительности климата (2.19) и данных табл.4.

С первого взгляда большая величина отношения (3.17) может вызвать удивление. Его причина связана с малым изменением температуры в атмосфере. В силу принципиальности указанной ошибки климатических моделей мы рассмотрим ее в случае высокой оптической плотности атмосферы для рассматриваемой частоты. Для атмосферы как слоя газа с слабой зависимостью температуры от высоты. В этом случае поток излучения из атмосферы на данной частоте J_ω определяется формулой Планка с температурой T_ω . Эта температура соответствует высоте h_ω , для которой оптическая толщина равна 2/3, т.е. [146, 147]

$$J_\omega = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2c^2[\exp(\hbar\omega/T_\omega) - 1]}, \quad T_\omega = T(h_\omega), \quad u_\omega(h_\omega) = \int_0^{h_\omega} k_\omega(h)dh = 2/3, \quad (3.21)$$

где $u_\omega(h_\omega)$ - оптическая толщина слоя для частоты излучения ω на высоте h_ω .

Обозначим через Δk_ω изменение коэффициента поглощения атмосферы на данной частоте за счет добавленных молекул углекислого газа, через k_ω - коэффициент поглощения молекулами углекислого газа, K_ω - суммарный коэффициент поглощения атмосферы. На углекислый газ приходится k_ω/K_ω часть суммарного потока излучения, так что увеличение потока излучения из атмосферы за счет добавленных молекул углекислого газа $\Delta J_\omega(CO_2)$ составляет

$$\Delta J_\omega(CO_2) = \frac{\Delta k_\omega \cdot k_\omega}{K_\omega^2} J_\omega, \quad (3.22)$$

С другой стороны, изменение суммарного потока излучения из атмосферы на данной частоте ΔJ_ω определяется изменением температуры излучения ΔT_ω или высоты Δh_ω , ответственной за излучение на данной частоте. Имеем

$$\Delta T_\omega = \frac{\partial T}{\partial h} \Delta h_\omega = \frac{\partial T}{\partial h} \cdot \frac{\Delta k_\omega}{k_\omega \cdot K_\omega} \quad (3.23)$$

В частности, для стандартной атмосферы имеем $\partial T/\partial h = 6.5K/km$. На основании формулы (3.23) получим для изменения суммарного потока излучения ΔJ_ω

$$\Delta J_\omega = \frac{\partial J_\omega}{\partial T_\omega} \Delta T_\omega = J_\omega \frac{\hbar\omega}{T_\omega^2[\exp(\hbar\omega/T_\omega) - 1]} \cdot \frac{\partial T}{\partial h} \cdot \frac{\Delta k_\omega}{k_\omega \cdot K_\omega} \quad (3.24)$$

Отсюда получим для отношения добавки к потоку излучения из атмосферы за счет добавленных молекул углекислого газа $\Delta J_\omega(CO_2)$ к изменению суммарного потока излучения на данной частоте ΔJ_ω

$$\delta = \frac{\Delta J_\omega(CO_2)}{\Delta J_\omega} = \frac{k_\omega^2}{K_\omega} \frac{T_\omega^2[\exp(\hbar\omega/T_\omega) - 1]}{\hbar\omega \cdot \partial T/\partial h} \quad (3.25)$$

Как видно, изменение потока излучения $\Delta J_\omega(CO_2)$, создаваемого молекулами углекислого газа, и изменение суммарного потока излучения ΔJ_ω определяются разными параметрами.

Отношение потоков (3.25) велико для малого градиента температуры атмосферы по высоте. Оно обращается в бесконечность, если температура атмосферного воздуха не меняется с высотой. Выполним оценку на основании формулы (3.25), взяв типичную эффективную высоту излучения $h_\omega = 1km$, что дает $T_\omega \approx 280K$, $K_\omega \approx 2/3km^{-1}$, и оптическая толщина атмосферы между поверхностью Земли и облаками составляет $u_\omega \approx 2$. Пусть рассматриваемая частота находится вблизи центра перехода между основным и нижним колебательным состояниями молекулы CO_2 $\hbar\omega = 667cm^{-1}$, и для определенности возьмем $k_\omega = K_\omega/2$. Тогда получим на основе формулы (3.25) $\delta = 4.2$, в то время как среднее значение этой величины согласно формуле (3.17) составляет $\delta = 5.2$ [155, 159]. Таким образом, потепление планеты из-за парникового эффекта, связанного с увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере, является вторичным эффектом повышения глобальной температуры, наблюдаемого в последние десятилетия.

Заканчивая анализ парникового эффекта в атмосфере Земли, отметим, что он включает ряд специфических нюансов, которые требуют внимательного исследования. Формальный подход к этой проблеме, как это имеет место в климатических моделях, ведет к ошибкам и неправильным выводам.

4 Экологические проблемы атмосферы

4.1 Особенности экологических проблем атмосферы

Выше при анализе вопроса, поставленного в заглавии, мы не выходили за рамки физики и на основе современных исследований атмосферы показали ложность понимания важных проблем окружающей среды, которые нам навязывают средства массовой информации. Это противоречие дает дополнительную возможность понять, как это делается. С этих позиций, используя научные данные, мы далее рассмотрим некоторые глобальные экологические проблемы атмосферы, роль которых в жизни общества емко сформулировано в докладе МГИМО [160], посвященном угрозам человечеству в наше время. «Проблемы экологии заслуживают серьезнейшего внимания и требуют предметного обсуждения. Если мы непоправимо разрушим среду собственного обитания, решения всех остальных проблем перестанут иметь смысл. Количество природных катастроф и стихийных бедствий продолжает нарастать. Природные катаклизмы несут в себе непосредственную угрозу для жизни целых народов, заставляя массы людей покидать свои дома.»

Наоборот, основные средства массовой информации России и Европы искажают состояние этих проблем в интересах определенной финансовой группы, которая навязывает миру ложное представление о вреде углеродной энергетики, чтобы извлечь из этого определенную выгоду. Подобный путь был ранее пройден при реализации монреальского протокола по озону 1987 года, запретивший производство хлорсодержащих фреонов, поскольку при их разложении в стратосфере образуется атомарный хлор, который, участвуя в цепи процессов, приводит к разложению стратосферного озона. Однако, во-первых, основной поток хлора в стратосферу создается океанами, содержащими в большом количестве поваренную соль, и во-вторых, разрушение озона в стратосфере в большей степени происходит за счет окислов азота, образуемых под действием самолетов, пути которых в основном пролегают вблизи границы стратосферы и, в отличие от хлорсодержащих соединений, не вымываются водой. Тем не менее, соглашение по озону было принято.

Отметим, что при современном состоянии науки актуальные проблемы человечества требуют одновременного участия разных направлений науки [161]. Однако, социальные науки основываются на опыте, тогда как точные науки оперируют с цифрами, что позволяет получить объективные выводы. В частности, из сравнения выводов на основе этих цифр для парникового эффекта атмосферы за счет углекислого газа и характера представления этой проблемы атмосферы на первой и второй государственных программах телевидения России следует существование цензуры во вред отечественной углеродной энергетике ?? . Далее мы рассмотрим некоторые экологические проблемы атмосферы, обратив внимание на этот аспект проблем.

4.2 Особенности развития углеродной энергетике

Выше был проведен анализ физических процессов с участием углерода в атмосфере и на поверхности Земли с учетом выводов современных программ по атмосфере. Далее мы используем результаты данного анализа для развития углеродной энергетике. Как химический элемент углерод занимает центральное место в жизненных процессах, а углеродная энергетика, как способ производства энергии при сжигании горючих полезных ископаемых, создает в настоящее время примерно 80% вырабатываемой энергии. Вклад углеродной энергетике в производство энергии снижается, причем в заметной степени благодаря мифам, распространяемых средствами массовой информации. Приведем основные из этих мифов,

Миф 1. Потепление на планете представляет большую опасность для человечества. При этом повышение глобальной температуры на 2°C приведет к необратимому последующему росту температуры. В частности, это указано в парижском соглашении по климату 2015 года [72].

Миф 2. Наблюдаемое повышение глобальной температуры с течением времени определяется увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере через парниковый эффект.

Миф 3. Поскольку увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере происходит в результате сжигания горючих полезных ископаемых, необходимо, насколько это возможно, отказаться от углеродной энергетики, заменив ее водородной энергетикой, под которой в данном случае понимается использование водорода в качестве топлива, т.е. замена метана водородом в мировой энергетике.

Эти мифы преподносятся средствами массовой информации как реальность, и в конечном итоге общественное мнение принимает их именно так. Тем более, что эта пропаганда хорошо организована. В частности, средства массовой информации ряда ведущих стран содержит цензуру, которая не допускает сомнений в том, что инжекция углекислого газа в атмосферу является главной причиной потепления на планете, а связанное с этим изменение климата является главной угрозой для человечества. Более того, они поддерживаются руководящими чиновниками ведущих стран. Достаточно вспомнить, с какой помпой принималось парижское соглашение по климату 2015 года, в котором участвовали руководители всех ведущих стран, исключая китайского.

Конечно, на основе проведенного выше анализа и научного опыта можно показать ложность приведенных мифов. Пользуясь палеонтологическими исследованиями, можно констатировать, что в период эоцена характерная температура на планете, по крайней мере, на 10°C превышала наблюдаемую в настоящее время, что отвергает первый миф, согласно которому повышение глобальной температуры на 2°C приведет к необратимому росту температуры планеты.

Что касается второго мифа, анализ парникового эффекта в атмосфере был подробно проанализирован в предыдущем параграфе. Из этого анализа следует, что рост концентрации углекислого газа в атмосфере не является основной причиной роста глобальной температуры. Однако, средства массовой информации убеждают население, что главная угроза для будущего - изменение климата, причем это изменение понимается ими примитивно, как рост температуры. Не останавливаясь на деталях, отметим, что изменения климата, в том числе в результате хозяйственной деятельности человека, заслуживает серьезного внимания, но в основном в связи с учащением стихийных бедствий.

Отказываясь от первых двух мифов, сформулированных во введении и распространяемыми средствами массовой информации, мы должны изменить отношение к современному производству энергии. Отметим, что характер производства энергии несколько раз менялся в течение индустриального периода развития нашей цивилизации. В настоящее время около 80% производимой энергии связано со сжиганием угля, нефти и газа, включая их производные. Вклад этого вида энергии со временем снижается из-за развития так называемых возобновляемых источников энергии - солнечной и ветряной. Их вклад в производство энергии в настоящее время невелик, но в производстве электроэнергии эти виды энергии значительны, особенно с учетом того, что они быстро развиваются. В частности, удвоение мощности углеродной энергетики составляет (30-40) лет, для ветроэнергетики этот показатель составляет 10 лет, а для солнечной энергетики - (7-8) лет.

Несмотря на это средства массовой информации распространяют третий миф, который требует серьезного изменения в структуре энергетики, одним из шагов которого является

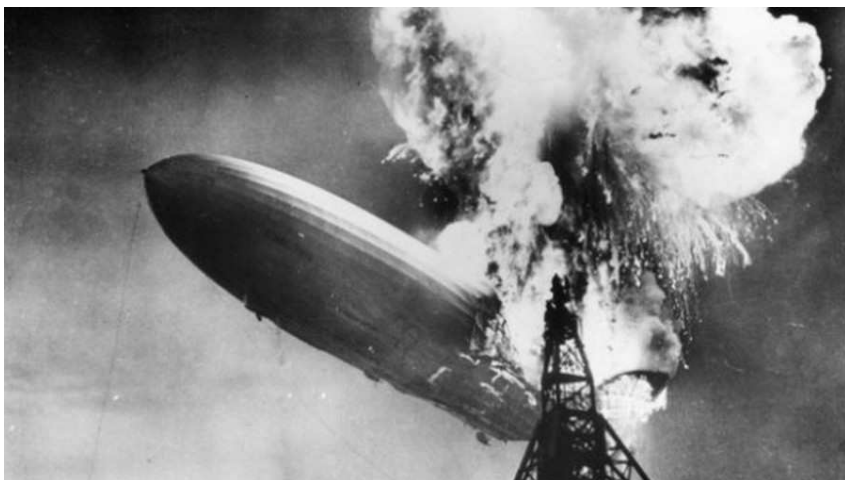


Figure 18: Взрыв дирижабля "Гинденбург" в Нью-Йорке [162].

замена натурального газа водородом. Однако, водородная энергетика как замена углеродной окажется тушью на горячем направлении и не может быть предложена массовому потребителю подобно натуральному газу в силу повышенной реакционной способности водорода.

Приведем пример, который подтверждает это и показывает опасность массового хранения водорода. Определенный опыт в хранении водорода в больших количествах дает развитие дирижаблей в тридцатых годах 20 века. Дирижабль "Гинденбург" [163, 164], гордость Третьего рейха, был построен в 1934 году и совершил 65 полетов за время своего существования. Длина этого дирижабля составляла 245 м, т.е. в три раза больше, чем длина самолета Boeing 747. Последний перелет дирижабля состоялся в Нью Йорк, где 6 мая 1937 года произошел взрыв (см.рис.18), который привел к разрушению дирижабля. Такая же участь постигла в конечном итоге дирижабли других стран.

Водородная энергетика предлагается как дополнение к производству электрической энергии. Проблема состоит в том, что некоторые генераторы электрической энергии не позволяют регулировать выходную мощность электрической энергии. В частности, потребление электрической энергии ночью заметно меньше, чем днем, но, скажем, вырабатываемая ветродвигателем электрическая энергия зависит только от силы ветра, но не от времени дня. Тогда было бы удобно запасти избыток энергии, вырабатываемой ночью, и далее вернуть ее днем. Для этого может быть использован аккумулятор энергии в виде водородной энергетика, который требуется не только для ветровой, но также и для других видов энергии.

Однако, имеется другой способ хранения энергии, связанный с использованием насосной станции, схема которой представлена на рис.19 и была разработана в 1903 году. В настоящее время в США и Китае построены отдельные каскады насосных станций мощностью 3 ГВт, а в Китае создается комплекс насосных станций мощностью 30 ГВт. Для сравнения, общая мощность Волжско-Камского каскада гидроэлектростанций, обслуживающих половину населения России, составляет 30 ГВт.

Тем не менее существует серьезная проблема углеродной энергетика, связанная с истощением запасов нефти и природного газа, так что области их добычи перемещаются в более труднодоступные места. При этом разведанных запасов угля при современных



Figure 19: Схема работы насосной гидроэлектростанции [165].

темпах его расходования хватит на несколько тысяч лет. При этих условиях возникает проблема изготовления жидкого и газообразного синтетического топлива из угля. С такой проблемой столкнулась Германия в первой половине 20 века. При этом первая технология, пригодная для массового использования, была предложена в 1913 году нобелевским лауреатом Фридрихом Бергиусом, где каменный или бурый уголь смешивались со специальными добавками, включающими катализаторы. Образовавшуюся суспензию смешивали с водородом, который был получен из нагретой смеси воды и угля, а далее смесь подавалась в химический реактор, где температура составляло $(450 - 485)^{\circ}\text{C}$, а давление достигало 500–700 атм. Получаемая синтетическая сырая нефть представляла собой смесь нефти, дизельного топлива, топливных газов и других компонент. В последующем синтетическая нефть разделялась на тяжелые масла, бензин и горючие газы.

Альтернативная технология производства синтетического топлива были реализована в так называемом процессе Фишера–Тропша (F.Fischer и H.Tropsch) в 1926 году [166]. Первой стадией этого процесса является обработка горячего измельченного угля (как каменного, так и бурого) перегретым водяным паром, что приводит к образованию так называемого синтез-газа [167] в виде смеси CO и H_2 . Синтез-газ может быть преобразован далее в жидкое топливо в результате смешивания с различными сырыми видами топлива. Эта технология позволяла получать различные виды топлива, среди которых особое место занимал синтетический бензин. Совершенствование и модификация представленной технологии использовалась на промышленных предприятиях при производстве различных синтетических видов топлива.

В Германии технология производства синтетического топлива получила практическое

применение, поскольку во время войны в 1944-1945 годах она оказалась отрезанной от районов добычи нефти в Румынии, тогда как другие развитые страны имели возможность получать более дешевое ископаемое топливо. В 1944 году на 25 заводах было произведено около 6 миллионов тонн синтетического топлива, и для этой цели было использовано 60 миллионов тонн угля.

Впоследствии были разработаны различные технологии для производства синтетических топлив из различных органических веществ, включая спирты, опилки, органические отходы. Однако, стоимость производимого синтетического топлива была всегда выше, чем стоимость ископаемого топлива. Однако, в 2021 году стоимость ископаемого топлива значительно выросла, что может изменить отношение к синтетическому топливу, поскольку производство синтетического топлива определяется экономикой.

Частичный переход на синтетическое топливо, которое производится из угля и заменяет природный газ, практически происходит на угольных тепловых электростанциях, где уголь используется в виде порошка в водяном паре. В паровом котле создаются сверхкритические температура и давление, достигающие 600°C и 320 атм соответственно. КПД этих электростанций превышает 40%. Таким образом, происходит постепенный переход к новой технологии производства энергии, при которой природный газ заменяется пылеугольным топливом. Но в отличие от тепловых электростанций на натуральном газе, в этом случае необходима очистка продуктов сгорания от вредных примесей, причем углекислый газ не входит в их число.

Таким образом, несмотря на определенные проблемы, углеродная энергетика, где энергия вырабатывается в результате сжигания ископаемого топлива, в настоящее время является одним из основных способом производства энергии, хотя и находится под прессом средств массовой информации, которые предъявляют к ней ложные претензии.

4.3 Проблема стратосферного озона

Глобализация привела к существенным изменениям в жизни человечества, хотя внешне незаметно, что многие действия стран принимаются высокими чиновниками в собственных интересах в рамках некоторого мирового управления. В конечном итоге это проявляется на жизни людей. Например, в связи с проведенными реформами средний рост ВВП России в прошедшие годы 21 века составлял в среднем 1%. Для сравнения средний рост ВВП в СССР с 1929 по 1956 год, когда страна была независимой от внешнего воздействия и общие принципы экономики не нарушались, этот рост составлял 12%, несмотря на жестокую войну в течение этого периода.

При этом характер управления глобализацией достиг высокого уровня, так что в открытой печати практически отсутствуют официальные документы, относящиеся к работе этой системы. Проведенный в данной работе физический анализ углеродных процессов вскрывает некоторые особенности этой работы. В частности, ранее было указано [?] существование цензуры у 1 и 2 государственных программ телевидения России, которая действует во вред своей стране.

Отметим, что удачно проведенная компания, связанная с углеродной проблемой и приведшая к парижскому соглашению 2015 год по климату, готовилась к расширению. Напомним, как Ю.Б.Чубайс требовал принятия вводимых западом штрафов за использование углеродной энергетике. И только война на Украине остановила второй этап эксплуатации углеродной энергетике. Конечно, существование глобальной системы, обладающей и управляющей огромными средствами, которая управляется невидимыми нитями, вызывает сомнение, особенно, как эта система может заниматься мошенничеством в международных масштабах и оставаться скрытой. Однако, кроме того, эта система устанавливает физические законы, противоречащие принципам физики, Тем не менее,

другой подобный случай меньшего масштаба, относящийся к проблеме стратосферного озона, позволяет понять некоторые аспекты такой глобальной системы.

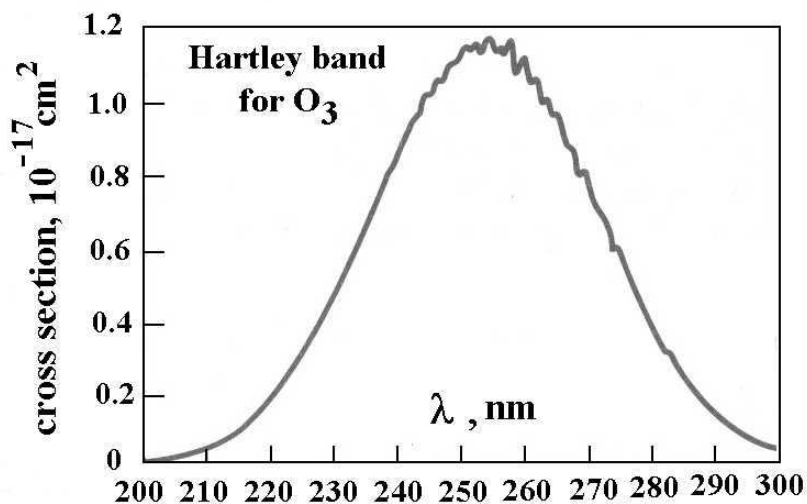


Figure 20: Сечение поглощения молекулы озона в диапазоне частот полосы Хартли согласно измерениям [176].

Рассмотрим экологическую проблему, связанную с поведением стратосферного озона, который защищает находящиеся на поверхности Земли живые организмы от действия ультрафиолетового излучения. Атмосферный озон в основном находится в стратосфере, где его средняя концентрация составляет $0,3ppm$ [169], а вблизи поверхности Земли она в среднем равна $0,04ppm$. Оптическая толщина атмосферы по отношению к ультрафиолетовому солнечному излучению составляет приблизительно 200 для длин волн (250 – 269)нм, где сечение поглощения максимально в соответствии с рис. refca20.

Поглощение ультрафиолетового солнечного излучения молекулами озона защищает от него живые организмы. В то же время изменение концентрации стратосферного озона в пределах порядка величины практически не изменяет его защитные свойства. Молекулы озона в атмосфере образуются в результате присоединения атомов кислорода к молекулам кислорода, которые, в свою очередь, формируются в нижней ионосфере на высотах выше 100 км, где молекулы кислорода диссоциируют под действием солнечной радиации в диапазоне спектра ближнего ультрафиолета [12, 9, 170].

Наша планета менялась в процессе своего развития. На первом этапе своей эволюции атмосфера Земли не содержала кислорода. Это началось в атмосфере под действием микроорганизмов примерно 1,8 миллиарда лет назад из 4,6 миллиардов лет существования Земли. Образование молекул кислорода под воздействием солнечной радиации в результате процесса фотосинтеза привело к созданию озонового слоя, появившегося в стратосфере. В результате живой мир, который ранее мог развиваться только вне досягаемости солнечных лучей, распространился по всей Земле. Участвуя в процессах фотосинтеза, растительность на поверхности Земли вырабатывала кислород. По этой причине атмосфера Земли принципиально отличается от атмосферы других планет солнечной системы,

которые не содержат кислорода. Впоследствии молекулы озона образовались в атмосфере Земли в процессах с участием кислорода, и основная часть озона находится в стратосфере. Молекулы озона эффективно поглощают солнечное излучение в диапазоне длин волн $210 \text{ нм} < \lambda < 300 \text{ нм}$ (см. рис. refca20).

Рассмотрим кинетику химических процессов в стратосфере с участием озона, которая в том числе была проанализирована автором [171], когда резко поднялся интерес к проблеме стратосферного озона. Разрушение стратосферного озона происходит по разным каналам. Существенно, что озон как метастабильное состояние кислорода является стабильным химическим соединением, так что процесс



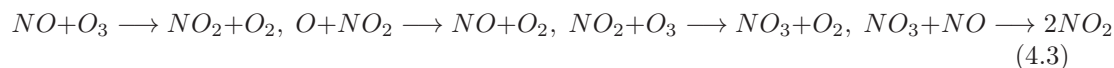
практически является запрещенным из-за соответствующего поведения поверхностей потенциальной энергии для начального и конечного состояний системы, состоящей из двух молекул озона. Следовательно, разложение озона происходит в процессах с участием радикалов.

Первый из этих процессов протекает по схеме



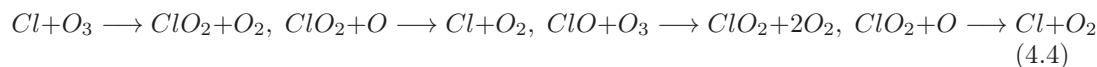
и называется кислородным циклом или циклом Чепмена [172], который он предложил еще в 1930 году. Оказалось, что более эффективные процессы разрушения озона в стратосфере реализуются в циклических процессах, где свободный или связанный атом кислорода отнимает атом кислорода у молекулы озона, что приводит к образованию молекул кислорода. В этих процессах атом кислорода или радикалы, содержащие водород, азот или хлор, являются катализаторами, которые приводят к превращению озона в молекулярный кислород [173]. Вблизи южного полюса во время полярной зимы накапливаются радикалы, которые весной (сентябрь-декабрь) приводят к уменьшению содержания озона в стратосфере вдвое. Это явление называется озоновая дыра.

Наиболее важные процессы разрушения озона в стратосфере относятся к азотному и хлорному циклам. Азотный цикл разрушения атмосферного озона включает реакции с участием оксидов азота, которые протекают в соответствии со схемой



Поскольку воздушные суда обычно летают на высотах, близких к тропопаузе, разделяющей тропосферу и стратосферу, а в двигателях самолетов создаются высокие температуры, при которых в воздухе образуются оксиды азота, полеты воздушных судов являются наиболее мощной антропогенной причиной разрушения стратосферного озона.

Хлорный цикл разрушения озона включает следующие реакции



Азотный и хлорный циклы разрушения озона могут быть перемешаны посредством процесса



Следует отметить, что азотный, водородный и хлорный циклы разрушения стратосферного озона были обнаружены в начале семидесятых годов прошлого века. За это открытие П.Крутцен, М.Молина и Ф.Ш.Роуленд получили Нобелевскую премию по химии в 1995 году [174]. И именно этот процесс был использован фирмой DuPont для принятия монреальского протокола по озону в 1987 году [175]. В результате этого протокола было запрещено использования ряда хлорсодержащих фреонов.

Основанием для этого протокола было, что попадающие в атмосферу хлорсодержащие фреоны в силу низкой химической активности могут достигать стратосферы, где фреоны разлагаются под воздействием солнечной радиации с образованием атомов хлора, которые, в свою очередь, разрушают озоновый слой. В частности, наиболее распространенный фреон CCl_4 имеет замкнутую структуру, где четыре атома галогена образуют замкнутую оболочку вокруг атома углерода. Следовательно, этот фреон химически неактивен и не представляет опасности для человека, если он находится в воздухе. Этот фреон ранее широко использовался в холодильных установках в качестве хладагента. Как простой и удобный растворитель фреон CCl_4 широко использовался при химической очистке. Этот фреон также является удобным наполнителем в счетчике нейтрино, где реакция нейтрино с атомом хлора приводит к образованию атома аргона.

Однако, концепция разрушения стратосферного озона под действием хлор-содержащих фреонов легко опровергается в силу высокой интенсивности потоков хлора, который транспортируется с поверхности океанов. Действительно, согласно формуле (2.12) средний поток молекул воды, испаренных с поверхности Земли, составляет $1.1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ или примерно $2 \cdot 10^{13}$ грамм воды, испаряющейся в секунду со всей поверхности Земли. Отсюда получаем поток воды $1 \cdot 10^{11} \text{ г/с}$, который достигает высоты 10 км. Учитывая типичную соленость океанов, равную 35 г/л [177, 178] при растворении поваренной соли в воде и считая для простоты, что соль испаряется с поверхности океанов с той же скоростью, что и вода, получим для потока хлора на высоте 10 км в сторону стратосферы, оцениваемого как $5 \cdot 10^9 \text{ г/с}$. Ежегодное производство основного хлор-содержащего фреона CCl_4 до его запрета составляло 150 тысяч тонн в год или $5 \cdot 10^3 \text{ г/с}$. Как видно, это на шесть порядков величины меньше потока океанского хлора в виде натриевой соли на высоту в несколько километров. отсюда следует ложность утверждения, положенного в основу монреальского протокола. Это показывает несостоятельность утверждения, полученного в основу монреальского протокола 1987 года по озону [175].

До того как оформить запрет производства хлор-содержащих фреонов в монреальском протоколе 1987 года DuPont запатентовал и организовал производство бромсодержащих фреонов и в дальнейшем лоббировал принятие монреальского протокола. В результате стоимость этой компании возросла до 130 миллиардов долларов [179], а производители хлорсодержащих фреонов понесли убытки. Это также привело к небольшому увеличению стоимости энергетического оборудования при производстве холодильных установок. Следует отметить, что даже спустя почти 40 лет после принятия Монреальского протокола нет достаточных измерений, относящихся к стратосферному озону, чтобы бить тревогу по поводу воздействия высотных полетов самолетов на стратосферный озон, тем более роли фреонов в этом. Поэтому монреальский протокол 1987 года можно рассматривать как удачное мошенничество, организованное фирмой DuPont.

Считается, что мошенничество рано или поздно наказывается. Так случилось и с фирмой DuPont, занимавшейся в том числе производством противопожарных покрытий на основе тефлона и аналогичных материалов, которые при высоких температурах являются источником токсичных веществ. Отходы этого производства не уничтожались, как того требуют законы, а выливались в почву. Это привело к загрязнению грунтовых

и поверхностных вод, что отразилось на здоровье людей, живущих вблизи места производства, а также их животных (например, [180]). После многолетних выяснений вина DuPont была доказана, и в интересах ее владельцев концерн был расформирован.

Акция, связанная с углеродной энергетикой, организована гораздо лучше, характеризуется другими масштабами и включает участников из большего числа стран. Несмотря на более высокую организацию, можно ожидать, что и это мошенничество будет наказано.

5 Заключение

Целью данной статьи является построить физическую картину процессов в атмосфере и на поверхности Земли с участием углекислого газа и связанного углерода для того, чтобы ответить на вопрос, сформулированный в заглавии статьи. Анализ физики этих процессов позволяет дать однозначный ответ на вопрос, сформулированный в названии статьи. Он содержится также в формулировке связанных с этим мифов, которые пропагандируются средствами массовой информации. Именно, углекислый газ, создаваемый мировой углеродной энергетикой в результате сжигания горючих полезных ископаемых, не является главной причиной роста глобальной температуры. Атмосферный углекислый газ не представляет опасности для здоровья человека, но рост его концентрации в атмосфере ведет по этой причине и к росту урожаев примерно в полтора раза за индустриальный период увеличились

Отметим, что концепции, составляющие представленной выше физической картины углеродных процессов в атмосфере, разделяются многими учеными и, в частности, среди других концепций нашли отражение в докладе [161]. Однако в данном случае они выражаются в цифрах, которые вытекают из соответствующих физических исследований. В частности, более подробный анализ процессов, лежащих в основе полученных выводов, содержится в книгах с участием автора, приведенных на рис.21. Отметим важную роль в этом анализе результатов ряда многолетних измерений, проводимых квалифицированными научными коллективами, главным образом, в рамках программ НАСА. Отмечу, что общее понимание автором проблемы атмосферного углерода не изменилось с семидесятых годов 20 века [181, ?]. Но теперь оно формулируется в цифровом формате с оценкой точности соответствующих параметров, до и сама проблема не была столь актуальной.

Побочным результатом проведенного анализа является новое состояние в управлении современной цивилизацией. Снова вернусь к докладу [161] и приведу цитату отсюда относительно к разным ситуациям "Нужна правда, какой бы неприятной она не была". Как следует из проведенного анализа, наука в поиске истины действует в рамках этого тезиса, так что объединение вклада разных ученых из разных стран обогащает науку. Но из сравнения результатов науки и поведением средств массовой информации показывает появление новой международной власти.

Эта власть ответственна за парижское соглашение по климату 2015 года. Она связала весь мир невидимыми нитями и располагает огромными ресурсами. О силе этой власти свидетельствует ее столкновение с президентом США Трампом, который, придя к власти, объявил парижское соглашение фейковым и попытался вывести США из этого соглашения, что ему не удалось. Однако, эти вопросы выходят за пределы физики и, обращая на них внимание, приведем отношение к ним специалистов из МГИМО [160]

"Нагнетаемая истерика вокруг глобального потепления становится благодатной почвой для крупного бизнеса. Давление на общественное мнение со стороны радикальных эко-активистов искусно используется для блокирования инвестиционных потоков в якобы «грязные» индустрии добычи и переработки невозобновляемых природных ресурсов.

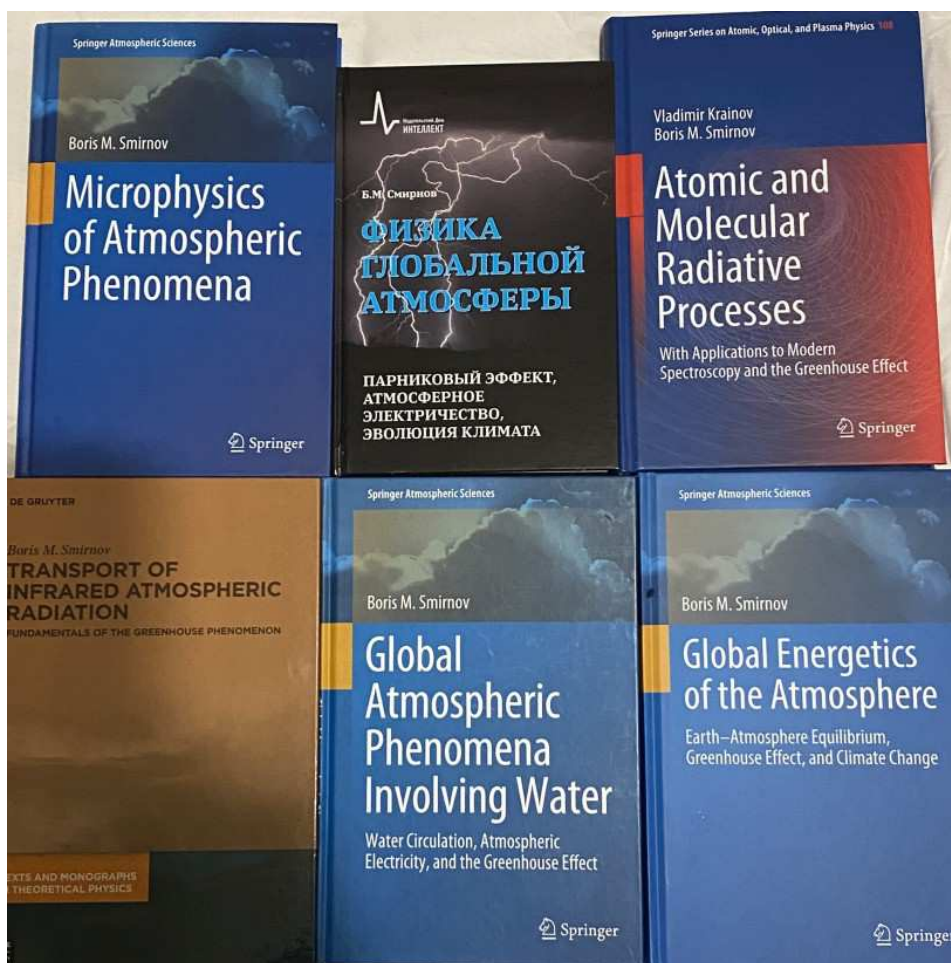


Figure 21: Книги с участием автора по атмосферным процессам, опубликованные в 2017-2021 годах.

За этой инициативой кроется стремление перенаправить деньги из реальной экономики в технологические компании, чтобы сохранить пузырь на рынке хайтека. Ряд стран ЕС также использует экологическую проблематику как ширму для обновленной стратегии протекционизма.

Наступает эра, в которой сфера политическая прирастает новым измерением. Сила и потенциал каждой страны начинают восприниматься через экологическую призму. Экологический потенциал, способность страны к устойчивому экологическому развитию становится одним из важных компонентов ее мощи."

References

- [1] J.T.Houghton. *The physics of atmospheres*. (Cambridge, Cambr.Univ.Press, 1977)
- [2] J.V.Iribarne, H.P.Cho. *Atmospheric Physics*. (Dordrecht, Reidel Publ., 1980)
- [3] R.G.Fleagle, J.A.Businger. *Introduction to Atmospheric Physics*. (San Diego, Acad.Press, 1980)
- [4] R.M.Goody, Y.L.Yung. *Principles of Atmospheric Physics and Chemistry*. (New York, Oxford Univ.Press, 1995)
- [5] M.L.Salby. *Fundamentals of Atmospheric Physics*. (San Diego, Academic Press, 1996)
- [6] J.H.Seinfeld, S.N.Pandis. *Atmospheric Chemistry and Physics*. (Wiley, New York, 1998)
- [7] D.G.Andrews. *An Introduction to Atmospheric Physics*. (Cambridge, Cambr.Univ.Press, 2000)
- [8] K.Ya.Kondratyev, V.F.Krapivin, C.A.Varotsos. *Global Carbon Cycle and Climate Change*. (Springer Praxis Publ., Chichester, 2003)
- [9] J.H.Seinfeld, S.N.Pandis. *Atmospheric Chemistry and Physics*. (Hoboken, Wiley, 2006)
- [10] J.M.Walace, R.Hobbs. *Atmospheric Science. An Introductory Survey*. (Amsterdam, Elsevier, 2006)
- [11] M.H.P.Ambaum. *Thermal Physics of the Atmosphere*. (Oxford, Wiley-Blackwell, 2010)
- [12] M.L.Salby. *Physics of the Atmosphere and Climate*. (Cambridge, Cambr.Univ.Press, 2012)
- [13] I.Lagzi e.a. *Atmospheric Chemistry*. (Budapest, Institute of Geography and Earth Science, 2013)
- [14] R.Caballero. *Physics of the Atmosphere* (Bristol, IOP Publish., 2014)
- [15] B.M.Smirnov. *Microphysics of Atmospheric Phenomena*. (Switzerland, Springer Atmospheric Series, 2017)
- [16] G.Visconti. *Fundamentals of Physics and Chemistry of the Atmosphere*. (Switzerland, Springer Nature, 2017)
- [17] *U.S. Standard Atmosphere*. (Washington, U.S. Government Printing Office, 1976)

- [18] B.M.Smirnov. *Global Energetics of the Atmosphere*. (Switzerland, Springer Atmospheric Series, 2021)
- [19] R.Braham. *J.Meteorol.* **9**, 227(1952)
- [20] A.Baumgartner, E.Reichel. *The World Water Balance*. (Amsterdam, Elsevier, 1975)
- [21] I.A.Shiklomanov. In : *Water in Crisis : A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Ed.P.H.Gleick. (Oxford, Oxford Univ.Press, 1993;p.13-24)
- [22] P. H.Gleick. *Water resources*. In *Encyclopedia of Climate and Weather*. Ed. by S. H. Schneider. (New York, Oxford University Press, 1996. vol. 2, pp. 817-823)
- [23] I.A.Shiklomanov, J.C.Rodda, eds. *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*. (Cambridge, Cambridge Univ.Press, 2003)
- [24] R.W.Healy, T.C.Winter, J.W.Labaugh, O.L.Franke. *Water budgets : Foundations for effective water-resources and environmental management*. (Reston, Virginia, U.S.Geological Survey Circular 1308, 2007)
- [25] K.E.Trenberth, L.Smith, T.Qian et.al. *J.Hydrometeorol.* **8**, 758(2007)
- [26] <http://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere-of-Earth>
- [27] <http://en.wikipedia.org/wiki/water-circle>
- [28] <http://water.usgs.gov/edu/watercycleatmosphere.html>
- [29] <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcp-monthly-global-precipitation-climatology-project>
- [30] R. F.Adler, G. Gu, M. Sapiano et.al. *Surveys in Geophysics*. **38**, 679(2017)
- [31] W.H.Dines. *Quart.J.Roy.Meteorol.Soc.* **43**, 151(1917)
- [32] Б.М.Смирнов. Развитие глобальной энергетики. (Москва, dariknigi,2022) ISBN 978-5-907563-34-6
- [33] <https://en.wikipedia.org/wiki/Albedo>
- [34] <https://earthobservatory.nasa.gov/images/84499/measuring-earths-albedo>
- [35] H.G.Houghton. *J.Meteorol.* **11**, 1(1954)
- [36] <https://wiki/Electromagnetic-absorption-by-water>
- [37] <http://www1.lsbu.ac.uk/water/water-vibrational-spectrum.html>//en.wikipedia.org
- [38] C.M.R.Platt. *Quart.J.Roy.Meteorolog.Soc.* **102**, 553(1976)
- [39] B.M.Smirnov. *EPL* **114**, 24005(2016)
- [40] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред*. (Москва, Наука, 1982)
- [41] <https://www.britannica.com/place/Mount-Tambora> 150km³
- [42] <https://en.wikipedia.org/wiki/1815-eruption-of-Mount-Tambora>

- [43] P.J.Crutzen, J.W.Birks. *Ambio* **11**, 114(1982)
- [44] R.P.Turco, O.B.Toon, T.P.Ackerman, J.B.Pollack, C.Sagan. *Science* **222**, 1283(1983)
- [45] Alan Robock,1 Luke Oman,1,2 and Georgiy L. Stenchikov JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 112, D13107(2007)
- [46] Coupe J.; Bardeen C., Robock A., Toon O. *J.Geophys. Res.: Atmospheres.* **124**,: 8522(2019)
- [47] <https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear-winter>
- [48] J.E.Hansen, D.Johnson, A.Lacis et.al. *Science* **213**, 957(1981)
- [49] [https://www.climate4you.com/Greenhouse Gases.htm-Atmospheric-carbon-dioxide \(GISS -temperature\)](https://www.climate4you.com/Greenhouse%20Gases.htm-Atmospheric-carbon-dioxide%20(GISS%20-temperature))
- [50] J.Hansen, M.Sato, R.Ruedy et.al. <http://www.columbia.edu/~jeh1/mailling/2016/20160120-Temperature2015>
- [51] <http://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2021>
- [52] <https://en.wikipedia.org/wiki/HadCRUT>
- [53] <https://datahub.io/core/global-temp>
- [54] *Intergovernmental Panel on Climate Change. Nature* **501**, 297;298(2013)
- [55] Palaeosens Project Members. *Nature* **491**, 683(2012)
- [56] B.M.Smirnov. *Transport of Infrared Atmospheric Radiation.* (Berlin, de Gruyter, 2020)
- [57] <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201805>
- [58] <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201905>
- [59] <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202207-anomaly-2022>
- [60] V.A.Zubakov, I.I.Borzenkova. *Global Paleoclimate of the Late Cenozoic.* (Amsterdam, Elsevier, 1990)
- [61] M.Benton, D.A.T.Harper. *Introduction to Paleobiology and the Fossil Record.* (Chichester, Wiley-Blackwell, 2009)
- [62] T.M.Cronin. *Paleoclimates : Understanding Climate Change Past and Present.* (New York, Columbia Univ.Press, 2010)
- [63] <https://en.wikipedia.org/wiki/Paleontology>
- [64] <https://en.wikipedia.org/wiki/Paleoclimatology>
- [65] M.L.Bender. *Paleoclimate.* (Princeton, Princ.Univer.Press, 2013)
- [66] G.Faure, D.Mensing. *Isotopes - Principles and applications.* (Hoboken N.J., Wiley, 2005)
- [67] <https://en.wikipedia.org/wiki/Paleoclimatology>

- [68] <https://en.wikipedia.org/wiki/Eocene>
- [69] A.Shuijs e.a. *Nature* **441**, 610(2006)
- [70] K.Moran e.a. *Nature* **441**, 601(2006)
- [71] C.Jaramilo e.a. *Science* **330**, 957(2010)
- [72] <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21>
- [73] EPICA Community Members. *Nature* **429**, 623(2004)
- [74] J.R.Petit, J.Jouzel, D.Raynaud et.al. *Nature* **399**, 429(1999)
- [75] <https://www.co2.earth/21-co2-past>
- [76] O.Raynaud et.al. *Nature* **436**, 39(2005)
- [77] L.Augustin et.al. *Nature* **429**, 623(2004)
- [78] J.Jouzel et.al. *Science* **317**, 793(2007)
- [79] D.Lüthi, M.Le Floch, B.Bereiter et.al. *Nature* **453**, 379(2008)
- [80] O.Watanabe et.al. *Nature* **453**, 379(2003)
- [81] J.Jouzel et.al. *Science* **317**, 793(2007)
- [82] D.Lüthi, M.Le Floch, B.Bereiter et.al. *Nature* **453**, 379(2008)
- [83] B.M.Smirnov. *Global Atmospheric Phenomena Involving Water*. (Switzerland, Springer Atmospheric Series, 2020)
- [84] B.M.Smirnov. *Foundation* **2**, 1114(2022)
§2
- [85] T.Pedersen, Y.Rosental, S.Seitzinger et.al. *Science* **290**, 291(2000)
- [86] *The Carbon Cycle*. Ed. T.M.Wigley, D.S.Schimmel. (Cambridge, Cambr.Univ.Press, 2000)
- [87] D.Archer. *The Global Carbon Cycle*. (Princeton, Princ.Univ.Press, 2010)
- [88] <https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-cycle>
- [89] <https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-dioxide-in-Earth/atmosphere/media/File:Carbon-cycle>
- [90] <https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-cycle>
- [91] <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>
- [92] P.Friedlingstein, M.O’Sullivan1, M.W.Jones et.al. *Earth Syst.Sci.Data* **11**, 1783(2019)
- [93] <http://www.globalcarbonproject.org>
- [94] <https://en.wikipedia.org/wiki/Mauna-Loa-Observatory>
- [95] Ch.D.Keeling e.a. *Tellus* **12**, 200(1960)

- [96] Ch.D.Keeling, R.B.Bacastow, A.E.Bainbridge e.a. *Tellus* **28**, 538(1976)
- [97] R.B.Bacastow, Ch.D.Keeling, T.P.Whorf. *J.Geophys.Res.* **90**, 10529(1985)
- [98] Ch.D.Keeling, T.P.Whorf, M.Wahlen, J.van der Plicht. *Nature* **375**, 666(1995)
- [99] Ch.D.Keeling, J.F.S.Chin, T.P.Whorf. *Nature* **382**, 146(1996)
- [100] Ch.D.Keeling. *Annual Review of Energy and the Environment.* **23**, 25(1998)
- [101] M.Grosjean, J.Goiot, Z.Yu. *Global Planet Change* **152**, 19(2017)
- [102] <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- [103] <https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2-mm-mlo.txt>
- [104] D.M.Etheridge, L.P.Steele, R.L.Langenfels e.a. *J.Geophys.Res.* **101**, 4115(1996)
- [105] F.Joos, R.Spahni. *Proc.Nat.Acad.Sci.USA* **105**, 1425(2008)
- [106] J.M.Kauffman. *J.Sci.Explor.* **4**, 723(2007)
- [107] L.Pauling. *General Chemistry.* (San Francisco, 1970)
- [108] D.W.Lawlor. *Photosynthesis.* (Oxford, BIOS, 2001)
- [109] J.E.Bidlack, K.R.Stern, S.Jansky. *Introductory plant biology.* (New York, McGraw-Hill, 2003)
- [110] *Handbook of Photosynthesis.* (Boca Raton, CRC Press, 2005)
- [111] R.E.Blankenship. *Molecular Mechanisms of Photosynthesis.* (London, Wiley, 2014)
- [112] R.E.Blankenship. *Molecular Mechanisms of Photosynthesis.* (London, Wiley, 2021)
- [113] <https://en.wikipedia.org/wiki/RuBisco>
- [114] U.Feller, t.Anders, T.Mae. *J.Exper.Bot.* **59**, 1615(2008)
- [115] T.D.Sharkey. *Photosynth Res.* **53**, 835(2019)
- [116] R.Hill. *Nature* **139**, 881(1937)
- [117] <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/chlorophyll>
- [118] L.Stryer, J.M.Berg, J.L.Tymoczko. *Biochemistry.* (San Francisco, Freeman, 2002; Chapter 20)
- [119] G.E.Edwards, D.A.Walker. *C3, C4: Mechanisms and Cellular and Environmental Regulation of Photosynthesis.* (Oxford: Blackwell, 1983)
- [120] A.S.Raghavendra, R.F.Sage. *C4:Photosynthesis and Related CO2 Concentrating Mechanisms.* (Springer, Dordrecht, 2011)
- [121] R.J.Spreitzer, M.E.Salvucci. *Annual Rev.Plant Biol.* **53**, 449(2002)
- [122] J.R.Evans, J.R.Seemann. In: *Photosynthesis.* Ed. Briggs W.R. (New York: Alan R. Liss Inc., 1989; p.183–205)

- [123] P.A.Kumar, M.A.J.Parry, R.A.C.Mitchell e.a. In: *Photosynthetic nitrogen assimilation and associated carbon and respiratory metabolism*. Ed.Foyer C.H., Noctor G. (Dordrecht: Kluwer, 2002; p.23)
- [124] A.Makino, H.Sakuma, E.Sudo, T.Mae. *Plant and Cell Physiol.* **44**, 952(2003)
- [125] T.Sugiyama, M.Mizuno, M.Hayashi. *Plant Physiol.* **75**, 665(1984)
- [126] R.F.Sage , R.W.Pearcy , J.R.Seemann. *Plant Physiol.* **85**, 355(1987)
- [127] R.F.Sage, R.K.Monson. *C4 Plant Biology*. (San Diego, Academic Press, 1999)
- [128] D.O.Hall, K.K.Rao. *Photosynthesis*. (Cambridge, Cambr.Univ.Press, 1999)
- [129] <https://www.rsc.org>
- [130] <https://en.wikipedia.org/wiki/Photosynthetic-efficiency>
- [131] R.T.Barber, A.K.Hilting. *History of the Study of Plankton Productivity*. (Oxford, Blackwell, 2002)
- [132] P.N.Pearson, M.R.Palmer. *Nature* **406**, 695(2000)
- [133] G.J.Retallack. *Nature* **411**, 287(2001)
- [134] P.G.Falkowski. *Sci.Am.* **287**, N22, 54(2002)
- [135] R.E.Zeebe, D.A.Wolf-Gladrow. *CO2 in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes*. (Amsterdam, Elsevier, 2001)
- [136] <https://en.wikipedia.org/wiki/ocean-storage-of-carbon-dioxide>
- [137] J.D. Pleil, M.A.G.Wallace, M.D.Davis, D.C.M.Matty.J. *Breath Res.* **15**, 042002(2021)
- [138] T.R.Malthus. *An Essay on the Principle of Population*. (London, St. Paul's Churchyard, 1798)
- [139] T.R.Malthus. *Principles of Political Economy Considered with a View of their Practical Application*. (London, John Murray, 1820)
- [140] <https://www.statista.com/statistics/263977/world-grain-production-by-type/>
- [141] <https://en.wikipedia.org/wiki/Cereal>
- [142] <https://www.worldometers.info/world-population/world-population-by-year>
- [143] M.Roser, H.Ritchie. <https://ourworldindata.org/food-supply>
- green**
- [144] R.M.Goody. *Atmospheric Radiation : Theoretical Basis*. (London, Oxford Univ.Press, 1964)
- [145] R.M.Goody, Y.L.Yung. *Principles of Atmospheric Physics and Chemistry* (New York, Oxford Univ.Press, 1995)
- [146] Б.М.Смирнов. Физика слабоионизованного газа. (Москва, Наука, 1978)
- [147] B.M.Smirnov. *Physics of Ionized Gases*. (New York, Wiley, 2001)

- [148] F.Reif. *Statistical and Thermal Physics*. (Boston, McGraw Hill, 1965)
- [149] L.D.Landau, E.M.Lifshitz. *Statistical Physics, vol.1*. (Oxford, Pergamon Press, 1980)
- [150] Б.М.Смирнов. *ЖЭТФ* **153**, 538(2018)
- [151] <https://www.cfa.harvard.edu/>
- [152] <http://www.hitran.iao.ru/home>
- [153] <http://www.hitran.org/links/docs/definitions-and-units>
- [154] G.Kirchhoff, R.Bunsen. *Annalen der Physik und Chemie* **109**, 275(1860)
- [155] B.M.Smirnov, D.A.Zhilyaev. *Foundation* **1**, 184(2021)
- [156] B.M.Smirnov. *Int.Rev.At.Mol.Phys.* **10**, 39(2019)
- [157] B.M.Smirnov. *J.Atmos.Sci.Res.* **2**, N4, 21(2019)
- [158] *Intergovernmental Panel on Climate Change. Nature* **501**, 297;298(2013)
(<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment?report/ar5/wg1/WGIAR5-SPM-brochure-en.pdf>)
- [159] D.A.Zhilyaev, B.M.Smirnov. *JETP* **133**, 687(2021)
§3
- [160] <https://yandex.ru/search/?text=международные угрозы 2020 мгимо>
- [161] Р.И.Нигматулин. *4 Э нашей жизни: экология, энергетика, экономика, этнос.* (Москва, ЛитТерра, 2015)
<https://www.labyrinth.ru/books/517837/?ysclid=lkw3j5cm2l408949752>
- [162] <https://www.ohiohistory.org/learn/education/resource-roundup/May-2017/humanityshindenburg>
- [163] <https://en.wikipedia.org/wiki/Hindenburg-disaster>
- [164] [https://ru.wikipedia.org/wiki/Hindenburg\(dirizhabl'\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Hindenburg(dirizhabl'))
- [165] <https://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage-hydroelectricity>
- [166] <https://en.wikipedia.org/wiki/Fischer-Tropsch-process>
- [167] <https://en.wikipedia.org/wiki/Syngas>
- [168] Б.М. Смирнов, Э. Е.Сон. *Известия РАН, Энергетика. № 2*, 16 (2020)
- [169] <https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone>
- [170] <https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone-layer>
- [171] Б.М. Смирнов. *УФН* **117**, 313(1975)
- [172] S.Chapman. *Mem.Royal.Meteorol.Soc.* **3**, 103(1930)
- [173] M.J.Molina, F.S.Rowland. *Nature* **249**, 810(1974)

- [174] Nobel Lectures in Chemistry 1991-1995. Ed.Bo.G.Malmström. (Singapore, World Scientific, 1997)
- [175] <https://en.wikipedia.org/wiki/Montreal-Protocol>
- [176] M.Griggs. *J.Chem.Phys.* **49**, 857(1968)
- [177] <https://en.wikipedia.org/wiki/Saline-water>
- [178] <https://en.wikipedia.org/wiki/Salinity>
- [179] <https://en.wikipedia.org/wiki/DuPoint>
- [180] <https://www.nbcnews.com/health/cancer/how-dupont-may-avoid-paying-clean-toxic-forever-chemical-n1138766>
- [181] Б.М.Смирнов. *Атмосфера Земли и энергетика.* (Москва, Знание, сер.физическая, 1979)
- [182] Б.М.Смирнов, Г.В.Шляпников. *УФН* **130**, 377(1980)