

УДК: 551.58

ФИЗИКА И ПРОБЛЕМЫ АНТРОПОГЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

В. В. ТЕТЕЛЬМИН
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ДРУЖБЫ НАРОДОВ

Выполнен анализ естественных внешних воздействий и антропогенных воздействий на климатическую систему Земли с учетом радиационного баланса. Делается вывод о том, что современное глобальное потепление формируется хозяйственной деятельностью человека.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *тепловое излучение Земли, эмиссия парниковых газов, парниковый эффект, антропогенное изменение климата.*

Проблема глобального климатического кризиса давно перешла в политическую плоскость и потому разобраться с ней даже подготовленному человеку непросто. Дело в том, что представители некоторых компаний, интересы которых страдают от снижения выбросов парниковых газов, ставят под сомнение данные об антропогенном изменении климата. Например, звучат такие фразы [2, 6]: «Диоксид углерода никак не влияет на климат. Мероприятия по стабилизации климата вредны для экономики». Даже Президенту РФ Владимиру Путину, выступившему в декабре 2018 г. на форуме «Российская энергетическая неделя», безымянные эксперты подготовили следующую фразу: «Антропогенные выбросы на глобальное потепление как-то влияют, но судя по мнению многих специалистов, влияют незначительным образом».

На протяжении всей человеческой истории основной движущей силой производства являлась энергия сжигаемого топлива. Сегодняшняя планета Земля отличается от той чистой планеты, когда 150 лет началась промышленная добыча нефти и угля. В настоящее время за один день сжигается в топках около 10 млн т нефти и 15 млн т угля. За последние 35 лет в атмосферу выброшено 1 трлн т диоксида углерода, масса которого в атмосфере увеличилась до $3,34 \times 10^{12}$ т. Огромный объем продуктов сгорания оставляет различные химические отпечатки по всему миру, формирующие новую эпоху «антропоцен» [7]. Сегодня перед цивилизацией возникла серьезная проблема: человечество вступило в полосу глобального климатического кризиса. Всесторонний анализ происходящего позволяет

PHYSICS AND ISSUES OF ANTHROPOGENIC CLIMATE CHANGE

V. V. TETELMIN
RUSSIAN UNIVERSITY FRIENDSHIP
OF PEOPLES

We performed the analysis of natural external and anthropogenic impacts on climatic system of the Earth amid radiation budget. We made a conclusion that current global warming is caused by human business activity.

KEY WORDS: *earth's radiant heat flux, greenhouse gas emission, greenhouse effect, anthropogenic climate change.*

с уверенностью сказать, что в наблюдаемом изменении климата доминирует мощное антропогенное воздействие, что миллиард автомобилей и тысячи дымовых труб тепловых и электрических станций распугивают климатическую систему Земли.

Климатическая система Земли состоит из трех основных взаимодействующих друг с другом компонентов – атмосферы, гидросферы и деятельного слоя суши. При этом в водах океана находится основная доля тепловой и кинетической энергии системы. Примерно 90% получаемой Землей солнечной энергии забирает Мировой океан и только около 4% – атмосфера Земли. К антропогенным воздействиям на климатическую систему относят изменения газового и аэрозольного состава атмосферы в результате хозяйственной деятельности человека: сжигание угля, газа и нефтепродуктов, производство цемента и металлов, животноводство, вырубка лесов и др.

Парниковый эффект – это реальное физическое явление, происходящее на субмолекулярном уровне, которое со времен нобелевского лауреата шведского химика Сванте Аррениуса достаточно глубоко исследовано. Известно, что основную роль в совокупном парниковом эффекте играет водяной пар атмосферы, вклад которого – 62%, на втором месте углекислый газ – 22%, на остальные парниковые газы приходится 16%. Если не считать влияние водяного пара, общее содержание которого составляет 13000 Гт и который за счет осадков обновляется 30 раз в году, то наибольший вклад в современное увеличение парникового эффекта вносит CO_2 – его доля в повышении средней

приземной температуры Земли составляет около 60%. Содержание в тропосфере водяного пара настолько велико, что его парниковый потенциал задействован полностью, поэтому основные изменения парникового эффекта обусловлены изменением содержания в атмосфере диоксида углерода, метана, закиси азота и фторхлоруглеродов. В доиндустриальную эпоху содержание диоксида углерода 280 ppm – (объемных частиц на миллион); метана 0,71 ppm; диоксида азота 0,27 ppm.

Созданная при ООН Межправительственная группа экспертов по изменению климата (ИПСС) на основании различных климатических моделей и фактических данных составила список тщательно проработанных последствий глобального потепления. Различные сценарии развития событий – от оптимистического до пессимистического – опубликованы международными экспертами в четырех оценочных докладах [4, 9, 10]. Сбалансированность между Природой и Человеком может наступить только в случае сознательного ограничения масштаба его разрушительной хозяйственной деятельности. Именно об этом говорил на последней сессии Генеральный Секретарь ООН А. Гуттериш, обозначивший для энергетики следующую цель: сократить выбросы парниковых газов на 45% за 10 лет и до нуля к 2050 г. Для того чтобы каждый житель планеты согласился с осуществлением подобного радикального плана действий, намеченного Парижским соглашением, необходимо глубокое понимание сути происходящего глобального потепления климата. Сложилась тревожная ситуация: наука предсказывает подстерегающие землян опасности, а человек не может остановиться в своих потребительских устремлениях.

Основной источник энергии на Земле – это Солнце, интенсивность излучения которого на внешней границе земной атмосферы $S = 1368 \text{ Вт/м}^2$, известна как «солнечная постоянная». Из этой мощности до земной поверхности при значении альбедо 0,3 доходит около 240 Вт/м^2 . На уровне моря солнечный спектр обладает рядом полос поглощения в результате взаимодействия излучения с атмосферными газами. В частности, коротковолновое излучение в районе длин волн 0,175 мкм и 0,310 мкм поглощается озоном, который тем самым обеспечивает защиту всего живого на Земле от жесткого ультрафиолета. Сильные полосы поглощения фотонов водяным паром (1,35–1,45; 1,8–1,95; 5,5–7,5 мкм), диоксидом углерода (4,5–5; 14–18 мкм) и метана (7,5–8,0 мкм) означают непрозрачность атмосферы на этих длинах волн, что играет важную роль в глобальном потеплении.

Излучаемая земной поверхностью солнечная энергия представляет собой электромагнитные волны в дальнем инфракрасном диапазоне от 3 до 70 мкм (рис. 1). Из этого диапазона лишь небольшая часть излучения $I_{\text{ПГ}} = 40 \text{ Вт/м}^2$ в диапазоне (9–13 мкм) уходит в космическое пространство через «ловушку» из

содержащихся в атмосфере парниковых газов, остальные тепловые волны поглощаются и переизлучаются ими с некоторой интенсивностью $I_{\text{ПГ}}$. При наличии в современной атмосфере парниковых газов уравнение радиационного баланса планеты Земля можно представить в следующем упрощенном виде:

$$S(1 - a)/4 = \sigma T^4 - \text{ПГ}, \quad (1)$$

где $S = 1368 \text{ Вт/м}^2$ – солнечная постоянная; $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \times \text{К}^4$ – постоянная Стефана-Больцмана; $a = 0,3$ – среднее значение альбедо; T – средняя температура земной поверхности; ПГ (Вт/м^2) – переменная часть теплового излучения Земли, поглощаемая парниковыми газами.

В приведенном уравнении значение интенсивности поглощения теплового излучения Земли ПГ (Вт/м^2) зависит от концентрации парниковых газов в атмосфере. Для идеальной атмосферы, не содержащей парниковых газов, уравнение радиационного баланса (1) дает низкую температуру земной поверхности $T = 255 \text{ К}$ (-18°С), которая не допускает наличия жизни на Земле. Причина подобного расхождения с реальной температурой (288 К ; 15°С) кроется в «парниковом эффекте», возникающем из-за свойства содержащихся в атмосфере парниковых газов поглощать излучение разной длины волн.

Из условия (1) следует, что совокупная мощность парникового эффекта от присутствия в атмосфере парниковых газов, включая пары воды, при $T = 288 \text{ К}$ (15°С) составляет $I_{\text{ПГ}} = 150 \text{ Вт/м}^2$. Такова совокупная энергетическая характеристика вклада в парниковый эффект атмосферных парниковых газов в доиндустриальный период человеческой истории. Именно этот поток тепловой энергии обеспечил повышение средней температуры земной поверхности до комфортного уровня 15°С , который существовал до начала активной хозяйственной деятельности человека. Суммарная интенсивность поглощения

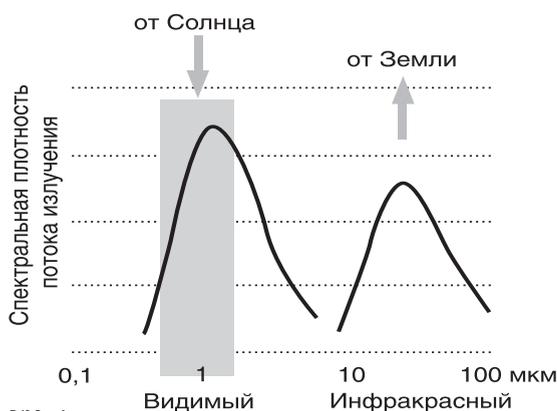


Рис. 1.

Диапазон длин волн получаемой Землей солнечной энергии и излучаемой земной поверхностью тепловой энергии

$I_{\text{ПГ}} = 150 \text{ Вт/м}^2$ обеспечивается присутствующими в атмосфере парниковыми газами в следующих долях: водяной пар – 60%; диоксид углерода – 23% (34 Вт/м^2); метан – 6%; озон – 5%; остальные газы 6%.

Попавшие в атмосферу молекулы антропогенного CO_2 начинают работать на потепление климата в соответствии с законами молекулярной физики. Поглощаемые молекулами диоксида углерода фотоны с длиной волны $4,26 \text{ мкм}$ вызывают вибрационное асимметричное растяжение этой молекулы, а фотоны с длиной волны $14,29 \text{ мкм}$ с энергией $1,39 \times 10^{21} \text{ Дж}$ – изгибные колебания молекулы. До начала наблюдаемого потепления климата в атмосфере содержалось около $2,3 \times 10^{12} \text{ т}$ CO_2 , чему соответствует содержание в единичном столбе атмосферы $6,4 \times 10^{25}/\text{м}^2$ молекул этого газа. Таким образом, до потепления климата каждая из молекул диоксида углерода перехватывала около $5 \times 10^{25} \text{ Вт}$ мощности волн дальнего инфракрасного диапазона. В настоящее время эта цифра уменьшилась из-за антропогенного увеличения концентрации CO_2 в атмосфере почти на 50%.

Следует отметить одну важную особенность, демонстрирующую сложность связей между климатическими переменными. Присутствующий в атмосфере CO_2 поглощает почти 80% излучения длин волн, которые он способен абсорбировать. Поэтому дальнейшее увеличение содержания этого парникового газа в атмосфере приводит не к пропорциональному, а более скромному росту поглощаемого им излучения. Дополнительно накапливающийся в атмосфере CO_2 поглощает только ту небольшую часть инфракрасного излучения, которая еще не была поглощена присутствующим в атмосфере диоксидом углерода.

Приземные молекулы CO_2 получают от излучения Земли свою порцию тепловой энергии, уходят вверх, а на их место в процессе конвекции спускаются и «подзаряжаются» тепловой энергией новые молекулы этого парникового газа. За последние 150 лет активной хозяйственной деятельности концентрация CO_2 в атмосфере увеличилась с 280 ppm до экстремального значения 416 ppm, то есть существенно увеличилась мощность антропогенной части парникового эффекта и средняя приземная температура (рис. 2). Например, на работу по подогреву и обеспечению конвекции молекул диоксида углерода в атмосфере «перехватывалось» и расходовалось следующее количество энергии инфракрасного излучения Земли [4, 5, 9, 11]: в 1995 г. $\Delta I_{\text{ПГ}} = 1,47 \text{ Вт/м}^2$; в 2005 г. – $1,66 \text{ Вт/м}^2$; в 2011 г. – $1,82 \text{ Вт/м}^2$.

Диоксид углерода не является единственным и, тем более, не является самым сильным парниковым газом. Например, влияние метана на глобальное потепление в пересчете на одну молекулу в 25 раз сильнее, а закиси азота почти в 290 раз сильнее, поэтому даже при небольшом содержании в атмосфере их влияние на глобальное потепление является заметным.

С 1850 г. концентрация в атмосфере метана возросла на 150%, закиси азота на 16%, фторхлоруглеродов на 14%. По мере роста концентрации парниковых газов увеличивается интенсивность поглощения теплового излучения Земли. При этом в соответствии с (1) температура земной поверхности T повышается, чтобы собственным более мощным излучением компенсировать возросшую «энергию перехвата» $\Delta I_{\text{ПГ}}$ и таким образом вернуть в Космос всю полученную от Солнца энергию. Международный комитет экспертов по изменению климата (ИПСС) оценил суммарное антропогенное усиление парникового эффекта по состоянию на 1995 г. величиной $\Delta I_{\text{ПГ}} = 2,45 \text{ Вт/м}^2$ [9]. По состоянию на 2005 г. общая интенсивность поглощения антропогенными парниковыми газами теплового излучения составила $\Delta I_{\text{ПГ}} = 3,06 \text{ Вт/м}^2$ [5].

При увеличении концентрации CO_2 и соответствующем увеличении интенсивности поглощения тепловой энергии температура приземного слоя атмосферы увеличивается быстро из-за малой теплоемкости воздуха и его постоянной конвекции. К 2017 г. средняя температура приповерхностного слоя атмосферы Земли выросла на 1°C (рис. 4). Температура земной поверхности, которая на 70% представлена Мировым океаном, изменяется медленно за счет высокой теплоемкости воды и вовлечения в процесс теплообмена глубинных слоев океана. Например, с 1960 по 2003 г.

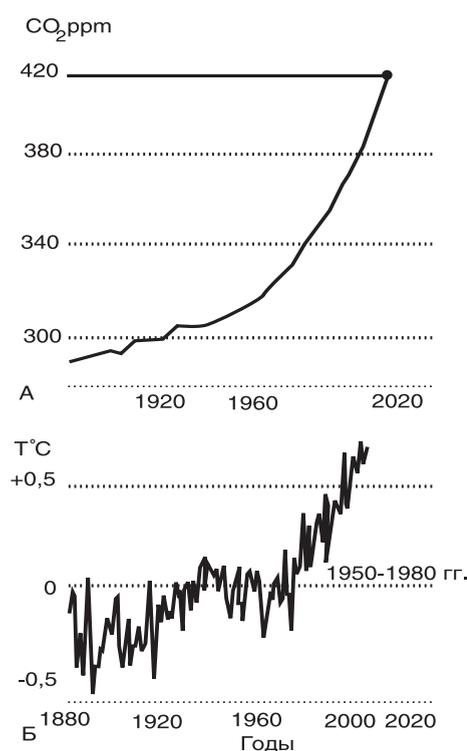


Рис. 2.

Рост концентрации диоксида углерода в атмосфере (а) и соответствующий рост средней температуры земной поверхности (б)

средняя температура слоя до глубины 700 м увеличилась всего на $0,1^\circ\text{C}$ [4]. К 2015 г. накопленный за счет парникового эффекта запас тепловой энергии в климатической системе Земли составил $2,8 \times 10^{23}$ Дж, из которых 93% приходится на долю Мирового океана. Таким образом, уже к настоящему времени человек зарядил климатическую систему Земли огромным количеством тепловой энергии, обладающей разрушительным для биосферы потенциалом.

Существенную роль в глобальном изменении климата играет высокая растворимость диоксида углерода в воде, которая зависит от температуры и парциального давления. Растворимость CO_2 в воде снижается с увеличением температуры: при 0°C – растворимость $3,51$ г/л; при 20°C – $1,69$ г/л. Именно этим фактором объясняется изменение концентрации CO_2 в атмосфере после каждого цикла естественного потепления-похолодания, периодически наблюдавшихся в течение последнего миллиона лет. То есть в тот давний период истории Земли изменение концентрации CO_2 в атмосфере являлось следствием естественного изменения климата, а не его причиной [6]. При этом сопутствующее изменение концентрации CO_2 в атмосфере за счет положительных обратных связей еще более усиливало палеоклиматический сдвиг.

Авторы публикаций, отрицающие антропогенный вклад в современное потепление климата, в качестве подтверждения своей правоты ссылаются на естественные события в истории Земли, когда на протяжении последнего миллиона лет с периодичностью раз в 100 тыс. лет происходило похолодание примерно на 9° . Эти повторяющиеся процессы похолодания с 288K до 279K были обусловлены снижением инсоляции и последующим сопутствующим снижением концентрации парниковых газов в атмосфере: CO_2 в диапазоне $290\text{--}190$ ppm; CH_4 в диапазоне $0,75\text{--}0,35$ ppm. Происходившее похолодание климата было вызвано естественным изменением орбитальных параметров Земли [1, 5, 6]. Например, из-за гравитационного взаимодействия Земли с планетами Солнечной системы эксцентриситет орбиты меняется с периодом около 100 тыс. лет, угол наклона оси вращения Земли меняется с периодом около 41 тыс. лет, а прецессия оси – с периодом около 26 тыс. лет. К естественным воздействиям можно отнести также вулканическую деятельность и солнечную активность.

Периодическое многократное похолодание, происходившее за счет вариации орбитальных параметров и соответствующего снижения инсоляции, снижало концентрацию CO_2 в атмосфере почти на 100 ppm и концентрацию CH_4 на $0,4$ ppm за счет увеличения их растворимости в океане. Уход парниковых газов в океан снижал создаваемый ими парниковый эффект. Можно принять, что по аналогии с современными событиями ретроспективное изменение концентрации парниковых газов обеспечило похолодание на 2

градуса из произошедших 9° . Это было проявлением положительной обратной связи, усилившей действие входного сигнала. Таким образом, через каждые 100 тыс. лет на Земле происходили два мощных естественных процесса, одновременно работавших на похолодание:

-- уменьшался приток солнечной энергии за счет колебаний орбитальных параметров Земли, обеспечивший снижение температуры на 7 град. с 288 до 281K ;

– увеличивался отток тепловой энергии за счет ослабления парникового эффекта, обеспечивший снижение температуры на 2 град. с 281 до 279K .

Первый из названных процессов проходил без участия парникового эффекта, был обусловлен только снижением инсоляции и солнечной постоянной до некоторого значения S_1 . Для такого сценария из уравнения радиационного баланса (1) при $T = 281\text{K}$ получаем эффективное значение солнечной постоянной в период палеоклиматического похолодания: $S_1 = 1164$ Вт/м². Подобное снижение инсоляции было вызвано совокупным изменением астрономических параметров, эквивалентных некоторому эффективному увеличению расстояния R_1 от Земли до Солнца. Зная мощность солнечного излучения $3,85 \times 10^{26}$ Вт, находим это расстояние: $R_1 = 1,60 \times 10^8$ км. Таким образом, примерно один раз в 100 тыс. лет совокупное изменение астрономических параметров нашей планеты соответствовало эффективному увеличению расстояния от Земли до Солнца на 8%, при этом инсоляция уменьшалась на 15%, отчего на Земле наступало похолодание почти на 9°C .

Существует большое количество разнопериодных – от десятков до миллиона лет климатических циклов, которые накладываются друг на друга и создают сложный ход метеорологических показателей. Современное аномально быстрое глобальное потепление, формируемое человеком (рис. 3), не имеет ничего общего с очень медленным естественным изменением климата. На протяжении последних 10 тыс. лет суммарное действие астрономических циклов Миланковича [1, 5] обеспечивает современной Земле фиксированную максимальную интенсивность солнечного излучения. Этот максимум излучения Земля будет получать еще не менее 30 тыс. лет, а затем наступит следующий ледниковый период.

Скорость изменения температуры, связанная с долговременными астрономическими вариациями положения Земли очень небольшая и составляет примерно $0,1^\circ\text{C}$ за 1000 лет. Это намного меньше, чем наблюдаемая современная скорость изменения средней температуры $0,18^\circ\text{C}$ за 10 лет. Хорошо известный 11-летний геомагнитный цикл Солнца также приводит к небольшим изменениям количества энергии, приходящей на верхнюю границу атмосферы, всего на 0,1%. Извержения вулканов выбрасывают в атмосферу

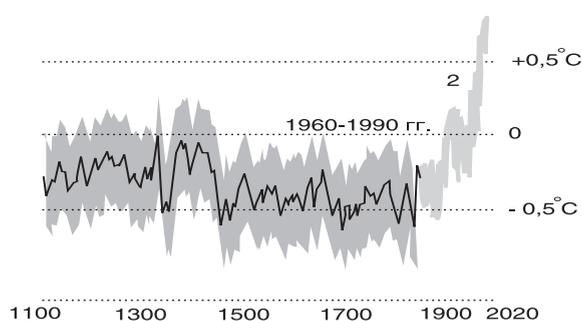


Рис. 3.

Изменение температуры Северного полушария за последнее 1000-летие за счет внутренней изменчивости климатической системы Земли: 1 – косвенные измерения; 2 – современные инструментальные измерения

около 240 млн т/год диоксида углерода и могут приводить только к кратковременному снижению температуры приземного слоя воздуха на планете.

Кроме внешних воздействий на климат случается внутренняя или собственная изменчивость климатической системы Земли, обусловленная нелинейными взаимодействиями между ее компонентами. При этом важнейшая роль принадлежит процессам в океане. Например, явление Эль-Ниньо – сильное колебание течений в южной части Тихого океана с периодическим выбросом огромного количества тепла из океана в атмосферу. Таким образом, внешние процессы и собственная изменчивость климатической системы не могут привести к наблюдаемому быстрому росту средней приземной температуры. На протяжении последнего столетия не было таких мощных воздействий Солнца, вулканов, вариаций орбиты Земли, которые способны настолько сильно изменить температуру океана, атмосферы и криосферы.

В 2018 г. выбросы мировой экономики составили примерно 37 млрд т CO_2 , из которых 4 млрд т дает производство цемента, остальные 33 млрд т приходится на сжигание ископаемого топлива (рис. 4). По видам топлива на первом месте по выбросам CO_2 находится уголь – 14,5 млрд т, затем нефтепродукты – 11,5 и природный газ – 6,8 млрд т. Суммарная годовая антропогенная эмиссия всех парниковых газов составляет 54 млрд т CO_2 -экв. В последнее время в атмосферу постоянно добавляются и остаются не поглощенными биосферой не менее 20 Гт/год антропогенного диоксида углерода.

Принципы положительной и отрицательной обратной связи в изменении климата установлены. Например, увеличение концентрации CO_2 в атмосфере ввиду его непрозрачности в инфракрасном диапазоне волн вызывает таяние арктических льдов, что снижает альбедо и еще более ускоряет потепление климата. Если бы физические воздействия, вызывающие глобальное потепление, имели только положительные обратные связи, то климатическая система Земли мог-

ла бы быстро пойти вразнос. К счастью, в биосфере существуют эффекты с отрицательными обратными связями. Например, потепление океанов способствует росту водорослей, увеличивающих потребление антропогенного CO_2 . Однако отрицательные обратные связи в климатической системе не компенсируют разогревающего эффекта от повышения концентрации парниковых газов.

Земная поверхность обладает конечной теплоемкостью $C_{зп}$, поэтому при увеличении количества поглощенной атмосферой энергии на ΔI температура земной поверхности медленно повышается на величину $\Delta T_{зп}$ за конечное время t . В случае скачка концентрации парникового газа на ΔC и соответствующего увеличения поглощения на ΔI ($\text{Вт}/\text{м}^2$) изменение температуры следует экспоненциальному закону [1]:

$$\Delta T_{зп} = G \times \Delta I [1 - \exp(-\frac{t}{\tau})], \quad (2)$$

где t – реальная продолжительность процесса; $G = T_{зп}/(1 - a)S$ ($\text{м}^2 \times \text{К}/\text{Вт}$) – функция радиационного усиления; $\tau = C_{зп} \times G$ – характеристическое время; $C_{зп}$ ($\text{Дж}/\text{м}^2 \times \text{К}$) – удельное теплосодержание активного слоя земной поверхности.

Из выражения (2) следует, что эффект от антропогенного увеличения содержания CO_2 в атмосфере и соответствующего увеличения ΔI является отложенным во времени. Изменение $\Delta T_{зп}$ и глобального климата происходит с запозданием из-за медленного нагревания Мирового океана. С течением времени экспонента в выражении (2) стремится к нулю, а приращение температуры $\Delta T_{зп}$ выходит на уровень, необходимый для соблюдения радиационного баланса, только через продолжительное время.

Последствия сокращения выбросов парниковых газов можно будет увидеть только через много лет из-за инертности климатической системы. Худших последствий антропогенного потепления можно избежать, если содержание парниковых газов в атмосфере удастся стабилизировать на уровне не выше 550 ppm CO_2 -экв. В этом случае потребуются около 30 лет на достижение 50% от равновесной температуры и 250 лет на получение 75% ответной реакции климатической системы Земли [5]. Аналогично, любое снижение величины поглощенной парниковыми газами энергии на ΔI не вызовет мгновенного падения температуры земной поверхности. Например, если человеческая цивилизация решит с 2020 г. ограничить антропогенные выбросы парниковых газов и снизить уровень содержания CO_2 в атмосфере, то снижение температуры земной поверхности произойдет намного позже.

Современное развитие климатических событий не соответствует долгосрочным целям Парижского соглашения Рамочной конвенции ООН об изменении климата, призывающего ограничить глобальное потепление не более чем на 2°C от доиндустриального уровня. Около 95% мировых выбросов CO_2 осущест-

вляется в Северном полушарии. В мире потепление происходит с интенсивностью $0,18^{\circ}\text{C}/10$ лет, в России $0,45^{\circ}\text{C}/10$ лет, а за полярным кругом $0,75^{\circ}\text{C}/10$ лет. Можно сказать, что постепенно стирается грань между Арктикой и тропиками, поэтому фиксируются усиленные потоки CO_2 и метана из оттаивающих вечномёрзлых пород, а также из залежей метангидратов арктического шельфа. Уровень Мирового океана повышается на 3 мм в год, что эквивалентно ежегодной потере суши 430 км^3 воды. Накопленная климатической системой Земли тепловая энергия меняет картину океанических течений, усиливает циркуляцию воздушных потоков. Например, пилоты самолетов зафиксировали усиление турбулентности над Северной Атлантикой оттого, что скорость ветра на высотах самолетных рейсов увеличилась на 15%. В текущем столетии будут смещаться границы лесов и вечной мерзлоты, повышаться вероятность наводнений и засух. Усиливающееся потепление климата заметно влияет на образ жизни целых народов.

Для того, чтобы Земля оставалась комфортной для проживания, должно сохраняться оптимальное значение концентрации парниковых газов в атмосфере. С 1960 г. темп глобального использования ископаемого топлива ежегодно увеличивался в среднем на 130 млн т н.э. в результате чего глобальная эмиссия CO_2 прирастала в среднем на 420 млн т/год. При этом концентрация CO_2 в атмосфере увеличивалась в ускоренном темпе: от 1,3 ppm/год в 1975 г. до 2,8 ppm/год в 2015 г. В 2017 г. из 37 млрд т эмиссии диоксида углерода биосфера «не сумела» депонировать около 23 млрд т. Следует иметь ввиду, что каждому увеличению концентрации CO_2 на 1 ppm соответствуют около 8 млрд т накопленных в атмосфере антропогенных выбросов этого парникового газа.

По мере роста эмиссии диоксида углерода биосфера постепенно наращивает мощность фотосинтеза по депонированию этого антропогенного газа за счет роста глобальной фитомассы и повышенного закисления Мирового океана. Например, в 1965 г. климатическая система Земли депонировала около 8 млрд т антропогенного CO_2 , а в 2015 г. – уже 15 млрд т. При этом в 1965 г. остались в атмосфере непоглощенными 6 млрд т, а в 2015 г. – уже 22 млрд т CO_2 . Таким образом, при нынешнем темпе роста сжигания ископаемого топлива биосфера не справляется с удалением из атмосферы основного парникового газа CO_2 (рис. 4). Для решения проблемы с глобальным потеплением человечество может в сфере энергетики реализовать несколько сценариев.

Сценарий первый. Начиная с 2020 г. человечество не увеличивает массу сжигаемого ископаемого топлива, а останавливается на достигнутом уровне сжигания 11 млрд т/год нефтяного эквивалента. В таком случае только через 100 лет биосфера за счет мобилизации своих резервов по активизации фотосинтеза

приобретет способность поглощать всю эмитируемую массу CO_2 . В таком случае к концу XXI века концентрация CO_2 в атмосфере успеет увеличиться вдвое – до 560 ppm, что будет ускоренно обогревать Землю на протяжении всего срока жизни в атмосфере этого парникового газа.

Сценарий второй – оптимальный. Начиная с 2020 г. человечество начинает ежегодно снижать использование ископаемого топлива на 200 млн т н.э./год, что обеспечит ежегодное снижение выбросов CO_2 на 620 млн т/год. При таком сценарии вещественный баланс углерода «эмиссия–сток» будет достигнут примерно к 2040 г. при накопленной концентрации CO_2 в атмосфере около 460 ppm (рис. 5). К тому времени будет сжигаться всего 7 млрд т н.э./год вместо сегодняшних «несбалансированных» 11 млрд т/год.

Названный темп снижения сжигаемой массы ископаемого топлива на 200 млрд т н.э./год подтверждается возможностью замещения выводимой из эксплуатации мощности тепловой энергетики альтернативными источниками энергии. Реальность подобного замещения подтверждается введенной в мире в 2017 г. мощностью 140 ГВт альтернативной (солнечной, ветровой, гидравлической и атомной) генерации. Эти станции способны вырабатывать 600 млрд кВт·ч/год электроэнергии, то есть ровно столько, сколько способны выработать тепловые станции при сжигании 200 млн т н.э.

Неблагоприятные и опасные гидрометеорологические явления по силе воздействия на экономику выходят на первое место. Предполагается, что к 2030 г. ущерб от глобального изменения климата составит 3,2% мирового ВВП. Уильям Нордхаус, нобелевский лауреат в области экономики за 2018 г., предлагает выбросы парниковых газов считать товаром со своей стоимостью. Предлагается в 2021 г. установить цену за выбросы в размере 10 евро/т CO_2 , а к 2025 г.

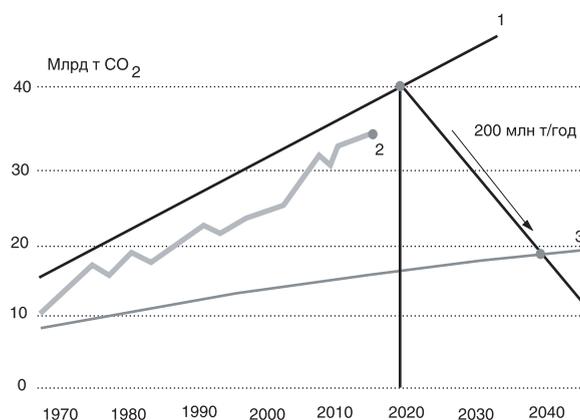


РИС. 4.

Динамика глобальной эмиссии диоксида углерода: 1 – общая эмиссия; 2 – выбросы энергетической отрасли; 3 – поглощение CO_2 биосферой

– 25 евро/т. Эти меры приведут к отказу от широкого использования ископаемого топлива и отходу стран от сырьевой экономики. В особенности это коснется России, где удельные выбросы CO_2 составляют 1,3 кг/долл. ВВП, что в 4 раза больше, чем, например, в Японии и Франции. Экосистема России обладает мощным ассимиляционным ресурсом, поэтому состоявшееся в сентябре 2019 г. подключение нашей страны к Парижскому климатическому соглашению является политически и экономически оправданным шагом.

ВЫВОДЫ

1. Собранные Межправительственной группой экспертов по изменению климата данные указывают на то, что с начала промышленной революции до настоящего времени уровень содержания парниковых газов в атмосфере и повышение средней глобальной температуры испытывали устойчивый рост. За последние 150 лет содержание накопившегося в атмосфере парникового газа CO_2 увеличилось на 1 трлн т. На протяжении последнего миллиона лет в атмосфере Земли не отмечались наблюдаемые экстремально высокие значения концентрации парниковых газов: CO_2 до 416 ppm, CH_4 до 2,0 ppm, N_2O до 0,35 ppm.

2. Парниковый эффект как природный физический фактор не может быть оспорен, потому что существовал на Земле до появления человека и обеспечил биосфере комфортную среднюю температуру 288K (15°C). Вековые изменения орбиты Земли ввиду их длительности невозможно рассматривать в качестве фактора наблюдаемого быстрого потепления климата. Происходящее повышение средней глобальной температуры с интенсивностью $0,18^\circ\text{C}/10$ лет в сотни раз превышает подобный показатель потепления от любого из возможных естественных процессов.

3. У населяющих Землю людей не должно оставаться сомнений в том, что основная причина переживаемого глобального климатического сдвига – это парниковый эффект, вызванный активной деятельностью человека. Наблюдаемое потепление климата – это лишь часть последствий произведенных антропоген-

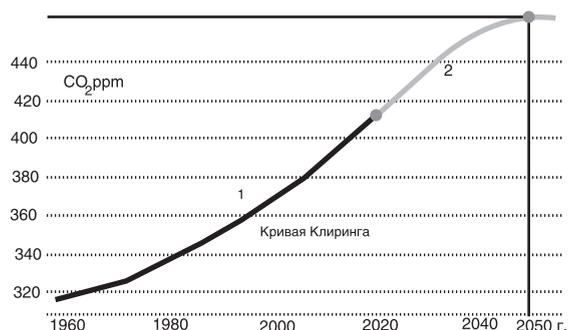


Рис. 5.

Реальный рост концентрации в атмосфере антропогенного CO_2 (1) и его прогнозируемая стабилизация (2) при снижении глобальных выбросов на 620 млн т/год

ных выбросов парниковых газов. Оставшаяся нереализованная доля влияния выбросов на потепление климата будет проявляться на протяжении многих десятилетий.

4. Внешние процессы и собственная изменчивость климатической системы Земли не могут привести к наблюдаемому быстрому потеплению климата. В последнее столетие не было существенных воздействий Солнца, вулканов, вариаций орбиты Земли, способных настолько сильно изменить температуру океана, атмосферы и криосферы. Поэтому человечеству следует активно приступить к адаптации мировой экономики к негативным антропогенным климатическим сдвигам, к ускоренному использованию возобновляемых источников энергии, к реализации пунктов Парижского соглашения.

ЛИТЕРАТУРА

1. БРИНКМАН Э. Физические проблемы экологии Долгопрудный: Интеллект. 2012. 288 с.
2. ГОРОДНИЦКИЙ А. Конец мифа о глобальном потеплении// «Новые известия» от 10.02.2017 г.
3. Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2017 г. Всемирная метеорологическая организация. 2018. 40 с.
4. ПАЧАУРИ Р.К., МЕЙЕР Л.А. Изменение климата. Обобщающий доклад МГЭИК. Женева: МГЭИК. 2014. 44 с.
5. СИЛВЕР ДЖ. Глобальное потепление без тайн. М.: Эксмо, 2009. 336 с.
6. СОРОХТИН О.Г. Жизнь Земли. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2007. 452 с.
7. ТЕТЕЛЬМИН В.В., ПИМАШКОВ П.И. Биосфера и человек. Экология взаимодействия. М.: ЛЕНАНД, 2019. 380 с.
8. ЮЛКИН М.А. Низкоуглеродное развитие: от теории к практике. М: АНО «Центр экологических инвестиций». 2018. 80 с.
9. IPCC AR5, 2013: Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p.
10. HOUGHTON J.T., JENKINS G.J. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment (Cambridge University Press, 1990).
11. IPCC. 2014 b. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken. Cambridge University Press, Cambridge. United Kingdom and New York, NY USA. 1132 p.

Тетельмин Владимир Владимирович,
д.т.н., профессор Российского университета дружбы на-
родов
✉ 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
117198, Moscow, st. Miklukho-Maklaya, 6
тел.: +7 (499) 936-87-87, e-mail: v-tetelmin@rambler.ru