ФИЗИКА 61

УЛК 551.511.13

# Влияние криосферы и площади облачного покрова Земли на изменение ее энергетического баланса и глобального климата

Д-р физ.-мат. наук **X. И. АБДУСАМАТОВ¹**, канд. техн. наук **E. В. ЛАПОВОК**, д-р техн. наук **C. И. ХАНКОВ²** 

¹abduss@gao.spb.ru, ²leva0007@rambler.ru Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН 196140, Россия, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65

Целью данной работы являлось определение влияния на приращение планетарной термодинамической температуры вариаций указанных характеристик земной поверхности и атмосферы на основе анализа изменения энергетического баланса Земли и выявление наиболее значимых факторов. Выведены формулы для расчета влияния вариаций альбедо и степеней черноты атмосферы и земной поверхности, а также пропускания
атмосферы на планетарную температуру. В рамках малых приращений этих параметров определен вклад
каждого из них в тенденции изменения климата. Показано, что главный вклад вносит изменение облачности
в атмосфере, а приращения криосферы занимает второе место. Проанализированы положительные и отрицательные обратные связи влияния рассмотренных параметров при повышении или понижении планетарной температуры, начало которым дает периодическое долговременное изменение солнечной постоянной.

**Ключевые слова:** криосфера Земли, климат, площадь облачного покрова, солнечная постоянная, планетарная температура Земли.

## The influence of cryosphere and cloud cover area of the Earth on its energy balance and global climate

D. Sc. H. I. ABDUSSAMATOV<sup>1</sup>, Ph. D. Ye. V. LAPOVOK, D. Sc. S. I. KHANKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>abduss@gao.spb.ru, <sup>2</sup>leva0007@rambler.ru Pulkovo Observatory 196140, Russia, Saint-Petersburg, Pulkovskoye chaussee 65

The paper deals with influence of cryosphere and cloud cover area increment on the planetary thermodynamic temperature. Analysis is based the changes in the energy balance of the Earth. Formulae for the influence of albedo variations, atmosphere emissivity and emissivity of the Earth, and atmospheric transmission on the planetary temperature are given. The influence of the above factors on the climate changes is analyzed in terms of their small increments. The cloud cover change is shown to have major impact, cryosphere increment being of the second importance. Positive and negative feedback of the parameter with decreasing or increasing planetary temperature du to periodic long-term changes of solar constant are analyzed. Keywords: cryosphere, climate, cloud cover area, solar constant, planetary temperature of the Earth.

Долговременные (двухвековые) циклические вариации солнечной постоянной, определяемой как удельный световой поток солнечного излучения на внешней границе атмосферы Земли, создают периодически пов-

торяющиеся избыток и дефицит в энергетическом балансе Земли. В фазах снижения солнечной постоянной Земля как планета отдает излучением в космическое пространство больше энергии, чем получает от Солнца (дефицит энергетического баланса). В фазах повышения солнечной постоянной — наоборот (положительное приращение энергетического баланса). Важно подчеркнуть, что попеременно возникающие дефицит и избыток энергетического баланса приводят с некоторым отставанием по времени не только к изменениям глобальной планетарной температуры, но и к изменениям агрегатного состояния воды и уровня мирового океана, сопровождающимися изменениями криосферы и влагосодержания в атмосфере. Соответствующие этим изменениям процессы проявляются в приращениях площадей ледового и снежного покрова Земли, а также общей площади облачного покрова атмосферы. В свою очередь это приводит к колебаниям оптических и радиационных характеристик земной поверхности и атмосферы. Под оптическими характеристиками понимаются те, которые соответствуют спектру солнечного излучения (альбедо земной поверхности и атмосферы, а также пропускание атмосферы в спектре солнечного излучения). К радиационным характеристикам относятся соответствующие спектру теплового инфракрасного излучения (степени черноты земной поверхности и атмосферы, ширина контура окна прозрачности и пропускание атмосферой теплового излучения земной поверхности). Вклад вариаций каждого из этих параметров в изменение климата Земли до сих пор должным образом не изучен.

Целью данной работы являлось определение влияния на приращение планетарной термодинамической температуры вариаций указанных характеристик земной поверхности и атмосферы на основе анализа изменения энергетического баланса Земли и выявление наиболее значимых факторов.

Энергетический баланс Земли, как планеты в целом, определяется поглощаемой энергией солнечного излучения, выражаемой величиной удельного теплового потока Q. Величина Q является единственной приходной частью энергетического баланса и определяется только инсоляцией  $Q_{in}$  и значением альбедо Бонда A, что описывается формулой [1]

$$Q = (1 - A) Q_{in}; Q_{in} = E/4,$$
 (1)

где E — солнечная постоянная,  $E = 1366 \text{ Br/m}^2$ .

Расходная часть энергетического баланса обусловлена излучением энергии от Земли в космическое пространство, характеризуемым поверхностной плотностью или удельной мощностью радиационного потока q, определяемого из соотношения [2]

$$q = \varepsilon_{ef} \sigma T_p^4; \qquad \varepsilon_{ef} = \varepsilon_a - (\varepsilon_a - \varepsilon_s) \delta \gamma,$$
 (2)

где  $\varepsilon_{ef}$  — эффективная излучательная способность (степень черноты) Земли как планеты;  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана,  $\sigma$  = 5,67·10<sup>-8</sup> Bt/(м²·К⁴);  $T_p$  — планетарная температура или эффективная термодинамическая температура системы океан-атмосфера,  $T_p$  = 284 K [2];  $\delta$  — доля энергии, заключенной в спектрах окна прозрачности атмосферы;  $\gamma$  — пропускание атмосферой теплового излучения земной поверхности;  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_a$  — усредненное по всей поверхности планеты значение степени черноты земной поверхности и атмосферы.

В общем случае в нестационарный энергетический баланс планеты входят еще три компоненты, которые нельзя отнести ни к приходной, ни к расходной части.

Первая компонента определяет изменение энтальпии J или теплосодержания поверхностного слоя планеты, главным образом океана (без изменения теплосодержания ее внутренней структуры, вплоть до горячего ядра) и описывается соотношением

$$J = di/d\tau;$$
  $di = C_s dT_p;$   $C_s = C/S,$  (3)

где di — приращение энтальпии;  $\tau$  — текущее время;  $C_s$  — поверхностная плотность полной теплоемкости Земли; C — суммарная теплоемкость атмосферы и океана; S — суммарная площадь поверхности планеты.

Две другие компоненты связаны с нарушением фазового равновесия при испарении и конденсации водяного пара с изменением площади облачного покрова, а также при образовании и таянии льда.

Нарушение равновесия в системе пар—вода приводит к выделению или поглощению тепловой энергии, описываемой величиной удельной мощности  $Q_1$  [3]. Некоторая часть приращения (положительного или отрицательного) поглощаемой Землей мощности солнечного излучения затрачивается на изменение массы ледового покрова, главным образом, в приполярных областях, где региональные температуры значительно ниже значения планетарной температуры и ниже температуры таяния льда (ниже 0 °C). Среднее значение мощности, затрачиваемой на образование или таяние льда за время длительности процесса  $\Delta \tau$ , обозначим  $Q_2$ .

В результате общее уравнение нестационарного энергетического баланса Земли можно записать в виде

$$Q = q + J + Q_1 + Q_2. (4)$$

Знак компонент энергетического баланса  $Q_1$  и  $Q_2$  зависит от знака приращения величины Q. Величина компонент  $Q_1$  и  $Q_2$  зависит от величины приращения Q, а также от длительности переходного процесса.

Ограничимся рассмотрением ситуации конечного перехода из одного равновесного состояния в другое. В этом случае выполняется условие

$$J = Q_1 = Q_2 = 0. (5)$$

В конечном состоянии, вследствие изменения влагосодержания в атмосфере и приращения площади облачного покрова, изменяется альбедо и пропускание атмосферы, как в спектре солнечного излучения, так и в спектре теплового излучения Земли. При изменении площади ледового и снежного покрова, также изменении растительности и др. изменяется альбедо земной поверхности.

Поглощаемая мощность солнечного излучения может быть выражена через эти оптические параметры соотношением [2]

$$Q = (1 - A_a) (1 - A_b \beta) Q_{in}, \tag{6}$$

где  $A_a$  — альбедо атмосферы;  $A_s$  — альбедо земной поверхности;  $\beta$  — пропускание атмосферы в спектре солнечного излучения.

Альбедо Бонда Земли также может быть выражено через те же оптические параметры в виде зависимости [2]

$$A = A_a + (1 - A_a) A_s \beta = A_s \beta + A_a (1 - A_s \beta). \tag{7}$$

Для получения зависимости планетарной температуры от приращений оптических, а также радиационных параметров ( $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_a$ ), входящих в  $\varepsilon_{ef}$  (2), запишем уравнение теплового баланса Земли с учетом (1) и (2) для начального и конечного состояний

$$\varepsilon_{ef} \, \sigma T_p^4 = (1 - A) Q_{in}; \tag{8}$$

$$(\varepsilon_{ef} + \Delta \varepsilon_{ef}) \sigma (T_p + \vartheta)^4 = [1 - (A + \Delta A)] Q_{in}, \qquad (9)$$

где 9 — приращение планетарной температуры.

Примем допущение о малом изменении планетарной температуры; критерий малости задается неравенством

$$9 \ll T_{\rm p},\tag{10}$$

невыполнение которого привело бы к катастрофическому изменению климата в глобальном масштабе.

При условии (10), а с весьма малой погрешностью при 9 < 0,1  $T_p$ , можно записать

$$(T_p + \vartheta)^4 = T_p^4 \left(1 + \frac{\vartheta}{T_p}\right)^4 = T_p^4 + 4T_p^3 \vartheta.$$
 (11)

Подставив (11) в (9), получим

$$(\varepsilon_{ef} + \Delta \varepsilon_{ef}) \sigma T_p^4 + (\varepsilon_{ef} + \Delta \varepsilon_{ef}) 4 \sigma T_p^3 \vartheta =$$

$$= (1 - A) Q_{in} - Q_{in} \Delta A \qquad (12)$$

С учетом (8) из (12) следует

$$\left(\varepsilon_{ef} + \Delta \varepsilon_{ef}\right) 4\sigma T_p^3 \vartheta = -Q_{in} \Delta A - \sigma T_p^4 \Delta \varepsilon_{ef}. \tag{13}$$

ФИЗИКА 63

Из (13) можно определить приращение планетарной температуры:

$$\vartheta = -\frac{Q_{in}\Delta A + \sigma T_p^4 \Delta \varepsilon_{ef}}{4\sigma T_p^3 \left(\varepsilon_{ef} + \Delta \varepsilon_{ef}\right)}.$$
 (14)

Приращение величин  $\Delta A$  и  $\Delta \varepsilon_{ef}$  в зависимости от вариации исходных параметров получены нами с учетом (7) и (2) в виде

$$\Delta A = D_a \Delta A_a + D_s \Delta A_s + D_\beta \Delta \beta + F$$

$$D_a = (1 - A_s \beta); \ D_s = (1 - A_a)\beta; \ D_\beta = (1 - A_a)A_s$$

$$F = -\beta \Delta A_a \Delta A_s - A_s \Delta A_a \Delta \beta + (1 - A_a) \Delta A_s \Delta \beta - \Delta A_a \Delta A_s \Delta \beta$$
(15)

$$\Delta \varepsilon_{ef} = \Delta \varepsilon_a + (e + \Delta e) \Delta \Phi$$

$$\Delta \Phi = \delta \Delta \gamma + \gamma \Delta \delta + \Delta \delta \Delta \gamma$$

$$e = \varepsilon_s - \varepsilon_a; \ \Delta e = \Delta \varepsilon_s - \Delta \varepsilon_a$$
(16)

Как видно из (15) и (16), приращение интегральных параметров  $\Delta A$  и  $\Delta \epsilon_{ef}$  содержит линейные комбинации исходных параметров, их попарные произведения, а также слагаемое с произведением приращений трех компонент.

Подставим в уравнение (14) известное значение  $Q_{in}$  = 341,5 BT/м² [1] и  $T_{p}$  = 284 K [2], в результате получим

$$\vartheta = -\frac{65,73\Delta A + 71\Delta \varepsilon_{ef}}{\varepsilon_{ef} (1+G)}; \quad G = \frac{\Delta \varepsilon_{ef}}{\varepsilon_{ef}}.$$
 (17)

Эффективная степень черноты Земли, как планеты, достоверно не известна. Однако, по известным компонентам энергетического баланса [4] оно было оценено величиной  $\varepsilon_{ef} = 0,613$ . Подставив эту величину в (17), получим с учетом малости приращений исходных параметров в G вместо (17) следующее соотношение

$$\vartheta = -(107 \Delta A + 116 \Delta \varepsilon_{a}) (1 - G).$$
 (18)

Соотношение (17) точно, а (18) весьма точно описывает зависимость приращения планетарной температуры от вариации совокупности всех оптических и радиационных параметров. Они учитывают не только линейные комбинации приращений параметров, но и их попарные, а также тройные произведения. Поскольку в самой общей постановке анализ влияния разных факторов на приращение температуры существенно усложнен, целесообразно проанализировать вклад каждого из факторов, рассматривая в зависимости (18) только линейную комбинацию параметров в рамках допущения о их малых приращениях.

При весьма малых приращениях исходных вариаций параметров из (18) с учетом (15) и (16) можно получить

$$\vartheta = -[107 (D_a \Delta A_a + D_s \Delta A_s + D_\beta \Delta \beta) + +116 (\Delta \varepsilon_a + \delta \gamma \Delta e + e \delta \Delta \gamma + e \gamma \Delta \delta)]$$
 (19)

Подставим в (19) значения исходных параметров [2]:

$$A_s = 0.15;$$
  $A_a = 0.225;$   $\beta = 0.747;$   $\varepsilon_s = 0.417;$   $\varepsilon_a = 0.7;$   $\delta = 0.31;$   $\gamma = 0.8$  (20)

Из (20) получим

$$D_a = 0.888; D_s = 0.579; D_B = 0.116; e = -0.283$$
 (21)

Подставив (21) в (19) получим следующее количественное соотношение

$$θ = -95 \Delta A_a - 87.2 \Delta \varepsilon_a - 62 \Delta A_s - 28.8 \Delta \varepsilon_s + 26.3 \Delta \delta + 10 \Delta \gamma - 12.4 \Delta \beta$$
 (22)

Из (22) следует, что наибольшее влияние на климат Земли оказывают приращения альбедо и степени черноты атмосферы. Следующим по значимости является приращение альбедо земной поверхности. Следующие по вкладу факторы — изменение степени черноты земной поверхности и ширины контура окна прозрачности  $\Delta\delta$ . Интересно отметить, что изменение пропускания атмосферы в окне прозрачности теплового излучения Земли и пропускания атмосферой солнечного излучения в стационарном невозмущенном состоянии имеют противоположные знаки. При этом значения коэффициентов при  $\Delta\gamma$  и  $\Delta\delta$  невелики и близки между собой. Это позволяет утверждать, что изменение прозрачности атмосферы в невозмущенном состоянии (без учета воздействия вулканов и метеоритов) во всем спектральном диапазоне мало влияет на климат Земли.

В заключение можно констатировать, что цель исследований достигнута. Получена общая формула (18), которая совместно с (15) и (16) описывает зависимость приращения планетарной термодинамической температуры с учетом совместного влияния вариаций всех оптических и радиационных параметров. Для реальной ситуации малых вариаций параметров получена упрощенная формула (22), которая наглядно описывает значимость влияния на приращение планетарной температуры вариаций каждого из параметров с учетом знака, указывающего направление влияния данного параметра.

При повышении планетарной температуры часть энергии  $Q_1$  затрачивается на испарение воды, что приводит к росту концентрации водяного пара в атмосфере, усилению поглощения атмосферой излучения поверхности Земли, уменьшению ширины окна прозрачности и приросту площади и плотности облачного покрова. Это ведет к росту альбедо атмосферы, что препятствует дальнейшему потеплению (отрицательная обратная связь). При этом часть избыточной энергии  $Q_2$  затрачивается на таяние льда и снежного покрова, увеличиваются площади открытой поверхности суши и океана, что ведет к уменьшению альбедо земной поверхности и дополнительному приросту планетарной температуры (положительная обратная связь).

В случае обратного процесса — при понижении планетарной температуры и образовании дополнительных площадей ледового покрова возрастает альбедо земной поверхности и ее степень черноты за счет роста площади суши, покрытой снегом (положительная обратная связь). Такой длительный процесс способен надолго ввести планету в состояние ледникового периода. Однако при похолодании уменьшается влагосодержание в атмосфере и общая площадь облачного покрова. Это приводит к незначительному уменьшению альбедо атмосферы (отрицательная обратная связь), но не является определяющим фактором [5—9].

В результате оказывается, что вариации планетарной температуры приводят к изменению оптических и радиационных свойств планеты, оказывающему противоположно направленные воздействия на дальнейшие тенденции изменения климата. При этом роль криосферы в формировании климата занимает второе место после облачности атмосферы.

## Список литературы (References)

- Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1956. 244 с. [Budyko M. I. Heat balance of an earth surface. –Leningrad. 1956. 244 р. (in Russian)]
- Abdussamatov H. I, Bogoyavlenskii A. I., Khankov S. I, Lapovok Y. V. The Influence of the Atmospheric Transmission for the Solar Radiation and Earth's Surface Radiation on the Earth's Climate. *Journal of Geographic Information System*. 2010, 2, 194–200 doi: 10.4236/jgis. 2010.24027 Published Online October 2010 (http://www.SciRP.org/journal/jgis)
- 3. *Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.* Теплопередача. Москва: Энергия. 1975. 488 с. [Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Heat transfer. Moscow, 1975. 488 р. (in Russian)]
- Trenberth K. E., Fasullo J. T., and Keihl J. Earth's global energy budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc*, 2009, vol. 90, №3, pp. 311– 323.
- Ханков С. И. Возможности использования криогенных оптико-электронных систем для обнаружения астероидов. // Вестник Международной академии холода. 2014. № 1. С. 46–50. [Khankov S. I. Possibilities of employing cryogenic optoelectronic systems for detection of asteroids. Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda. 2014. No 1. p. 46–50. (in Russian)]

- Abdussamatov H. I. Bicentennial decrease of the total solar irradiance leads to unbalanced thermal budget of the Earth and the Little Ice Age. *Applied Physics Research*. 2012. Vol. 4. No. 1. p. 178–184. http://dx.doi.org/10.5539/apr. v4n1p178.
- Abdussamatov H. I. Grand minimum of the total solar irradiance leads to the Little Ice Age. *Journal of Geology & Geosciences*. 2013. Vol. 2, No. 2: p. 113. http://dx.doi.org/10.4172/jgg. 1000113
- 8. Абдусаматов Х. И., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Периодические изменения энергетического баланса и криосферы земли под действием долговременных вариаций солнечной постоянной // Вестник Международной академии холода. 2014. № 3. с. 41–44. [Abdussamatov H. I., Lapovok Ye. V., Khankov S. I. The periodical disturbances of the energy balance and cryosphere of the Earth under the influence of the long-term variations of the total solar irradiance. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*. 2014. No 3. p. 41–44. (in Russian)]
- Abdussamatov H. I., Khankov S. I., Lapovok Ye. V. The Thermal Inertia Characteristics of the System Ocean-Atmosphere. Journal of Geographic Information System. 2012. No. 4. pp. 479–482. DOI: 10.4236/jgis. 2012.45052 Published Online October 2012 (http://www.SciRP.org/journal/jgis) Copyright © 2012 SciRes. JGIS



The **24th IIR International Congress of Refrigeration** will bring together a large number of refrigeration stakeholders from all parts of the world. It will cover cryology, gas processing, thermodynamics, equipment & systems, biology & food technology, storage & transport, air conditioning, heat pumps, and energy recovery. The overarching theme is New Refrigeration Saves the Earth.

### Main commissions:

- A1: Cryophysics, cryoengineering
- A2: Liquefaction & separation of gases
- B1: Thermodynamics & transfer processes
- B2: Refrigerating equipment
- C1: Cryobiology, cryomedicine
- C2: Food science & engineering
- D1: Refrigerated storage
- D2: Refrigerated transport
- E1: Air conditioning
- E2: Heat pumps, energy recovery

### **Organizer(s):**

Japan Society of Refrigerating & AIr Conditioning Engineers (JSRAE).

Secretariat ICR2015, ICS Convention Design Inc.

### **Contact Details:**

Chiyoda Building, 1-5-18 Sarugakucho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8499, Japan e-mail: icr2015@ics-inc.co.jp

http://www.icr2015.org/index.html