

ПРОБЛЕМЫ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ АТМОСФЕРЫ

© 2021 г. Б. М. Смирнов*

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

**E-mail: bmsmirnov@gmail.com*

Поступила в редакцию 21.09.2019 г.

После доработки 26.12.2019 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

Проанализированы изменения атмосферы Земли, влияющие на ее энергетику. Представлены результаты программ NASA по мониторингу углекислого газа в атмосфере и эволюции глобальной температуры, а также данные по измерениям эволюции локальной температуры в прошлом. На основе современной информации проанализированы глобальные энергетические процессы: естественные и в результате деятельности человека. Рассмотрены каналы установления равновесия между изменением массы атмосферного углекислого газа и изменением глобальной температуры, которые включают ослабление суммарной скорости фотосинтеза в результате уничтожения лесов, выбросы углекислого газа в атмосферу при сжигании горючих полезных ископаемых и парниковый эффект. На основе современной информации показано, что ни один из этих каналов не объясняет наблюдаемое накопление углекислого газа в атмосфере. Продемонстрирована несостоятельность климатических моделей изменения глобальной температуры в результате роста концентрации углекислого газа, которые поставлены в основу парижских соглашений по климату. Использование этих моделей основано на предположении, что спектры молекул углекислого газа и воды не пересекаются, и противоречит как данным, вытекающим из измерений по программам NASA, так и расчетам на основе спектроскопических параметров молекул из банка современных данных HITRAN. Представлена концепция Паулинга, согласно которой термодинамическое равновесие устанавливается между атмосферным углекислым газом и связанным углеродом на поверхности Земли. На основе этой концепции показан разный характер равновесия в прошлом и теперь. Так, в прошлом наиболее медленным процессом окисления связанного углерода на поверхности Земли было испарение растворенных в океане молекул углекислого газа, тогда как в настоящее время лимитирующим процессом является окисление находящихся в океанах карбонатов.

DOI: 10.31857/S0040364421030121

ВВЕДЕНИЕ

Проблема атмосферного углекислого газа заключается в выяснении причины его накопления в атмосфере. Действительно, непрерывный мониторинг атмосферного углекислого газа, проводимый в расположенной на Гавайях обсерватории Мауна Лоа, которая входит в структуру NASA, показывает, что со времени основания этой обсерватории в 1959 г. концентрация молекул углекислого газа в атмосфере монотонно увеличивается (если не учитывать сезонных осцилляций). За время наблюдений эта величина выросла с 316 ppm в 1959 г. до 411 ppm в 2019 г. [1]. В качестве единицы измерения концентрации молекул используются 1 ppm, равный одной молекуле на миллион молекул воздуха, или 1 ГтС, что означает массу углерода в атмосфере, равную гигатонне, или 10^{15} г. При этом 1 ppm = 2.1 ГтС, так что современная атмосфера содержит примерно 880 ГтС.

Углекислый газ находится в равновесии с поверхностью Земли, которая усваивает углекислый газ, переводя его в твердые формы углерода в результате фотосинтеза. При разложении образу-

ющихся в результате этого соединений углерода в растениях и питательной среде этот углерод возвращается в атмосферу в виде углекислого газа. Современное значение скорости фотосинтеза на Земле находится в интервале между 150 и 175 ГтС/год [2]. Поэтому среднее время нахождения молекулы углекислого газа в атмосфере составляет 5–6 лет. За это время углекислый газ перемешивается с атмосферным воздухом, так что концентрация углекислого газа в атмосфере не зависит от места наблюдения, если оно находится вдали от источников и поглотителей углекислого газа.

Концентрация углекислого газа в атмосфере в настоящее время монотонно увеличивается с начала индустриального периода, причем в 1750 г. она составляла (277 ± 3) ppm, а в 1870 г. (288 ± 3) ppm [3]. Можно считать, что в начале индустриального периода концентрация углекислого газа составляла примерно 280 ppm и с тех пор росла с ускорением, увеличившись к настоящему времени почти в полтора раза. Если наблюдающаяся в последние сорок лет скорость роста сохранится, то

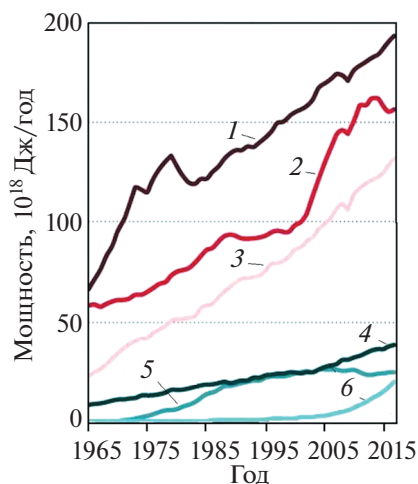


Рис. 1. Типы современной энергетики и их мощность [4, 5]: 1 – нефть, 2 – уголь, 3 – газ, 4 – ГЭС, 5 – АЭС, 6 – солнечная и ветровая энергетика.

время удвоения концентрации углекислого газа в атмосфере составит 120 лет.

Казалось бы, имеются два механизма для роста концентрации углекислого газа. Во-первых, в результате добычи и использования горючих ископаемых углерод из недр Земли включается в равновесие между углекислым газом атмосферы и связанным углеродом на поверхности Земли. Тем самым увеличивается полная масса углерода, участвующая в равновесии, а вместе с ней увеличивается и масса углекислого газа в атмосфере. Во-вторых, вырубка и горение лесов приводит к уменьшению скорости фотосинтеза и, соответственно, к увеличению массы углекислого газа в атмосфере.

Изменения концентрации углекислого газа в атмосфере и глобальной температуры связаны между собой в силу равновесия между атмосферным углекислым газом и связанным углеродом в соединениях, находящихся на поверхности суши и океана. Цель работы – проанализировать эту связь.

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА ПЛАНЕТЫ

Мощности различных типов современной энергетики представлены на рис. 1 [4, 5]. Основной вклад в современную энергетику (более 80%) дают горючие ископаемые. Их большая часть используется в энергетических установках, где в конечном итоге это топливо превращается в углекислый газ, который переходит в атмосферу и частично сразу же поглощается поверхностью Земли. Поскольку флуктуации скорости этих процессов большие и могут исказить представление о соотношении скоростей конкурирующих процессов, далее приводятся их значения, осредненные за декаду – с 2008 по 2017 гг. [4, 5].

Итак, в соответствии с [4, 5] поток углерода в результате сжигания ископаемого топлива составляет 9.4 ГтС/год, а в результате аграрной деятельности человека в оборот попадает 1.5 ГтС/год. Далее 4.7 ГтС/год поглощается океаном, 2.4 ГтС/год усваивается сушей, а 3.8 ГтС/год остается в атмосфере. Затем этот углерод перераспределяется между данными каналами, однако это происходит за времена, превышающие характерное время фотосинтеза $t_{\phi} = 5$ лет. Отметим отсутствие баланса между приведенными потоками, поскольку он устанавливается также за счет естественных потоков для рассмотренных каналов.

Полная мощность, расходуемая человеком в настоящее время, не превышает 2×10^{13} Вт, если сюда включить органическую массу, получаемую в результате аграрной деятельности человека (рис. 1). Эта величина на четыре порядка меньше полной мощности солнечного излучения, попадающего в атмосферу Земли. Отсюда можно сделать вывод, что в глобальном плане энергетическая деятельность человека не проявляется в окружающей природе.

Локальная энергетика тем не менее может быть заметной. Для оценки можно отнести расходуемую мощность к числу людей, что дает несколько менее 3 кВт на человека. Если считать, что эта мощность расходуется там, где человек обитает, получается в городах и мегаполисах удельная мощность локального энерговыделения на два порядка величины меньше, чем дает солнечная энергия или тепловое излучение поверхности Земли. Если добавить эту мощность к мощности теплового излучения Земли, то получается, что за счет энергетики, связанной с человеком, локальная температура Земли в области обитания человека возрастет на несколько градусов по сравнению с их окружением. Действительно, такое наблюдается для больших городов и мегаполисов. По мере роста мегаполисов это может превратиться в проблему.

На рис. 2 приводится эволюция скорости выброса углекислого газа в атмосферу в результате сжигания ископаемого топлива [4, 5]. Поскольку флуктуации в изменениях этой величины заметные, следует использовать только среднее значение для наращивания скорости этого процесса. Пусть [6] удвоение скорости рассматриваемого процесса составляет 40 лет. На основе этого определяется полная масса углерода M , взятая из недр Земли и включенная в углерод, находящийся на поверхности Земли и в атмосфере, между которыми поддерживается равновесие:

$$M = \frac{9.4 \times 40}{\ln 2} = 540,$$

где масса углерода, введенного в атмосферу и на поверхность Земли, выражена в ГтС.

Очевидно, часть этой массы углерода переходит в атмосферу в результате равновесия между атмосферой и поверхностью Земли. Эта часть

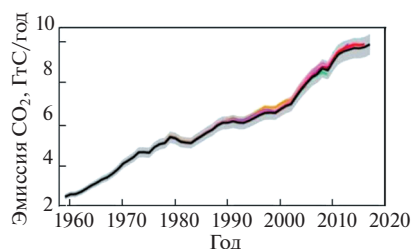


Рис. 2. Суммарная эмиссия углекислого газа в атмосферу в результате сжигания ископаемого топлива [4, 5].

приводит к увеличению концентрации углекислого газа в атмосфере, которая с 1959 по 2019 гг. изменилась на 220 ГтС. Тем самым на поверхность Земли приходится 320 ГтС. Казалось бы, отсюда можно получить характерное время перехода углерода с поверхности Земли в атмосферу из равновесия между ними, которое составляет 7–8 лет, если время усвоения атмосферного углекислого газа в результате фотосинтеза составляет $t_{\text{ф}} = 5$ лет. Однако полученный результат противоречив. Во-первых, вызывает сомнение столь малое время нахождения связанного углерода на поверхности Земли. Но основное возражение связано с разными временами нарастания концентрации углекислого газа в атмосфере и выброса углерода из недр планеты в систему атмосфера–поверхность Земли. Время удвоения массы углерода в атмосфере Земли в составе углекислого газа составляет сегодня примерно 120 лет, а время удвоения массы углерода, инжектируемой в атмосферу в результате сжигания горючих ископаемых, равно примерно 40 лет. Это означает, что за время удвоения инжектируемой массы углерода время жизни связанного углерода на поверхности Земли существенно уменьшится.

Этот факт можно было бы связать с уменьшением площади лесов на поверхности Земли и, соответственно, с уменьшением скорости фотосинтеза, в результате которого атмосферный углерод переводится в связанные формы на поверхности Земли. Действительно, горение лесов и их вырубка в течение последних десятилетий происходит в больших масштабах [6, 7].

Изменение площади лесов относительно невелико (рис. 3) [8]. При этом основной вклад в процесс фотосинтеза на поверхности Земли, который составляет несколько процентов [9, 10], вносят тропические леса. Тем не менее, согласно рис. 3, это изменение невелико. Действительно, во-первых, наиболее эффективный фотосинтез, который носит сезонный характер, имеет место на определенной стадии развития леса. Во-вторых, наряду со странами с бесхозяйственным отношением к лесу, где они горят каждый год, имеются другие страны, где производится реновация леса и лесопосадки. Рис. 3 отражает среднее положение, где

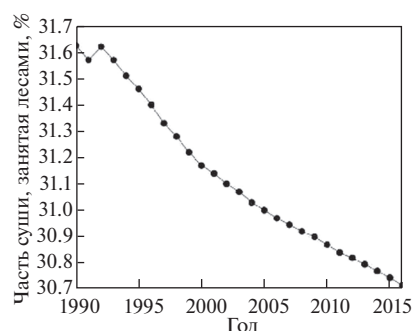


Рис. 3. Данные всемирного банка о доле суши, занятой лесами [8].

за 26 лет площадь лесов уменьшилась на 3%, т.е. характерное время, за которое площадь лесов уменьшается вдвое, составляет сотни лет. Поэтому последующим изменением вклада лесов в изменение массы углекислого газа в атмосфере можно пренебречь.

ГЛОБАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА В НАСТОЯЩЕМ И ПРОШЛОМ

Изменение массы атмосферного газа можно связать с изменением глобальной температуры, т.е. температуры поверхности Земли, осредненной по географическим координатам, времени суток и сезону. Глобальная температура характеризует состояние Земли как планеты в целом, так что изменение глобальной температуры с годами свидетельствует об эволюции теплового состояния планеты. Наиболее подходящий метод определения эволюции глобальной температуры основан на сравнении разности температур для данной точки на поверхности Земли, но в одинаковое время суток и время сезона с последующим осреднением по географической координате и времени [11], а не сравнением средних глобальных температур. Это позволяет уменьшить флуктуации в изменении глобальной температуры на порядок величины.

Рис. 4 показывает изменение глобальной температуры за последние 150 лет. Из этих и других данных следует, что первые сто лет этого временного интервала характеризовались небольшим изменением глобальной температуры, тогда как последние сорок лет наблюдается резкое изменение этого параметра примерно на 0.6 К. В процессе эволюции глобальной температуры наблюдаются ее флуктуации, составляющие 0.1–0.2 К. В дополнение к этому табл. 1 содержит рассматриваемые изменения средней температуры в последние годы для суши и океанов, а также для северного и южного полушарий [13, 14]. Отсюда следует существенно неоднородное изменение глобальной температуры, которое резко зависит от локальных условий. Поэтому все выводы о ха-

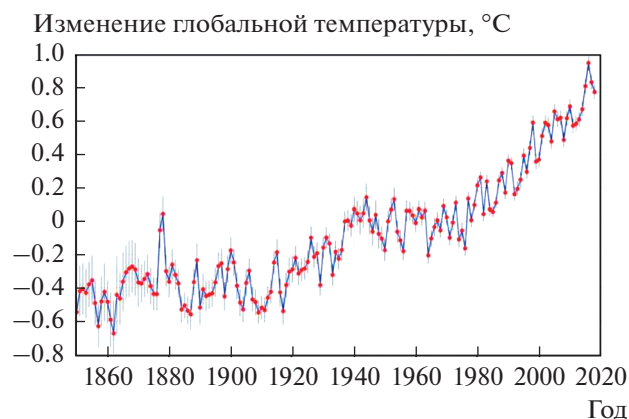


Рис. 4. Изменение глобальной температуры Земли, где в качестве нуля берется средняя температура за 1951–1980 гг. [12].

рактуре эволюции глобальной температуры носят скорее качественный характер.

Эволюция глобальной температуры коррелирует с изменением концентрации углекислого газа в атмосфере, что в первую очередь следует из корреляции эволюций этих параметров в прошлом. В частности, на рис. 5 представлены эволюции локальной температуры Антарктиды и концентрации углекислого газа в этой области на основании данных, полученных из анализа пузырьков воздуха, находящихся в отложениях льда, которые извлечены в районе метеостанции “Восток” [15]. В этом случае полученная концентрация углекислого газа соответствует его концентрации в пузырьках, а температура определяется на основе заселенности изотопа кислорода ^{18}O .

Наряду с корреляцией между изменениями температуры и концентрации атмосферного углекислого газа, рис. 5 показывает, что в прошлом в конце ледникового периода наблюдались резкие изменения температуры, подобные наблюдаемому для глобальной температуры в последние десятилетия. Однако в прошлом скачок температуры был на порядок выше, чем в настоящее время. С другой стороны, концентрации молекул атмо-

сферного углекислого газа в прошлом (рис. 5) были в полтора–два раза ниже, чем в настоящее время. Этот факт можно связать с хозяйственной деятельностью человека.

При этом годовые изменения концентрации молекул атмосферного углекислого газа испытывают большие флуктуации, как это следует из рис. 6 [1, 16], где приводятся результаты измерений в структуре NASA. На основе выполненных измерений в рамках программы NASA можно также определить изменение глобальной температуры при удвоении концентрации молекул атмосферного углекислого газа, которое составляет [17]

$$\Delta T = 2.5 \pm 0.4 \text{ К.} \quad (1)$$

Данное выражение продолжает результаты измерений для эволюции глобальной температуры и концентрации атмосферного углекислого газа в последние десятилетия и поэтому использует предположение, что наряду с удвоением массы атмосферного углекислого газа происходит пропорциональное увеличение содержания других компонент.

Одним из каналов, обеспечивающих рост глобальной температуры в результате изменения состава атмосферы, является парниковый эффект. Действительно, рост концентрации парниковых компонент атмосферы вызывает увеличение потока инфракрасного излучения из атмосферы на поверхность Земли и тем самым увеличение глобальной температуры. Целью последующего анализа является выяснить, какой вклад в это изменение вносит рост концентрации углекислого газа.

ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ В ИЗМЕНЕНИИ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рост концентрации углекислого газа в атмосфере вызывает увеличение потока инфракрасного излучения на поверхность Земли, что в свою очередь ведет к росту глобальной температуры. На рис. 7 приведен характер приращения потоков излучения на поверхность Земли при удвоении концентрации углекислого газа по мере увеличения частоты излучения [18, 19] за счет молекул углекислого газа и изменение суммарного потока излучения при использовании модели стандарт-

Таблица 1. Изменение глобальной температуры Земли, где в качестве нуля берется средняя температура за 20-й век [13, 14]

| | Земля | Северное полушарие | Южное полушарие |
|---------------|-------|--------------------|-----------------|
| Май 2018 г. | | | |
| Суша | 1.21 | 1.27 | 1.06 |
| Океаны | 0.60 | 0.69 | 0.54 |
| Суша + океаны | 0.77 | 0.91 | 0.62 |
| Май 2019 г. | | | |
| Суша | 1.16 | 1.25 | 1.13 |
| Океаны | 0.73 | 0.81 | 0.69 |
| Суша + океаны | 0.85 | 0.93 | 0.77 |

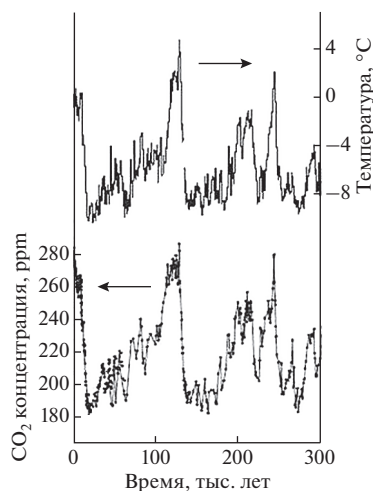


Рис. 5. Эволюция локальной температуры в районе станции “Восток” (Антарктида) и концентрация углекислого газа в этом районе [15].

ной атмосферы. На основании этих данных можно проследить характер увеличения потока излучения на Землю в результате изменения концентрации парникового газа. Основная полоса эмиссии углекислого газа включает три колебательных перехода с изменением на единицу деформационного колебательного состояния. Эта полоса простирается примерно от 580 до 750 см⁻¹.

Изменение потока излучения определяется областью спектра вблизи границы полосы, где оптическая толщина атмосферы порядка единицы. Действительно, для основной части полосы поглощения, где оптическая толщина много больше единицы, температура излучения соответствует температуре области атмосферы вблизи поверхности, откуда излучение способно дойти до поверхности Земли, не поглотившись по дороге. Увеличение потока излучения, создаваемого молекулами углекислого газа, на каждой границе полосы поглощения изменяется примерно на 3 Вт/м² (рис. 7). Однако на красной границе полосы поглощения это увеличение для полного потока излучения в заметной степени компенсируется за счет уменьшения потока излучения, создаваемого молекулами воды, так что изменение суммарного потока излучения за счет этой части спектра составляет примерно 0.1 Вт/м². В области голубой границы полосы поглощения молекул углекислого газа создаваемый ими поток излучения в меньшей степени компенсируется уменьшением благодаря молекулам воды и микрокаплям воды, образующим облака. Поэтому изменение суммарного потока за счет этой границы полосы поглощения существенно больше и составляет примерно 0.8 Вт/м².

Отметим заметный вклад в изменение потока излучения области спектра вблизи лазерных ли-

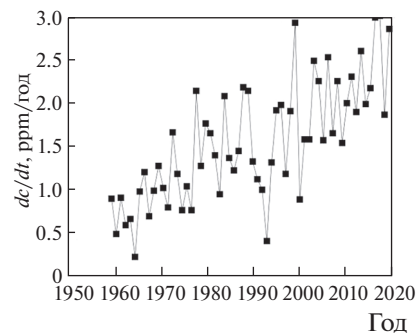


Рис. 6. Годовые изменения концентрации углекислого газа в атмосфере Земли согласно мониторингу, выполняемому в обсерватории Mauna Loa [1, 16].

ний 9.4 мкм и 10.6 мкм, который составляет примерно четверть от суммарного изменения потока. Оптическая толщина атмосферы благодаря молекулам углекислого газа в этой области спектра меньше единицы при существующих температурах, и эта область спектра дает малый вклад как в поток излучения, создаваемый молекулами углекислого газа, так и в изменение этого потока при изменении концентрации этих молекул. Однако в этой области спектра отсутствует поглощение молекулами воды.

Более детальное понимание роли парникового эффекта в тепловом балансе Земли следует из данных табл. 2 [20], где приведены парциальные изменения потоков излучения из атмосферы на поверхность Земли, создаваемых молекулами углекислого газа $\Delta J(\text{CO}_2)$, молекулами воды $\Delta J(\text{H}_2\text{O})$, микрокаплями воды ΔJ_{cl} , которые составляют облака, а также суммарное изменение потока излучения атмосферы на поверхность Земли ΔJ_i при удвоении концентрации молекул углекислого газа в атмосфере. Эти величины для интервала частот между ω_1 и ω_2 вводятся как

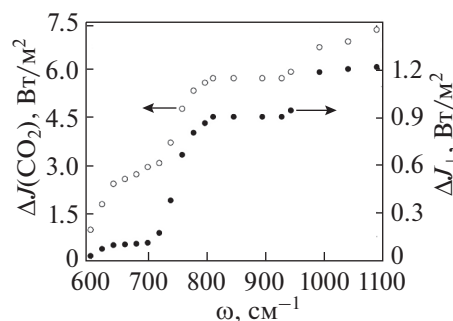


Рис. 7. Изменения потока излучения, создаваемого молекулами углекислого газа $\Delta J(\text{CO}_2)$, и изменение суммарного потока инфракрасного излучения ΔJ_i в результате удвоения концентрации углекислого газа в атмосфере по мере увеличения частоты излучения [18, 19] для модели стандартной атмосферы.

Таблица 2. Изменения парциальных потоков излучения атмосферы на поверхность Земли за счет разных парниковых компонент атмосферы

| Область частот, см ⁻¹ | $\Delta J(\text{CO}_2)$, Вт/м ² | $\Delta J(\text{H}_2\text{O})$, Вт/м ² | ΔJ_{cl} , Вт/м ² | ΔJ_t , Вт/м ² |
|-------------------------------------|--|---|---|-------------------------------------|
| 580–660 | 2.55 | -2.38 | -0.07 | 0.10 |
| 660–740 | 1.15 | -0.46 | -0.42 | 0.27 |
| 740–800 | 1.88 | -0.14 | -1.25 | 0.49 |
| 800–1000 | 1.11 | -0.04 | -0.77 | 0.30 |
| 1000–1100 | 0.55 | 0 | -0.39 | 0.16 |
| Сумма | 7.24 | -3.02 | -2.90 | 1.32 |

Таблица 3. Изменения парциальных потоков излучения атмосферы на поверхность Земли, рассчитанные по разным моделям

| Модель | ΔJ , Вт/м ² |
|------------|--------------------------------|
| 1 [20] | 1.3 ± 0.1 |
| 2 [21] | 1.3 ± 0.3 |
| 3 [18, 22] | 1.4 ± 0.3 |
| 4 [19] | 1.3 ± 0.1 |

$$\Delta J = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \Delta J_{\omega} d\omega, \quad (2)$$

где ΔJ_{ω} – изменение потока излучения за счет данной парниковой компоненты, приходящееся на единицу частот. Кроме того, имеет место следующее соотношение:

$$\Delta J_t = \Delta J(\text{CO}_2) + \Delta J(\text{H}_2\text{O}) + \Delta J_{\text{cl}}.$$

Рассмотрим чувствительность изменения суммарного потока излучения на поверхность Земли в результате удвоения концентрации углекислого газа к используемой модели при расчете этой величины. Такой анализ представлен в табл. 3, где даются значения изменения потока, рассчитанные на основе разных моделей. При этом во всех используемых моделях суммарный коэффициент поглощения является суммой коэффициентов поглощения для трех парниковых компонент, а также для современного содержания парниковых компонент в атмосфере берется за основу энергетический баланс Земли и ее атмосферы, согласно которому полный поток излучения на поверхность Земли составляет $J = 327 \text{ Вт/м}^2$.

При этом модель [20] предполагает, что коэффициент поглощения за счет молекул и микрокапель воды усреднен по спектру, а коэффициент поглощения молекул углекислого газа усреднен по осцилляциям для переходов между соседними вращательными состояниями, тогда как в модели [21] нет такого усреднения. В этих случаях справедлива модель полосы поглощения, согласно которой для частот внутри этой полосы поглощение определяется молекулами углекислого газа, а вне ее молекулы углекислого газа не дают вклада

в излучение атмосферы. Эта полоса поглощения находится в области частот 580–750 см⁻¹, тогда как лазерная область частот дает вклад примерно 30% в изменение потока излучения атмосферы. Чтобы учесть этот факт, значения, полученные на основе моделей 1 и 2, увеличены на 30%.

В модели 3 [18, 22] спектр молекул воды, как и молекул углекислого газа, учитывается и берется из банка спектроскопических данных HITRAN, тогда как используется однородное распределение микрокапель воды по высотам. В модели 4 [19] предполагается, что облака, содержащие микрокапли воды, образуют плотный слой, начиная с некоторой высоты. Эта высота определяется из условия, что полный поток излучения на поверхность Земли при современном содержании парниковых компонент в атмосфере составляет $J = 327 \text{ Вт/м}^2$.

Рассмотренные модели (табл. 3) приводят к близким значениям изменения суммарного потока излучения на поверхность Земли в результате удвоения концентрации углекислого газа, несмотря на существенно разные модельные предположения. Это изменение может быть переведено в изменение глобальной температуры, которая носит название равновесной чувствительности климата и составляет [21]

$$EA = 0.6 \pm 0.3 \text{ К}. \quad (3)$$

Большая ошибка в переходе к глобальной температуре связана с неопределенностью самого переводного фактора между изменением потока излучения и глобальной температурой, который носит название чувствительности климата [23]. Эта величина зависит от ряда факторов и чувствительна к их изменениям.

Выясним, к какому изменению глобальной температуры привело изменение концентрации углекислого газа с конца 19-го века, когда оно было равно 288 ppm [3] до значения 411 ppm в 2019 г. [1]. Это ведет к изменению глобальной температуры

$$\Delta T = 0.30 \pm 0.15 \text{ К}. \quad (4)$$

Реальное изменение глобальной температуры за это время составляет

$$\Delta T = 0.8 \pm 0.1 \text{ К}. \quad (5)$$

Согласно климатологическим компьютерным программам, статистическое усреднение равновесной чувствительности климата соответствует [24]

$$EA = 3.0 \pm 1.5 \text{ К}. \quad (6)$$

Это ведет к следующему изменению глобальной температуры с конца 19-го века до настоящего времени в результате роста концентрации молекул углекислого газа в атмосфере

$$\Delta T = 1.5 \pm 0.8 \text{ К}. \quad (7)$$

Данное значение находится в некотором противоречии с величиной (4), характеризующей реальное изменение глобальной температуры, тем более что имеются другие факторы, ответственные за изменение глобальной температуры. Тем

не менее проанализируем причину, приводящую к столь сильному расхождению значений равновесной чувствительности климата, т.е. различия между (3) и (6).

Если рассматривать противоречие между данными (3) и (6) с позиций табл. 2, возникает подозрение, что в компьютерных климатологических программах вместо изменения полного потока излучения ΔJ используется изменение потока за счет излучения молекул углекислого газа $\Delta J(\text{CO}_2)$. Другими словами, климатологические расчеты основаны на сложных компьютерных программах, в основе которых находится концепция Аррениуса из его работы [25] конца 19-го века. На той стадии понимания процессов эмиссии атмосферы Аррениус отождествлял изменение потока излучения из атмосферы за счет изменения концентрации молекул углекислого газа с изменением потока излучения из атмосферы, создаваемого молекулами углекислого газа. Это означает, что спектры поглощения для молекул углекислого газа и воды разделены, что было правильно для рассмотренных Аррениусом резонансных переходов, отличных от переходов, ответственных за тепловое излучение атмосферы.

Более внимательный анализ данной проблемы был выполнен в 1956 г. в серии работ (в частности, [26]) на основе существовавшей тогда информации о спектроскопии молекул углекислого газа и воды. В [25] сделан вывод, что взаимодействие спектров молекул воды и углекислого газа приводит к уменьшению изменения потока теплового излучения атмосферы на 20%. Далее это было включено в современные климатологические программы. На самом деле поток теплового излучения из атмосферы в результате данного эффекта уменьшается в 5–6 раз, что в корне меняет практическое значение данного эффекта.

ХАРАКТЕР РАВНОВЕСИЯ ДЛЯ АТМОСФЕРНОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Проведенный выше анализ показывает в соответствии с формулами (1) и (2), что парниковый эффект за счет увеличения массы атмосферного углекислого газа не может быть ответственным за наблюдаемое нагревание планеты, но влияет на него. Наблюдаемый рост концентрации углекислого газа в атмосфере в 20-м веке трудно связать с уменьшением скорости глобального фотосинтеза или сжиганием горючих ископаемых, хотя это и представляется наиболее подходящим объяснением накопления углекислого газа в атмосфере. В связи с этим проанализируем изменение концентрации углекислого газа в атмосфере, привлекая к его объяснению другие факты.

Концентрация углекислого газа в атмосфере устанавливается в результате процессов, уравнивающих содержание углерода на поверхности Земли и в атмосфере. Именно в результате

процессов фотосинтеза углекислый газ превращается в твердый углерод, входящий в состав органических соединений на поверхности Земли, а в результате процессов окисления твердый углерод переходит в атмосферу в составе углекислого газа. На рис. 8 приведены скорости соответствующих процессов, относящихся к концу 20-го века. Как видно, вклад деятельности человека в поток углекислого газа в атмосферу составлял примерно 5%. Хотя ревизия скорости фотосинтеза [2] ведет к уменьшению этой величины, а выбросы углекислого газа в атмосферу в результате хозяйственной деятельности человека увеличились, вывод о малом вкладе человека в потоки углерода сохраняется.

Для того чтобы понять, как формируются выбросы углекислого газа в атмосферу, представим на рис. 9 величины этих потоков. Суммарный поток углекислого газа в атмосферу, приведенный на рис. 9 (кривая 1), складывается из потоков за счет промышленной и сельскохозяйственной деятельности человека, причем промышленная (2 на рис. 9) в основном определяется сжиганием горючих ископаемых. Далее этот углекислый газ превращается в твердый углерод в результате фотосинтеза или же остается в атмосфере в виде углекислого газа. Скорость накопления углекислого газа в атмосфере представлена на рис. 9 кривой 3. Как видно, в атмосфере остается более 40% выбросов углекислого газа.

Вклад сельскохозяйственной деятельности человека в выбросы углекислого газа в атмосферу уменьшался со временем. Так, согласно [4, 5], выбросы углекислого газа в атмосферу за период с 1750 г. по 2017 г. за счет индустриальной (сжигание горючих ископаемых), сельскохозяйственной деятельности и суммарные выбросы составили соответственно 430 ± 20 , 235 ± 95 и 680 ± 95 ГтС/год. За период с 1959 г. по 2017 г. эти величины соответствовали 350 ± 20 , 80 ± 40 и 430 ± 45 ГтС/год. Как видно, роль сельского хозяйства в рассматриваемых процессах заметно падает по мере развития цивилизации. Для сравнения отметим также, что современное содержание углерода в атмосфере в виде углекислого газа составляет около 900 ГтС/год. Тем самым, хотя и наблюдается заметное изменение содержания углекислого газа в атмосфере за индустриальный период, оно не столь велико.

ЭВОЛЮЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРНОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Чтобы понять характер влияния человека на накопление углекислого газа в атмосфере, построим простую математическую схему, связывающую концентрацию атмосферного углекислого газа и глобальную температуру. Обозначим A массу углерода в атмосферном углекислом газе. Объединим океан и сушу, введя массу углерода m , который находится на поверхности Земли и участ-

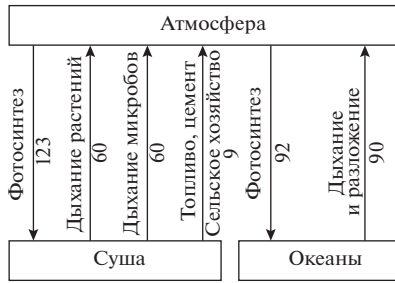


Рис. 8. Баланс углерода в результате химического равновесия между атмосферой и поверхностью Земли [27]; числа – потоки между атмосферой Земли и ее поверхностью в ГтС/год.

вует в обмене углеродом между поверхностью Земли и атмосферой. Можно считать $m \gg A$, поскольку на поверхности Земли находится большее количество связанного углерода. В частности, масса углерода, растворенного в океане и находящегося там в виде соединений углерода, составляет примерно 380000 ГтС.

Вводя скорость окисления углерода j , находящегося в связанном состоянии на поверхности Земли, где скорость окисления нормирована на концентрацию углерода, получим уравнения баланса для концентрации молекул атмосферного углекислого газа c

$$\frac{dc}{dt} = j - \frac{c}{t_{\phi}}.$$

Отсюда для концентрации молекул углекислого газа, находящегося в равновесии со связанным углеродом на поверхности Земли, следует равенство

$$c = jt_{\phi}.$$

Это соотношение справедливо, если масштаб рассматриваемых времен значительно превышает характерное время нахождения молекулы углекислого газа в атмосфере t_{ϕ} . По сути дела, это соотношение описывает равновесие между углеродом, входящим в состав углекислого газа атмосферы, и связанным углеродом в составе органических соединений на поверхности Земли. Оно может быть представлено в виде

$$\frac{A}{t_{\phi}} = \frac{m}{t_{\text{ок}}},$$

где $t_{\text{ок}}$ – время окисления связанного углерода на поверхности Земли.

Пусть между атмосферным углекислым газом и связанным углеродом, находящимся на поверхности Земли в виде соединений углерода, установлено равновесие. При этом поток углекислого газа в атмосферу создается в результате медленного окисления этих соединений. Очевидно, этот процесс имеет тепловую природу. Тогда можно воспользоваться концепцией Паулинга [28, 29],

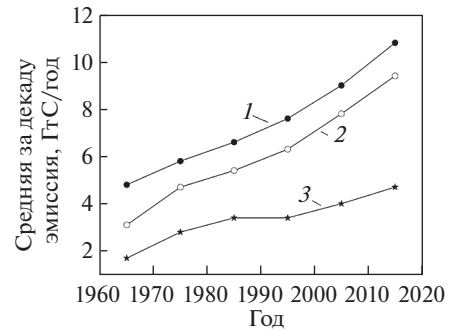


Рис. 9. Глобальная, средняя за десятилетие эмиссия углекислого газа в атмосферу: 1 – суммарная, 2 – в результате сжигания горючего топлива, 3 – остающаяся в атмосфере [4, 5].

согласно которой между связанным и свободным углекислым газом устанавливается термодинамическое равновесие. Поскольку масса углерода в атмосфере мала, зависимость концентрации углекислого газа от глобальной температуры имеет вид

$$c \sim \exp\left(-\frac{\Delta H}{T}\right), \quad \frac{dc}{dt} = c \frac{\Delta H}{T^2} \frac{dT}{dt},$$

где ΔH – энтальпия процесса перехода атома углерода с поверхности Земли в атмосферу. Отсюда получаем следующую связь между энтальпией перехода и изменениями рассматриваемых величин

$$\Delta H = T^2 \frac{d \ln c}{dT}.$$

Проверим в рамках этой формулы данные рис. 6 для Антарктиды в прошлом, а также современные данные. Согласно данным по Антарктиде, на основании рис. 5 в области сильного потепления, когда температура повысилась на величину $\Delta T = 12$ К, средняя температура равна $T = 271$ К, а концентрация углекислого газа изменилась с 180 на 280 ppm. Это дает для энтальпии окисления твердого углерода $\Delta H = 0.21$ эВ, что грубо соответствует растворению молекул углекислого газа в воде.

Теперь рассмотрим с тех же позиций изменение глобальной температуры, а также эволюцию концентрации атмосферного углекислого газа в современной атмосфере. В данном случае

$$\frac{d \ln c}{dt} = (5.02 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ 1/год},$$

$$\frac{dT}{dt} = 18 \pm 3 \text{ мК/год}.$$

Это дает $\Delta H = 2.0 \pm 0.2$ эВ, что соответствует образованию карбонатов в морской воде. Таким образом, в прошлом и в настоящее время наблюдается разный характер равновесия между атмосферным углекислым газом и связанным углеродом на поверхности Земли.

Как следует из проведенного сравнения, характер установления равновесия между связанным углеродом на поверхности Земли и углекислым газом атмосферы в настоящее время принципиально отличается от того, что было в прошлом. Для определенности в качестве поверхности Земли, с которой устанавливается равновесие углерода, возьмем океан, и, если судить по величине энтальпии окисления углерода, в прошлое время связанный углерод представлял собой растворенный в океане углекислый газ, тогда как в настоящее время связанный углерод входит в состав растворенных в океане карбонатов. Если принять эту точку зрения, можно считать, что в настоящее время в океане растворено достаточное количество катализатора в виде радикалов, которые переводят растворенный углекислый газ в карбонаты. Тем самым разницу между прошлым и настоящим составляет относительно высокая плотность радикалов в природе, которая является результатом деятельности человека.

Можно ожидать, что заметное повышение концентрации химически активных соединений, которое изменило характер химических процессов, ответственных за состояние атмосферы, произошло в конце 20-го века. Действительно, согласно данным рис. 4, высокая скорость изменения глобальной температуры установилась в 1980-е годы. Другой пример такого рода приведен на рис. 10, где изображена эволюция площади нижнего яруса облаков и интенсивности космических лучей [30–33]. Аномалии связаны с той частью космических лучей, которые создаются Солнцем или проходят через него. Космические лучи, которые попадают в атмосферу Земли, вступают в ядерную реакцию в верхней части тропосферы и вызывают ионизацию атмосферы. Образованные под действием космических лучей ионы являются ядрами конденсации в атмосфере.

Как следует из данных рис. 10, влияние изменений интенсивности космических лучей на среднюю облачность проявлялось в 22-м 11-летнем солнечном цикле, тогда как в следующем 23-м солнечном цикле корреляции между этими величинами не наблюдалось. Такой факт можно объяснить появлением в атмосфере достаточной плотности химически активных молекул, которые также становятся ядрами конденсации и конкурируют в 23-м солнечном цикле в этом процессе с атмосферными ионами, образующимися под действием космических лучей.

Из проведенного анализа следует, что глобальные изменения на Земле и в атмосфере происходят за счет химически активных соединений в атмосфере, которые, несмотря на относительно малое их количество в атмосфере, влияют на разные атмосферные процессы, такие как образование смога, процессы конденсации, парниковый эффект и другие. Эти соединения и радикалы образуются в результате хозяйственной и бесхозяй-

ственной деятельности человека. Как показано выше, углекислый газ, образующийся в энергетических процессах при сжигании горючих ископаемых, в основном поглощается растениями и океанами в результате фотосинтеза, а наблюдаемый рост концентрации атмосферного углекислого газа со временем в соответствии с концепцией Паулинга связан с нагреванием Земли, которое в свою очередь определяется более тонкими процессами. Все это требует более детального изучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Согласно представленным выше результатам, имеет место глобальное потепление, а также рост концентрации углекислого газа в атмосфере, которая заметно превышает соответствующие значения в доиндустриальный период. Необходимо понять причины этих изменений, а также степень их опасности. Казалось бы, причину этих изменений можно установить простым способом, исходя из тех изменений, к которым приводит хозяйственная деятельность человека.

Во-первых, бесхозяйственное отношение к лесам в ряде стран сопровождается вырубкой и горением, а сокращение площади лесов уменьшает скорость фотосинтеза на поверхности Земли и тем самым скорость вывода углекислого газа из атмосферы. Однако измерения показывают слишком медленное уменьшение площади лесов со временем, так что рост концентрации углекислого газа в атмосфере не связан с проблемой лесов.

Во-вторых, рост концентрации молекул углекислого газа в атмосфере мог бы быть связан с “углеродной” энергетикой, связанной с добычей горючих ископаемых, которые извлекаются из недр Земли и вовлекаются в процессы, устанавливающие равновесие между атмосферным углекислым газом и связанным углеродом на поверхности Земли. За последний век в результате сжигания горючих ископаемых в атмосферу Земли выброшено примерно 540 ГтС, т.е. углерода в составе молекул углекислого газа, а содержание углерода в атмосфере в составе указанных молекул увеличилось примерно на 200 ГтС. Поскольку инжектируемый в атмосферу углекислый газ в соответствии с пропорциями углерода в атмосфере и на поверхности Земли далее в основном переходит на поверхность, такой механизм накопления углекислого газа в атмосфере не реализуется. Еще более сильным аргументом против этого механизма является то, что время удвоения массы углекислого газа в атмосфере (примерно 120 лет) заметно превышает время удвоения массы сжигаемых горючих ископаемых в единицу времени (40 лет), что отвергает данный механизм.

В-третьих, за увеличение глобальной температуры мог бы быть ответственным парниковый эффект, если рост массы атмосферного углекислого газа имеет антропогенный характер. Однако

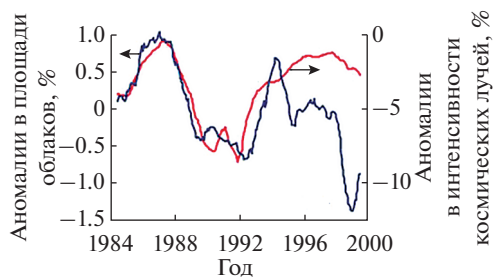


Рис. 10. Корреляция между интенсивностью космических лучей и площадью нижнего яруса облаков [30–33].

современный рост массы атмосферного углекислого газа вызывает повышение глобальной температуры в результате парникового эффекта, который в 4–5 раз меньше наблюдаемого. Тем самым приходится отказаться и от этого механизма как ответственного за наблюдаемое повышение глобальной температуры.

Таким образом, анализ современной информации заставляет отказаться от простых механизмов связи между ростом массы углекислого газа в атмосфере и глобальной температурой. Более вероятно, что равновесие между атмосферным углекислым газом и связанным углеродом на поверхности Земли изменяется в результате изменения процессов, ответственных за это равновесие. В частности, на основе полученных значений эффективной энтальпии окисления твердого углерода в прошлом и теперь можно считать, что ранее это происходило через растворенный в океане углекислый газ, и именно выход этого углекислого газа в атмосферу лимитировал суммарный процесс окисления углерода. В настоящее время это происходит прямым образом с участием находящихся в океане карбонатов, причем загрязнение океана в результате деятельности человека создает катализаторы, которые становятся определяющими для основного канала окисления.

Теперь рассмотрим опасности, связанные с рассматриваемыми изменениями. Что касается потепления, то, как следует из рис. 5, в прошедшем рост температуры был на порядок величины выше, чем это наблюдается в последние полтора столетия. Данные изменения можно связать с поворотом оси орбиты Земли в результате взаимодействия с окружением, что следует из теории Миланковича [34]. Более того, в недавнем прошлом наблюдалось похожее потепление, а затем похолодание. В связи с этим викинги оккупировали Гренландию в 11-м веке, а в 14-м веке покинули ее из-за похолодания. Как видно, в то время этот материк был свободен ото льдов, хотя теперешнее таяние гренландского ледника беспокоит климатологов.

Произошедшее в последнее время изменение концентрации атмосферного углекислого газа не представляет опасности для человека, поскольку выдыхаемый им воздух содержит 5–8% углекислого газа. Оно может вызывать опасение только в общем плане. В то же время некоторые каналы загрязнения атмосферы и поверхности Земли опасны для человека, особенно фотохимический смог, который наблюдается в промышленных южных городах в течение последнего века. В этом случае в атмосфере Земли под действием солнечного излучения, а также органических веществ, продуктов промышленности и озона образуются канцерогенные вещества, а они влияют на здоровье человека.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что наблюдаемый рост концентрации углекислого газа в атмосфере не объясняется стандартными методами воздействия на атмосферу. Видимо, загрязнение окружающей среды создает новые каналы для установления равновесия между атмосферным углекислым газом и связанным углеродом на поверхности Земли, что и объясняет происходящие изменения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно данным, положенным в основу парижских соглашений и основанным на пренебрежении перекрытием спектров молекул углекислого газа и воды, рост глобальной температуры при наблюдаемом изменении концентрации молекул углекислого газа с конца 19-го века составляет 1.5°C (равенство (7)), а согласно подробным расчетам [19], на основе информации из современного банка спектроскопических данных HITRAN [35, 36] эта величина равна 0.3°C (выражение (4)). Указанные данные относятся к части изменения глобальной температуры за счет молекул углекислого газа, тогда как полное значение этой величины равно 0.8°C (см. (5)) в соответствии с данными нескольких тысяч метеостанций. Отсюда следует ошибочность предположения, заложенного в основу парижских соглашений по климату, как и предсказания на их основе.

В соответствии с данными последних десятилетий примерно 40% выбросов углекислого газа в атмосферу в результате сжигания горючих ископаемых остается в атмосфере. В случае равновесия между атмосферой и поверхностью Земли углерод этого углекислого газа должен перейти в связанное состояние в верхних слоях суши и океана. Рост средней температуры суши примерно вдвое выше, чем для океана. Эти и другие факты, относящиеся к энергетике атмосферы, характеризуют ее эволюцию и требуют дополнительного анализа.

Отметим еще одну особенность рассматриваемых выше проблем. Исследуя научную проблему, ученый стремится к истине, тогда как парижские соглашения по климату инициированы междуна-

родной финансовой группой с целью получения прибыли. Благодаря высокой деловой организации эта группа имеет влияние на основные ин-формационные ресурсы, а также на ряд ведущих климатологов страны, которые могут отыскивать и отвергать публикации, не соответствующие па-рижским соглашениям. Возможность этой фи-нансовой группы можно видеть на примере дав-ления на президента Трампа, который, прокон-сультировавшись с ведущими американскими учеными, вывел США из парижских соглашений. Все это следует учитывать при анализе публикаций, относящихся к атмосферному углекислому газу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Global Monitoring Laboratory. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
2. *Conners D.* Scientists Calculate a New Rate for Global Photosynthesis // *EarthSky*. 2011. <https://earthsky.org/earth/scientists-calculate-a-new-rate-for-global-photosynthesis>
3. *Joos F., Spahni R.* Rates of Change in Natural and Anthropogenic Radiative Forcing over the Past 20,000 Years // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2008. V. 105. P. 1425.
4. *Le Quere C., Andrew R.M., Friedlingstein P. et al.* Global Carbon Budget 2018 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2018. V. 10. P. 2141.
5. *Hausfather Z.* Analysis: Fossil-fuel Emissions in 2018 Increasing at Fastest Rate for Seven Years // *Carbon Brief*. 2018. <https://www.carbonbrief.org/analysis-fossil-fuel-emissions-in-2018-increasing-at-fastest-rate-for-seven-years>
6. *Runyan C., D'Odorico P.* Global Deforestation. Cambridge: Cambr. Univ. Press, 2016. 300 p.
7. *Nunez Ch.* Deforestation // *National Geographic*. 2019. <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/deforestation/>
8. Forest Area. The World Bank. <https://data.worldbank.org/indicator/ag.lnd.frst.zs>
9. Эффективность фотосинтеза. Википедия. https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффективность_фотосинтеза
10. *Blankenship R.E., Tiede D.M., Barber J. et al.* Comparing Photosynthetic and Photovoltaic Efficiencies and Recognizing the Potential for Improvement // *Science*. 2011. V. 332. P. 805.
11. *Hansen J.E., Johnson D., Lacis A. et al.* Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide // *Science*. 1981. V. 213. P. 957.
12. *Rohde R.* Global Temperature Report for 2018. Berkley Earth, 2019. <http://berkeleyearth.org/2018-temperatures/>
13. Global Climate Report – May 2018. National Centers for Environmental Information. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201805>
14. Global Climate Report – May 2019. National Centers for Environmental Information. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201905>
15. *Lüthi D., Le Floch M., Bereiter B. et al.* High Resolution Carbon Dioxide. Record 650000–800000 Years before Present // *Nature*. 2008. V. 453. P. 379.
16. Mauna Loa Observatory. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Mauna_Loa_Observatory
17. *Смирнов Б.М.* Физика глобальной атмосферы. Долгопрудный: Интеллект, 2017. 250 с.
18. *Смирнов Б.М.* Инфракрасное излучение в энергетике атмосферы // *ТВТ*. 2019. Т. 57. № 4. С. 609.
19. *Smirnov B.M.* Infrared Atmospheric Spectroscopy. Berlin: DeGruyter, 2020. 262 p.
20. *Smirnov B.M.* Microphysics of Atmospheric Phenomena. Switzerland: Springer, 2017. 270 p.
21. *Smirnov B.M.* Collision and Radiative Processes in Emission of Atmospheric Carbon Dioxide // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. V. 51. 214004.
22. *Krainov V., Smirnov B.M.* Atomic and Molecular Radiative Processes. Switzerland: Springer, 2019. 275 p.
23. Climate Sensitivity. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_sensitivity
24. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. et al. Cambridge–N.Y.: Cambr. Univ. Press, 2018. 1535 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf
25. *Arrhenius S.* On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground // *Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1896. V. 41. P. 237.
26. *Plass G.N.* Theory of Climatic Change // *Tellus*. 1956. V. VIII. P. 140.
27. Carbon Cycle. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_cycle
28. *Pauling L.* General Chemistry. San Francisco: Freeman, 1970. 532 p.
29. *Kauffman J.M.* Climate Change Reexamined // *J. Sci. Explor.* 2007. V. 4. P. 723.
30. *Svensmark H., Friis-Christensen E.* Variation of Cosmic Ray Flux and Global Cloud Coverage—a Missing Link in Solar-Climate Relationships // *J. Atm. Terr. Phys.* 1997. V. 59. P. 1225.
31. *Svensmark H.* Experimental Evidence for the Role of Ions in Particle Nucleation under Atmospheric Conditions // *Proc. Roy. Soc.* 2007. V. A463. P. 385.
32. *Svensmark H., Bondo T., Svensmark J.* Cosmic Ray Decreases Affect Atmospheric Aerosols and Clouds // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L151001.
33. *Svensmark H., Englo M.B., Pedersen J.O.P.* Response of Cloud Condensation Nuclei (>50 nm) to Change in Ion-nucleation // *Phys. Lett.* 2013. V. A377. P. 2343.
34. *Milankovich M.* Canon of Insolation and the Ice Age Problem. Belgrade: Agency for Textbooks, 1998. 636 p.
35. HITRAN. <https://hitran.iao.ru/home>
36. HITRAN Online. <https://hitran.org/links/>