

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2025-23-64-87>

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА ЗЕМЛИ С ПОЗИЦИИ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

Цегельский В.Г.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия*

Ключевые слова: климат Земли, неравновесная термодинамика, гистерезис, производство энтропии, антропогенные процессы, пауза в глобальном потеплении.

Аннотация. На основании общих закономерностей эволюции неравновесных термодинамических систем проанализированы процессы, влияющие на состояние атмосферы и соответствующий ему климат. Показано, что с позиций неравновесной термодинамики процессы, протекающие в атмосфере, близки к процессам, протекающим при конвекции Рэлея-Бенара. Сопоставлены воздействия разных природных и антропогенных факторов на климат Земли по количеству производства энтропии в атмосфере от каждого из них. Показано, что приходящая солнечная радиация на верхнюю границу атмосферы в настоящее время превысила исходящую длинноволновую радиацию в космос на $0,436 \text{ Вт/м}^2$ из-за увеличения парникового эффекта и отражённую коротковолновую радиацию на $0,0475 \text{ Вт/м}^2$ из-за уменьшения альбедо. Объясняется ускоренное потепление Мирового океана ускоренным ростом концентраций CO_2 в атмосфере из-за уменьшения его растворимости в океане, что повышает парниковый эффект и ускоряет рост температуры системы океан–атмосфера из-за обратной связи. С позиций неравновесной термодинамики объясняются возникающие паузы в росте температуры атмосферы при продолжающемся увеличении в ней концентрации CO_2 .

EARTH'S CLIMATE CHANGE FROM THE PERSPECTIVE OF NONEQUILIBRIUM THERMODYNAMICS

Tsegelsky V.G.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: earth's climate, nonequilibrium thermodynamics, hysteresis, entropy production, anthropogenic processes, pause in global warming.

Abstract. Based on the general laws of evolution of nonequilibrium thermodynamic systems, the processes influencing the state of the atmosphere and the corresponding climate are analyzed. It is shown that from the standpoint of nonequilibrium thermodynamics, the processes occurring in the atmosphere are close to the processes occurring during Rayleigh-Benard convection. The effects of different natural and anthropogenic factors on the Earth's climate are compared by the amount of entropy production in the atmosphere from each of them. It is shown that the incoming solar radiation at the upper boundary of the atmosphere currently exceeds the outgoing long-wave radiation into space by 0.436 W/m^2 due to an increase in the greenhouse effect and the reflected short-wave radiation by 0.0475 W/m^2 due to a decrease in albedo. The accelerated warming of the World Ocean is explained by the accelerated growth of CO_2 concentrations in the atmosphere due to a decrease in its solubility in the ocean, which increases the greenhouse effect and accelerates the growth of the temperature of the ocean-atmosphere system due to feedback. From the standpoint of nonequilibrium thermodynamics, the pauses that arise in the growth of the atmospheric temperature with a continuing increase in the concentration of CO_2 in it are explained.

Введение. Изменение климата на Земле происходит под воздействием природных и антропогенных факторов. К природным воздействиям относятся такие, которые изменяют климат Земли без участия человека и на которые он повлиять в настоящее время не может, например, изменение солнечной активности, орбиты Земли, извержение вулканов, падение астероидов.

Антропогенные воздействия на климат вызваны жизнедеятельностью человека, влияющего, например, на тепловое загрязнение атмосферы, альбедо Земли, величину парникового эффекта и др. Существуют такие пороговые значения воздействий, превышение которых приводят к значительным и быстрым изменениям климата. Наблюдаются в природе и обратные связи, которые могут либо усилить, либо уменьшить первоначальное воздействие.

Общие закономерности процессов в природе. Чтобы определить как природные и антропогенные процессы влияют на климат Земли и сопоставить их влияние, надо прежде всего понять природу наступления ледниковых периодов, кардинально изменяющих климат. Было установлено, что чередование ледниковых и межледниковых периодов в истории Земли сопровождалось изменением состояния атмосферы. Климат на Земле отображает ее состояние и зависит от многих протекающих процессов. Также было установлено, что начавшийся процесс оледенения развивается по своим закономерностям, игнорируя многие природные воздействия на климат в период межледнековья [1].

Атмосфера представляет собой газообразующую оболочку Земли, ограниченную с одной стороны её поверхностью, а с другой космосом. В такой термодинамической системе протекают далекие от равновесия процессы. В работах [2, 3] впервые сформулированы общие закономерности эволюции далёких от равновесия термодинамических систем и экспериментально-расчетным путем доказана их применимость для процессов, протекающих как в неживой, так и живой природе. В основе этих закономерностей лежит общий принцип, сформулированный в виде аксиомы о стремлении к совершенству процессов в природе: *из всех возможных стационарных состояний системы, допускаемых действующими в природе законами, термодинамикой необратимых процессов, граничными и другими физически обоснованными условиями, наиболее вероятно состояние с минимально возможным производством энтропии.* Под производством энтропии P_S в термодинамике понимают количество энтропии, производящейся (возникающей) внутри термодинамической системы за единицу времени $P_S = d_i S / dt$, где изменение энтропии $d_i S$ равно значению элементарной приведенной теплоты $\delta Q/T$, поглощенной системой; T – температура; t – время. Продемонстрируем на некоторых примерах общие закономерности эволюции неравновесных термодинамических систем, в которых протекают теплообменные процессы.

В работе [2] в качестве неравновесной термодинамической системы рассмотрена масса воды, находящаяся в большом объеме при атмосферном давлении, кипение которой осуществляется в условиях естественной

конвекции на плоском теплоотдающем днище сосуда, ограниченного теплоизолированными боковыми стенками (рис. 1). Экспериментально установлено два основных режима кипения воды: развитое пузырьковое и пленочное. Переход от одного режима кипения к другому определяется плотностью теплового потока q , представляющего собой количество теплоты, проходящей через единицу площади теплоотдающей поверхности за единицу времени. Производство энтропии в неравновесной термодинамической системе, находящейся в стационарном состоянии, согласно [2], можно определить по балансу потоков энтропии, выходящих из системы $J_{s,out}$ и поступающих $J_{s,in}$ в нее:

$$P_s = d_i S / dt = J_{s,out} - J_{s,in}; \quad PS = q(1/T_x - 1/T_e), \quad (1)$$

где для рассматриваемого случая $J_{s,out} = q/T_x$; $J_{s,in} = q/T_e$; T_x , T_e – соответственно температура холодной и горячей границ; PS – удельное производство энтропии, приходящееся на единицу теплоотдающей поверхности в соответствии с тепловым потоком q . Такое определение значений потоков энтропии применимо для квазистационарных состояний неравновесных термодинамических систем, в которых протекают тепломассообменные процессы.

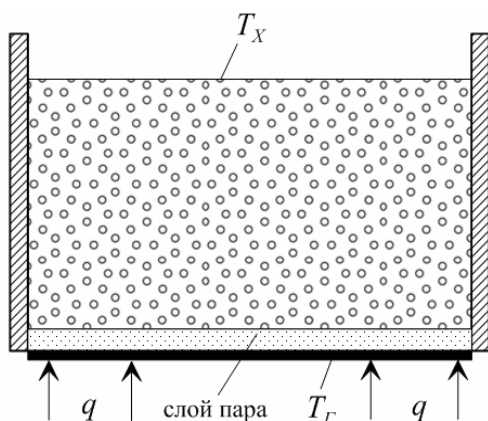


Рис. 1. Кипение воды в большом объеме

$PS \cdot 10^{-3}$, Вт/(м²·К)

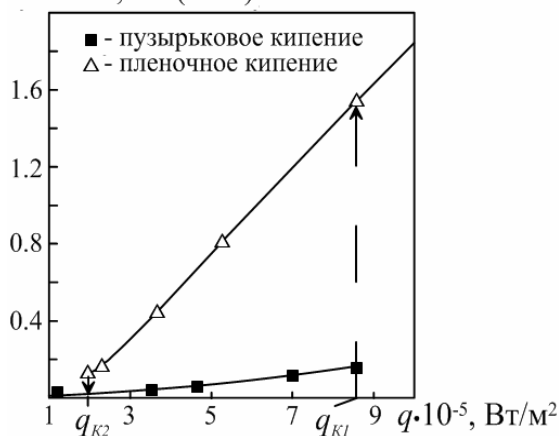


Рис. 2. Зависимость PS от q для двух режимов кипения в большом объеме воды

На основании экспериментальных данных, представленных в [4], определены по формуле (1) зависимости удельного производства энтропии PS от q для пузырькового и пленочного режимов кипения. Эти зависимости приведены на рисунке 2. В рассматриваемом случае удельное производство энтропии представляет собой количество произведенной в единицу времени энтропии, приходящейся на единицу площади теплоотдающей поверхности. Развитому пузырьковому режиму кипения соответствует меньшее значение удельного производства энтропии, а пленочному кипению – большее. Эти режимы кипения различаются картиной парообразования – гидродинамической структурой вблизи теплоотдающей поверхности.

При развитом пузырьковом кипении на теплоотдающей поверхности образуется большое число центров парообразования. Однако при этом жидкость продолжает омывать поверхность нагрева между этими центрами, и происходит интенсивное перемешивание ее пограничного слоя образующимися в нем паровыми пузырьками. При пленочном кипении жидкость отделена от теплоотдающей поверхности образующимся слоем водяного пара (см. рис. 1), имеющего более низкую теплопроводность, вследствие чего интенсивность теплоотдачи становится во много раз меньше, чем при пузырьковом кипении. Переход пузырькового режима кипения в пленочный происходит при достижении плотности теплового потока первого критического значения $q_{к1}$ (рис. 2). Этот переход из состояния с меньшим удельным производством энтропии в состояние с большим производством является срывным, сопровождается скачкообразным изменением как гидродинамической картины вблизи теплоотдающей поверхности, так термодинамическими и теплофизическими параметрами. Он характеризуется нестационарностью картины кипения. В разных зонах теплоотдающей поверхности образуются всевозможные сочетания пленочного и пузырькового режимов кипения, которые хаотически сменяют друг друга.

В [4] также показано, что путем медленного увеличения теплового потока через специально подобранную теплоотдающую поверхность, обедненную центрами парообразования, удалось превзойти в некоторых экспериментах нормальное критическое значение $q_{к1}$ почти в два раза. Возможность затянуть переход из стационарного состояния с меньшим значением производства энтропии в стационарное состояние с большим значением является общим свойством для всех неравновесных термодинамических систем.

При дальнейшем увеличении значений $q > q_{к1}$ пленочный режим кипения будет сохраняться, а PS увеличиваться в соответствии с верхней кривой на рисунке 2. При уменьшении $q < q_{к1}$ обратный переход термодинамической системы из состояния с большим производством энтропии в состояние с меньшим производством осуществляется тогда, когда разность между производствами энтропии этих двух состояний достигает определенного минимального положительного значения. Этому соответствует уменьшение плотности теплового потока до второго критического значения $q_{к2}$, значительно меньшего $q_{к1}$. Таким образом, четко виден гистерезис в тепловых явлениях, связанных с переходом от одного состояния термодинамической системы к другому. Рассмотренная неравновесная термодинамическая система подчиняется приведённым в работе [2] общим закономерностям эволюции. Аналогично ведут себя и другие неравновесные термодинамические системы, в которых протекают теплообменные процессы.

Рассмотрим конвекцию Рэлея-Бенара [2], налив на сковороду слой глицерина определенной высоты и поставив её на плиту. В зависимости от температуры нагрева, а точнее числа Рэлея Ra , в которое входит разность температур горячей T_z и холодной T_x границ жидкости, в слое появляются

различные стационарные состояния движения жидкости в виде: шестиугольных ячеек Бенара (рис. 3, а, б); двухмерных ячеек, напоминающих вращение валов в противоположные стороны (рис. 3, в); трехмерных ячеек и других организованных структур [5]. Каждому стационарному состоянию соответствует свое значение производства энтропии, а переходы из состояний с меньшим производством энтропии в состояние с большим производством происходят при достижении в эксперименте некоторых критических значений чисел Рэлея Ra_1 , Ra_2 , Ra_3 и т.д.

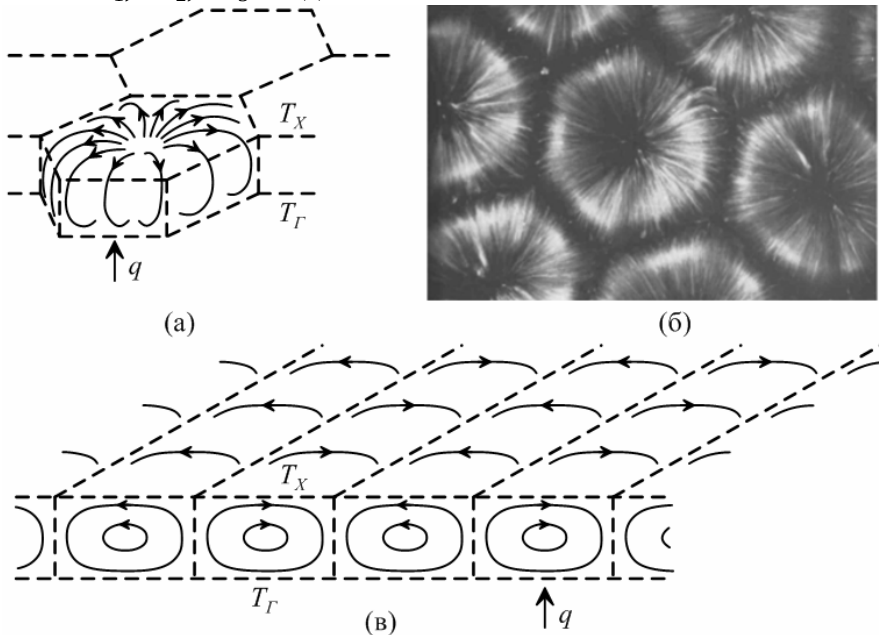


Рис. 3. Схематическое изображение конвективных ячеек:

а – шестиугольные ячейки Бенара; б – фотография ячеек Бенара; в – двумерные валы

На рисунке 4 представлен характер изменения зависимостей производств энтропии от значения числа Ra для четырех стационарных состояний. По виду изменения зависимостей он аналогичен представленным на рисунке 2, но отличается количеством реализующихся стационарных состояний, имеющих свои структуры.

В состоянии, соответствующем кривой 0 на рисунке 4, при слабом нагреве слоя жидкости конвективные потоки отсутствуют, и подводимое тепло полностью отводится посредством теплопроводности. С повышением температуры нагрева появляются конвективные потоки, и при достижении числа Рэлея значения Ra_1 образуется новое стационарное состояние, соответствующее кривой 1 на рисунке 4 со структурой движения жидкости, напоминающей пчелиные соты и названной ячейками Бенара. При дальнейшем увеличении теплового потока образовавшаяся структура течения сначала сохраняется, а затем ячейки Бенара начинают разрушаться с образованием нестационарных состояний, через которые термодинамическая система при числе Рэлея Ra_2 переходит в новое стационарное состояние с

валиковой структурой течения жидкости. Этому течению соответствует кривая 2 на рисунке 4 со структурой на рисунке 3, в. При числе Рэлея Ra_3 образуется новая стационарная структура течения и т.д. Из рисунка 4 видно, что с увеличением значения числа Рэлея термодинамическая система переходит из состояния с меньшим производством энтропии в состояние с большим производством энтропии (стрелки с направлениями вверх).

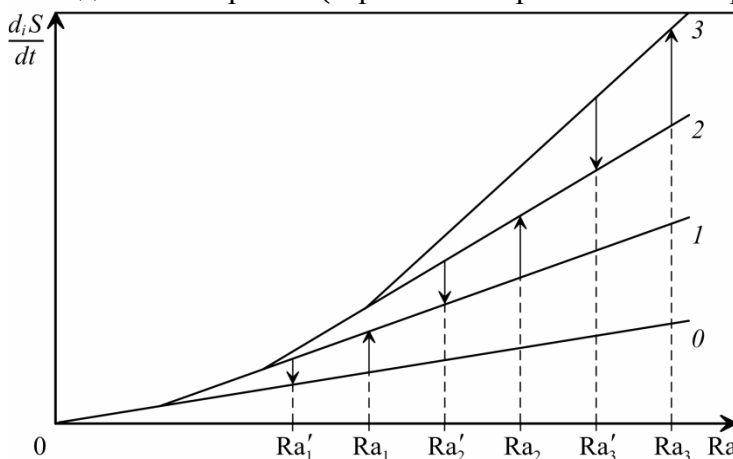


Рис. 4. Характер изменения производства энтропии от числа Рэлея

В экспериментах [5] отмечается, что при уменьшении теплового потока в рассматриваемую термодинамическую систему, а следовательно и числа Рэлея, ее обратный переход (стрелки вниз) из стационарного состояния с большим производством энтропии в стационарное состояние с меньшим производством энтропии происходит при меньших числах Рэлея, чем прямой переход. На рисунке 4 обратным переходам соответствуют отмеченные штрихом числа Рэлея Ra'_1, Ra'_2, Ra'_3 . Таким образом, переходы между двумя стационарными состояниями неравновесной термодинамической системы демонстрируют гистерезис, как и в рассмотренной ранее системе.

Атмосфера Земли как термодинамическая система. Применим рассмотренные общие закономерности изменения состояний неравновесных термодинамических систем к атмосфере Земли. Производство энтропии в атмосфере Земли зависит от большого количества факторов, влияющих на тепловой баланс атмосферы. В частности, от величин потоков энергии, проходящих через верхнюю и нижнюю границы атмосферы, и тепловых потоков, возникающих внутри неё.

Через верхнюю границу в атмосферу поступает поток энергии в большей части в виде лучистой солнечной энергии. Периодически может поступать поток энергии, вызванный другими явлениями, например, прилетом астероидов. Из атмосферы в космос отводится лучистая энергия поверхности Земли и атмосферы, а также отраженная солнечная энергия.

Через нижнюю границу атмосфера обменивается с Землей лучистой энергией и тепломассовыми потоками, обусловленными теплопроводностью,

испарением и конвекцией. Периодически в атмосферу вбрасывается энергия недр Земли, выделяемая при тектонических сдвигах и вулканических извержениях. В последнее столетие все интенсивнее извлекаются из недр Земли такие полезные ископаемые, как нефть, газ, уголь, урановая руда и др., энергия которых в результате жизнедеятельности человека переходит в виде теплоты в атмосферу. Нарастающее использование солнечной, ветровой и водородной энергетики значительно увеличивает тепловое загрязнение атмосферы по сравнению с углеводородной энергетикой [6].

Происходящие массообменные процессы с Землей изменяют состав атмосферы и вызывают ее загрязнение аэрозольными образованиями. Это снижает прозрачность атмосферы и, следовательно, ослабляет солнечную радиацию и другие лучистые потоки. Изменения состава атмосферы, а именно концентраций паров воды, CO_2 , CH_4 и ряда других газов, изменяют поглощательную способность атмосферы к инфракрасному излучению, что влияет на парниковый эффект. Увеличивающаяся масса живых организмов и разлагающихся органических веществ также воздействует, как на газовый состав атмосферы, так и на тепловые потоки. Большое влияние на состав атмосферы оказывает фотосинтез.

В квазистационарном состоянии структура атмосферы и соответствующий ей климат изменяются незначительно. В этом случае поток энтропии, вытекающей из атмосферы, согласно уравнению (1), должен быть больше потока энтропии, втекающего в нее на величину производства энтропии в атмосфере. Квазистационарные состояния атмосферы достаточно неустойчивые. Существует множество факторов, влияющих как на входные и выходные потоки энтропии, так и на производство энтропии внутри атмосферы. При достижении производства энтропии внутри атмосферы критических значений происходят существенные изменения ее структуры, а соответственно и климата. Атмосфера переходит в другое квазистационарное состояние, отличающееся от первоначального как структурой, так термодинамическими и другими параметрами. При этом из всех возможных состояний наиболее вероятен переход в состояние с минимально возможным значением производства энтропии.

Геофизики условно выделяют четыре группы циклов, включающих периодичность времен, в течение которых происходит увеличение площади ледников (ледниковый период) или их уменьшение [1]. Ультракороткие, от десятков до сотни лет, и короткие, исчисляемые сотнями и тысячами лет, реализуются за счет изменения параметров земной орбиты и солнечной активности. Длинные, исчисляемые продолжительностью в миллионы лет, и сверхдлинные, продолжительностью, превышающей сотни миллионов лет, коррелируются с вулканической и тектонической активностью на Земле разной интенсивности.

Атмосфера как термодинамическая система, представляет собой слой газа малой толщины по сравнению с диаметром Земли. Она обменивается тепловыми потоками со стороны Земли и космоса. Рассмотренная выше

конвекция Рэлея–Бенара возникает в горизонтальном слое жидкости также малой толщины, подогреваемым тепловым потоком снизу. С верхнего слоя жидкости тепловой поток отводится в атмосферу. С позиции неравновесной термодинамики процессы, протекающие при конвекции Рэлея–Бенара, близки к процессам, протекающим в атмосфере. На основании этого на рисунке 5 представлен предполагаемый характер изменения производства энтропии в атмосфере от изменения величины суммы тепловых потоков Q , поступающих в неё.

С ростом величины тепловых потоков увеличивается производство энтропии в атмосфере и её температура, приводящая к уменьшению площади ледников на Земле. Ультракороткие циклы реализуются при достижении производства энтропии в атмосфере 1-ого критического значения. При этом атмосфера переходит по стрелке 1 вверх из квазистационарного межледникового состояния, соответствующего кривой 0 на рисунке 5, в квазистационарное состояние 1. Переход из состояния с меньшим значением производства энтропии в состояние с бóльшим значением, как было показано ранее, реализуется через нестационарные состояния, и может начаться раньше или позже в зависимости от скорости нарастания теплового потока в атмосферу.



Рис. 5. Предполагаемый характер зависимости производства энтропии от изменения теплового потока для возможных циклов потепления и похолодания атмосферы

В диапазоне перехода хаотически изменяется структура атмосферы, определяемая направлениями и интенсивностью ветров, количеством возникающих циклонов и антициклонов, конвективными тепломассовыми потоками и другими параметрами. Хаотическое изменение состояния атмосферы приводит к хаотическому изменению климата на Земле.

Если при переходе в квазистационарное состояние 1 прекратится увеличение теплового потока в атмосферу, то процессы, протекающие в атмосфере и на Земле, будут стремиться уменьшить производство энтропии, чтобы вернуть термодинамическую систему в первоначальное состояние.

Уменьшение производства энтропии в атмосфере возможно за счёт оттока лучистой энергии в космос и теплообмена с океаном. В соответствии с основными положениями неравновесной термодинамики, обратный переход возможен только через гистерезис. Поэтому этот переход должен произойти при тепловом потоке, а соответственно и производстве энтропии в атмосфере, ниже 1-ого критического значения. Обратному переходу соответствует ультракороткий ледниковый период 1-1' жизни Земли (участок графика между стрелкой 1 вверх и стрелкой 1' вниз на рисунке 5).

Если при переходе атмосферы в состояние 1 сохранится положительный приток тепловой энергии в атмосферу, то рост производства энтропии и температуры атмосферы продолжится. При достижении производством энтропии 2-ого критического значения возможна реализация короткого ледникового периода 2-2' жизни Земли. Следует отметить, что ультракоротких и коротких циклов чередования ледниковых и межледниковых периодов, так же как и причин их образования, может быть значительно больше (состояния n_i на рисунке 5). Начавшееся в последние годы резкое, хаотическое изменение климата на Земле предвещает начало перехода к одному из таких состояний.

Для реализации длинных и сверхдлинных циклов производство энтропии в атмосфере должно достигнуть больших критических значений. Это может произойти из-за вулканической активности, падения астероидов с большой энергией на Землю, из-за взрыва в атмосфере определенного количества ядерных зарядов или из-за одновременного действия всех этих факторов и ряда других, например, перегрева вод океана. Следует отметить, что при переходе атмосферы в состояние, соответствующее длинному циклу 3 или сверхдлинному 4 на рисунке 5, промежуточные состояния могут не реализоваться. Это обусловлено тем, что при поступлении в атмосферу большого количества тепловой энергии за относительно небольшой промежуток времени, промежуточные состояния не успевают реализоваться, так как перекрываются вышестоящим состоянием (см. [2]).

При ультракоротких и коротких циклах уменьшение температуры атмосферы может осуществляться за счёт реализации таких состояний атмосферы, при которых увеличивается интенсификация теплообмена с океаном, имеющим более низкую температуру, например, за счет усиления интенсивности и изменения направлений ветров, которые поднимут больше холодных глубинных вод океана к поверхности на большей площади, а также за счет увеличения количества циклонов, ураганов, дождей, торнадо, штормов, изменения направлений океанических течений и атмосферной циркуляции. При реализации длинных и сверхдлинных циклов для уменьшения температуры атмосферы, а соответственно и вод океана, потребуется отводить от неё большое количество тепловой энергии. В этом случае в атмосфере могут образоваться мощные циклонные потоки, которые отсепарируют на периферию парниковые газы и понизят давление в центре вихря. Это создаст возможность большому количеству инфракрасного

излучения по внутреннему каналу вихря уходить в космос, охлаждая атмосферу и океан.

Кроме возникновения циркуляционных потоков в атмосфере возможна реализация и других течений, приводящих к глубокому охлаждению океана. В подтверждение этому на рисунке 6 представлен снимок гигантского шестиугольника с поперечным размером в 25 тысяч километров, находящегося на северном полюсе планеты Сатурн. Шестиугольник напоминает ячейку Бенара (см. рис. 3, а, б), прямые стенки которого образованы течением похожим на вихрь, уходящий вглубь атмосферы. Верхние слои атмосферы Сатурна имеют температуру 100-160 К, а внутри планеты температура поднимается до 12000 К. Такое течение позволяет нижним горячим слоям атмосферы быстро подниматься к верхним холодным слоям и при этом сбрасывать теплоту в космос за счет теплового излучения.

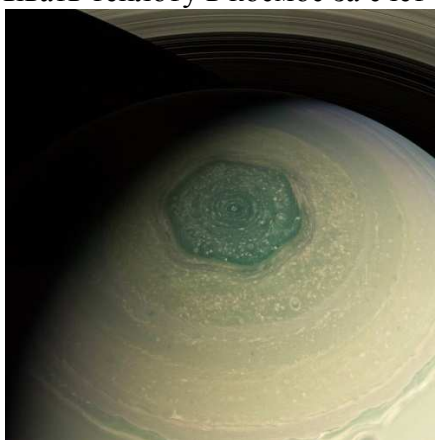


Рис.6. Фотография северного полюса Сатурна

Впервые шестиугольная структура на планете Сатурн была замечена на снимках, переданных аппаратами Вояджер 1 и Вояджер 2.

Сопоставление влияния природных и антропогенных факторов на климат. Приведем сравнения влияния некоторых природных и антропогенных факторов на рост производства энтропии в атмосфере. Определим производство энтропии в атмосфере из-за солнечного излучения.

На рисунке 7 представлен тепловой баланс Земли взятый из [7]. Согласно этой работе плотность потока энергии излучения от Солнца в систему атмосфера-Земля составила 341 Вт/м^2 . Часть этого излучения в количестве 102 Вт/м^2 в видимом диапазоне света отразилась обратно в космос (альбедо). Земля и атмосфера за счет этой энергии не нагревались. Остальная часть $341 - 102 = 239 \text{ Вт/м}^2$ поглотилась атмосферой (78 Вт/м^2) и поверхностью Земли (161 Вт/м^2). Из поглощенного излучения часть в количестве 80 Вт/м^2 расходовалась на испарение воды и 17 Вт/м^2 на конвективный теплообмен. Энергия этих тепловых процессов передавалась атмосфере. Тепловое излучение от поверхности Земли составило 396 Вт/м^2 , из которого 40 Вт/м^2 излучалось через атмосферу в космос, а 356 Вт/м^2

поглощалось атмосферой и часть этого теплового потока (333 Вт/м^2) переизлучалась обратно к поверхности Земли, создавая парниковый эффект. Общее количество теплового излучения из атмосферы и от поверхности Земли в космос составило $199 + 40 = 239 \text{ Вт/м}^2$. Учитывая, что в рассматриваемом случае атмосфера, как термодинамическая система, находится в квазистационарном неравновесном состоянии, будем считать возможным определить производство энтропии в ней по формуле (1), т.е. по разности потоков энтропии, выходящих из системы в космос $J_{s,out}$ и поступающих в нее от солнечного излучения $J_{s,in}$. За верхнюю границу атмосферы принимаем верхнюю границу стратосферы со средней температурой 230 К , так как более 90% массы водяного пара и воздуха находится в пределах этой границы. Из космоса на Землю поступает поток излучения с поверхности Солнца, имеющей температуру $\approx 6000 \text{ К}$.

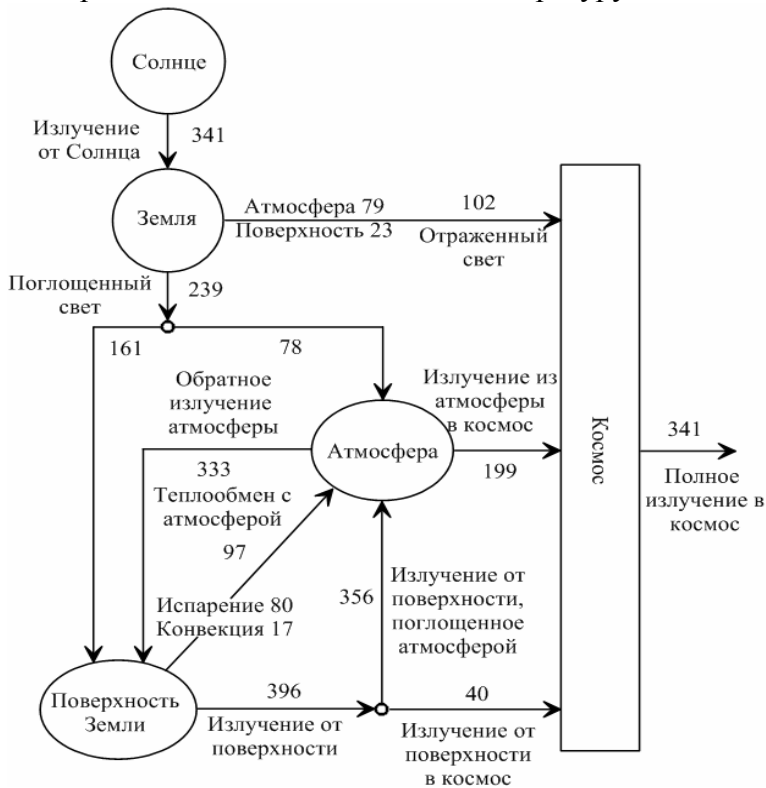


Рис. 7. Тепловой баланс Земли (март 2000 – май 2004): все тепловые потоки в Вт/м^2 , усредненные по времени и по поверхности Земли

На основании этого удельное производство энтропии в атмосфере, вызванное потоками излучения от солнца, запишем

$$IIS_{\text{солн}} = 239 \left(\frac{1}{230} - \frac{1}{6000} = 0,9993 \right) \text{ Вт/}(\text{м}^2\text{К}). \quad (2)$$

В это производство энтропии входят производства энтропии и от других процессов, протекающих в атмосфере за счет поступающей солнечной энергии.

Энергия, расходуемая на фотосинтез и почвообразование, составляет менее 1% от общего теплового баланса, представленного на рисунке 7. Ввиду малой величины она в балансе не учитывается. Однако в силу того, что эта энергия способна накапливаться в течение длительного времени в оболочке Земли с образованием в ней сланцев, каменного угля, нефти и других органических веществ, а затем с помощью человечества быстро преобразовываться в другие виды, она оказывает большое воздействие на атмосферу.

Поток солнечного излучения на верхнюю границу атмосферы Земли не является постоянным. Он изменяется как во времени, так в пространстве в зависимости от изменения орбиты вращения Земли вокруг Солнца, угла наклона ее оси вращения и активности Солнца. В работе [8] расчетным путем была получена матрица изменения попадающей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации с 1900 по 2100 год без учета изменения солнечной активности. В проведенных расчетах отмечается слабая тенденция к уменьшению солнечной радиации в течение исследованного периода и значимые ее межгодовые колебания, в зависимости от времени и пространства, наиболее отчетливо проявляющиеся в 19-ти летнем цикле и не превышающие 0,08% от среднего значения.

В работе [9], на основании результатов расчета, приведена оценка изменения солнечной энергии, получаемой Землей за последние 500 тысяч лет за счет изменения орбиты Земли и угла наклона ее оси. Согласно расчётам в настоящее время мы живем в межледниковье и приближаемся к очередной эпохе оледенения со средней скоростью уменьшения инсоляции порядка 0,2-0,4% за одну тысячу лет. Из вышеизложенного следует, что не из-за изменения солнечной энергии, поступающей на верхнюю границу атмосферы Земли, происходит в настоящее время изменение структуры атмосферы, сопровождающееся потеплением климата.

Рассмотрим другие природные факторы, влияющие на климат Земли, и оценим величину их воздействия по изменению производства энтропии в атмосфере. Значительные климатические изменения происходили в прошлом на Земле из-за большой вулканической активности и падения на нее астероидов. Так, например, при извержении одного из самых мощных за последние два столетия вулкана Тамбора (Индонезия), которое началось 5 апреля 1815 года и активная фаза длилась 10 дней, выделилось энергии $Q_{\text{вул}} = 1,4 \cdot 10^{20}$ Дж [10]. При извержении в стратосферу попало большое количество вулканических газов (в том числе паров воды и CO_2), пепла и других аэрозолей. Извержение вулкана привело к снижению глобальной температуры на 0,4-0,7°C. Весной и летом 1816 года в Европе сохранялась прохладная погода с продолжительными заморозками, грозами, сильными наводнениями, неурожаем. За это год получил название «Год без лета».

Говоря о выделенной в атмосферу энергии от того или иного процесса надо учитывать и время, за которое оно выделялось, а также площадь, на которой это произошло. Так, например, в работе [11] показано, что при облучении лазером термотропного жидкого кристалла его структура меняется не сразу во всем объеме кристалла, а сначала в области (домене), в которой температура достигает критического значения. Так и в случае извержения вулкана производство энтропии может быстро достигнуть критических значений только в некотором домене вокруг вулкана, и в нём произойдет изменение структуры атмосферы, что повлияет и на климат всей Земли. Если извержения вулканов продолжается недолго, то длительных ледниковых периодов не наступает, как, например, в случае уменьшения инсоляции из-за изменения орбиты Земли и угла наклона ее оси.

Если предположить, что в некоторой области атмосферы (домене) вокруг вулкана Тамбора за 10 дней извержения установилось состояние протекающего процесса близкое к стационарному, то удельное производство энтропии (отнесенное к единицы поверхности Земли $F_{земл} = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$) в этом домене можно оценить по уравнению (1). Принимая температуру извержения вулкана равной температуре лавы $T_z = 1400 \text{ К}$, удельное производство энтропии из-за извержения вулкана Тамбора запишем

$$\begin{aligned} PS_{тамб} &= \frac{Q_{бул}}{F_{земл} \cdot t} \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_z} \right) = \frac{1,4 \cdot 10^{20}}{5,1 \cdot 10^{14} \cdot 10 \cdot 24 \cdot 3600} \left(\frac{1}{230} - \frac{1}{1400} \right) = \\ &= 0,1155 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/}(\text{м}^2\text{К}). \end{aligned} \quad (3)$$

Из этого следует, что при достижении критического значения удельного производства энтропии, соответствующего уравнению (3), начинает изменяться климат на Земле. Изменение климата будет происходить с учетом состояния атмосферы до извержения вулкана.

К таким же последствиям, как извержение крупных вулканов, а в некоторых случаях и более тяжелым, может привести падение на Землю астероидов с радиусом более 1 км. Падение астероида диаметром около 10 км на полуостров Юкатан (Мексика) 65 млн. лет назад привело к образованию кратера диаметром 180 км, и при этом выделилась энергия $Q_{асм} = 5 \cdot 10^{23} \text{ Дж}$ [12]. В результате падения астероида в стратосферу попало большое количество раскаленной от удара геологической породы, пыли и других аэрозольных частиц. Возникшее сильное землетрясение вызвало мощную сейсмическую волну, обогнувшую земной шар несколько раз, так же как и высокотемпературную ударную волну, распространяющуюся в атмосфере. Все это привело к значительным изменениям структуры атмосферы, а соответственно и климата на Земле. Среднегодовая температура воздуха существенно уменьшилась. Это событие, как считают многие ученые, привело к гибели динозавров и других земных существ. Предположим, как и в случае с извержением вулкана Тамбора, что через 60 дней после падения астероида в некотором домене атмосферы, вблизи места падения, протекающие тепловые процессы приблизились к квазистационарному состоянию настолько близко,

что удельное производство энтропии в этом домене можно оценить по уравнению (1). Тогда, принимая температуру в месте падения $T_e = 4000$ К, находим производство энтропии в домене атмосферы из-за падения астероида

$$PS_{act} = \frac{Q_{act}}{F_{земл} \cdot t} \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_e} \right) = \frac{5 \cdot 10^{23}}{5,1 \cdot 10^{14} \cdot 60 \cdot 24 \cdot 3600} \left(\frac{1}{230} - \frac{1}{4000} \right) = 0,775 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}).$$

Видим, что удельное производство энтропии в атмосфере из-за падения астероида имеет тот же порядок, что и удельное производство энтропии, вызванное потоком излучения от Солнца. При этом надо учитывать, что удельное производство энтропии от падения астероида рассчитано из условия, что квазистационарное состояние в домене установилось в течение 60 дней. Далее со временем оно будет уменьшаться, т.к. энергия от падения будет растекаться по атмосфере и уходить за ее границы.

Крупные астероиды редко падают на Землю, а вулканы и землетрясения с разной интенсивностью проявляются в течение всего года. Ежегодно на поверхности Земли происходит приблизительно 50-60 извержений вулканов, из которых редко могут быть и крупные, такие как рассмотренный выше вулкан Тамбора. Тепловая энергия, выделяемая в течение года некрупными вулканами, согласно [13], составляет примерно $Q_{вулк.наз} = 0,5 \cdot 10^{19}$ Дж/год.

Тогда удельное производство энтропии из-за среднегодовых извержений вулканов на поверхности Земли составит

$$PS_{вулк.наз} = \frac{0,5 \cdot 10^{19}}{5,1 \cdot 10^{14} \cdot 3,1536 \cdot 10^7} \left(\frac{1}{230} - \frac{1}{1400} \right) = 0,113 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}).$$

Далее в расчетах принимаем 1 год = $3,1536 \cdot 10^7$ с.

Современная подводная вулканическая деятельность значительно превосходит деятельность наземных вулканов. Подводные вулканы извергают за год примерно в 12-15 раз больше вулканического материала, чем наземные вулканы. Поэтому можно предположить, что выделяемая ими среднегодовая тепловая энергия будет в 14 раз выше по сравнению с наземными вулканами и составит $Q_{вулк.под} = 0,7 \cdot 10^{20}$ Дж/год. Эти тепловые потоки поглощаются водами океана, и воздействие их на состояние атмосферы и климат Земли проявляется через повышение его температуры.

Ежегодно на Земле фиксируется более 100 тысяч землетрясений и согласно работе [14] ими выделяется в среднем энергия $Q_{земл} = 0,575 \cdot 10^{18}$ Дж/год. Причем ~75% этой энергии выделяют единицы разрушительных землетрясений продолжительностью в несколько минут. Энергия землетрясений расходуется на разрушение, нагрев и образование сейсмических волн. Некоторые землетрясения с очагами в океане сопровождаются мощной волной – цунами. Основная энергия от таких землетрясений поглощается землей и водой океана, подогревая его. В силу малой разности между температурами T_e и T_x производством энтропии в атмосфере из-за годовых землетрясений можно пренебречь.

Рассмотрим основные антропогенные процессы, влияющие на климат Земли. Оценим влияние мировой энергетики на рост производства

энтропии в атмосфере. Определить влияние углеводородной энергетики можно по величине потребляемой человечеством первичной энергии. Согласно [15] мировое потребление первичной энергии в 2023 году составило $Q_{\text{угл.э}} = 0,62 \cdot 10^{21}$ Дж/год. Эта энергия после её использования переходит в атмосферу. Принимая среднюю температуру сгорания топлив 2800 К и считая, что вся эта тепловая энергия передается от атмосферы к океану с поверхностной температурой 288 К, удельное производство энтропии в атмосфере из-за использования человечеством углеводородной энергетики запишем

$$PS_{\text{угл.э}} = \frac{0,62 \cdot 10^{21}}{5,1 \cdot 10^{14} \cdot 3,1536 \cdot 10^7} \left(\frac{1}{288} - \frac{1}{2800} \right) = 0,12 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

Солнечная и ветровая энергетика учитывается отдельно от первичной энергии по количеству произведенной ими электроэнергии. Производство электроэнергии за счет этих источников, согласно [15], в 2023 году выросло на 13% и достигло уровня $0,416 \cdot 10^{20}$ Дж/год. Далее считаем, что вся эта энергия вырабатывается солнечными электростанциями, так как их доля в производстве электроэнергии превышает ветровые.

Из-за низкого КПД кремниевых солнечных панелей количество тепловой энергии, выделяемой в атмосферу будет в ~ 7 раз больше вырабатываемой ими электроэнергии, и составит $Q_{\text{сол.э}} = 0,2912 \cdot 10^{21}$ Дж/год. Вся эта энергия, после использования электрической энергии, выработанной солнечными панелями, переходит в атмосферу и далее передается океану. Удельное производство энтропии в атмосфере из-за использования солнечной энергетики, запишем

$$PS_{\text{сол.э}} = \frac{0,2912 \cdot 10^{21}}{5,1 \cdot 10^{14} \cdot 3,1536 \cdot 10^7} \left(\frac{1}{288} - \frac{1}{6000} \right) = 0,05985 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

Удельное производство энтропии в атмосфере в 2023 году из-за использования углеводородной и солнечной энергетики составило

$$PS_{\Sigma} = PS_{\text{угл.э}} + PS_{\text{сол.э}} = 0,1799 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

В 2021 году мощность ГЭС в Море достигла 1360 Гвт. При этом в окружающую среду была выделена за год тепловая энергия, с учетом КПД = 0,95, равная $Q_{\text{ГЭС}} = 0,4515 \cdot 10^{20}$ Дж/год. В этом же году выделенная в окружающую среду тепловая энергия от использования АЭС составила $Q_{\text{АЭС}} = 0,5797 \cdot 10^{20}$ Дж/год. Общее количество выделенной в окружающую среду за год тепловой энергии от большинства видов энергоресурсов, потребляемых человечеством, составило

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{угл.э}} + Q_{\text{сол.э}} + Q_{\text{ГЭС}} + Q_{\text{АЭС}} = 1,014 \cdot 10^{21} \text{ Дж/год.}$$

Определим производство энтропии в атмосфере из-за уменьшения альбедо Земли. В работе [6] представлены результаты исследований изменения отражательной способности Земли, проводимые с 1998 г. астрофизиками из Калифорнийской обсерватории, и результаты аналогичных исследований по данным спутниковой системы. Согласно данным

лаборатории альbedo Земли за 20 летний наблюдаемый период уменьшалось в среднем за год на $0,03 \text{ Вт/м}^2$, а согласно данным спутниковой системы на $0,065 \text{ Вт/м}^2$. В расчетах используем среднее значение между показаниями обсерватории и спутниковой системой равное $0,0475 \text{ Вт/м}^2$. На эту величину происходило среднее ежегодное увеличение лучистой энергии Солнца, поглощаемой Землей из-за уменьшения альbedo.

Удельное производство энтропии из-за уменьшения альbedo составило

$$PS_{\text{альб}} = 0,0475 \cdot \left(\frac{1}{288} - \frac{1}{6000} \right) = 0,157 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м}^2\text{K)}.$$

Дополнительная энергия, поглощённая поверхностью Земли в течение года из-за уменьшения альbedo

$$Q_{\text{альб}} = 0,0475 \cdot 5,1 \cdot 10^{14} \cdot 3,1536 \cdot 10^7 = 0,76396 \cdot 10^{21} \text{ Дж/год.}$$

Происходящие на всех континентах пожары, площадь которых увеличивается с годами из-за потепления климата, уменьшают альbedo Земли и значительно увеличивают как тепловые выбросы, так и количество парниковых газов в атмосфере.

Определим производство энтропии в атмосфере из-за тепловых выбросов при лесных пожарах. В зависимости от типа леса, его возраста, подлеска, влажности и др. выделяется в атмосферу при сгорании 1 га леса разное количество теплоты. В расчете принимаем, что при сгорании 1 га леса выделяется $1,4 \cdot 10^{12}$ Дж тепловой энергии. В 2021 году в России пожары уничтожили 18,8 млн. га леса [16]. В этом же году сильные пожары происходили во многих странах Мира. Так как данных по площади сгоревших лесов даже в больших странах найти не удалось, а площадь лесов в России составляет около 20% от площади всех лесов мира, далее принимаем общую площадь сгоревших во всех странах лесов равную 50,76 млн. га. Количество теплоты, поступившей в атмосферу за три жарких месяца по всему миру, составило $Q_{\text{лес.пож}} = 50,76 \cdot 10^6 \cdot 1,4 \cdot 10^{12} = 0,71 \cdot 10^{20}$ Дж. Считая температуру горения древесины 1200 К и что тепловой поток от сгорания в основном отводится в океан, удельное производство энтропии из-за лесных пожаров, используя уравнение (1), запишем:

$$PS_{\text{лес.пож}} = \frac{0,71 \cdot 10^{20}}{5,1 \cdot 10^{14} \cdot 3 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 3600} \left(\frac{1}{288} - \frac{1}{1200} \right) = 0,4724 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(м}^2\text{K)}.$$

Тепловые потоки в атмосферу выделяются и при разложении (гниении) органических веществ. Органические вещества на Земле образуются в процессе фотосинтеза, протекающего в клетках растений с использованием в основном солнечной энергии в видимом диапазоне света. Синтезированные растениями углеводы (глюкоза) являются главным источником энергии для большинства организмов, населяющих Землю. После завершения жизненного периода начинается разложение органических остатков с выделением тепловой энергии. Процесс разложения органических веществ отстает от процесса синтеза, что приводит к их накоплению в недрах Земли и образованию горючих ископаемых.

Доля теплового потока из-за разложения органических веществ увеличивается, как из-за увеличения количества органических веществ на Земле, так и глобального потепления, нарушающего целостность почвенного органического вещества, хранящегося в мерзлоте. Оценить величину этого потока в настоящее время не представляется возможным.

Определим удельное производство энтропии в атмосфере от теплокровных живых организмов. По данным ООН население планеты в 2024 году составило ~8,2 миллиарда человек и продолжает увеличиваться. Средняя мощность тепловыделения для взрослого человека в зависимости от вида нагрузки изменяется от 100 Вт (находится в покое) до 300 Вт (быстрая ходьба) [17] при одной и той же комфортной температуре. Принимаем при расчете мощность тепловыделения 150 Вт. Общая мощность тепловыделения от всех людей планеты составит $1,23 \cdot 10^{12}$ Вт. Тепловая энергия, выделяемая людьми в атмосферу за год, составит $0,3879 \cdot 10^{20}$ Дж/год. Удельное производство энтропии в атмосфере от людей из расчета, что температура человека $36,7^{\circ}\text{C}$, а тепловой поток поглощается океаном с температурой поверхности 288 К, запишем

$$\frac{1,23 \cdot 10^{12}}{5,1 \cdot 10^{14}} \left(\frac{4}{288} - \frac{1}{(273 + 36,7)} \right) = 0,5868 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}).$$

Точное количество теплоты, которое выделяют другие теплокровные организмы, живущие на Земле, определить очень сложно, так как выделяемое ими тепло зависит, например, от их веса, мышечной активности, количества живущих особей, которое порой тяжело определить. Ориентировочно можно определить общую мощность тепловыделения только от некоторых выращиваемых человеком животных. Используя взятые из интернета данные, можно предположить, что мощность тепловыделения от других земных теплокровных организмов составит $1,6 \cdot 10^{12}$ Вт, а тепловая энергия, выделенная ими за год, будет равна $0,505 \cdot 10^{20}$ Дж/год. Удельное производство энтропии в атмосфере из-за теплового потока от животных (с учетом того, что нормальная температура у большинства $39,5^{\circ}\text{C}$) составит

$$\frac{1,6 \cdot 10^{12}}{5,1 \cdot 10^{14}} \left(\frac{1}{288} - \frac{1}{273 + 39,5} \right) = 0,855 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}).$$

Суммарное удельное производство энтропии в атмосфере от всех теплокровных организмов, живущих на Земле, составит

$$IIS_{\text{тепл.орг}} = 0,5868 \cdot 10^{-6} + 0,855 \cdot 10^{-6} = 0,144 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}).$$

Суммарная тепловая энергия, выделяемая всеми теплокровными организмами, составит

$$Q_{\text{тепл.орг}} = 0,3879 \cdot 10^{20} + 0,505 \cdot 10^{20} = 0,8929 \cdot 10^{20} \text{ Дж/год.}$$

Приведенные в статье значения некоторых тепловых потоков и выбранных параметров в дальнейшем могут быть скорректированы в процессе получения новых опытных данных и расчётных методик. Но это не изменит суть и выводы статьи.

Определим суммарное годовое количество тепловой энергии $Q_{антр}$, поступающей в систему атмосфера-океан из-за рассмотренных выше антропогенных факторов. При этом предполагаем, что тепловое загрязнение системы из-за разложения органических веществ $Q_{разл}$ мало отличается от тепловой энергии $Q_{тепл.орг}$. Также предполагаем, что тепловое загрязнение системы из-за продолжающихся на Земле войн $Q_{войн}$, в силу отсутствия данных по использованному количеству взрывчатого вещества и пороха, равно $Q_{войн} = Q_{лес.пож}$. Тогда

$$Q_{антр} = Q_{э\sum} + Q_{альб} + Q_{лес.пож} + Q_{тепл.орг} + Q_{разл} + Q_{войн} = 2,0985 \cdot 10^{21} \text{ Дж/год.}$$

Суммарное годовое количество этих энергий способно растопить ледяной покров толщиной 3 м занимающий квадратное поле со стороной 1500 км. Чем больше тает ледников, тем меньше становится альбеда, и процесс таяния ледников ускоряется из-за обратной связи. Все это приводит к ускорению роста температуры как атмосферы, так и вод мирового океана. Мировой океан аккумулирует большую часть этой энергии, в том числе из-за таяния ледников. В силу большой массы океана и величины его теплоемкости, по сравнению с атмосферой, он является терморегулятором температуры и не позволяет атмосфере быстро нагреваться. Например, если всю массу атмосферы охладить на 30^0C и передать эту энергию 100 метровому слою океана, то вода в нем нагреется всего на 1^0C .

Мировой океан за длинный ледниковый период сбросил в космос посредством инфракрасного излучения такое количество энергии, что его температура в самых глубоких местах составляет от $+2^0\text{C}$ до $+4^0\text{C}$ и это несмотря на периодические извержения многочисленных подводных вулканов и потоков воды из геотермальных жерл на морском дне с температурой, достигающей 400^0C . Кроме того к океанической коре поступают посредством теплопроводности тепловые потоки от раскаленных недр Земли и радиогенное тепло, образующееся при радиоактивном распаде изотопов в мантии. Средний тепловой поток от океанической коры в океан, согласно работе [18], составляет

$$Q_{недр} = 0,0625 \text{ Вт/м}^2 (1,005 \cdot 10^{21} \text{ Дж/год}).$$

Анализ океанографических наблюдений, в том числе проводимых с 2003 года с помощью глобальной системы «Argo», измеряющей температуру в верхнем 2000 метровом слое воды, показал (см., например, [19]), что потепление Мирового океана не только продолжается, но и ускоряется. Так, например, если среднее за год увеличение теплосодержания верхнего 2000 метрового слоя воды за 50- летний срок наблюдения с 1955 до 2004 годы составляло $\sim 3,9 \cdot 10^{21}$ Дж/год, то за последующие 15 лет с 2005 по 2020 годы этот показатель увеличился почти в 3-и раза до $10,2 \cdot 10^{21}$ Дж/год. В 2024 году содержание тепла в верхних 2000 метрах океана достигло очередных рекордных значений за все время наблюдений.

Потепление океана ускоренными темпами протекает из-за ряда факторов. За счет указанных выше антропогенных факторов в систему

атмосфера-океан поступает тепловая энергия $Q_{антр} = 2,0985 \cdot 10^{21}$ Дж/год. За счет природных факторов в год без катаклизмов в систему поступает тепловая энергия как от вулканических извержений и землетрясений, так и энергия из недр Земли в общем количестве

$$Q_{прир} = Q_{вулк. наз} + Q_{вулк. вод} + Q_{земл} + Q_{недр} = 1,081 \cdot 10^{21} \text{ Дж/год.}$$

Существенно бóльшая часть тепловой энергии, возникающей от действий этих факторов, аккумулируется океаном, меньшая часть атмосферой и сушей, а также в виде теплового излучения уходит в космос. Далее в расчетах принимаем, что вся эта тепловая энергия попадает в океан.

Увеличение теплосодержания океана в 2020 году составило $10,2 \cdot 10^{21}$ Дж/год, из них из-за указанных выше антропогенных и природных факторов $\sim 3,18 \cdot 10^{21}$ Дж/год. Остальное увеличение $7,02 \cdot 10^{21}$ Дж/год ($0,436 \text{ Вт/м}^2$) вероятнее всего произошло из-за уменьшения длинноволнового (теплового) излучения от поверхности Земли и атмосферы в космос. Приходящая солнечная радиация (341 Вт/м^2 на рис.7) превысила исходящую длинноволновую радиацию на $0,436 \text{ Вт/м}^2$ из-за увеличения парникового эффекта и отраженную коротковолновую радиацию на $0,0475 \text{ Вт/м}^2$ из-за уменьшения альбедо Земли. Произошло нарушение теплового баланса на верхней границе атмосферы.

Предполагая, что такое нарушение незначительно повлияет на значения удельных производств энтропий, рассчитываемых по формуле (1) для стационарных состояний, определяем удельное производство энтропии из-за увеличения парникового эффекта

$$PS_{парн} = 0,436 \left(\frac{1}{288} - \frac{1}{6000} \right) = 0,144 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}^2\text{K)}.$$

Сумма удельных производств энтропии в атмосфере для ряда рассмотренных выше антропогенных процессов составит

$$PS_{антр} = PS_{парн} + PS_{\gamma} + PS_{альб} + PS_{лес.пож} + PS_{тепл.орг} = 0,1826 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}^2\text{K)}.$$

Это значение близко к значению удельного производства энтропии в атмосфере из-за извержения вулкана Тамбора $PS_{тамб}$ (см. уравнение (3)), что и вызвало наблюдаемый в настоящее время хаотичный переход состояния атмосферы в другое квазистационарное состояние, а, соответственно, и хаотическое изменение климата. При завершении перехода, например, в p_1 состояние на рисунке 5, увеличится, как было показано выше, интенсификация теплообмена атмосферы с океаном, что должно понизить температуру атмосферы за счет холодных глубинных вод океана или не позволить ей нагреваться.

На рисунке 8 представлено изменение глобальной температуры на поверхности Земли [20], которая вычислялась по алгоритму усредненных результатов, зарегистрированных десятками тысяч метеостанций. Видны промежутки, в течение которых глобальная температура практически не изменялась при продолжающемся увеличении концентрации CO_2 в атмосфере.

Такие промежутки называли паузами в глобальном потеплении. Переходы с одной глобальной температуры на другую происходят достаточно быстро в соответствии с общими закономерностями эволюции, а дальнейшее понижение температуры при этом не происходит из-за ускоренного увеличения притока тепла в атмосферу, превосходящую отток его в океан.

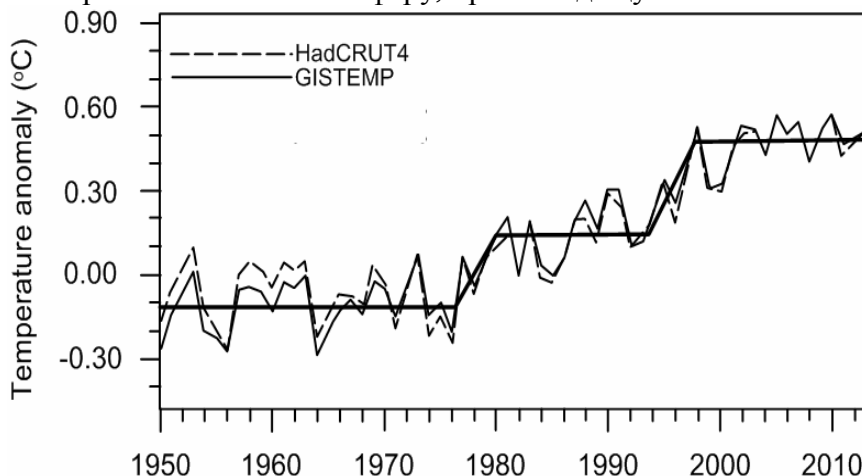


Рис.8. Изменение глобальных температур в 1950-2013 годах. За ноль принято среднее значение с 1961 по 1990 год. Черные линии – приповерхностные температуры: пунктирная – данные из базы HadCRUT (версия HadCRUT4); сплошная – из базы NASA GISTEMP; толстая сплошная – среднее значение за промежуток

Когда океан исчерпает возможность поглощать дополнительную тепловую энергию, поступающую из атмосферы, структура её кардинально перестроится в соответствии с вышеизложенным, и установится длительный ледниковый период, в течение которого океан начнёт охлаждаться за счет теплового излучения в космос, например, по внутренним каналам мощных вихрей, образующихся в атмосфере.

Наблюдаемое при обработке опытных данных долгосрочное ускоренное потепление Мирового океана согласуется с ускоренным повышением концентрации CO_2 в атмосфере, что подтверждает выводы более ранних работ. Например, в [21], обосновывается рост концентрации углекислого газа в атмосфере уменьшением его растворимости в водах океана с увеличением температуры. Также в работе [6] несколькими способами доказывается, что углеводородная энергетика не виновата в росте концентрации CO_2 в атмосфере, который происходит из-за увеличения температуры Мирового океана.

С повышением температуры океана увеличивается концентрация CO_2 и водяных паров в атмосфере, что повышает парниковый эффект и температуру атмосферы. Увеличение температуры атмосферы приводит с некоторым запаздыванием к увеличению температуры океана за счет перетекания в него теплоты, а это приводит опять к росту концентрации CO_2 и водяных паров в атмосфере, и процесс потепления ускоряется из-за обратной связи, что и наблюдается в настоящее время.

Заключение. Океан и атмосфера – единая взаимосвязанная система. Между ними протекают непрерывные процессы обмена теплом, пресной водой и газами. Океан поглощает из атмосферы избыток CO_2 или выделяет его в случае недостатка. Повышение температуры океана приводит к уменьшению количества растворённого в воде CO_2 и к выпадению в осадок CaCO_3 , который вместе с морскими организмами осаждается в виде известковых отложений. В недрах Земли образовались большие залежи известняка. Происходящее при этом увеличение концентрации CO_2 в атмосфере ведет к озеленению Земли и росту продуктивности растений. При этом в процессе фотосинтеза увеличивается потребление углекислого газа из атмосферы и производство углеводов, которые накапливаются в Земле, образуя залежи горючих материалов. Таким образом сама природа участвует в регулировании содержания CO_2 в атмосфере и океане. Поэтому, если уменьшить антропогенные воздействия на природу и увеличить поглощение CO_2 из атмосферы за счет увеличения площадей покрытых растениями, и одновременно ускорить процесс образования известняка, забирающего часть CO_2 из океана, за счет, например, увеличения коралловых образований, то может начаться процесс уменьшения концентрации CO_2 в системе океан-атмосфера, что увеличит поток теплового излучения с поверхности Земли в космос и понизит температуру системы.

Чтобы сохранить как можно дольше человеческую цивилизацию необходимо:

- остановить ускоренный приток тепла в атмосферу, в том числе за счет прекращения войн на Земле. Следует особо отметить, что к настоящему времени человечество накопило такое количество энергии, скрытой в ядерных боеголовках, что одновременное высвобождение только ее части приведет к росту производства энтропии в атмосфере, превышающей многие природные катастрофы, которые были на Земле;

- ограничить потребление человечеством энергоресурсов, а растущие потребности в них обеспечивать за счет создания альтернативных существующим энергосберегающих и экологически чистых технологий;

- поменять приоритеты развития современного общества, перейти со временем к обществу интеллектуалов и рациональных пользователей материальных благ;

- проявить максимальную заботу о сохранении природы, прекратить её загрязнение, уменьшить вырубку лесов, предотвратить их масштабное выгорание и др.

Список литературы

1. Кокин А.В., Кокин А.А. Современные экологические мифы и утопии. – СПб.: [б.и.], 2008. – 251 с.
2. Цегельский В.Г. Эволюция далеких от равновесия термодинамических систем в примерах. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 164 с.

3. Tsegelskiy V.G. Thermodynamic analysis of the impact of world energy and other aspects of human activity on the approach of the ice age on Earth // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2018, iss. 9-1, pp. 5-20.
4. Кутателадзе С.С. Теплоотдача при конденсации и кипении. – М.: Машгиз., 1952. – 235 с.
5. Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея-Бенара. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 248 с.
6. Цегельский В.Г. Мифы Парижского соглашения по климату // *Жизнь Земли*. – 2023. – Т. 45, №4. – С. 540-555. – doi.org/10.29003/m3535.0514-7468.2019_45_4/540-555.
7. Trenberth K., Fasullo J., Kiehl J. Earth's Global Energy Budget // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2009, vol. 90, iss. 3, pp. 311-324. doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1.
8. Федоров В.М., Фролов Д.М. Пространственная и временная изменчивость приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации // *Космические исследования*. – 2019. – Т. 57, №3. – С. 177-184. – doi.org/10.1134/S002342061903004X.
9. Мизун Ю.В., Мизун Ю.Г. Озонные дыры и гибель человечества. – М.: Вече, 1998. – 534 с.
10. Klemetti E. Tambora 1815: Just How Big Was The Eruption? // *Science. USA*. April. 10, 2015, pp. 1-5.
11. Цегельский В.Г. Гистерезисные явления в оптических системах с позиции неравновесной термодинамики. Оптическая бистабильность. // *Journal of Advanced Research in Natural Science*. – 2025. – №22. – С. 19-30. – doi.org/10.26160/2572-4347-2025-22-19-30.
12. Витер В.Н. Тратилый эквивалент // *Химия и химики*. – 2010. – №4. – С. 53-87.
13. Жарников В.Б., Ван А.В. Природный и антропогенный тепловой баланс Земли // *Вестник Сибирской Государственной Геодезической Академии*. – 2010. – Вып. 2(13). – С. 37-45.
14. Кузнецов В.В. Физика Земли. Учебник-монография. – Новосибирск: [б.и.], – 2011. – 842 с.
15. Рост мирового потребления электроэнергии. Хроника 2023. Мировая Энергетика, 2024/06/21 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clck.ru/3NMbg3>.
16. Лесные пожары в России: итоги 2021 года. Интернет-журнал «Экология сегодня». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ecologynow.ru/knowledge/zdorove-cheloveka/lesnye-pozhary-v-rossii-itogi-2021-goda>.
17. Лобанов Д.В., Звенигородский И.И., Свирин М.В. Определение теплопоступлений от человека с учётом энерготрат и физической активности // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2023. – №1. – С. 42-52. – doi.org/10.34031/2071-7318-2022-8-1-42-52.
18. Ферхуген Дж., Тернер Ф., Вейс Л. Земля. Введение в общую геологию. – М.: Мир, 1974. – 847 с.
19. Li Z., England M., Groeskamp S. Recent acceleration in global ocean heat accumulation by mode and intermediate waters // *Nature Communications*. 2023, vol. 14, pp. 1-14. doi.org/10.1038/s41467-023-42468-z.

20. Li Ch., Huang J., He Y., Li D. Atmospheric Warming Slowdown during 1998-2013 Associated with Increasing Ocean Heat Content // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2019, vol. 36, iss. 11, pp. 1188-1202. doi.org/10.1007/s00376-019-8281-0.
21. Снакин В.В. Динамика глобальных природных процессов и учение о биосфере В.И. Вернадского // *Жизнь Земли*. – 2023. – Т. 45, №1. – С. 27-38. – doi.org/10.29003/m3147.0514-7468.2023_45_1/27-38.

References

1. Kokin A.V., Kokin, A.A. Modern environmental myths and utopias. – SPb.: [w.p.], 2008. – 251 p.
2. Tsegelskiy V.G. Evolution of far-from-equilibrium thermodynamic systems in examples. – M.: MSTU n.a. N.E. Bauman, 2021. – 164 p.
3. Tsegelskiy V.G. Thermodynamic analysis of the impact of world energy and other aspects of human activity on the approach of the ice age on Earth // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2018, iss. 9-1, pp. 5-20.
4. Kutateladze S.S. Heat transfer during condensation and boiling. – M.: Mashgiz, 1952. – 235 p.
5. Getling A.V. Rayleigh–Benard convection. – M.: Editorial URSS, 1999. – 248 p.
6. Tsegelskiy V.G. Myths of the Paris Climate Agreement // *Life of the Earth*. 2023, vol. 45, no. 4, pp. 540-555. doi.org/10.29003/m3535.0514-7468.2019_45_4/540-555.
7. Trenberth K., Fasullo J., Kiehl J. Earth's Global Energy Budget // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2009, vol. 90, iss. 3, pp. 311-324. doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1.
8. Fedorov V.M., Frolov D.M. Spatial and temporal variability of solar radiation arriving at the upper boundary of the atmosphere // *Space Research*. 2019, vol. 57, no. 3, pp. 177-184. doi.org/10.1134/ S002342061903004X.
9. Mizun Yu.V., Mizun Yu.G. Ozone holes and the death of mankind. – M.: Veche, 1998. – 534 p.
10. Klemetti E. Tambora 1815: Just How Big Was The Eruption? // *Science. USA*. April. 10, 2015, pp. 1-5.
11. Tsegelskiy V.G. Hysteresis phenomena in optical systems from the standpoint of nonequilibrium thermodynamics. Optical bistability. // *Journal of Advanced Research in Natural Science*. 2025, iss. 22, pp. 19-30. doi.org/10.26160/2572-4347-2025-22-19-30.
12. Viter V.N. Tratyl equivalent // *Chemistry and Chemists*. 2010, no. 4, pp. 53-87.
13. Zharnikov V.B., Van A.V. Natural and anthropogenic heat balance of the Earth // *Bulletin of the Siberian State Geodetic Academy*. 2010, iss. 2(13), pp. 37-45.
14. Kuznetsov V.V. Physics of the Earth. Textbook-monograph. – Novosibirsk: [w.p.], 2011. – 842 p.
15. Growth of global electricity consumption. Chronicle 2023. World Energy, 2024/06/21 [Electronic resource]. – Access mode: <https://clck.ru/3NMbg3>.
16. Forest fires in Russia: results of 2021. Internet journal "Ecology today" [Electronic resource]. – Access mode: <https://ecologynow.ru/knowledge/zdorovecheloveka/lesnye-pozhary-v-rossii-itogi-2021-goda>.
17. Lobanov D.V., Zvenigorodsky I.I., Svirin M.V. Determination of heat input from a person taking into account energy expenditure and physical activity // *Bulletin of BSTU n.a. V.G. Shukhov*. 2023, no. 1, pp. 42-52. doi.org/10.34031/2071-7318-2022-8-1-42-52.

18. Verhugen J., Turner F., Weiss L. Earth. Introduction to General Geology. – M.: World, 1974. – 847 p.
19. Li Z., England M., Groeskamp_S. Recent acceleration in global ocean heat accumulation by mode and intermediate waters // Nature Communications. 2023, vol. 14, pp. 1-14. doi.org/10.1038/s41467-023-42468-z.
20. Li Ch., Huang J., He Y., Li D. Atmospheric Warming Slowdown during 1998-2013 Associated with Increasing Ocean Heat Content // Advances in Atmospheric Sciences. 2019, vol. 36, iss. 11, pp. 1188-1202. doi.org/10.1007/s00376-019-8281-0.
21. Snakin V.V. Dynamics of global natural processes and the doctrine of the biosphere of V.I. Vernadsky // Life of the Earth. 2023, vol. 45, no. 1, pp. 27-38. doi.org/10.29003/m3147.0514-7468.2023_45_1/27-38.

Цегельский Валерий Григорьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник	Tsegelskiy Valery Grigorievich – doctor of technical sciences, chief scientist
user46@ro.ru	

Received 15.07.2025