

**МЕТЕОРОЛОГИЯ****METEOROLOGY**

УДК 551.583:341.12

**ОБЪЕКТИВНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ПОНЯТИЯ «КЛИМАТ»****М.Л. АРУШАНОВ<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, mikl-arushanov@rambler.ru

**Аннотация.** До настоящего времени понятие «климат» остаётся понятием качественным, формулируемым как многолетний (порядка нескольких десятилетий) режим погоды. Это чисто «бытовое» определение климата, основанное на средних за десятилетия значениях режима погоды. С физической точки зрения оно не несёт в себе никакой информации, так как понятие «режим погоды» тоже неопределённо. Иными словами, отсутствует количественная характеристика, позволяющая на больших промежутках времени объективным методом выделить периоды, на которых климат (в обычном понимании) сохранял стационарные состояния и периоды с выраженной динамикой. Понятие «климат» должно быть сформулировано на основании рассмотрения климатической системы и является количественной реализацией этой системы на данном периоде времени.

В статье на основе теоремы И. Пригожина о минимальности производства энтропии в открытой стационарной термодинамической системе выполнена формализация понятия «климат». Численные расчёты, выполненные на периоде более 300 лет, показали корректность полученной количественной характеристики климата – производство энтропии.

**Ключевые слова:** климат, климатическая система, открытая термодинамическая система, энтропия, производство энтропии, температура, теорема Пригожина.

**Введение.** Необходимость в формализации понятия климат продиктована отсутствием его определения, базирующегося не на статистической [Блютген, 1972], а на физической основе, как это изначально было заложено древними греками в самом слове климат – «κλίμα (*klimatos*) – наклон», т.е. наклон к поверхности Земли падающих солнечных лучей.

В климатологии климат определяется как совокупность погод за определённый промежуток времени в их обычном среднем проявлении в данной географической местности. В свою очередь, понятие «погода» относится к текущему состоянию атмосферы и представляет совокупность непрерывно меняющихся значений метеорологических величин. Поэтому в определении А.С. Моница [Монин, 1979] климат характеризуется как некоторый статистический режим погоды. Это определение носит качественный статистический характер, лишённый физической основы, а вместе с этим, объективного критерия его изменчивости. Действительно, величина «среднего» зависит от длины осреднения нестационарных временных рядов метеорологических величин. Кроме того, значение среднего не является характеристикой климата, а только его тренд на достаточно продолжительных интервалах времени. Тренд описывается различными уравнениями (линейными, логарифмическими, степенными и т.д.), а решение о постоянстве параметров уравнения принимается на основе статистической проверки гипотезы [Пугачев, 1979]. Из-за ограниченности длины временных рядов метеорологических величин точность определения тренда среднего низкая. Таким

образом, понятие «климат» должно быть формализовано в рамках физической конструкции.

В своих основных чертах климат имеет колебательный характер с определёнными периодами. Это указывает на самоорганизующее начало динамики климатической системы.

**Производство энтропии – количественная характеристика климатической системы.** В свою очередь самоорганизующее начало природных процессов указывает на то, что процессы формирования погоды необходимо рассматривать как результат функционирования открытой термодинамической системы, элементы которой обмениваются веществом, энергией и импульсом. Как известно [Де Гроот, Мазур, 1964] свойства открытых систем описываются наиболее просто вблизи состояния термодинамического равновесия. Если отклонения от термодинамического равновесия не велико, то неравновесное состояние можно охарактеризовать теми же параметрами, что и равновесное, но не с постоянными для всей системы значениями, а зависящие от времени. Степень неупорядоченности такой открытой системы, как и системы в равновесном состоянии, характеризуется энтропией. Термодинамические силы (отклонения термодинамических параметров от их равновесных значений) вызывают в системе потоки энтропии и вещества, что приводит к росту энтропии системы – *производству энтропии*. В замкнутой изолированной системе, согласно второму закону термодинамики, энтропия, возрастая, стремится к своему максимальному значению, а производство энтропии к нулю [Гленсдорф, Пригожин, 1973]. В открытой системе возможны стационарные состояния с постоянной энтропией при постоянном производстве энтропии. И. Пригожиным доказана теорема [Гленсдорф, Пригожин, 1973], согласно которой при стационарных состояниях в открытой системе производство энтропии минимально. Данная теорема является прямым указанием на возможность формализации понятия «климат». Действительно, средние погодные условия в течение определённых периодов на планете, характеризующиеся как климат, на этом периоде можно рассматривать как стационарное состояние климатической системы. Тогда на этом временном интервале производство энтропии будет минимально. Таким образом, «скачки» значений производства энтропии между незначительными её изменениями на интервале определённой длительности являются индикаторами, характеризующие состояние климатической системы на данном отрезке времени. Схематически это показано на рис. 1. Такие «скачки» не могут быть подобны изменению  $\delta$ -функции в виде импульса, а достигают своего экстремума в течение определённого интервала времени. Эти интервалы определяют некоторый переходной климатический период.

Климатическая открытая система характеризуется мощными необратимыми диссипативными процессами на планете, включающие громадные потоки вещества и энергии. Уравнение энергетического баланса планеты [Изаков, 1991]

$$B = F_{\odot} - F_T = S_{\odot} \pi R^2 (1 - A) - 4\pi R^2 \sigma_B T_e^4 \quad (1)$$

включает поглощённый от Солнца поток радиации  $F_{\odot}$  и излучённый поток тепловой радиации  $F_T$  (поток тепла из недр Земли пренебрежительно мал по сравнению с указанными потоками). В (1)  $S_{\odot}$  – солнечная постоянная, связанная со светимостью Солнца  $L_{\odot}$  соотношением  $L_{\odot} = S_{\odot} \cdot 4\pi l^2$  ( $l$  – расстояние Земли от Солнца),  $R$  – радиус Земли,  $A$  – интегральное сферическое альbedo,  $T_e$  – эффективная температура Земли,  $\sigma_B$  – постоянная Стефана-Больцмана. Средний за год баланс энергии близок к нулю [Марчук и др., 1988], то есть планета в единицу времени теряет столько же энергии, сколько получает

$$V \frac{d\bar{E}}{dt} = B \cong 0, \quad (2)$$

где  $\bar{E}$  – средняя энергия единицы объёма,  $V$  – объём атмосферы и активного слоя вблизи поверхности Земли, на который воздействует солнечная радиация. На основании (2) зачастую делается неверный вывод, что состояние планеты близко к термодинамическому равновесию. Это не так вследствие наличия мощных диссипативных процессов, охватывающих большие потоки энергии и вещества. Уравнение (1) не содержит меры этих неравновесных процессов. В термодинамике необратимых процессов их мерой служит рост энтропии. Когда состояние планеты близко к квазистационарным условиям рост энтропии  $S$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dU}{dt} + \frac{P}{TV} \frac{dV}{dt} - \sum_k \frac{\mu_k}{T} \frac{\partial n_k}{dt} \quad (3)$$

достаточно мал. В (3)  $U$  – внутренняя энергия системы,  $V$  – объём системы,  $\mu_k$ ,  $n_k$  – химический потенциал и концентрации  $k$ -го компонента.

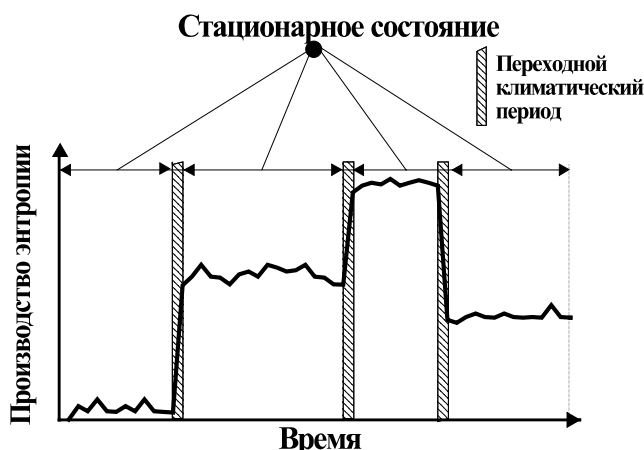


Рис. 1. Схема выделения климатических периодов по данным распределения производства энтропии

Fig. 1. Scheme of allocation of climatic periods according to the distribution of entropy production

При близости планеты к квазистационарным условиям в течение определённого времени средние климатические условия сохраняются устойчивыми. Эти квазистационарные условия, сохраняющиеся на соответствующем периоде времени и следует считать *климатом данного периода*. Здесь совершенно справедлив вопрос: каким образом при наличии мощных диссипативных необратимых процессов на Земле энтропия открытой системы в течение относительно длительных периодов практически не меняется? Ответ на этот вопрос следует из рассмотрения двух членов в приращении энтропии  $dS$ : первый  $d_e S$  описывает перенос энтропии через границы системы, второй  $d_i S$  означает энтропию, произведённую в системе как меру функционирования диссипативных процессов (рис. 2) [Пригожин, 1985]. В силу аддитивности энтропии имеем

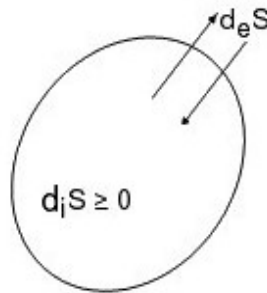
$$dS = d_e S + d_i S, \quad d_i S \geq 0. \quad (4)$$

Перенос энтропии через границы системы генерируется потоком  $F_{\odot}$ , испущенным с поверхности Солнца  $4\pi R_{\odot}^2$  ( $R_{\odot}$  - радиус Солнца), который распределяется у Земли на сферу  $4\pi l^2$

$$f_{\odot} = \sigma_B T_{\odot} \left( \frac{R_{\odot}}{l} \right)^2 \quad (5)$$

Радиация, испускаемая с единицы площади поверхности Земли с температурой  $T_e$  в полупространство, несёт поток энергии

$$f_T = \sigma_B T_e^4. \quad (6)$$



**Рис. 2. Открытая система, в которой  $d_i S$  означает производство энтропии, а  $d_e S$  – обмен энтропией между системой и внешней средой**

**Fig. 2. Open system, in which  $d_i S$  means the production of entropy, and  $d_e S$  - the exchange of entropy between the system and the external environment**

Принимая в первом приближении Солнце и Землю абсолютно черными телами, получим, что приток радиационной энтропии на планету равен

$$d_e S \cong \Delta S_e = \frac{4\pi R^2}{3} \left[ \frac{f_{\odot} (1 - A)}{T_{\odot}} - \frac{f_T}{T_e} \right], \quad (7)$$

где  $T_{\odot}$  – температура солнечной радиации, определяемая из уравнения (5),  $T_e$  – равновесная температура Земли, определяемая из (1) и (6).

На основании наблюдаемых данных  $F_{\odot} \approx F_T$  [Hartman, 1986; Ramanathan, 1987] выражение (7) можно записать в виде

$$\Delta S_e \approx \frac{4}{3} F_{\odot} \left[ \frac{1}{T_{\odot}} - \frac{1}{T_e} \right]. \quad (7a)$$

Ответ на поставленный вопрос «каким образом при наличии мощных диссипативных необратимых процессов на Земле энтропия открытой системы в течение длительных периодов практически не меняется?» заключён в неравенстве  $T_e < T_{\odot}$ , то есть приток энтропии на Землю, как следует из (7a), отрицателен. Таким образом, рост энтропии  $d_i S$  уравнивается притоком отрицательной  $\Delta(-S_e)$  энтропии (негэнтропии), возникающей за счёт различия энтропий поглощённой солнечной и излучённой тепловой радиации.

В атмосфере Земли, где распространяется поток солнечной  $f_{\odot}$  и тепловой  $f_T$  радиации, последняя теряет в единице объёма

$$\Delta S_r = \frac{4}{3} \left( -\nabla \frac{f_{\odot}}{T_{\odot}} - \nabla \frac{f_T}{T} \right), \quad (8)$$

а вещество получает

$$\Delta S_m = \frac{1}{T} \left( -\nabla f_{\odot} - \nabla f_T \right), \quad (9)$$

где  $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$  – оператор Гамильтона.

С учётом (4), (8), (9) производство энтропии  $\sigma(S)$  в единице объёма атмосферы Земли запишется в виде

$$\sigma(S) = \Delta S_m - \Delta S_r = -\frac{1}{T} (\nabla f_{\odot} + \nabla f_T) + \frac{4}{3} \left( \frac{\nabla f_{\odot}}{T_{\odot}} + \frac{\nabla f_T}{T} \right). \quad (10)$$

В случае стационарного состояния, т.е.  $-\nabla f_{\odot} = \nabla f_T$ ,  $\sigma(S)$  выразится как

$$\sigma(S) = \frac{4}{3} (-\nabla f_{\odot}) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\odot}} \right). \quad (10a)$$

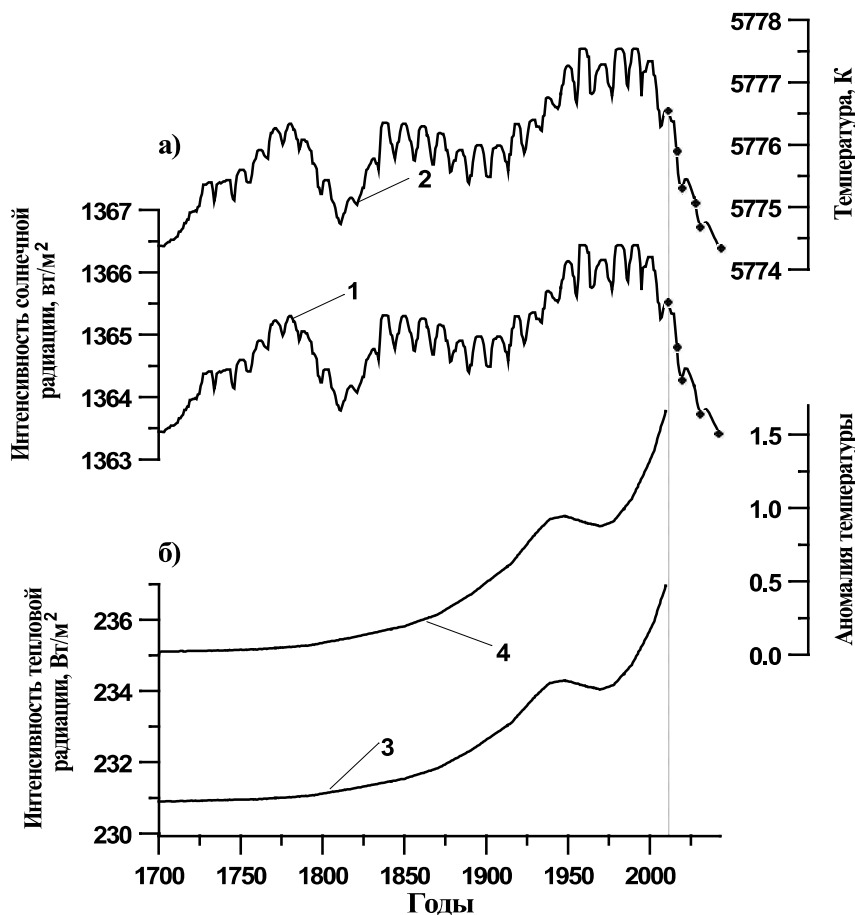
**Численный эксперимент.** Для проведения численного эксперимента рассматривался слой атмосферы до высоты 20 км. В пределах этого слоя газовый состав атмосферы с достаточной точностью можно считать сплошной средой (число Кнудсена значительно меньше единицы), где кванты солнечного света поглощаются и рассеиваются молекулами атмосферы. Таким образом, производство энтропии рассчитывалось как интеграл по слою от (10):

$$\sigma(S) = \int_0^z \left[ -\frac{1}{T} (\text{div} f_{\odot} + \text{div} f_T) + \frac{4}{3} \left( \frac{\text{div} f_{\odot}}{T_{\odot}} + \frac{\text{div} f_T}{T} \right) \right] dz. \quad (11)$$

На рис. 3 приведены динамика радиационных потоков  $f_{\odot}$  и  $f_T$  и их температур  $T_{\odot}$ ,  $T$  по данным работ [Монин, 1979; Абдусаматов, 2003, 2005, 2009]. Распределения радиационных потоков на единицу поверхности, как функция высоты, взяты из модели С. Манабе и Р.Ф. Стриклера [Манабе, Стриклер, 1967].

Результаты численного эксперимента по расчёту динамики производства энтропии климатической системы планеты приведены на рис. 4. Как видно из рисунка, в течение последних 300 лет в климатической системе планеты наблюдаются четыре переходных периода различной продолжительности. Отличительная особенность первой половины периода (около 150 лет) состоит в том, что стационарные состояния более продолжительные, чем переходные. И, наоборот, последнее 150-летие характеризуется длительными переходными периодами и непродолжительными стационарными состояниями. При этом, приведённые на рис. 4 продолжительности стационарных состояний, хорошо согласуются с принятой классификацией динамики климата на рассматриваемом периоде времени [Монин, 1979]. Так, например, продолжительные стационарные состояния климатической системы между 1700 и 1850 годами с незначительными по времени переходными периодами хорошо согласуются с так называемым «малым ледниковым периодом» [Монин, 1979]. Современное состояние климатической системы, как следует из рис. 4, находится в стадии переходного периода после её последнего стационарного состояния между 1940 и 1980 годами.

На основании выше изложенного можно дать следующее физическое определение климата: *Климат – это открытая периодически меняющаяся термодинамическая система, сохраняющая состояние стационарности или близкое к нему с постоянным значением производства энтропии на определённых интервалах времени.*



**Рис. 3.** Динамика солнечной и тепловой радиации за последние 300 лет

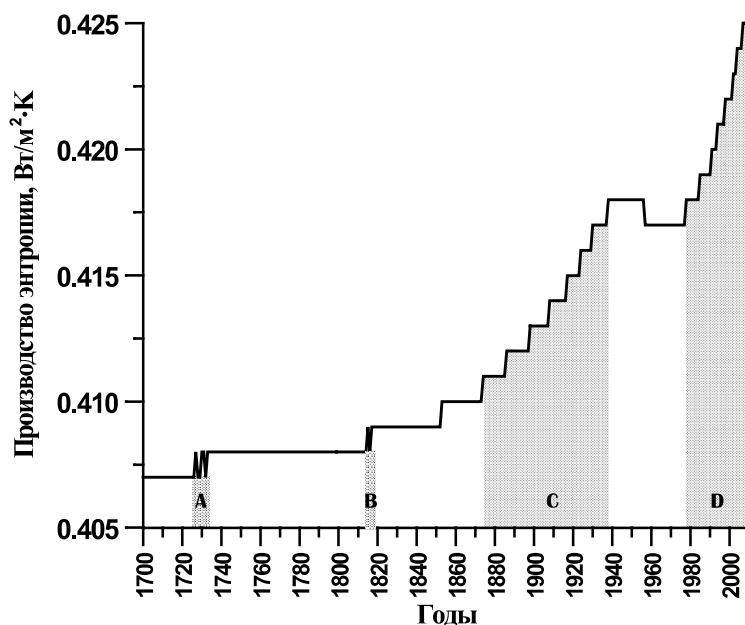
a) 1- интенсивность потока солнечной радиации [13,14], 2 – температура солнечной радиации;

—\*—\*— прогноз по данным [Абдусаматов, 2003, 2005, 2009]; б) 3 – интенсивность потока тепловой радиации, 4 – температура тепловой радиации [Манабэ, Стриклер, 1967].

**Figure: 3.** Dynamics of solar and thermal radiation over the past 300 years

a) 1 - the intensity of the solar radiation flux [13, 14], 2 - the temperature of solar radiation;

—\*—\*— forecast based on data [Abdusamatov, 2003, 2005, 2009]; b) 3 - intensity of the flow of thermal radiation, 4 - temperature of thermal radiation [Manabe, Strickler, 1967].



**Рис. 4. Динамика производства энтропии за 300-летний период, как объективный показатель изменчивости климатической системы**  
*A, B, C, D – переходные периоды, между стационарными состояниями климатической системы.*

**Figure: 4. Dynamics of entropy production over a 300-year period, as an objective indicator of the variability of the climate system**  
*A, B, C, D – transition periods between stationary states of the climate system.*

**Выводы.** При описании открытой самоорганизующейся климатической системы энтропия играет ведущую роль, так как это единственная функция, позволяющая различить неравновесные и равновесные процессы, а производство энтропии является объективным показателем стационарности климатической системы на определённом периоде времени. Стационарное состояние неравновесной климатической системы поддерживается притоком негэнтропии.

Большим подспорьем в реализации изложенного подхода в целях диагноза состояния климатической системы являются данные спутниковых измерений солнечной и уходящей земной радиации. Здесь, несомненное уточнение расчётов должны дать профили вертикального распределения радиации в земной атмосфере.

Так как производство энтропии всегда неотрицательно, то для диагноза длительности стационарного состояния системы – очередного климатического периода, оно может быть использовано в качестве функции Ляпунова.

## ЛИТЕРАТУРА

*Абдусаматов Х.И.* Скоординированные вариации диаметра, активности и светимости Солнца и эксперимент «Измерение вариаций и формы диаметра Солнца» на борту российского сегмента МКС // Петербургские фрагменты научной картины мира. – Санкт-Петербург: Вып. 2, 2003. – С. 8-20.

*Абдусаматов Х.И.* О долговременных вариациях потока интегральной радиации и возможных изменениях температуры в ядре Солнца // Кинематика и физика небесных тел. Т. 21, №6. 2005. – С. 471-477.

- Абдусаматов Х.И. Солнце определяет климат. – М.: «Наука и жизнь», №1, 2009. – С.34-40.
- Блютген И. География климатов. Том 1. – М.: Прогресс, 1972. – 427 с.
- Блютген И. География климатов. Том 2. – М.: Прогресс, 1972. – 440 с.
- Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
- Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. – Мир, 1964. – 456 с.
- Изаков М.Н. О возможности измерения со спутников притока радиационной негэнтропии на землю для экологических исследований // Исследование Земли из космоса, 1991. №4. – С. 3-15.
- Манабе С., Стриклер Р.Ф. Термическое равновесие в атмосфере с учётом конвекции // Теория климата. – Л. Гидрометеоздат, 1967. – С. 61-104.
- Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В. Радиационный баланс Земли. – М.: Наука, 1988. – 223 с.
- Монин А.С. История климата. – М.: Гидрометеоздат, 1979. – 407 с.
- Пригожин И. От существующего к возникающему. – М.: Наука, 1985. – 327 с.
- Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Наука, 1979. – 496 с.
- Hartman D.C., Ramanathan V., Berroir A., Hunt G.E. Earth radiation budget data and climate research // Rev. Geophys, 1986. V. 24. No 2. – PP. 439-468.
- Ramanathan V. The role of Earth radiation budget studies in climate and general circulation research // J. Geophys. Res., 1987. V 92. D 4. – PP. 4075-4095.

## «ИКЛИМ» ТУШУНЧАСИНИНГ ОБЪЕКТИВ ТАЪРИФИ

М.Л. АРУШАНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Гидрометеорология илмий-тадқиқот институти, mikl-arushanov@rambler.ru

**Аннотация.** Ҳозирги вақтгача “иқлим” об-ҳавонинг кўп йиллик (бир неча ўн йиллик) режими деб қабул қилинувчи сифатий тушунча бўлиб келмоқда. Иқлимнинг бундай талқини соф “машиий” тушунча бўлиб, об-ҳаво режимининг ўн йилликлар учун ўртачаланган қийматларига асосланади. Табиий нуқтаи назардан “об-ҳаво режими” тушунчасининг ўзи ноаниқликларга эга эканлиги тўғрисида, мазкур талқиндаги “иқлим” тушунчаси ҳам ўзида ҳеч қандай ахборот ҳавола этмайди. Бошқача қилиб айтганда, юқоридаги таърифда катта вақт оралиқларида иқлим (анъанавий маънода) стационар ҳолатини сақлайдиган ва яққол ифодаланган ўзгаришга эга бўлган даврларни объектив усул билан ажратилишига имкон берувчи миқдорий тавсиф мавжуд эмас. Аслида “иқлим” тушунчаси иқлимий тизимни таҳлил қилиши асосида шакллантирилиши ҳамда вақтнинг муайян оралиғида бу тизимни миқдор жиҳатидан тавсифлаши зарур.

Мақолада И. Пригожиннинг очиқ стационар термодинамик тизимда энтропия ишлаб чиқарилишининг минималлиги тўғрисидаги теоремаси асосида “иқлим” тушунчасига миқдорий таъриф берилди. 300 йилдан ортиқ давр учун бажарилган ҳисоблашлар энтропия ишлаб чиқарилиши иқлимнинг тўғри миқдорий характеристикаси эканлигини кўрсатди.

**Калит сўзлар:** иқлим, иқлимий тизим, очиқ термодинамик тизим, энтропия, энтропиянинг ишлаб чиқарилиши, ҳарорат, Пригожин теоремаси.

## OBJECTIVE CONSTRUCTION OF THE CONCEPT OF «CLIMATE»

M.L. ARUSHANOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hydrometeorological Research Institute, mikl-arushanov@rambler.ru

**Abstract.** To date, the concept of «climate» remains a quality concept, formulated as a multi-year (of the order of several decades) weather conditions. This purely «everyday» definition of climate, based on the average values of the regime over years over decades, from the physical point of

view does not carry any information, since the concept of «weather mode» is also vague. In other words, there is no quantitative characteristic that allows, over long periods of time, to distinguish with an objective method the periods at which the climate (in the usual sense) retained stationary states and periods with pronounced dynamics. The concept of «climate» should be formulated on the basis of consideration of the climate system and is a quantitative implementation of this system for a given period of time

Based on the theorem of I. Prigogine on the minimization of entropy production in an open stationary thermodynamic system, the concept of «climate» is formalized. Numerical calculations performed over a period of more than 300 years have shown the correctness of the obtained quantitative characteristics of the climate – entropy production.

**Keywords:** climate, climate system, open thermodynamic system, entropy, entropy production, temperature, Prigogine's theorem.

## REFERENCE

*Abdusamatov H.I.* Skoordinirovannyye variatsii diametra, aktivnosti i svetimosti Solntsa i eksperiment «Izmerenie variatsiy i formy diametra Solntsa» na bortu rossyiskogo segmenta MKS [Coordinated variations in the diameter, activity and luminosity of the Sun and the experiment] // St. Petersburgskie fragmenty nauchnoy kartiny mira. – Sn. Petersburg: Vip. 2., 2003. – S. 8-20. (In Russian)

*Abdusamatov H.I.* Solntse opredelyaet klimat [The sun determines the climate]. – «Nauka i jizn», N1, 2009. – S. 34-40. (In Russian)

*Abdusamatov H.I.* O dolgovremennykh variatsiyah potoka integralnoy radiatsii i vozmojnykh izmeneniyah temperatury v yadre Solntsa [On long-term variations in the flux of integral radiation and possible changes in temperature in the core of the Sun] // Kinematika i fizika nebesnykh tel. Tom 21, N6. 2005. – S. 471-477. (In Russian)

*Blutgen I.* Geografiya klimatov [Geography of climates]. Tom 1. – M.: Progress, 1972. – 427 s. (In Russian)

*Blutgen I.* Geografiya klimatov [Geography of climates]. Tom 2. – M.: Progress, 1972. – 440 s. (In Russian)

*Glensdorf P., Prigogine I.* Termodinamicheskaya teoriya strukturyi, ustoychivosti i fluktatsiy [Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations]. – M.: Mir, 1973. – 280 s. (In Russian)

*De Groot S., Mazur P.* Neravnovesnaya termodinamika [Nonequilibrium thermodynamics]. Mir, 1964. – 456 s. (In Russian)

*Izakov M.N.* O vozmojnosti izmereniya pritoka radiatsionnoy negentropii na zemlyu dlya ekologicheskikh issledovaniy [On the possibility of measuring from satellites the inflow of radiation negentropy to the earth for ecological research] // Issledovanie Zemli iz kosmosa, 1991. N 4. – S. 3-15. (In Russian)

*Manabe S., Strickler R.F.* Termicheskoe ravnovesie v atmosfere s uchetom konveksii [Thermal equilibrium in the atmosphere taking into account convection] // Teoriya klimata. – L. Gidrometeoizdat, 1967. – S. 61-104. (In Russian)

*Marchuk G.I., Kondrat'ev K.Ya., Kozoderov V.V.* Radiatsionnyy balans Zemli [Radiation balance of the Earth]. – M.: Nauka, 1988. – 223 s. (In Russian)

*Monin A.S.* Istoriya klimata [History of climate]. – M.: Gidrometeoizdat, 1979. – 407 s. (In Russian)

*Prigogine I.* Ot sushchestvuyushogo k vznikayushemu [From Existing to Emerging]. – M: Nauka, 1985. – 327 s. (In Russian)

*Pugachev V.S.* Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. – M: Nauka, 1979. – 496 s. (In Russian)

*Hartman D.C., Ramanathan V., Berroir A., Hunt G. E.* Earth radiation budget data and climate research // Rev. Geophys, 1986. V. 24. N2. – PP. 439-468.

*Ramanathan V.* The role of Earth radiation budget studies in climate and general circulation research // J. Geophys. Res. 1987. V 92. D 4. – P. 4075-4095.