

Д.В. Красношапка, К.Є. Золотко

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

**МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ СОНЯЧНИМ
ВИПРОМІНЮВАННЯМ З ВИКОРИСТАННЯМ ОРБІТАЛЬНИХ
ДЗЕРКАЛ З УРАХУВАННЯМ ЗАЛЕЖНОСТІ АЛЬБЕДО ЗЕМЛІ
ВІД ТЕМПЕРАТУРИ**

Проведено моделювання управління сонячним випромінюванням з використанням орбітальних дзеркал з урахуванням залежності альbedo Землі від температури. Було визначено, що урахування залежності альbedo Землі від температури має незначний вплив на площу орбітальних дзеркал, необхідну для зниження середньої температури поверхні Землі і компенсації глобального потепління. Також урахування залежності альbedo Землі від температури майже не змінює час досягнення рівноважної температури поверхні Землі при використанні методу управління сонячним випромінюванням з використанням орбітальних дзеркал.

Ключові слова: альbedo Землі, глобальне потепління, методи управління сонячним випромінюванням, орбітальні дзеркала, модель енергетичного балансу Землі.

D.V. Krasnoshapka, K.Y. Zolotko

Oles Honchar Dnipro National University

**SIMULATION OF SOLAR RADIATION CONTROL USING ORBITAL
MIRRORS TAKING INTO ACCOUNT THE DEPENDENCE OF THE
EARTH'S ALBEDO ON TEMPERATURE**

Modeling of solar radiation control using orbital mirrors considering the dependence of the Earth's albedo on temperature was carried out. In the previous work, an analysis of the method of controlling solar radiation using orbital mirrors was carried out, in particular, the area of orbital mirrors needed to compensate for global warming was determined, and the dynamics of the Earth's surface temperature when using this method was found. In this study, for the sake of simplicity, it was assumed that the albedo of the Earth does not depend on temperature, although such a dependence exists within certain limits of temperature values. Many studies indicate a very strong influence of such dependence on the behavior of the Earth's climate as a dynamic system and leads to the occurrence of bifurcation. It is important to conduct a more accurate simulation of solar radiation control using orbital mirrors, considering the dependence of the planet's albedo on the surface temperature. It was determined that considering the dependence of the Earth's albedo on temperature has a negligible effect on the area of orbital mirrors, which is necessary to reduce the average temperature of the Earth's surface and compensate for global warming. If we take the height of the orbit of the mirrors to be 400 km, then the value of $n = 0.39$ and the area of the orbital mirrors without taking into account the dependence of the albedo of the planet on the surface temperature is $4.59 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$ and taking into account: $S_m = 4.20 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$, that is, the area of the mirrors decreases by 8%. Also, considering the dependence of the Earth's albedo on temperature almost does not change the time it takes to reach the equi

librium temperature of the Earth's surface when using the solar radiation control method using orbital mirrors. It was determined that the time during which the temperature of the Earth's surface becomes balanced after the start of the orbital mirrors, considering the dependence of the planet's albedo on temperature, is practically no different from the similar time calculated without such consideration and is approximately 14-15 days. This study was conducted for a temperature close to the current value of the global average temperature of the Earth. It is of interest to model the control of solar radiation using orbital mirrors, considering the dependence of the Earth's albedo on temperature for a much wider range of temperatures.

Key words: Earth's albedo, global warming, solar radiation management methods, orbital mirrors, Earth's energy balance model.

Д.В. Красношапка, К.Е. Золотько

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРБИТАЛЬНЫХ ЗЕРКАЛ С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ АЛЬБЕДО ЗЕМЛИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Произведено моделирование управления солнечным излучением с использованием орбитальных зеркал с учетом зависимости альbedo Земли от температуры. Было определено, что учет зависимости альbedo Земли от температуры оказывает незначительное влияние на площадь орбитальных зеркал, необходимую для снижения средней температуры поверхности Земли и компенсации глобального потепления. Также учет зависимости альbedo Земли от температуры почти не изменяет время достижения равновесной температуры поверхности Земли при использовании метода управления солнечным излучением с использованием орбитальных зеркал.

Ключевые слова: альbedo Земли, глобальное потепление, методы управления солнечным излучением, орбитальные зеркала, модель энергетического баланса Земли.

Вступ. Індустріалізація у глобальному масштабі крім очевидних переваг для людства принесла також і деякі суттєві проблеми, серед яких однією із найважливіших є глобальне потепління. Масштабні викиди парникових газів промисловістю і спричинений ними так званий парниковий ефект призвели до того, що, наприклад, уже у 2017 році середня глобальна температура на поверхні Землі була приблизно на 1,1 °С вищою, порівняно із доіндустріальним рівнем (тобто середньорічною температурою у 1850–1900 роках) [1]. Подальше підвищення температури призведе до зниження виробництва у сільському господарстві [2], нестачі води для мільйонів людей у багатьох регіонах [3], негативні зміни у таких екосистемах як арктична тундра та ліси Амазонки [4], збільшення кількості лісових пожеж у всьому світі [5] та до інших наслідків.

Очевидно головним напрямком боротьби з глобальним потеплінням є зменшення викидів парникових газів. Тому міжурядова група експертів з питань змін клімату (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) «Глобальне потепління на 1,5 °С запропоувала обмежити потепління на рівні 1,5 °С шляхом скорочення глобальних викидів діоксиду вуглецю (CO₂) на 45 % до 2030 року порівняно з 2010 роком і зведення їх до нуля до 2050 року [6]. Нажаль останні події у світі, насамперед, військова агресія Російської феде-

рації проти України і її наслідки, показують, що досягнення цієї мети малої-мовірно, через збільшення витрат розвинених країн на оборону, допомогу біженцям, субсидії на електроенергію та витрати на доставку [7]. Тому важливе значення набувають альтернативні способи боротьби проти глобального потепління, наприклад, так зване управління сонячним випромінюванням (solar climate intervention або solar radiation modification) і конкретно один із його варіантів - використання орбітальних дзеркал або скорочено - космічні методи (space-based methods).

В роботі [8] проведено аналіз методу управління сонячним випромінюванням з використанням орбітальних дзеркал, зокрема, визначено площу орбітальних дзеркал, необхідну для компенсації глобального потепління, знайдено динаміку температури поверхні Землі при використанні даного методу. У даному дослідженні для спрощення припускалося, що альbedo Землі не залежить від температури, хоча така залежність існує у певних межах значень температури. Багато досліджень вказують на дуже сильний вплив такої залежності на характер поведінки клімату Землі як динамічної системи і призводить до виникнення біфуркації [9, 10]. Представляється важливим провести більш точне моделювання управління сонячним випромінюванням з використанням орбітальних дзеркал з урахуванням залежності альbedo планети від температури поверхні.

Постановка задачі. Модель енергетичного балансу Землі з урахуванням того, що альbedo Землі залежить від температури, можна представити таким чином:

$$C_E \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \alpha_p(T)) \frac{S_0}{4} - A \uparrow \quad (1)$$

де C_E - ефективна теплоємність середовища (вимірюється у Дж/м²К⁻¹), T_s - температура поверхні, t - час, α_p - альbedo планети, S_0 - сонячна стала і $A \uparrow$ - загальна кількість енергії, що випромінює 1 м² поверхні Землі.

Залежність альbedo планети від температури поверхні можна виразити так [9]:

$$\alpha(T) = 0.5 + 0.2 \tanh(0.1(265 - T)) \quad (2)$$

Загальну кількість енергії, яку випромінює 1 м² поверхні Землі знаходимо за законом Стефана-Больцмана, при цьому враховуючи інфрачервону проникність атмосфери τ :

$$A \uparrow = \varepsilon \sigma T_s^4 \tau \quad (3)$$

де σ - стала Стефана-Больцмана, ε - випромінювальна здатність поверхні.

З (1), (2) і (3) модель енергетичного балансу Землі набуде такого вигляду:

$$C_E \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - 0.5 - 0.2 \tanh(0.1(265 - T))) \frac{S_0}{4} - \varepsilon \sigma T_s^4 \tau \quad (4)$$

Необхідно визначити наскільки впливає залежність альbedo планети від температури поверхні на значення площі орбітальних дзеркал, необхідних

для компенсації глобального потепління і динаміку температури Землі при використанні орбітальних дзеркал.

Визначення площі орбітальних дзеркал із врахуванням залежності альbedo планети від температури поверхні. Згідно [8] сонячну сталу можна знайти за виразом:

$$S_0 = \frac{4\varepsilon\sigma T^4\tau}{1 - \alpha_p} \quad (5)$$

Для зниження глобальної середньої температури на $T_2^* - T_1^*$, де T_1^* - поточна глобальна середня температура, T_2^* - глобальна середня температура доіндустріального рівня, з урахуванням залежності альbedo планети від температури поверхні (2), треба зменшити потужність сонячного випромінювання на:

$$S_{0_2} - S_{0_1} = \frac{4\varepsilon\sigma\tau}{1 - \alpha_p} (T_2^{*4} - T_1^{*4}) \quad (6)$$

де S_{0_1} - потужність сонячного випромінювання без використання дзеркал, а S_{0_2} - потужність сонячного випромінювання з використанням дзеркал.

З урахуванням залежності альbedo планети від температури поверхні (2):

$$S_{0_2} - S_{0_1} = 4\varepsilon\sigma\tau \left(\frac{T_2^{*4}}{1 - 0.5 - 0.2 \tanh(0.1(265 - T_2^*))} - \frac{T_1^{*4}}{1 - 0.5 - 0.2 \tanh(0.1(265 - T_1^*))} \right)$$

Знайдемо відносну величину зменшення потужності сонячного випромінювання, достатнє для зниження глобальної середньої температури на 1 градус (для досягнення глобальної температури доіндустріального рівня):

$$A = \frac{S_{0_2} - S_{0_1}}{S_{0_1}} \quad (8)$$

Використовуючи глобальну середню температуру 15.4° С [10], або $T=15.4$ К, випромінювальну здатність поверхні $\varepsilon=0.97$ і значення $\tau=0.64$, маємо відносну величину зменшення потужності сонячного випромінювання $A=-0.0127$, тобто необхідно зменшити потужність на 1.27%.

Порівнюючи це значення із значенням, розрахованим без урахування залежності альbedo планети від температури поверхні $\alpha(T) - A=1.41\%$ [8], можна констатувати, що врахування $\alpha(T)$ дещо знижує вимоги до необхідного зменшення потужності сонячного випромінювання.

Площа орбітальних дзеркал знаходиться таким чином:

$$S_m = \frac{\pi R_E^2 A}{n} \quad (9)$$

де $R_E=6371000$ м середній радіус Землі, n - величина, яка показує яку частину довжини орбіти дзеркало відкидає тінь на Землю [8].

Якщо взяти висоту орбіти дзеркал 400 км то величина $n = 0.39$ і площа орбітальних дзеркал без урахування залежності альbedo планети від температури поверхні $4.59 \cdot 10^{12}$ м², а з урахуванням: $S_m=4.20 \cdot 10^{12}$ м², тобто площа дзеркал зменшується на 8%. Таким чином, врахування залежності альbedo

планети від температури поверхні незначним чином зменшує площу дзеркал, яку треба вивести на орбіту, для зниження глобальної температури Землі до доіндустріального рівня.

Вплив залежності альbedo планети від температури поверхні Землі на динаміку температури при використанні орбітальних дзеркал. Як було зазначено у [8], у разі використання методу управління сонячним випромінюванням шляхом розміщення орбітальних дзеркал рівноважна температура Землі устанавлюється не миттєво через велике значення теплоємності середовища поверхні суші і океану. Обчислення показали, що для досягнення рівноважної температури поверхні Землі від моменту розміщення дзеркал на орбіті проходить близько 15 діб. Представляє інтерес визначити, як впливає на цей час врахування залежності альbedo планети від температури поверхні Землі. Для визначення часу досягнення рівноважної температури треба взяти рівняння моделі енергетичного балансу Землі (4).

Розрахунки та отримування інфографіки були проведені з використанням мови програмування високого рівня GNU Octave. Величина ефективної теплоємності середовища дорівнювала $C_E = 2.08 \cdot 10^8$ Дж/м²К⁻¹ [11].

На рис. 1. зображено графік залежності температури поверхні Землі від часу після використання орбітальних дзеркал із врахуванням залежності альbedo планети від температури поверхні Землі – суцільна лінія і без такого врахування – пунктирна лінія.

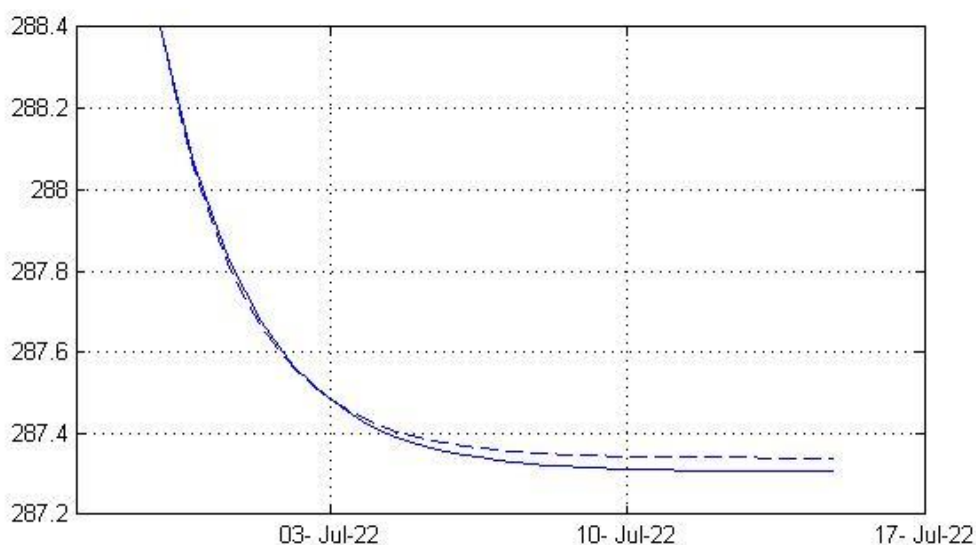


Рис. 1. Динаміка температури поверхні Землі при використанні орбітальних дзеркал з урахуванням та без урахування залежності альbedo планети від температури поверхні Землі

Як суцільна, так і пунктирна лінія виходять на горизонтальну ділянку приблизно за 14-15 діб після початку падіння температури.

Таким чином, графіки показують, що урахування залежності альbedo планети слабо впливає на динаміку зміни температури Землі при використанні орбітальних дзеркал.

Аналіз одержаних результатів та висновки. В даній роботі проведено моделювання управління сонячним випромінюванням з використанням орбітальних дзеркал з урахуванням залежності альbedo Землі від температури. Було встановлено, що врахування залежності альbedo планети від температури поверхні зменшує площу дзеркал, яку треба вивести на орбіту, для зниження глобальної температури Землі до доіндустріального рівня на 8%.

Визначено, що час, за який температура поверхні Землі стає врівноваженою після початку дії орбітальних дзеркал з урахуванням залежності альbedo планети від температури практично не відрізняється від аналогічного часу, обчисленого без такого урахування і становить приблизно 14-15 діб.

Дане дослідження було проведено для температури, близької до поточного значення глобальної середньої температури Землі. Представляє інтерес зробити моделювання управління сонячним випромінюванням з використанням орбітальних дзеркал з урахуванням залежності альbedo Землі від температури для значно ширшого діапазону температур.

Бібліографічні посилання

1. Chao, Q., & Feng, A. (2018). Scientific basis of climate change and its response. *Global Energy Interconnection*, 1(4), 420-427.
2. Nelson G.C., Valin H., Sands R.D., et al. Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 111 (9) (2014), p. 3274.
3. Gosling S.N., Arnell N.W. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity *Climatic Change*, 134 (3) (2016), pp. 371-385.
4. *Climate Change 2014: Synthesis Report* Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (Eds.), Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland (2014), p. 151.
5. Jolly W.M., Cochrane M.A., Freeborn P.H., et al. Climate-induced variations in global wild-fire danger from 1979 to 2013 *Nature Communications*, 6 (2015), pp. 7537-7547.
6. IPCC, 2018: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.
7. Edgecliffe-Johnson, Andrew and Neville, Sarah. "Bill Gates warns Ukraine war is sapping Europe's foreign aid budgets" *Financial Times*, September 13. 2022.
8. Красношарпа Д.В., Золотко К.Є. Аналіз методу управління сонячним випромінюванням з використанням орбітальних дзеркал. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. 2021. Вип. 21. С. 146-152.
9. Kaper H., Engler H. *Mathematics and Climate*. Philadelphia, PA: SIAM, 2013.
10. Walsh J., Oberlin C. *Climate models and differential equations. Joint Meetings*. Baltimore, Режим доступу: http://sigmaa.maa.org/em/USE_Math_2014/Walsh-ODEclimate.pdf.
11. Mann M.E. Why Global Warming Will Cross a Dangerous Threshold in 2036. *Scientific American*. 310, 4, April 2014.

Надійшла до редколегії 01.09. 2022.