

УДК 551.511.13

Периодические изменения энергетического баланса и криосферы земли под действием долговременных вариаций солнечной постоянной

Х. И. АБДУСАМАТОВ¹, Е. В. ЛАПОВОК, д-р техн. наук С. И. ХАНКОВ²¹abduss@gao.spb.ru, ²leva0007@rambler.ruГлавная Пулковская астрономическая обсерватория РАН
196140, Россия, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65

Целью данной работы является разработка методики расчета влияния долговременных квазипериодических вариаций солнечной постоянной на величину избытка и дефицита тепловой энергии соответственно в периоды потеплений и похолоданий, а также предварительный анализ влияния этого фактора на климат Земли. Отсутствие равновесного теплового состояния планеты, обусловленное как одиннадцатилетними, так и двухвековыми циклическими вариациями светимости Солнца, приводит к синхронным вариациям солнечной постоянной. Авторами разработана методика расчета изменений разности поглощаемой и отдаваемой Землей удельной тепловой мощности под действием долговременных циклических вариаций солнечной постоянной. Выведена формула, описывающая приращение интегральной по времени дополнительной выделившейся или поглощенной тепловой энергии за половину периода двухвековой вариации солнечной постоянной. Расчеты проведены для двухвекового периода, но предлагаемая методика позволяет учитывать комбинацию двухвекового и одиннадцатилетних циклов.

Ключевые слова: энергетический баланс, периодические вариации, солнечная постоянная, планетарная температура, термическая инерция, удельная мощность тепловыделений.

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

H. I. ABDUSSAMATOV¹, Ye. V. LAPOVOK,
D. Sc. S. I. KHANKOV²¹abduss@gao.spb.ru, ²leva0007@rambler.ruPulkovo Observatory
196140, Russia, St.-Petersburg,
Pulkovskoye chaussee 65

The article deals with calculations of the long term quasi-periodic variations of the solar constant influence on the excessive or deficit amount of thermal energy during the warming and cooling periods. Preliminary analyses of the influence of the factor in question on the climate of the Earth is carried out. The lack of equilibrium of planetary temperature due to both bicentennial and eleven-year cycles of the solar luminosity results in synchronic variations of the solar constant. The method of computing the changes of energy imbalance of the Earth between the planetary absorbed and outgoing energy fluxes under the influence of long-term periodical variations of the TSI is developed. The formula for the increment of the integrated heat energy over the time during the half-period of bicentennial variation of the TSI is obtained. Calculations are provided for a bicentennial period but the described method makes it possible to take in account a combination of bicentennial and eleven-year cycles.

Keywords: energy balance, periodical variations, solar constant, planetary temperature, thermal inertia, specific capacity of heat emission.

Важным фундаментальным показателем динамики климатических изменений является отклонение интегрального энергетического баланса Земли как планеты от сбалансированного равновесного состояния. Строго говоря, равновесного теплового состояния планеты практически не существует, что обусловлено как одиннадцатилетними, так и двухвековыми циклическими вариациями светимости Солнца [1, 2]. Это приводит к синхронным вариациям солнечной постоянной, определяемой как удельный световой поток солнечного излучения на внешней границе атмосферы Земли. Отклонение теплового баланса планеты от среднего уровня (равновесного состояния), определяемого равенством поглощаемой земной поверхностью (главным образом, океаном) и атмосферой удельной мощности солнечного излучения Q_0 и отдаваемой планетой в космическое пространство удельной мощности теплового излучения q_0 , вызывает соответствующие периодические изменения планетарной температуры и состояние криосферы.

Мерой этого отклонения является разность

$$U = \Delta Q - \Delta q = [Q(\tau) - Q_0] - [q(\tau) - q_0] = Q(\tau) - q(\tau) \quad (1)$$

где $Q(\tau)$ и $q(\tau)$ — соответственно поглощаемая и излучаемая планетой текущие удельные мощности тепловых потоков; ΔQ и Δq — их приращения.

Целью данной работы является разработка методики расчета влияния долговременных квазипериодических вариаций солнечной постоянной на величину избытка и дефицита тепловой энергии соответственно в периоды потеплений и похолоданий, а также предварительный анализ влияния этого фактора на климат Земли.

Последние данные реконструкции вариаций солнечной постоянной с 1600 по 2000 гг. показывают, что они носят нерегулярный характер [3]. Моделирование ре-

ального процесса весьма затруднительно, причем сама нерегулярность недостаточно изучена, поэтому попытки точного моделирования только усложняют задачу, не повышая достоверности результата, но затрудняя обобщения выводов. Поэтому на первом этапе исследований решим задачу в упрощенной постановке, полагая, что вариации солнечной постоянной подчиняются гармоническому закону, выделив для конкретных расчетов двухвековой период.

Физическая модель ориентирована на решение задачи в линейном приближении. Это означает, что в расчетах приращений поглощаемых Землей и отдаваемых ею удельных тепловых потоков не учитываются фазовые переходы, вызывающие изменения площади ледовых и снежных покровов, а также содержания водяного пара и других газов в атмосфере и общей облачности. Таким образом, в тепловой и математической моделях не учитываются возможные изменения альбедо Бонда: альбедо земной поверхности и атмосферы, а также пропускание атмосферой солнечного и собственного теплового излучения. В модели предполагается малость вариаций удельных мощностей, задаваемых условиями $\Delta Q \ll Q_0$ и $\Delta q \ll q_0$.

Очевидно, что расчет фазовых переходов упростился бы в случае, если бы поверхность Земли была изотермична. Однако, вследствие существенной неравномерности распределения температур от экватора к полюсам, крайне затруднительно проводить оценку прироста массы ледового покрова даже, если допустить, что удалось бы очертить границу участков поверхности Земли с отрицательными и положительными температурами. Моделирование даже такой идеализированной ситуации представляет собой сложную научную проблему.

Неучет в математической модели фазовых переходов позволяет, тем не менее, по обнаруженному дефициту или избытку поглощаемой Землей солнечной энергии в периоды повышенных и пониженных значений солнечной постоянной оценить потенциальную возможность приращения объема ледового и снежного покрова, усредненного по поверхности Земли.

Ранее мы вывели уравнение нестационарного теплового баланса Земли, включающее приращение планетарной температуры ϑ , и определили значения входящих в него параметров [4, 5]. Задавая колебания солнечной постоянной в виде гармонического закона и переходя к приращениям удельных тепловых мощностей ΔQ и Δq , можно получить уравнение нестационарного теплового баланса в виде

$$t \frac{d(\Delta q)}{dt} + \Delta q = \Delta Q; \quad \Delta Q = \Delta Q_m \sin \left(2\pi \frac{\tau}{t_0} \right); \quad (2)$$

$$t = \frac{C}{4\alpha}; \quad \Delta q = 4\alpha\vartheta; \quad \alpha = \frac{q_0}{T_{p0}}; \quad \Delta Q_m = 4\alpha\vartheta_m = \frac{Q_0}{E} \Delta E,$$

где ϑ_m — амплитуда колебаний температуры; τ — текущее время, относительно момента начала колебаний в двухвековом периоде; t — постоянная термической инерции планеты как системы океан–атмосфера; ΔQ_m — амплитуда изменения суммарной поглощенной планетой (земной поверхностью и атмосферой) тепловой мощности Q_0 , пропорциональная амплитуде колебаний солнечной постоянной ΔE с периодом t_0 ; α — суммарный коэф-

фициент теплоотдачи излучением от атмосферы и океана через окна прозрачности атмосферы в открытый космос; C — поверхностная удельная теплоемкость океана и атмосферы, Дж/м²·К; T_{p0} — планетарная температура равновесного состояния.

Решение уравнения (2) при начальном условии $\Delta q(\tau = 0) = 0$ и $\Delta Q(\tau = 0) = 0$ имеет вид

$$\Delta q = \frac{\Delta Q_m}{1+b^2} \left\{ \sin \left(2\pi \frac{\tau}{t_0} \right) - b \left[\cos \left(2\pi \frac{\tau}{t_0} \right) - \exp \left(-\frac{\tau}{t} \right) \right] \right\}; \quad (3)$$

$$b = 2\pi \frac{t}{t_0}.$$

Постоянную термической инерции с учетом значений параметров, определенных ранее в работах [5, 6], можно представить в виде зависимости от глубины активного слоя океана H :

$$t = 0,095(1 + 0,42H), \text{ годы} \quad (4)$$

Поскольку процесс периодических вариаций солнечной постоянной установившийся и $\tau \gg t$, экспонента в выражении (3) равна нулю. В результате, подставив в (1) выражение для ΔQ из (2) и для Δq из (3), получим

$$U = \frac{\Delta Q_m}{1+b^2} \left[b^2 \sin \left(2\pi \frac{\tau}{t_0} \right) + b \cos \left(2\pi \frac{\tau}{t_0} \right) \right]. \quad (5)$$

Как показали дальнейшие исследования, для двухвекового цикла вариаций солнечной постоянной период изменений U практически равен $t_0 = 200$ лет. Это позволяет определить приращение выделившейся или поглощенной энергии на 1 м² площади земной поверхности за время, равное половине периода

$$W = \int_0^{\tau=t_0/2} U d\tau = \frac{\Delta Q_m t_0}{\pi} \frac{b^2}{1+b^2}. \quad (6)$$

Суммарное выделение (или поглощение на отрицательном участке полупериода) энергии на всей поверхности земного шара определяется из простого соотношения $W_\Sigma = WS$, где S — полная площадь поверхности земного шара.

В расчетах использовались следующие значения параметров: для двухвекового цикла колебаний солнечной постоянной ($t_0 = 200$ лет) амплитуда колебаний принята равной $\Delta E = 3,4$ Вт/м² [3]. Величина ΔQ_m определялась из соотношения в (2), с учетом известных значений $E = 1366$ Вт/м² и $Q_0 = 239$ Вт/м² [7] получено: $\Delta Q_m = 0,595$ Вт/м².

На рис. 1 приведены зависимости разности поглощаемой и излучаемой удельной мощности U , вычисленные для разных значений глубины активного слоя океана. Как видно из рисунка, с ростом глубины активного слоя увеличивается амплитуда колебаний U_m и уменьшается временная задержка $\Delta\tau_1$ периодических колебаний величины U относительно колебаний солнечной постоянной.

Величина запаздывания может быть определена по расстоянию между узлами функции синусоидального изменения солнечной постоянной и функции (5). Зависимость задержки $\Delta\tau_1$ с ростом глубины активного слоя H представлена на рис. 2 в сопоставлении с временной задержкой колебаний планетарной температуры $\Delta\tau_2$, определенной по методикам [4, 5]. В то время как величина $\Delta\tau_1$ монотонно падает с рос-

том глубины активного слоя океана H , величина $\Delta\tau_2$ монотонно растет. При любом значении H выполняется равенство $\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 = 50$ лет. Для того, чтобы показать асимптотические приближения $\Delta\tau_1 \rightarrow 50$ лет и $\Delta\tau_2 \rightarrow 0$ при $H \rightarrow \infty$, пределы изменения H на рис. 2 продлены до 5 км, хотя реальное усредненное по всей планете значение глубины активного слоя по современным представлениям составляет примерно 700 м.

Увеличение значения $\Delta\tau_2$ с ростом H физически понятно: оно объясняется ростом принимаемой в расчетах поверхностной плотности теплоемкости океана.

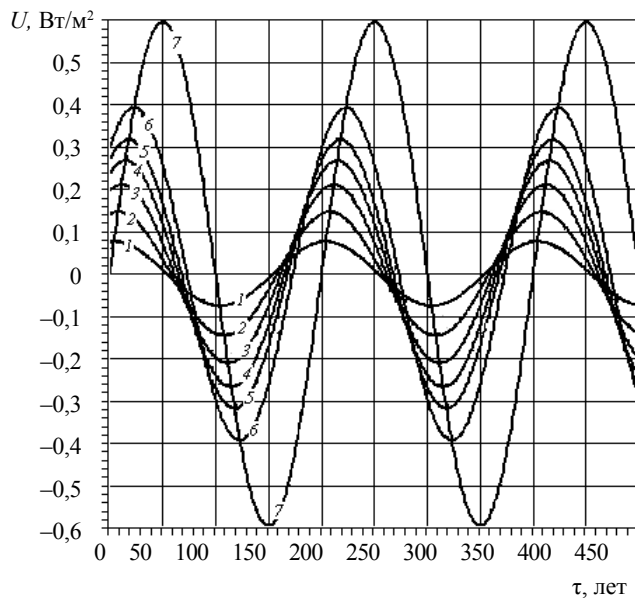


Рис. 1. Вариации разности поглощаемой и излучаемой планетой удельной тепловой мощности при значениях глубины активного слоя океана, равных: 100 м (кривая 1); 200 м (2); 300 м (3); 400 м (4); 500 м (5); 700 м (6). Линия 7 соответствует колебаниям поглощаемой Землей мощности солнечного излучения, обусловленным вариациями солнечной постоянной.

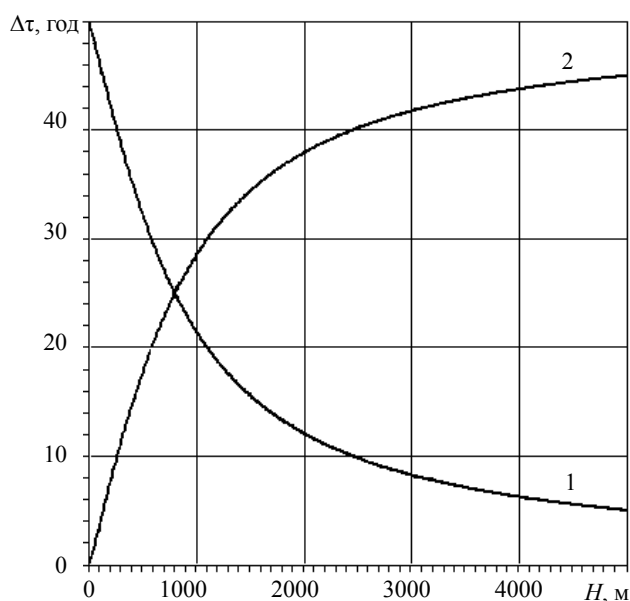


Рис. 2. Зависимости временной задержки относительно колебаний солнечной постоянной периодических отклонений от равновесия энергетического баланса Земли (линия 1) и колебаний планетарной температуры (линия 2)

Поведение зависимости $\Delta\tau_1 (H)$ не столь очевидно и требует пояснений. Величина U определяет меру отклонения теплового баланса от равновесного состояния, причем колебания поглощаемой солнечной энергии при постоянном периоде зависят только от амплитуды колебаний солнечной постоянной. Вычитаемая из этой величины компонента отдаваемой Землей в космическое пространство понижается с ростом поверхностной плотности теплоемкости, доходя при больших H до нуля. В пределе кривая разбаланса стремится к линии 7 на рис. 1.

Для оценок зависимостей амплитуды U_m от глубины активного слоя в пределах изменения $100 \text{ м} \leq H \leq 700 \text{ м}$ достаточно использовать простую зависимость, обеспечивающую погрешность менее 10%:

$$U_m = (300 + 5H) \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2 = (30 + 0,5H) \text{ мВт/м}^2.$$

При $H = 700 \text{ м}$ получим $t = 28$ лет и $b = 0,88$, величина отношения $\Delta Q_m / \pi = 0,186$. Суммарная энергия в полуцикле при $t_0/2 = 100$ равна $W = 631 \text{ МДж/м}^2$. С учетом площади поверхности Земли $S = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$, общий дефицит или прирост энергии за половину периода составляет $W_\Sigma = 3,22 \cdot 10^{23} \text{ Дж}$. Оценить влияние W_Σ на климатические изменения сложно на фоне глобальной планетарной температуры $T_p = 287 \text{ К}$, далекой от температуры фазового перехода, а учесть долю энергии, приходящуюся на приполярные области затруднительно. Если бы средний уровень температуры соответствовал точке фазового перехода, то при величине скрытой энергии плавления льда и замерзания воды $r = 334 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ [8] масса образовавшегося или растаявшего льда могла бы составить примерно 10^{15} тонн. Если отсчитывать как от исходной точки от 1991 г., на момент которого масса полярного льда была принята равной $3,5 \cdot 10^{15}$ тонн [8, 9], вычисленный прирост массы льда на планете достигает 30%. Только часть дефицита энергии может затрачиваться на фазовый переход, но определение этой части требует дополнительных исследований. Часть выделившейся или поглощенной тепловой энергии за полупериод может изменять влажностное содержание в атмосфере и общую площадь облаков. Данные процессы способны привести к изменению альбедо земной поверхности и атмосферы, а также пропускания атмосферой солнечного и собственного теплового излучения Земли. Это может существенно усилить амплитуду колебаний приращений энергетического баланса и планетарной температуры, вызванных вариациями солнечной постоянной.

Список литературы (References)

1. 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>.
2. 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>
3. Shapiro A. I., Schmutz W., Rozanov E., Schoell M., Haberreiter M., Shapiro A. V., Nyeki S. A new approach to the long-term reconstruction of the solar irradiance leads to large historical

solar forcing. *Astronomy and Astrophysics* 529, A67 (2011). DOI: 10.1051/0004-6361/201016173

4. Habibullo I. Abdussamatov, Sergey I. Khankov, Yevgeniy V. Lapovok 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

5. Абдусаматов Х. И., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Факторы, определяющие термоинерционные характеристики системы Земля — атмосфера // Труды Всерос. конфер. «Солнечная и солнечно-земная физика — 2011». С-Петербург, 2011. С. 307–310. [Abdussamatov Kh. I., Lapovok E. V., Khankov S. I. The factors defining thermoinertial characteristics of system Earth atmosphere. «Solar and Solar and Earth Physics — 2011» conference. St. Petersburg. 2011. p. 307–310. (in Russian).]

6. Abdussamatov H. I., Bogoyavlenskii A. I., Lapovok Ye. V., Khankov S. I. (2010). Modeling of the Earth's Planetary Heat Balance with Electrical Circuit Analogy. *JEMAA*, Vol. 2. No. 3, pp. 133–138. DOI: 10.4236/jemaa. 2010.23020

7. Trenberth K. E., Fasullo J. T., and Keihl J. Earth's global energy budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2009. Vol. 90. No. 3. p. 311–323.

8. Физические величины: Справочник; Под редакцией И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.; Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. [Grigor'ev I. S., Meilikhov E. Z.. Physical quantities: *Reference manual*. — Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1232 p. (in Russian).]

9. 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).]

XX МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

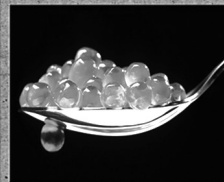
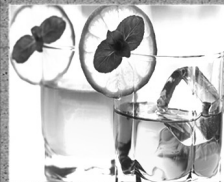
Баш Прод Экспо 25-27 ноября Уфа 2014 Упаковка Полиграфия

МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ ОПТОВО-РОЗНИЧНАЯ ЯРМАРКА
(БИРЖА ДЕЛОВЫХ КОНТАКТОВ)
ПРЕЗЕНТАЦИЯ ЭКСПОЗИЦИЙ
“НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОДУКТ”



БАШЭКСПО
ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР

Тел./факс: (347) 256-51-80, 256-51-86, 256-58-23
Факс: (347) 256-59-04
E-mail: prod-ural@bashexpo.ru
<http://www.bashexpo.ru>



БАШ П РО Д Э К СП О