

УДК 574.46

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УГЛЕРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2024 г. Б. М. Смирнов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: bmsmirnov@gmail.com

Поступила в редакцию 29.12.2023 г.

После доработки 10.04.2024 г.

Принята к публикации 09.07.2024 г.

На основе данных научных центров и результатов долгосрочных научных проектов проанализированы тепловое состояние Земли и глобальные процессы, протекающие в атмосфере и на поверхности. Анализ выполнен в форме числовых оценок, и на их основе построена физическая картина глобальных процессов с участием углерода и углекислого газа. Показано, что парниковый эффект за счет антропогенного углекислого газа, инжектируемого в атмосферу, не является главной причиной наблюдаемого в последние десятилетия роста глобальной температуры, который в свою очередь мал по сравнению с изменениями в прошлом. Рост концентрации углекислого газа в атмосфере при ее современных значениях не влияет на здоровье человека, но увеличивает эффективность фотосинтеза, так что урожаи сельскохозяйственных культур за индустриальный период выросли в полтора раза. Истощение ресурсов ископаемых газа и нефти в этом веке делает актуальной задачу производства синтетического жидкого и газообразного топлива из угля. Показано, что замена метана как топлива водородом наряду с низкой эффективностью ведет также к большим рискам при массовом использовании.

DOI: 10.31857/S0040364424040147

ВВЕДЕНИЕ

Под углеродной энергетикой понимается производство энергии в результате сжигания горючих полезных ископаемых, т.е. угля, нефти и газа. Это наиболее дешевая энергия, и поэтому на ее долю в настоящее время приходится около 80% производимой энергии [1]. Однако вклад углеродной энергетикой в производство мировой энергии уменьшается со временем. Более того, величина производимой энергии для каждого типа углеродной энергетикой достигает максимума и далее ее мощность убывает. Так, максимум производства энергии за счет сжигания угля достиг максимума в 2013 г., для нефти он ожидается в 2025 г., а для газа — в 2035 г. [2].

При этом энергия, производимая или расходуемая в течение года, увеличилась с 2.3×10^{18} Дж в 1971 г. до 6.6×10^{18} Дж в 2019 г., т.е. она росла со скоростью 2% в год [3]. Это соответствует скорости роста добычи горючих полезных ископаемых — удвоению скорости добычи примерно за 40 лет. Отметим, что скорость роста населения в последние десятилетия составляла 1.5% в год [4], т.е. энергия на душу населения увеличивалась в это время.

Одной из основных особенностей современной энергетикой является быстрый рост так называемой возобновляемой энергетикой, включающей использование энергии Солнца и ветра. Появление и развитие новых видов энергии естественно и в процессе существования цивилизации происходило неоднократно. Однако возобновляемая энергетика развивается невиданными темпами, так что производство энергии с использованием ветра увеличивалось с 2012 по 2021 гг. со скоростью 12% в год, а скорость роста солнечной энергетикой составляла в этот период 16% в год [5]. Тем не менее вклад возобновляемой энергетикой в полное производство энергии пока невелик. В частности, 71% электрической энергии, произведенной в 2022 г., обеспечила углеродная энергетика, тогда как вклад возобновляемых видов энергии составил 12% (4.5% — солнечная и 7.5% — ветровая) [6].

Данные цифры характеризуют современное состояние и развитие современной мировой энергетикой. Основным видом является углеродная энергетика, которая, по прогнозам, даже в 2050 г. обеспечит 43% производимой

энергии [2]. Поскольку возобновляемая энергетика работает только в подходящую погоду, она должна совмещаться с углеродной энергетикой. По сути дела, в углеродной энергетике используется химическая энергия, находящаяся в недрах Земли и полученная из солнечной энергии в прошлом.

Продуктом углеродной энергетикой является углекислый газ, образуемый при сжигании ископаемых топлив. В результате этого процесса за время жизни нескольких поколений концентрация углекислого газа в атмосфере заметно увеличивается. Это приводит к интенсификации процесса фотосинтеза, процесса превращения углекислого газа в биомассу под действием солнечного излучения, поскольку оптимальные условия для этого процесса отвечают существенно более высокому содержанию углекислого газа в атмосферном воздухе. Наряду с этим, рост концентрации углекислого газа в атмосфере вызывает опасения, так как при этом меняются оптические свойства атмосферы в инфракрасной области спектра, что приводит к усилению парникового эффекта на Земле и увеличению глобальной температуры. Далее подробно проанализируются эти проблемы.

Отношение к развитию углеродной энергетикой, которое пропагандируется средствами массовой информации, убеждает население в опасности углеродной энергетикой, поскольку ее продуктом является углекислый газ, рост концентрации которого в атмосфере способствует потеплению на планете, наблюдаемому в последние десятилетия. Одной из целей данной статьи является опровержение этого утверждения на основе достоверной цифровой информации, полученной в ряде научных центров и при выполнении международных научных программ. Так, предметом данной статьи является круг проблем, связанных с влиянием выбросов углекислого газа в атмосферу на окружающую среду и условия существования человека. Кроме того, рассматриваются другие проблемы углеродной энергетикой в плане развития современной энергетикой.

ЭВОЛЮЦИЯ УГЛЕРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Сначала, основываясь на данных информационного центра «Our World in Data» [7], представим современное состояние углеродной энергетикой и ее эволюцию в прошедшую четверть 21-го в. Наряду с сжиганием горючих ископаемых, к углеродной энергетикой относится сжигание других органических соединений, в частности дров и мусора. Последнее дает вклад менее 3% в суммарное расходование глобальной энергетикой.

Поэтому для простоты далее пренебрегаем этой частью и под углеродной энергетикой будем понимать выделение энергии при сжигании горючих полезных ископаемых, т.е. угля, нефти, газа.

На рис. 1 даются значения выработанной в течение года глобальной энергетикой, которая просуммирована по всем видам или относится к углеродной энергетикой. Суммарная мощность мировой индустрии составляет 2.0×10^{13} Вт, что на четыре порядка величины меньше мощности 1.7×10^{17} Вт солнечного излучения в видимой области спектра, которое попадает в атмосферу Земли.

Рис. 2 содержит значения энергии, произведенной для каждого вида углеродной энергетикой. При этом нефть является основным источником энергии для транспорта, который включает железнодорожные, водные, автомобильные и авиаперевозки, причем для каждого из них используется определенный продукт переработки нефти. Отметим провалы на рис. 1, 2, отвечающие кризису 2008 г., а также периоду эпидемии ковида-19 в 2019–2020 гг.

При экспоненциальной зависимости от времени для вырабатываемой энергии и сохране-

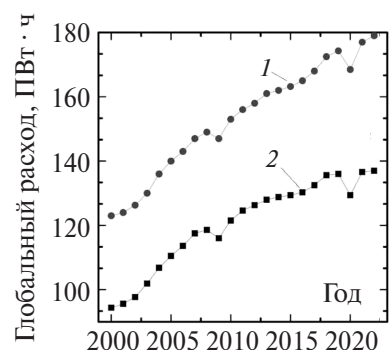


Рис. 1. Годовое мировое производство энергии: 1 — суммарное, 2 — в результате сжигания горючих полезных ископаемых [7].

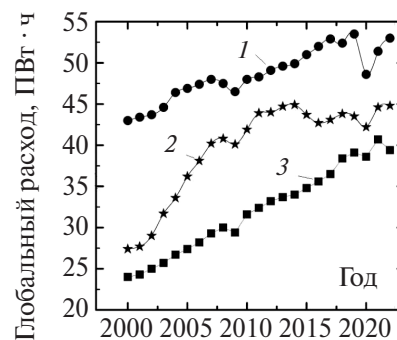


Рис. 2. Годовое мировое производство энергии за счет горючих полезных ископаемых [7]: 1 — нефть, 2 — уголь, 3 — газ.

нии представленных выше значений суммарной и парциальных энергий, выработанных индустрией в 2000 и 2022 гг., время удвоения для суммарной вырабатываемой энергии составит 49 лет, время удвоения за счет угля или газа — 31 год, а время удвоения производимой энергии за счет сжигания нефти — 73 года.

На рис. 3 приводится доля энергии, вырабатываемой в рамках глобальной углеродной энергетики, по отношению к суммарной производимой и расходуемой энергии. Углеродная энергетика вносит наибольший вклад в производство энергии и останется основным видом производства энергии в течение долгого времени. Доля энергии, производимой в рамках углеродной энергетики с использованием перечисленных топлив, представлена на рис. 4. Таким образом, вклады в углеродную энергетику со стороны нефти, угля, газа сравнимы, однако указанная последовательность ископаемых топлив сохраняется в течение рассматриваемого диапазона времени.

Отметим ограниченную точность используемой информации. Например, согласно данным [8], доля ископаемого топлива в производстве мировой энергии составляет 82%. Тем не менее представленные выше графики по энергетике

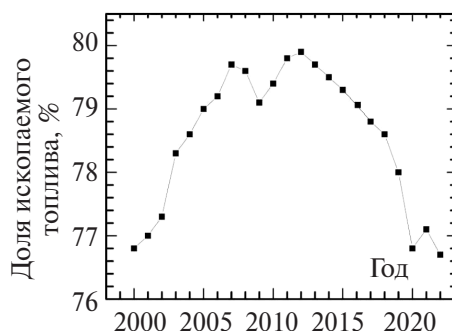


Рис. 3. Доля углеродной энергетики в производстве суммарной энергии [7].

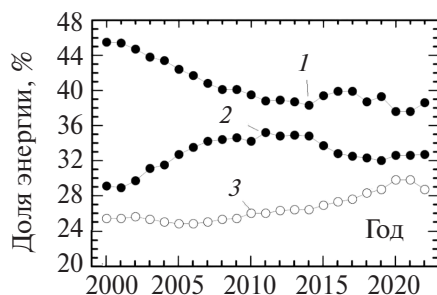


Рис. 4. Доля разных горючих полезных ископаемых в производстве энергии в рамках углеродной энергетики [7]: 1 — нефть, 2 — уголь, 3 — газ.

мировой индустрии основаны на тщательном анализе данных, используемых далее.

Из совокупности представленных зависимостей следует, что рассмотренные параметры, относящиеся к углеродной энергетике, мало менялись за последние десятилетия. В рамках углеродной энергетики вырабатывается около 80% мировой энергии, и эта доля будет падать со временем. Тем не менее в 21-м в. углеродная энергетика будет играть важную, если не определяющую, роль в производстве энергии.

УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ В АТМОСФЕРЕ

Продуктом углеродной энергетики является углекислый газ, который выбрасывается в атмосферу и влияет на условия жизни человека. В природе существует равновесие между углекислым газом атмосферы и углеродом биосферы, которую в основном составляют растения на поверхности Земли и водоросли в океанах. В результате дыхания и гниения растений происходит окисление углерода, который в виде углекислого газа попадает в атмосферу. Обратным является процесс фотосинтеза, в результате которого углерод из углекислого газа атмосферы переходит в биосферу.

Осреднение относящимся к углеродному равновесию данных с учетом результатов углеродного проекта [9–11] показывает, что в биосфере находится примерно 1240 млрд т углерода, а в атмосфере в составе углекислого газа присутствует 790 млрд т углерода [12]. В результате фотосинтеза 210 млрд т углерода в год переходит из атмосферы в биосферу. Точность этих данных оценивается в 20%. Отсюда, в частности, следует, что, время нахождения молекулы углекислого газа в атмосфере составляет 4 года [13].

Доставая горючее топливо из недр Земли и включая его в равновесие между поверхностью Земли и атмосферой, человек увеличивает общую массу углерода, участвующего в рассматриваемом равновесии. Учитывая, что ежегодная добыча горючих полезных ископаемых составляет примерно 10 млрд т, получаем, что естественный поток углерода в атмосферу превышает антропогенный примерно в 20 раз [14]. Однако за время с начала индустриального периода (примерно 300 лет) это привело к увеличению биомассы и концентрации углекислого газа в атмосфере в 1.5 раза. Численные значения параметров рассматриваемого равновесия с источниками представлены далее.

Рассмотрим рост концентрации углекислого газа в атмосфере согласно измерениям. Наиболее точные и надежные измерения концентрации углекислого газа в атмосфере производятся в обсерватории Мауна Лоа (Гавайи, США) [15].

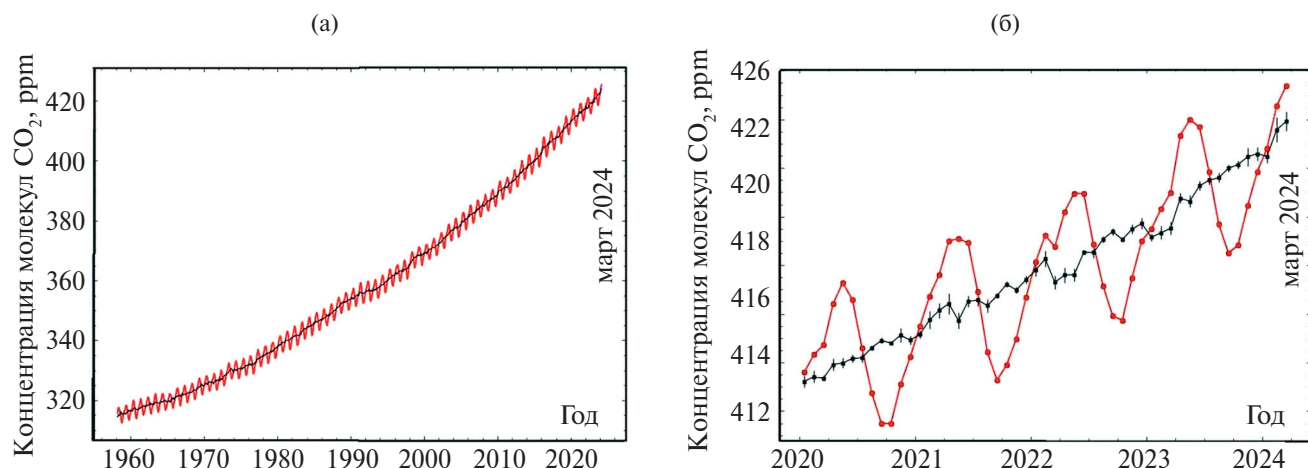


Рис. 5. Выраженная в ppm концентрация молекул углекислого газа в атмосфере Земли согласно мониторингу, выполняемому в обсерватории Мануа Лоа, с осреднением за месяц и за год в течение всего времени существования обсерватории (а) и за последние пять лет (б) [16].

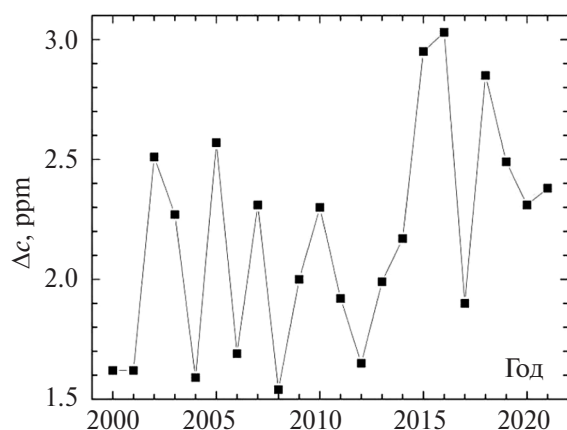


Рис. 6. Годовой рост концентрации молекул углекислого газа в атмосфере в настоящее время [17].

Эта обсерватория находится на плоскогорье на высоте 3400 м и вдали от источников и поглотителей углекислого газа, что обеспечивает высокую точность измерений, которые проводятся с 1959 г. На рис. 5 представлена эволюция концентрации молекул углекислого газа в атмосфере в единицах ppm (1 ppm означает одну молекулу углекислого газа на миллион молекул воздуха). Наблюдаемые на этом рисунке сезонные осцилляции концентрации молекул углекислого газа в атмосфере отражают сезонный характер фотосинтеза, который в большей степени происходит в Северном полушарии.

За время измерений изменилась не только сама концентрация с 316 ppm в 1959 г. до 420 ppm в 2023 г., но и ее ежегодный прирост. Значения этого прироста представлены на рис. 6. Как следует из представленных данных

измерений, проведенных в обсерватории Мануа Лоа, 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 атмосфере, согласно данным рис. 6, в настоящее время аппроксимируется в среднем зависимостями (ppm/год)

$$\frac{dc(\text{CO}_2)}{dt} = (2.4 \pm 0.4),$$

$$\frac{d \ln c(\text{CO}_2)}{dt} = (6.0 \pm 0.5).$$

Из них, в частности, следует, что при современной скорости увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере время, за которое эта концентрация удвоится, составляет примерно 130 лет.

К измерениям концентрации углекислого газа в атмосфере добавим результаты анализа потоков углерода между сушей, океанами и атмосферой от начала индустриального периода до настоящего времени, который проводится в рамках глобального углеродного проекта [9] на протяжении почти десяти лет. При этом масса углерода измеряется в единицах Гт С, или 10^{15} г углерода. Для атмосферы Земли связь между единицами измерения такая: 1 ppm = 2.124 Гт С.

Отметим, что здесь рассматривается углеродное равновесие между атмосферой, сушей и океанами в масштабах времен, составляющих десятки и сотни лет. За эти времена углерод, находящийся в виде горючих ископаемых в недрах Земли, или углекислый газ, образующий химическую связь с почвой, не участвуют

в этом равновесии. Поэтому суммарная масса углерода, находящегося в биомассе на суше и в океанах, а также в составе атмосферного углекислого газа, сохраняется. Рис. 7 показывает долю углерода, который содержится в атмосферном углекислом газе. Поскольку углеродное равновесие поддерживается процессом фотосинтеза, который в свою очередь зависит от покрытия поверхности Земли лесами, эта доля может уменьшаться со временем из-за вырубки лесов, определяющих массу переработанного углекислого газа в результате фотосинтеза, но увеличивается с ростом концентрации углекислого газа в атмосфере.

Сопоставим данные глобального углеродного проекта и измерения концентрации углекислого газа в атмосфере. В 2021 г. выбросы углекислого газа в атмосферу главным образом в результате сжигания горючего топлива и в малой степени в процессе производства цемента составляют 10.9 ± 0.8 Гт С. При этом увеличение массы углерода в атмосфере в составе атмосферного углекислого газа в течение 2021 г. составило 5.2 ± 0.2 Гт С, что соответствует увеличению концентрации углекислого газа в атмосфере на 2.5 ± 0.1 ppm [16]. Сопоставление разных способов определения параметров углеродного равновесия показывает их точность. Отсюда следует, в частности, что в атмосфере остается $48 \pm 5\%$ инжектируемого в атмосферу углекислого газа.

Полученное значение доли углерода, который остается в атмосфере после выброса в нее углекислого газа, в пределах ошибки соответствует данным рис. 7. При этом непосредственное измерение концентрации углекислого газа

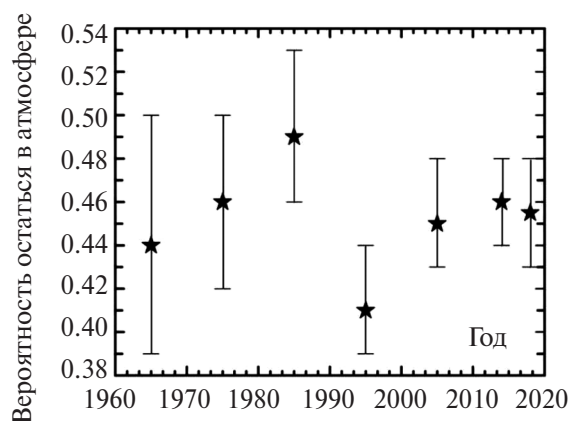


Рис. 7. Доля углерода, который после извлечения из недр Земли в виде горючих ископаемых переходит в углекислый газ атмосферы с последующим переходом в атмосферу и биомассу; выбросы углекислого газа в атмосферу относятся к соответствующему десятилетию и к 2018 г. [10, 11].

в атмосфере включает сезонные флуктуации этой величины, тогда как баланс массы углерода дает ее перераспределение между атмосферой, сушей и океанами. При определении доли углерода, который остается в атмосфере после инъекции углекислого газа в атмосферу, предполагалось, что время изменения выбрасываемой массы углерода в атмосферу велико по сравнению со временем нахождения пробной молекулы углекислого газа в атмосфере.

В результате проведенного анализа получается, что рост концентрации углекислого газа в атмосфере имеет антропогенную природу и в основном определяется сжиганием ископаемого топлива в рамках углеродной энергетики. Это топливо берется из недр Земли и далее включается в равновесие углерода между атмосферой, сушей и океанами.

РОСТ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СО ВРЕМЕНЕМ

Средства массовой информации убеждают население, что главной опасностью в будущем является потепление на планете. Это преподносится как результат деятельности углеродной энергетики, связанной со сжиганием ископаемого топлива, которое приводит к росту концентрации углекислого газа в атмосфере. Поэтому дополнительный углекислый газ вызывает усиление парникового эффекта атмосферы и повышение температуры на поверхности Земли.

В дополнение к этому парижское соглашение 2015 года по климату [18] объявляет критическим увеличение на 2°C глобальной температуры, т.е. осредненной по времени и Земному шару. Ниже показана ложность этих утверждений, поскольку они противоречат многолетним палеонтологическим исследованиям. Действительно, за время более 2 млрд лет, в течение которого средняя температура Земли находилась в коридоре 20°C [19], а амплитуда колебания температуры в ледниковых циклах в последние миллион лет равна примерно 12°C [20, 21].

При анализе эволюции глобальной температуры в настоящее время ориентируются на результаты института космических исследований НАСА [22], в котором был разработан алгоритм анализа эволюции глобальной температуры путем сравнения не самих глобальных температур, а разности температур в данной географической точке в данный момент времени, но в разные годы, для чего используются измерения нескольких тысяч метеостанций, а также спутников в последние десятилетия [23]. Такой алгоритм позволяет снизить флуктуации в изменении глобальной температуры с градусов до примерно 0.2°C .

Это позволило определить эволюцию глобальной температуры за последние полтора века, которая представлена на международной панели изменения климата [24, 25]. Далее этот подход использовался другими организациями, которые получили близкие результаты для эволюции глобальной температуры. Эволюция глобальной температуры в течение указанного периода имеет немонотонный характер и не коррелирует с ростом концентрации углекислого газа в атмосфере. Отсюда следует вывод, что изменения, связанные с атмосферным углекислым газом, не являются главным фактором в эволюции глобальной температуры.

Убирая флуктуации в эволюции глобальной температуры, установленной в результате осреднения данных метеостанций и спутников, получаем эволюцию глобальной температуры, представленную на рис. 8. Изменение характера теплового состояния нашей планеты произошло в 1980-х гг.

Оставив в стороне дискуссию о причине обнаруженного изменения, отметим, что из данных по эволюции глобальной температуры после 1980-х гг. имеем

$$\frac{d\Delta T}{dt} = (17 \pm 3) \text{ мК/год}, \quad (1)$$

где ΔT — изменение глобальной температуры. Такая скорость роста глобальной температуры соответствует ее повышению на 1°C примерно за 60 лет. При этом со второй половины 19-го в. глобальная температура увеличилась примерно на 1°C , согласно обработке данных метеостанций. Как видно, происходящие изменения глобальной температуры не представляют опасности для ближайших поколений.

Хотя использование глобальной температуры как параметра, описывающего тепловое со-

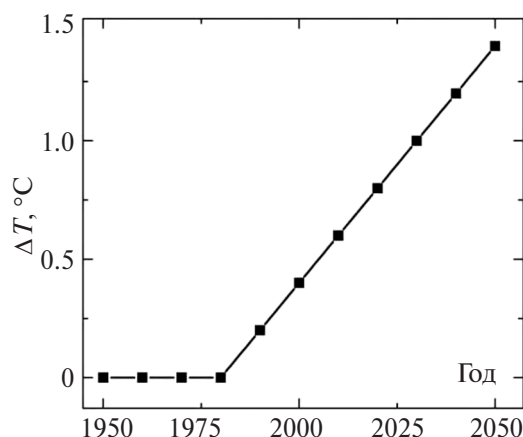


Рис. 8. Упрощенный характер эволюции глобальной температуры в последние десятилетия в результате исключения флуктуаций [12].

стояние Земли, является грубым, оно позволяет проанализировать качественный характер связанных с ним изменений. Более точным будет описание теплового состояния Земли, разделенной на океаны и сушу, а также Северное и Южное полушария.

Анализируя данные табл. 1, находим, что наибольшее потепление земной поверхности происходит на суше в Северном полушарии, где находится основная часть производства и реализуется наиболее эффективный фотосинтез. Это является косвенным свидетельством того, что данные изменения происходят в результате деятельности человека, меняющей излучательные параметры поверхности Земли в инфракрасной области спектра, а также влияющей на характер фотосинтеза.

Среднее отношение увеличений средних температур над сушей и над океанами как в Северном, так и в Южном полушариях составляет

Таблица 1. Изменение глобальной температуры (в $^\circ\text{C}$) по отношению к средней температуре Земли в 20-м в. [26–28]

Регион	Время	Суша	Океан	Суша + океан
Северное полушарие	май 2018 г.	1.27	0.69	0.91
	май 2019 г.	1.25	0.81	0.93
	январь–декабрь 2021 г.	1.54	0.89	1.09
	январь–июль 2022 г.	1.54	0.81	1.09
Южное полушарие	май 2018 г.	1.06	0.54	0.62
	май 2019 г.	1.13	0.69	0.77
	январь–декабрь 2021 г.	0.86	0.54	0.59
	январь–июль 2022 г.	0.88	0.57	0.62
Оба полушария	май 2018 г.	1.21	0.60	0.77
	май 2019 г.	1.16	0.73	0.85
	январь–декабрь 2021 г.	1.35	0.65	0.84
	январь–июль 2022 г.	1.36	0.67	0.86

1.7 ± 0.2 . Это противоречит концепции, озвучиваемой мировым сообществом, согласно которой наблюдаемый рост глобальной температуры определяется парниковым эффектом за счет роста концентрации атмосферного углекислого газа. Характерное время перемешивания углекислого газа в пределах Северного или Южного полушарий равно примерно неделе, тогда как типичное время нахождения молекулы углекислого газа в атмосфере составляет четыре года. Поэтому, если бы накопление углекислого газа в атмосфере было причиной наблюдаемого роста глобальной температуры, это изменение температуры было бы одинаковым для суши и океанов.

ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ В АТМОСФЕРЕ

Парниковый эффект атмосферы реально означает участие теплового излучения атмосферы в энергетическом балансе Земли и ее атмосферы, причем одним из парниковых компонентов, создающих направленное на поверхность Земли излучение в инфракрасной области спектра, является углекислый газ. Соответственно, увеличение концентрации атмосферного углекислого газа приводит к изменению теплового баланса Земли и увеличению ее температуры. Целью данной работы является выяснение связи между повышением глобальной температуры и ростом концентрации углекислого газа в атмосфере численно, поскольку, согласно средствам массовой информации, наблюдаемый рост глобальной температуры связан с выбросами углекислого газа как продукта углеродной энергетики.

Особенность излучения молекул атмосферы состоит в том, что при атмосферном давлении спектр излучения, создаваемого молекулами, состоит из отдельных уширенных спектральных линий, причем ширина этих спектральных линий меньше, чем разность частот для соседних линий. Соответственно, спектр излучения атмосферы представляет собой совокупность большого числа отдельных спектральных линий, причем оптическая толщина атмосферы в центрах соседних линий в десятки и сотни раз превышает оптическую толщину при частотах, находящихся между соседними линиями. Поэтому при расчете потоков излучения атмосферы используется модель «линия за линией» [29, 30], в рамках которой вычисления производятся на каждой частоте отдельно, что позволяет учесть особенности спектра эмиссии атмосферы.

В процессе излучения атмосферы поддерживается термодинамическое равновесие между состояниями молекул и полем излучения.

Это равновесие определяется относительно высоким давлением воздуха в атмосфере и большими временами излучательных переходов для возбужденных колебательных и вращательных состояний молекул. При этих условиях 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 анализ рассматриваемого процесса, поскольку температура излучения, испускаемого из заданной области пространства, равна ее локальной температуре.

Поскольку радиус Земли на три порядка величины 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 из слабо неоднородного слоя газа к потоку излучения из слоя с постоянной температурой по высоте путем введения эффективной температуры излучения T_ω для каждой частоты излучения ω .

Учет этих особенностей теплового излучения атмосферы и данных по излучательным параметрам парниковых молекул, содержащихся в базе данных HITRAN [31–33], позволяет рассчитать потоки молекулярного излучения из атмосферы на поверхность Земли на основе численных методов. В такой расчет необходимо заложить плотности и их высотные профили для парниковых молекулярных компонентов, а также высотный профиль температуры. Потоки излучения из атмосферы на поверхность Земли для атмосферы с осредненными параметрами представлены в табл. 2.

Основными парниковыми компонентами атмосферы, которые определяют излучение реальной атмосферы, являются молекулы воды и углекислого газа, а также микрокапли воды, которые образуют облака. Дополнительными парниковыми компонентами являются CH_4 , N_2O , O_3 . Высотные профили молекулярных компонентов могут быть определены в рамках модели стандартной атмосферы [34] или заданы при специальных условиях. Однако соответствующая информация для облаков, которые состоят из микрокапель воды среднего размера (6–10 мкм), отсутствует.

Микрокапли воды являются эффективными излучателями в инфракрасной области спектра. Облака при этом образуются случайным образом, относительно быстро перемещаются

Таблица 2. Потоки излучения, которые создаются указанными оптически активными компонентами атмосферы и поглощаются поверхностью Земли, а также вклад этих компонентов в поток излучения, формируемый атмосферой [35, 36]

Компонент	Концентрация	Поток, Вт/м ²	Доля, %
Молекулы Н ₂ O	1.7%	214	64
Облака	—	61	18
Молекулы CO ₂	416 ppm	56	17
Молекулы CH ₄	1.9 ppm	1.6	0.5
Молекулы N ₂ O	0.25 ppm	1.2	0.4
Молекулы O ₃	25 ppb	0.5	0.1

в атмосфере и имеют ограниченное время жизни, что затрудняет расчет потоков излучения атмосферы. В случае стандартной атмосферы [24] некоторую информацию об излучении облаков можно получить, сравнивая проинтегрированный по частотам поток излучения атмосферы на поверхность Земли, который создается парниковыми молекулами и рассчитан, как это описано выше, а также измеренный поток теплового излучения на поверхность Земли как элемент энергетического баланса Земли.

В рамках рассмотренных проблем реалистичной моделью, описывающей тепловое излучение атмосферы и учитывающей участие в этом облаков, является модель плотного облака, для которой облака расположены в атмосфере, начиная с некоторой высоты, выше которой атмосфера становится оптически плотной. Значение этой высоты атмосферы следует из суммарного потока излучения атмосферы на поверхность Земли, но эти потоки несколько различаются для разных источников энергетического баланса планеты. Это приводит к погрешностям в рассчитанных потоках излучения атмосферы.

Алгоритм расчета параметров излучения атмосферы для модели стандартной атмосферы [34] был разработан в [35, 36], а в [37] была создана профессиональная программа для расчета теплового излучения атмосферы в рамках модели плотного облака, где потоки излучения атмосферы, как парциальные, так и суммарные, определяются введенными в программу параметрами парниковых компонентов. Если в [36] использовалось около тысячи молекулярных излучательных переходов, в компьютерную программу [37], разработанную Д.А. Жилиевым, включено более десяти тысяч спектральных линий. Упрощение линейчатой структуры излучения атмосферы во многих климатических моделях может привести к принципиальным ошибкам.

Проанализируем рост глобальной температуры в результате увеличения концентрации

углекислого газа в атмосфере. Считая, что рост глобальной температуры коррелирует с ростом концентрации углекислого газа в атмосфере, находим на основании формулы (1) увеличение глобальной температуры ΔT (в °C) при удвоении концентрации углекислого газа:

$$\Delta T = 2.1 \pm 0.4. \quad (2)$$

Изменение глобальной температуры пропорционально изменению потока излучения из атмосферы на поверхность Земли. Расчет парникового эффекта для реальной атмосферы, т.е. увеличения глобальной температуры, при удвоении концентрации углекислого газа в стандартной атмосфере в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом дает [36, 37]

$$\Delta T = 0.6 \pm 0.3. \quad (3)$$

Сравнение формул (2) и (3) показывает, что вклад парникового эффекта в изменение глобальной температуры за счет увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере составляет примерно 30%. Из этого следует, что выбросы углекислого газа в атмосферу не являются основной причиной наблюдаемого роста глобальной температуры, что показывает ложность точки зрения, транслируемой средствами массовой информации.

В результате получаем, 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. Статистическое осреднение результатов расчетов в рамках климатических моделей, представленных на международной панели изменения климата, приводят к следующему изменению глобальной температуры при удвоении концентрации молекул углекислого газа в атмосферном воздухе [24]:

$$\Delta T = 3.0 \pm 1.5. \quad (4)$$

Это значение превышает даже наблюдаемое повышение температуры (2), хотя в пределах погрешностей данные значения совпадают. Именно на ошибочном результате (4) основана

официальная точка зрения на вопрос, согласно которому наблюдаемый рост глобальной температуры определяется ростом концентрации углекислого газа в атмосфере, продуктом углеродной энергетики.

Рассмотрим причину данной ошибки климатических моделей. Основу климатических моделей составляют сложные компьютерные программы, в которые включено много факторов, и излучение атмосферы является одним из них. Для простоты в этих моделях предполагается наличие только одного парникового компонента — углекислого газа, изменение концентрации которого определяет состояние атмосферы. Однако такое упрощение является нарушением закона Кирхгофа [38] для многокомпонентного газа [39, 40], согласно которому излучатель одновременно является и поглотителем. В случае однокомпонентной атмосферы изменение потока излучения из нее определяется введенными в нее молекулами излучающего газа, тогда как в многокомпонентной атмосфере введенные в газ молекулы ведут также к уменьшению потоков излучения, создаваемых другими компонентами в результате поглощения введенных в атмосферу молекул.

Проведем анализ для атмосферного воздуха, основными парниковыми компонентами которого являются молекулы воды и углекислого газа, а также облака. Введем изменения потоков в данной области спектра в виде $\Delta J_\omega(\text{CO}_2)$, $\Delta J_\omega(\text{H}_2\text{O})$, $\Delta J_\omega(\text{облака})$, которые представляют собой увеличение потока излучения, создаваемого молекулами CO_2 , а также уменьшение потоков излучения, создаваемых молекулами воды и облаками на данной частоте в результате изменения концентрации молекул углекислого газа. Очевидно, изменение суммарного потока излучения ΔJ_ω на данной частоте удовлетворяет закону сохранения

$$\Delta J_\omega = \Delta J_\omega(\text{CO}_2) - \Delta J_\omega(\text{H}_2\text{O}) - \Delta J_\omega(\text{облака}),$$

которое справедливо как для парциальных потоков на определенной частоте, так и для проинтегрированных по частотам потоков излучения. Ошибка климатических моделей при определении связи между изменениями концентрации атмосферного углекислого газа и глобальной температуры следует из замены суммарного по компонентам изменения потока излучения ΔJ_ω создаваемым молекулами углекислого газа $\Delta J_\omega(\text{CO}_2)$.

Данное предположение климатических моделей справедливо, если спектры поглощения парниковых компонентов не пересекаются. Для реальной атмосферы это не выполняется, и ошибка климатических моделей составляет, со-

гласно модели плотного облака и с использованием излучательных параметров молекул, взятых из банка HITRAN [32]:

$$\frac{d\Delta J(\text{CO}_2)}{d\Delta J} = 5.2 \pm 0.2, \quad (5)$$

где ΔJ — изменение суммарного потока излучения атмосферы, проинтегрированного по ча-

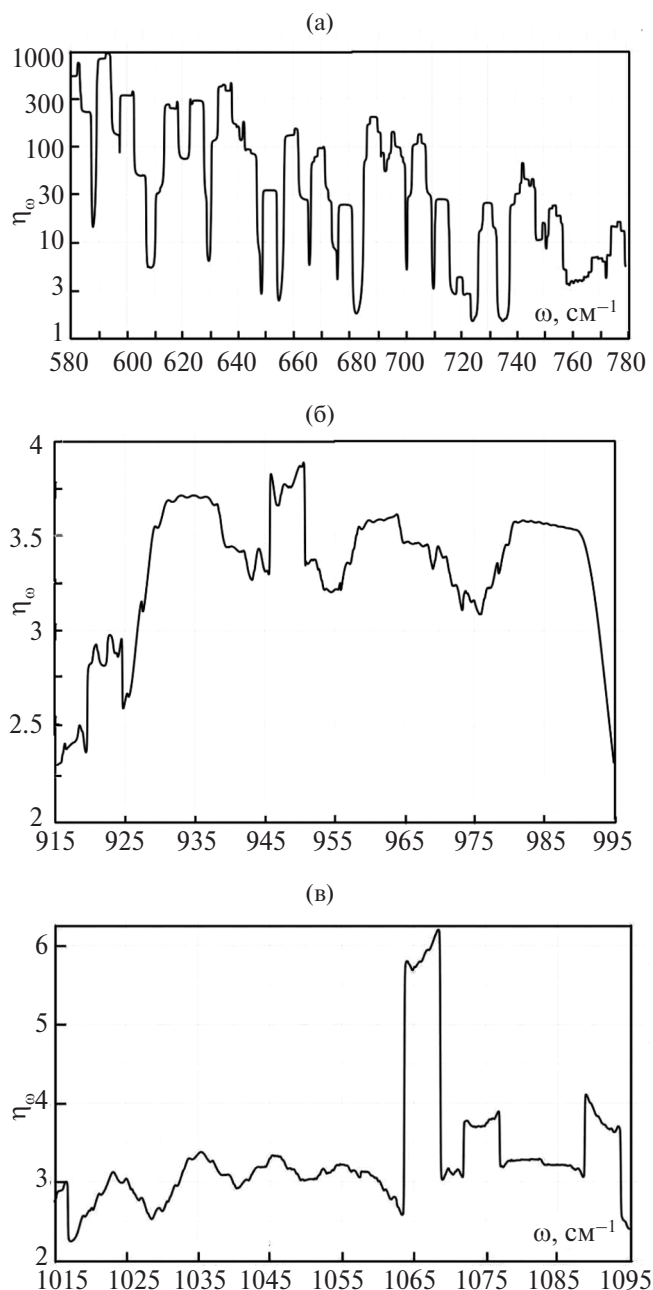


Рис. 9. Отношение парциального потока излучения $\Delta J_\omega(\text{CO}_2)$, создаваемого молекулами углекислого газа, к суммарному потоку излучения: (а) — область нижней полосы поглощения молекул углекислого газа; (б), (в) — полосы частот поглощения молекул углекислого газа, используемые в лазерах на углекислом газе.

стотам; $\Delta J(\text{CO}_2)$ — соответствующее изменение потока излучения, создаваемого молекулами углекислого газа.

В дополнение к этому на рис. 9 приводятся отношения изменения парциального отношения потоков, которое вводится согласно формуле

$$\eta_{\omega} = \frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{\Delta J_{\omega}(\text{CO}_2)}{\Delta J_{\omega}} d\omega,$$

для нижней полосы поглощения в области частот $580\text{--}780\text{ см}^{-1}$, дающей вклад около 98% в поток излучения, создаваемый молекулами углекислого газа, а также полос излучения, используемых в лазерах на углекислом газе.

Среднее значение рассматриваемого параметра по нижней полосе поглощения составляет $\eta = 5.6$ (рис. 9), тогда как средние значения по нижней и верхней лазерным полосам поглощения равны соответственно 3.3 и 3.2. Осреднение по трем полосам поглощения дает $\eta = 5.0$, что совпадает с результатом по формуле (5). Таким образом, из совокупности приведенных данных следует, что полученное в рамках климатических моделей изменение потока излучения атмосферы как и изменение глобальной температуры в результате роста концентрации углекислого газа в атмосфере, завышается примерно в пять раз [41, 42].

УГЛЕРОД В ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Наряду с изменением теплового баланса Земли рост концентрации углекислого газа в атмосфере может привести к изменению условий жизни человечества. Рассмотрим сначала действие этого изменения на здоровье человека при современных масштабах процесса. Действительно, образуемый в организме углекислый газ выносится из организма в результате дыхания. В процессе дыхания выдыхаемый воздух обычного человека в среднем содержит 5% углекислого газа. В период полного покоя человека объем выдыхаемого воздуха для обычного человека составляет приблизительно 0.5 л на один выдох при скорости дыхания 12 раз в минуту [43]. 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.

Оценим влияние изменения концентрации углекислого газа в атмосфере на дыхание человека на основании простого реального примера. Пусть человек находится в помещении площадью 10 м^2 и высотой 3 м. Воздух этой комнаты содержит в среднем около 10 л CO_2 при ат-

мосферном давлении. 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 такого изменения количества углекислого газа в помещении. Этот пример показывает, что произошедшее за период индустриализации изменение концентрации углекислого газа в атмосфере в полтора раза не только не влияет на здоровье человека, но человек не замечает этого. Другими словами, наблюдаемый в обозримый период рост концентрации углекислого газа в атмосфере не представляет опасности для человека.

Однако процесс фотосинтеза чувствителен к изменению концентрации углекислого газа при современных значениях этой величины. Поскольку процесс фотосинтеза обеспечивает планету продуктами питания, а оптимальные условия для фотосинтеза реализуются при значительно более высоких концентрациях атмосферного углекислого газа по сравнению с современными значениями, производство сельскохозяйственных продуктов питания увеличивается с современным ростом концентрации атмосферного углекислого газа. Рассмотрим эту проблему подробнее и оценим возможности Земли как источника производства продовольствия.

В конце 18-го в. Мальтус [44] выполнил серьезный анализ обеспечения населения продуктами питания. Используя статистическую информацию 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 не сможет прокормить население, что может привести к катастрофе.

Однако во второй половине 20-го в. возникла другая ситуация, главным образом, в связи с так называемой «зеленой» революцией, которая привела к существенному росту урожая, и проблема перенаселения планеты потеряла свою остроту. Это в большой степени связано с использованием удобрений, разных для разных культур. В табл. 3 приводятся данные о мировых урожаях основных зерновых культур в начале «зеленой» революции и в настоящее время.

Согласно данным табл. 3, суммарный урожай зерновых продуктов вырос в 3.4 раза за прошедшие 60 лет, а население Земного шара с 1961 по 2022 гг. увеличилось с 3.21×10^9 до 7.98×10^9 человек [5], т.е. в 2.4 раза. Как видно, рост количества продуктов питания за данный период вре-

Таблица 3. Суммарные урожаи основных зерновых культур на всей Земле в млн т [45, 46]

Культура	1961 г.	2022 г.
Кукуруза	205	1251
Рис	285	5031
Пшеница	222	784
Ячмень	72	150
сумма	784	2688

мени происходил эффективнее, чем рост населения, т.е. в ближайшее время недостаток пищи не угрожает населению планеты. Однако часть этого роста связана с увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере, которая за рассматриваемое время составила 1.4 раза. Если считать, что рост массы сельскохозяйственных культур при прочих равных условиях пропорционален росту концентрации углекислого газа в атмосфере и исключить из увеличения 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 только компенсирует рост населения.

Рассмотрим возможности нашей планеты для обеспечения населения продуктами питания. Исходим 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/сут [47], а внутри этого интервала зависит от конкретной страны.

Для оценки будем ориентироваться на среднюю величину 3000 ккал/сут и глюкозу в качестве продукта питания, что равно примерно 320 г углерода в составе глюкозы. Величина 3000 ккал/сут соответствует мощности 140 Вт, и поскольку глобальная мощность фотосинтеза составляет 2×10^{14} Вт, фотосинтез в принципе может обеспечить энергией порядка 1×10^{12} человек, что на два порядка величины превышает современное население Земли. Ясно, что эта оценка завышена, поскольку наряду с растительной пищей человек потребляет животную пищу, которая энергетически в несколько раз дороже растительной. Тем не менее эта оценка показывает, что в настоящее время фотосинтез используется для производства продуктов питания неэффективно, а проблема перенаселения планеты не является актуальной.

Отметим также, что мощность, необходимая для поддержания жизнедеятельности человечества (3000 ккал/сут для 8×10^9 человек), немногим превышает 1×10^{12} Вт. Сравнивая эту вели-

чину с вырабатываемой в результате промышленной энергетики (около 2×10^{13} Вт), имеем, что мощность сельскохозяйственного производства на порядок величины ниже мощности промышленной энергетики.

Сделаем еще одну оценку, учитывая, что человек перерабатывает 320 г углерода в день, а человечество — примерно 0.9 млрд т углерода в год, превращая его в углекислый газ. Используемая масса углерода для углеродной энергетики немногим превышает 10 млрд т углерода в год. Отсюда следует, что вклад в увеличение концентрации атмосферного углекислого газа за счет жизнедеятельности людей немногим меньше 10%.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ УГЛЕРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Структура энергетики меняется со временем естественным образом. В настоящее время наиболее быстрыми темпами развивается возобновляемая энергетика, в которой используется энергия Солнца и ветра. Сейчас ее вклад в производство энергии невелик, и главный недостаток этого вида энергетики связан с невозможностью регулировать производимую энергию. Поэтому можно ожидать, что до конца 21-го в. углеродная энергетика сохранит ведущие позиции.

Рассмотрим некоторые проблемы углеродной энергетики, важные для ее развития в ближайшем будущем. В средствах массовой информации широко обсуждается необходимость замены углеродной энергетики водородной, что означает замену ископаемого топлива водородом. Тогда в атмосферу не попадает углекислый газ, продукт углеродной энергетики. Также водородная энергетика, подобно углеродной энергетике, позволяет регулировать выходные параметры интенсивно развивающейся возобновляемой энергетики. Не останавливаясь на малой эффективности водородной энергетики, рассмотрим риски, связанные с использованием водорода в больших масштабах.

Действительно, водородная энергетика не подходит для массового использования, поскольку опасно хранить водород в больших количествах. Продемонстрируем это на основе опыта, полученного разными странами при эксплуатации дирижаблей на водороде около ста лет назад. Типичный дирижабль имеет длину примерно 100 м и поперечные размеры в несколько десятков метров, причем почти весь объем дирижабля заполнен водородом. Обычно несколько лет эксплуатации дирижаблей кончались их взрывами. На рис. 10 представлен взрыв дирижабля «Гинденбург». Этот дири-



Рис. 10. Взрыв дирижабля «Гинденбург» в Нью-Йорке [48].

жабль [49, 50], гордость Третьего рейха, был построен в 1934 г. и совершил 65 полетов за время своего существования между разными странами и континентами. Взрыв произошел в процессе его остановки в Нью-Йорке 6 мая 1937 г.

Другой пример хранения водорода при его массовом использовании относится к ракетным двигателям [51]. Одним из видов топлива для второй и третьей ступеней баллистической ракеты является смесь жидких водорода и кислорода. Для хранения данной смеси требуются специальные материалы и строгое выполнение определенных требований при обращении с ней. Нарушение этих требований привело к взрыву на Байконуре 24 октября 1960 г. [52]. Этот взрыв и вызванный им пожар привели к гибели 78 человек.

Одной из главных проблем углеродной энергетики является исчерпание горючих полезных ископаемых. Согласно данным [7], запасы ископаемых топлив — газа, нефти и угля — составляют соответственно 115, 230 и 560 Гт С. Конечно, история показывает, что спустя время будут разведаны новые запасы горючих ископаемых. Однако на наших глазах источники добычи полезных ископаемых перемещаются в труднодоступные места. При этих условиях возникает проблема изготовления жидкого и газообразного синтетического топлива из угля.

С такой проблемой столкнулась Германия в первой половине 20-го в. При этом первая технология, пригодная для массового использования, была предложена в 1913 г. нобелевским лауреатом Ф. Бергиусом, в которой каменный или бурый уголь смешиваются со специальными добавками, включающими катализаторы. Подготовленную суспензию смешивают с водородом, который получается из нагретой смеси воды и угля, а далее смесь подается в химический реактор, где температура составляет 450–485°C, а давление достигает 500–700 атм.

Получаемая синтетическая сырая нефть представляла собой смесь нефти, дизельного топлива, топливных газов и других компонентов. В последующем синтетическая нефть разделялась на тяжелые масла, бензин и горючие газы.

Альтернативная технология производства синтетического топлива была реализована в процессе Фишера–Тропша в 1926 г. [53]. Первой стадией этого процесса является обработка горячего измельченного угля (как каменного, так и бурого) перегретым водяным паром, что приводит к образованию синтез-газа [54] в виде смеси CO и H₂. Синтез-газ может быть преобразован далее в жидкое топливо в результате смешивания с различными сырыми видами топлива. Эта технология позволяет получать различные виды топлива, среди которых особое место занимал синтетический бензин. Совершенствование и модификация данной технологии использовалась на промышленных предприятиях при производстве различных синтетических видов топлива.

В Германии технология производства синтетического топлива получила практическое применение в 1944–1945 гг., когда во время войны страна оказалась отрезанной от районов добычи нефти в Румынии, тогда как другие развитые страны имели возможность получать более дешевое ископаемое топливо. В 1944 г. на 25 заводах было произведено около 6 млн т синтетического топлива, и для этой цели было использовано 60 млн т 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. В то же время стоимость ископаемого топлива со временем растет, что может изменить отношение к синтетическому топливу.

Частичный переход на получаемое из угля синтетическое топливо практически происходит на угольных тепловых электростанциях, где используется диспергированный уголь, помещенный в перегретый водяной пар [55]. В паровом котле создаются сверхкритические температура и давление, достигающие 600°C и 320 атм соответственно. КПД таких электростанций превышает 40%. Таким образом, происходит постепенный переход на новую технологию 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 вред-

ных примесей, в число которых не входит углекислый газ.

Таким образом, современное развитие углеродной энергетики связано с рядом проблем, как естественных, так и надуманных. Тем не менее углеродная энергетика сохранит свое доминирующее положение до конца 21-го в.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия выполняются долгосрочные научные программы, посвященные измерению и анализу параметров глобальных процессов, протекающих между атмосферой и поверхностью Земли. Наряду с более глубоким пониманием глобальных процессов это дает возможность проанализировать роль индустриальной деятельности человека в происходящих на Земле изменениях. В настоящей статье использовались данные ряда научных центров и долгосрочных научных программ для анализа энергетических глобальных процессов и эволюции теплового состояния Земли под действием углеродной энергетики.

Однако современный объем углеродной энергетики и связанные с этим большие потоки средств являются привлекательными для разработки международных мошеннических схем, а средства массовой информации в интересах определенных финансовых групп создают искаженное представление о некоторых аспектах энергетики. Не рассматривая гуманитарные, финансовые и политические аспекты проблемы, в работе представлены анализ и оценки, позволяющие надежно проанализировать важные аспекты углеродной энергетики.

Из проведенного анализа следует, что наблюдаемый рост концентрации атмосферного углекислого газа носит антропогенный характер и определяется сжиганием горючих ископаемых в рамках углеродной энергетики. Часть инжектируемого углекислого газа остается в атмосфере и дает вклад примерно 30% в рост глобальной температуры. Поэтому инжектируемый в атмосферу углекислый газ не является главной причиной наблюдаемого потепления планеты.

Хотя вклад антропогенного углекислого газа в потоки углерода между поверхностью Земли и атмосферой невелик и составляет примерно 5% от естественных потоков, за время индустриального периода (примерно 300 лет) масса углерода в атмосфере и биомассе на поверхности Земли увеличилась в полтора раза. При современном содержании углекислого газа в атмосфере это увеличение не влияет на здоровье человека, но ведет к возрастанию урожаев сельскохозяйственных культур примерно в полто-

ра раза и, таким образом, обеспечивает пищей увеличивающееся население планеты.

Углеродная энергетика, видимо, сохранит свое лидирующее положение в мировой энергетике в 21-м в., так что проведенный выше численный анализ проблем, связанных с эволюцией углеродной энергетики, может быть полезен при планировании ее развития. К сожалению, средства массовой информации дают ложное представление о будущем углеродной энергетики, считая ее опасной для человечества. Проведенный выше анализ вскрывает принципиальные ошибки, на которых основан этот вывод.

Отметим, что углеродная энергетика находится под сильным давлением со стороны международных финансовых кругов, что позволило существенно снизить цену горючих полезных ископаемых, делая невыгодным по сравнению с ними использование синтетического топлива и органических отходов. Для обоснования этого давления привлекается ложная концепция парникового эффекта за счет накопления углекислого газа в атмосфере. Хорошо организованная цензура в средствах массовой информации большинства энергетических стран, включая Россию, поддерживает эту ложную концепцию и не допускает ее обсуждения.

В то же время существует ряд научных центров, главным образом под эгидой НАСА, результатом исследования которых является научная истина. При этом целью данной работы является не дискуссия о парниковой природе наблюдаемого роста глобальной температуры, а объединение результатов отдельных научных центров в детальную физическую картину, лежащую в основе развития углеродной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fossil Fuels. Washington, DC: Environmental Energy Study Institute. <https://www.eesi.org/topics/fossil-fuels/description>
2. Global Energy Perspective 2022. Report. McKinsey & Company, 2022. <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2022>
3. World Energy Balances: Overview. Report. The International Energy Agency, 2021. <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/world>
4. World Population by Year. Worldometer. <https://www.worldometers.info/world-population/world-population-by-year>
5. World Energy Supply and Consumption. https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_supply_and_consumption

6. Distribution of Electricity Generation Worldwide in 2023, by Energy Source. <https://www.statista.com/statistics/269811/world-electricity-production-by-energy-source/>
7. Global Primary Energy Consumption by Source. <https://ourworldindata.org/grapher/global-energy-substitution>
8. Fossil Fuels Remain Strong in 2022 Globally, Despite Increases in Renewable Energy. Institute for Energy Research, 2023. <https://www.instituteeforenergyresearch.org/international-issues/fossil-fuels-remain-strong-in-2022-globally>
9. The Global Carbon Project. <http://www.globalcarbonproject.org>
10. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al. Global Carbon Budget 2018 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2019. V. 11. P. 1783.
11. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al. Global Carbon Budget 2021 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2022. V. 14. P. 4811.
12. Smirnov B.M. Global Energetics of the Atmosphere. Springer Atmospheric Sciences. Switzerland: Springer, 2021. 301 p.
13. Grosjean M., Gouiot J., Yu Z. Scrutinizing the Carbon Cycle and CO₂ Residence Time in the Atmosphere // *Global Planet Change*. 2017. V. 152. P. 19.
14. Smirnov B.M. Microphysics of Atmospheric Phenomena. Springer Atmospheric Sciences. Switzerland: Springer, 2017. 270 p.
15. Mauna Loa Observatory. <https://en.wikipedia.org/wiki/Mauna-Loa-Observatory>
16. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide (CO₂). Earth System Research Laboratories. Global Monitoring Laboratory. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends>
17. https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2_mm_mlo.txt
18. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21>.
19. Paleoclimatology. <https://en.wikipedia.org/wiki/Paleoclimatology>
20. Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani J.O. et al. Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 // *Science*. 2007. V. 317. P. 793.
21. Lüthi D., Le Floch M., Bereiter B. et al. High-resolution Carbon Dioxide Concentration Record 650,000–800,000 Years Before Present // *Nature*. 2008. V. 453. P. 379.
22. Atmospheric Carbon Dioxide (CO₂). [https://www.climate4you.com/GreenhouseGasses.htm#Atmospheric%20carbon%20dioxide%20\(CO2\)](https://www.climate4you.com/GreenhouseGasses.htm#Atmospheric%20carbon%20dioxide%20(CO2))
23. Hansen J.E., Johnson D., Lacis A. et al. Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide // *Science*. 1981. V. 213. P. 957.
24. Hansen J., Sato M., Ruedy R., Schmidt G.A., Lo K. Global Temperature in 2015, 2016. http://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2016/20160120_Temperature2015.pdf.
25. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIAR5_SPM_brochure_en.pdf.
26. May 2018 Global Climate Report. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201805>
27. May 2019 Global Climate Report. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201905>
28. July 2022 Global Climate Report. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202207>
29. Goody R.M. Atmospheric Radiation: Theoretical Basis. London: Oxford Univ. Press, 1964. 435 p.
30. Goody R.M., Yung Y.L. Principles of Atmospheric Physics and Chemistry. N.Y.: Oxford Univ. Press, 1995. 544 p.
31. Center for Astrophysics, Harvard & Smithsonian. <https://www.cfa.harvard.edu/>
32. HITRAN. <http://www.hitran.iao.ru/home>
33. Definitions and Units: Line-by-line Parameters. <https://hitran.org/docs/definitions-and-units/>
34. U.S. Standard Atmosphere. Washington: U.S. Government Printing Office, 1976. 241 p.
35. Смирнов Б.М. Инфракрасное излучение в энергетике атмосферы // *TBT*. 2019. Т. 57. № 4 С. 609.
36. Smirnov B.M. Transport of Infrared Atmospheric Radiation. Berlin: De Gruyter, 2020. 250 p.
37. Smirnov B.M., Zhilyaev D.A. Greenhouse Effect in the Standard Atmosphere // *Foundation*. 2021. V. 1. P. 184.
38. Bunsen R., Kirchhoff G. Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen // *Annalen der Physik und Chemie*. 1860. Bd. 110. S. 161.
39. Smirnov B.M. Interaction of Radiative Molecules in Gas Emission // *Int. Rev. At. Mol. Phys.* 2019. V. 10. P. 39.
40. Smirnov B.M. Atmospheric Carbon Dioxide and Climate // *J. Atmos. Sci. Res.* 2019. V. 2. № 4. P. 21.
41. Жилиев Д.А., Смирнов Б.М. Закон Кирхгофа при эмиссии смеси молекулярных газов // *ЖЭТФ*. 2021. Т. 133. С. 687.
42. Смирнов Б.М. Проблемы глобальной энергетике атмосферы // *TBT*. 2021. Т. 59. № 4. С. 589.
43. Pleil J.D., Wallace M.A.G., Davis M.D., Matty D.C.M. Human Breathing // *J. Breath Res.* 2021. V. 15. P. 042002.
44. Malthus T.R. An Essay on the Principle of Population. London: St. Paul's Churchyard, 1798. 104 p.
45. Worldwide Production of Grain in 2023/24, by Type (in Million Metric Tons). <https://www.statista.com/statistics/263977/world-grain-production-by-type/>.

46. Cereal. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cereal>
47. *Roser M., Ritchie H., Rosado P.* Food Supply. <https://ourworldindata.org/food-supply>
48. *Evans N.* Humanity's Hindenburg. 2017. <https://www.ohiohistory.org/humanitys-hindenburg/>
49. Hindenburg Disaster. https://en.wikipedia.org/wiki/Hindenburg_disaster
50. Гинденбург (дирижабль). [https://ru.wikipedia.org/wiki/Гинденбург_\(дирижабль\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Гинденбург_(дирижабль))
51. Ракетное топливо. https://ru.wikipedia.org/wiki/Ракетное_топливо
52. Катастрофа на Байконуре (1960). [https://ru.wikipedia.org/wiki/Катастрофа_на_Байконуре_\(1960\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Катастрофа_на_Байконуре_(1960)).
53. Fischer–Tropsch Process. https://en.wikipedia.org/wiki/Fischer–Tropsch_process
54. Syngas. <https://en.wikipedia.org/wiki/Syngas>
55. Supercritical Steam Generator. https://en.wikipedia.org/wiki/Supercritical_steam_generator