

Оценка ослабления излучения Солнца космической системой регулирования температурного режима земной атмосферы

07, июль 2014

DOI: 10.7463/0714.0719558

Старовойтов Е. И.^{1,a}

629.76:523.9-7

¹Россия, ОАО "РКК "Энергия" им. С.П. Королева"

^aevgstarovojtov@yandex.ru

Представлена оценка влияния эффекта потемнения диска Солнца на эффективность ослабления потока его излучения космической системой регулирования температурного режима земной атмосферы на базе солнечно-парусного корабля (СПК), размещенного в либрационной точке Лагранжа L1 системы Земля-Солнце. На основе известного закона потемнения диска Солнца к краю получены выражения для ослабления потока излучения при нахождении СПК по центру диска Солнца и для ослабления при отклонении СПК от центра диска на некоторый угол. Установлено, что наибольшее ослабление происходит в спектральном диапазоне 260...300 нм, соответствующем средневолновой УФ-области. Сделан вывод, что необходимы дополнительные исследования возможных последствий снижения УФ-радиации для климата Земли при регулировании солнечной постоянной с использованием СПК.

Ключевые слова: солнечно-парусный корабль, Солнце, потемнение от центра к краю, спектральный диапазон, УФ-радиация, глобальный климат, температура, точка Лагранжа L1

Введение

Глобальные изменения климата являются одной из самых серьезных проблем, стоящих в настоящее время перед человечеством. Дальнейшее повышение температуры земной атмосферы способно привести к последствиям, которые представляют угрозу для существования цивилизации.

По современным представлениям одним из факторов, вызывающих глобальное потепление, является деятельность человека. В качестве возможной меры по снижению антропогенного воздействия на климат рассматривается переход на безуглеродную энергетику. Достаточность и эффективность этого мероприятия в настоящее время является предметом дискуссии в научном сообществе.

В этом контексте имеет смысл рассмотреть возможности, предоставляемые космонавтикой. Представляет большой интерес предложенная Г.А. Сизенцевым космическая

система регулирования температурного режима земной атмосферы [1-3], позволяющая уменьшить количество падающего на Землю излучения Солнца.

Для практической реализации данной системы необходимо решить комплекс задач, связанных в первую очередь с эффективностью ослабления потока излучения Солнца.

1. Космическая система регулирования температурного режима земной атмосферы и потемнение диска Солнца к краю

В предложенной концепции космической системы регулирования температурного режима земной атмосферы, главную роль играет солнечно-парусный корабль (СПК), также называемый барражирующий астрорегулятор климата – «БАРК», находящийся в либрационной точке Лагранжа L_1 системы Земля-Солнце [1-3]. За счет большой площади парусов СПК, барражируя в плоскости, нормальной потоку солнечных лучей, должен уменьшать количество излучения Солнца, падающего на Землю.

При оценке характеристик СПК в [1-3] был сделан ряд допущений, позволяющих интерпретировать полученные результаты только как оценку в первом приближении. Дальнейшая разработка конструкции СПК требует проведения расчетов с большей степенью точности.

В частности, оценки [1-3] сделаны в предположении, что диск Солнца имеет равномерное распределение излучения по площади. Соответственно, величина ослабления потока солнечного излучения остается постоянной, при его барражировании в зоне радиусом r_B , которая, если проводить аналогию с солнечным затмением, соответствует конусу лунной тени при кольцеобразном затмении.

В реальности имеет место явление потемнения диска Солнца к краю (лимбу) в спектральном диапазоне 160...500 000 нм, которое объясняется тем, что излучение от центра и от края диска поступает из газовых слоев, имеющих разную глубину и температуру. Единичная оптическая глубина для определенной длины волны определяет геометрическую глубину наблюдаемого слоя. При наблюдении слоев на краю диска Солнца под большими углами, такая же оптическая глубина достигается во внешних слоях с меньшей геометрической глубиной и более низкой температурой, вследствие чего уменьшается яркость излучения [4]. По мере удаления от центра яркость падает, особенно на самом краю, который выглядит очень резким [5]. Со сдвигом в ИК-диапазон потемнение диска Солнца к краю становится более плавным [5,6]. Для полного излучения Солнца ослабление на краю составляет 0,32 [6].

Для реализации космической системы регулирования температурного режима земной атмосферы необходимо исследовать вопрос влияния потемнения диска Солнца к краю на процесс ослабления исходящего от него потока излучения с использованием СПК.

2. Оценка влияния потемнения диска Солнца на ослабление исходящего от него потока излучения с использованием СПК

Закон потемнения диска Солнца к краю имеет вид [6]

$$\frac{L_c(\theta)}{L_c(0)} = 1 - u_2 - v_2 + u_2 \cdot \cos(\theta) + v_2 \cdot \cos^2(\theta), \quad (1)$$

где $L_c(\theta)$ – яркость на угловом расстоянии θ от центра диска Солнца; θ – угол между радиус-вектором Солнца и лучом зрения; $L_c(0)$ – яркость в центре диска Солнца; u_2, v_2 – постоянные, отличающиеся для разных длин волн.

Угол θ определяется из соотношения

$$\cos(\theta) = \sqrt{1 - \left(\frac{\varphi}{\rho_c}\right)^2}, \quad (2)$$

где $\rho_c = 4,652$ мрад – видимый с Земли угловой радиус диска Солнца; φ – угол отклонения от центра диска Солнца.

Углы θ и φ при наблюдении некоторой точки на поверхности Солнца показаны на рис. 1.

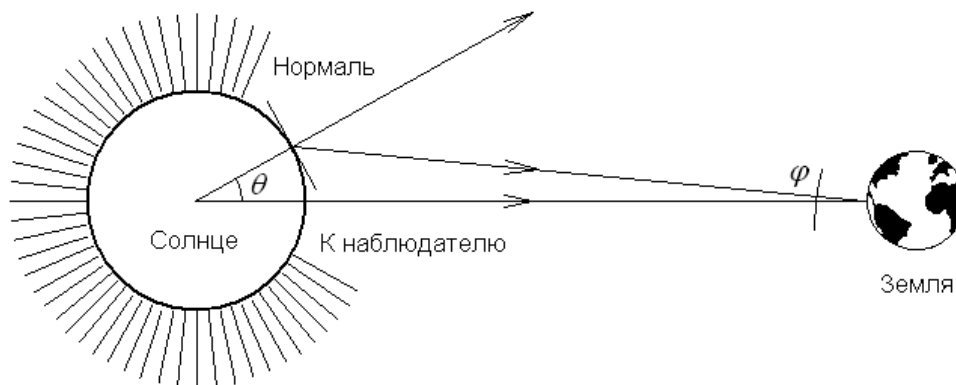


Рис. 1. Углы θ и φ при наблюдении с Земли некоторой точки на диске Солнца

Для полного излучения Солнца справедливы равенства: $u_2 = 0,84$; $v_2 = -0,20$ [6], при которых выражение (1) имеет вид

$$\frac{L_c(\varphi)}{L_c(0)} = 0,36 + 0,84 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\varphi}{\rho_c}\right)^2} - 0,20 \cdot \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\rho_c}\right)^2\right). \quad (3)$$

Оценку ослабления потока солнечного излучения с использованием СПК выполним следующим образом. Телесный угол, в котором виден диск Солнца равен $\pi \cdot \rho_c^2$, а интегральное ослабление вдоль его углового радиуса $\varphi \leq \rho_c$ составляет

$$K_\varphi = \int_0^\varphi \left(0,36 + 0,84 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\varphi}{\rho_c}\right)^2} - 0,20 \cdot \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\rho_c}\right)^2\right) \right) d\varphi. \quad (4)$$

Отсюда ослабление излучения за счет СПК, находящегося по центру диска Солнца, составит

$$K_y = \frac{\int_0^{\omega_{СПК}} \left(0,36 + 0,84 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\varphi}{\rho_c} \right)^2} - 0,2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\varphi}{\rho_c} \right)^2 \right) \right) d\varphi}{\int_0^{\rho_c} \left(0,36 + 0,84 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\varphi}{\rho_c} \right)^2} - 0,2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\varphi}{\rho_c} \right)^2 \right) \right) d\varphi}^2, \quad (5)$$

где $\omega_{СПК}$ – угловой радиус СПК, видимый с Земли.

При расположении СПК с радиусом $r_{СПК} = 845$ км на удалении от Земли, равном $2,57 \cdot 10^6$ км ($\omega_{СПК} = 0,329$ мрад) [1-3] ослабление потока солнечного излучения составит $K_y = 0,635$ %.

В [1-3] для снижения средней температуры атмосферы на $1,5^\circ$ С предлагается уменьшить поток падающего излучения Солнца всего лишь на 0,500 %. Тогда при размещении СПК в точке L_1 по центру диска Солнца относительно Земли, его угловой радиус должен быть равен $\omega_{СПК} = 0,292$ мрад, что соответствует радиусу $r_{СПК} = 750$ км.

Согласно данным, накопленным за весь период систематических наблюдений, вариации полного потока излучения Солнца (солнечной постоянной) составляют $\sim 0,100$ % [5,7]. При этом оценки [7] показывают, что изменение солнечной постоянной на 1,000 % при постоянном значении альбедо приведет к изменению средней температуры Земли на 1,1...1,5 К, а по данным [8], колебания солнечной постоянной в пределах $\sim 0,073$ % соответствуют изменению глобальной температуры на 0,1 К.

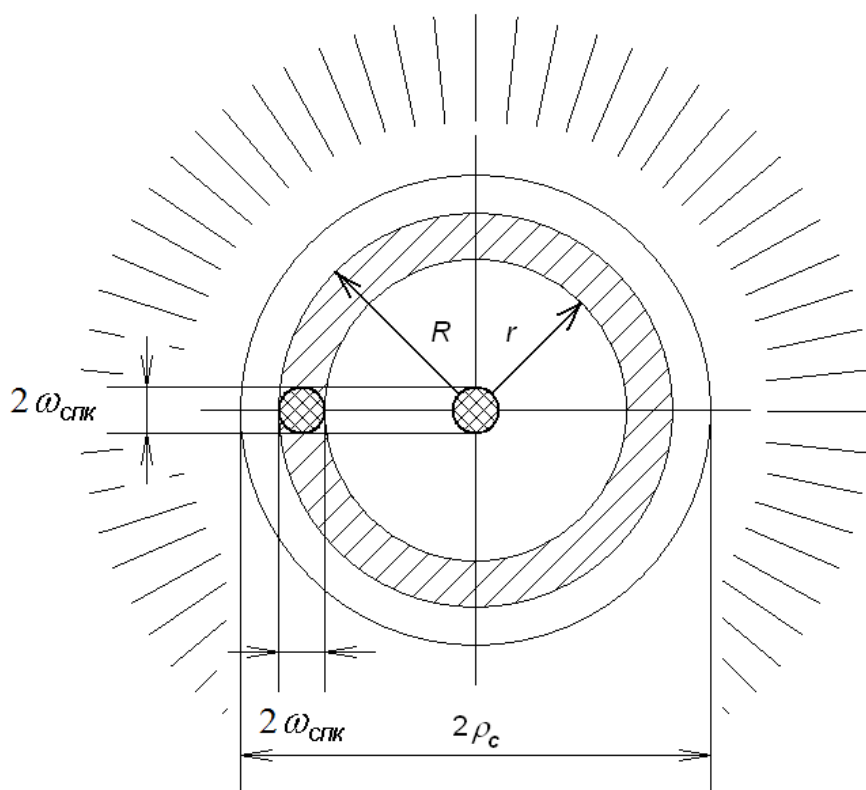


Рис. 2. Кольцевая зона, служащая для оценки ослабления излучения при смещении СПК от центра диска Солнца

Ослабление будет уменьшаться при смещении СПК от центра диска Солнца, так как оттуда исходит наиболее интенсивный поток излучения.

Для оценки ослабления солнечного излучения может использоваться модель, в которой ослабление излучения усредняется в пределах кольцевой зоны, ширина которой равна угловому размеру СПК (рис. 2).

При сдвиге на угол ψ относительно центра диска Солнца, СПК будет находится между двумя концентрическими окружностями с радиусами R и r :

$$R = \psi + \omega_{СПК}, \quad (6)$$

$$r = \psi - \omega_{СПК}. \quad (7)$$

Интегральное ослабление в этой кольцевой зоне определяется выражением

$$L_K = \pi \cdot \left(\int_0^R \left(0,36 + 0,84 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\varphi}{\rho_c} \right)^2} - 0,20 \cdot \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\rho_c} \right)^2 \right) \right) d\varphi \right)^2 - \left(\int_0^r \left(0,36 + 0,84 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\varphi}{\rho_c} \right)^2} - 0,20 \cdot \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\rho_c} \right)^2 \right) \right) d\varphi \right)^2. \quad (8)$$

СПК будет перекрывать часть потока солнечного излучения, равную отношению его площади к площади кольцевой зоны, определяющейся тривиальным геометрическим соотношением

$$\eta = \frac{\omega_{СПК}^2}{R^2 - r^2}. \quad (9)$$

С учетом (6) и (7) соотношение (9) имеет вид

$$\eta = \frac{\omega_{СПК}}{4 \cdot \psi}. \quad (10)$$

При смещении СПК от центра диска Солнца на угол ψ ослабление потока излучения за счет СПК определяется с использованием выражения

$$K_\psi = \frac{\omega_{СПК}}{4 \cdot \psi} \cdot \left(\frac{\int_0^{\psi + \omega_{СПК}} \left(0,36 + 0,84 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\varphi}{\rho_c} \right)^2} - 0,2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\varphi}{\rho_c} \right)^2 \right) \right) d\varphi}{\int_0^{\rho_c} \left(0,36 + 0,84 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\varphi}{\rho_c} \right)^2} - 0,2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\varphi}{\rho_c} \right)^2 \right) \right) d\varphi} \right)^2 -$$

$$-\frac{\omega_{СПК}}{4 \cdot \psi} \cdot \left(\frac{\int_0^{\psi - \omega_{СПК}} \left(0,36 + 0,84 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\varphi}{\rho_C} \right)^2} - 0,2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\varphi}{\rho_C} \right)^2 \right) \right) d\varphi}{\int_0^{\rho_C} \left(0,36 + 0,84 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\varphi}{\rho_C} \right)^2} - 0,2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\varphi}{\rho_C} \right)^2 \right) \right) d\varphi} \right)^2. \quad (11)$$

Если край тени СПК касается края солнечного диска, то при $\omega_{СПК} = 0,329$ мрад ослабление составит

$$K_{\psi} = 0,374 \text{ \%}.$$

3. Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 представлена зависимость ослабления потока солнечного излучения в зависимости от положения СПК относительно центра диска Солнца при $\omega_{СПК1} = 0,329$ мрад и $\omega_{СПК2} = 0,292$ мрад.

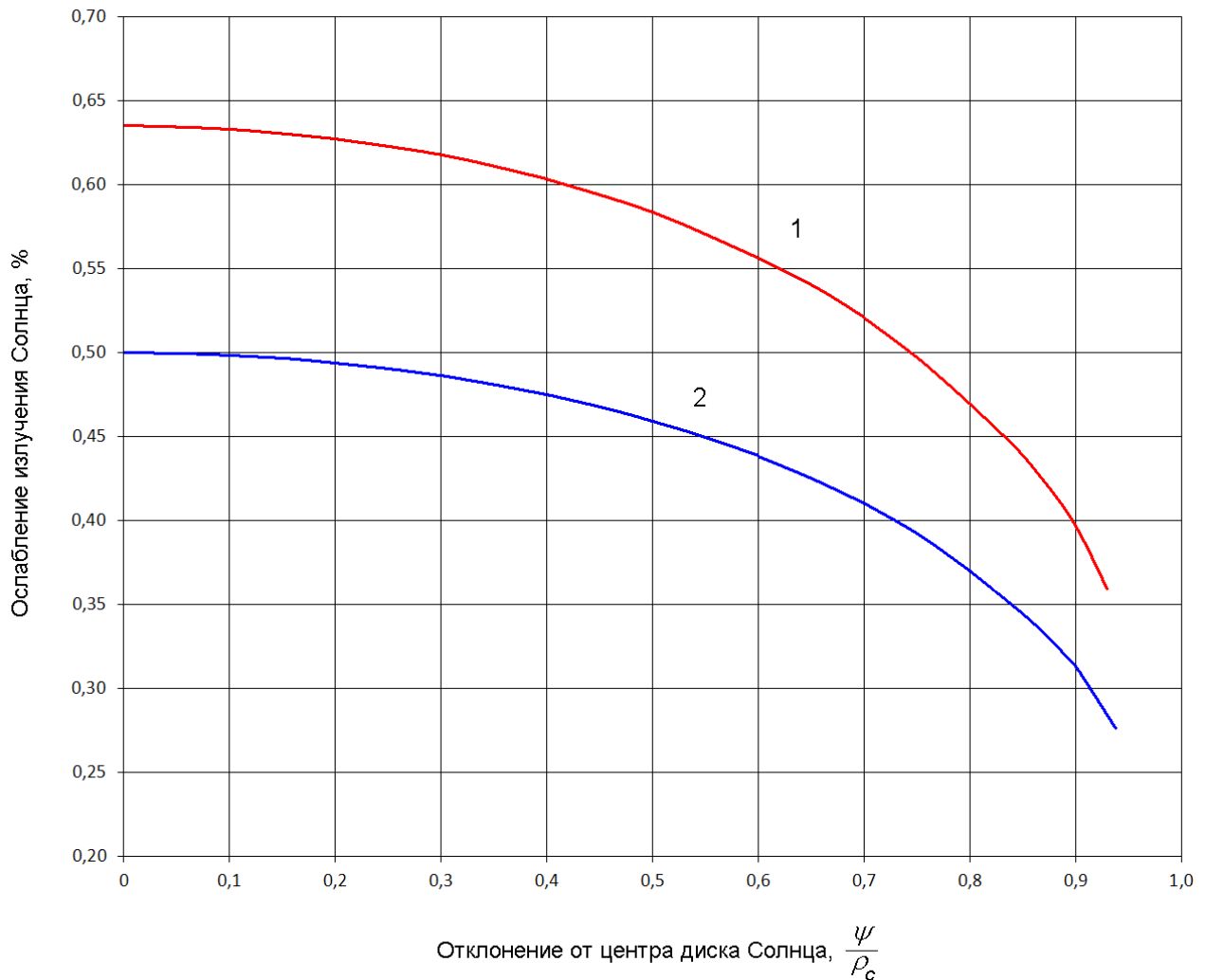


Рис. 3. Зависимость ослабления потока излучения в зависимости от положения СПК относительно центра диска Солнца: 1 – $\omega_{СПК1} = 0,329$ мрад; 2 – $\omega_{СПК2} = 0,292$ мрад

В предыдущих работах [1-3] с учетом принятых допущений предполагалось, что для снижения ослабления излучения необходимо частично вывести СПК за край диска Солнца относительно Земли. Фактически, при барражировании СПК в зоне с радиусом r_B (в пределах диска Солнца) ослабление потока солнечного излучения будет варьировать в зависимости от положения СПК относительно центра диска Солнца.

Для обеспечения постоянного значения ослабления потока излучения необходимо обеспечить стабильное положение СПК относительно центра диска Солнца, либо конструкция СПК должна позволять регулировать величину пропускания потока излучения.

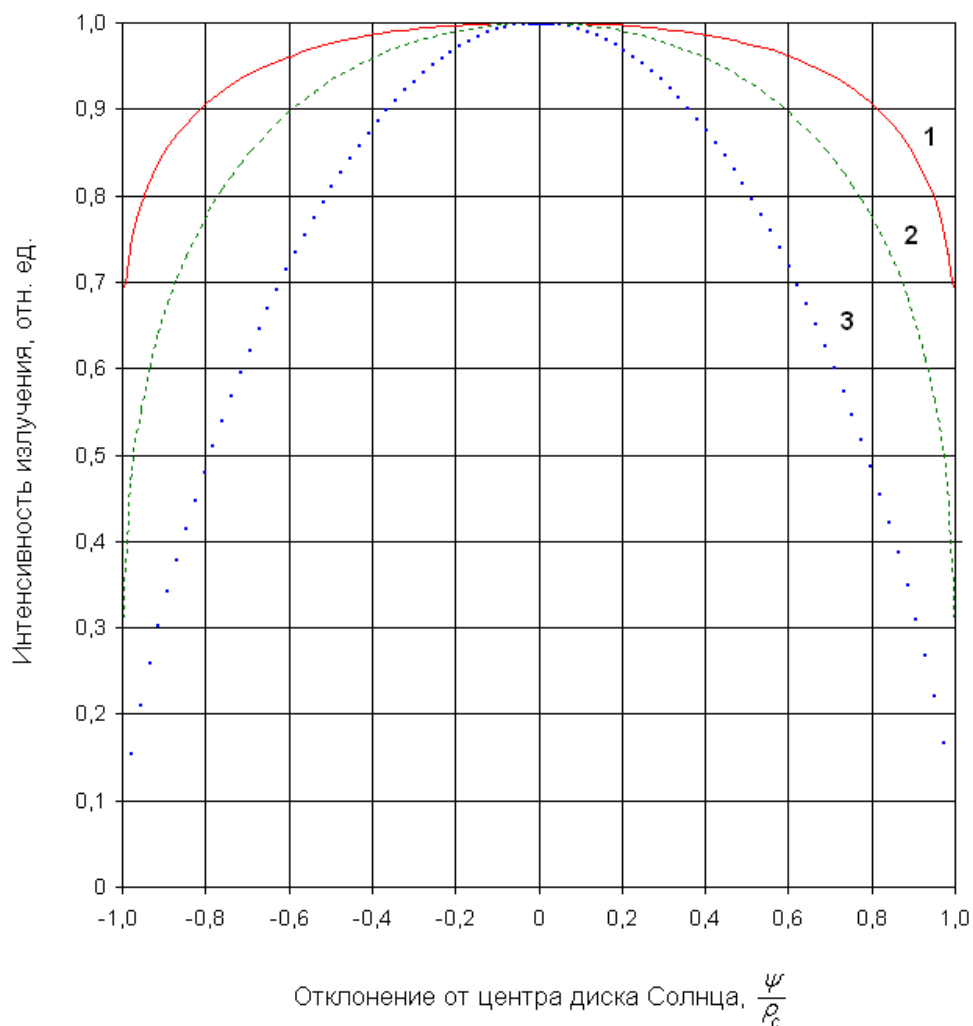


Рис. 4. Ослабление излучения при отклонении луча зрения от центра диска Солнца для разных длин волн:
1 – 1500 нм; 2 – 550 нм; 3 – 280 нм

Кроме того, Солнце фактически является переменной звездой, с краткосрочными колебаниями солнечной постоянной в пределах от $-0,4\%$ до $+0,2\%$, которые обусловлены прохождением по диску Солнца ярких факелов и темных пятен, и долгосрочными колебаниями в пределах $\pm 0,1\%$ [5]. Более того, из-за эксцентриситета орбиты Земли значение солнечной постоянной меняется в течение года: от $1,416 \text{ кВт/м}^2$ в январе до $1,324 \text{ кВт/м}^2$ в

июле, т.е. Северное полушарие за свой летний день облучается меньше чем Южное [9]. Все эти аспекты также необходимо учесть при разработке системы регулирования температурного режима земной атмосферы на базе СПК.

Необходимо обратить внимание на усиление эффекта потемнения к краю диска Солнца в коротковолновом диапазоне [5,6]. Ослабление потока излучения при отклонении луча зрения от центра диска Солнца для разных длин волн проиллюстрировано на рис. 4.

Из рисунка видно, насколько сильно выражен эффект потемнения в средневолновой УФ-области по сравнению с видимой и ИК-областью спектра излучения Солнца. Соответственно, при расположении СПК по центру диска Солнца относительно Земли ослабление излучения будет сильнее в УФ-области спектрального диапазона.

Для решения прикладных задач (например, энергетического расчета оптоэлектронных приборов) спектральная плотность излучения Солнца определяется по табличным данным, представленным в литературе [6,10]. Абсолютное ослабление спектральной плотности излучения при расположении СПК по центру диска Солнца определяется выражением

$$\Delta F_{\lambda} = F_{\lambda} \cdot K_{\eta}, \quad (12)$$

где F_{λ} – спектральная плотность излучения Солнца на данной длине волны.

Значения ΔF_{λ} в спектральном диапазоне 200...1400 нм (при $\omega_{СПК} = 0,329$ мрад) представлены на рис. 5.

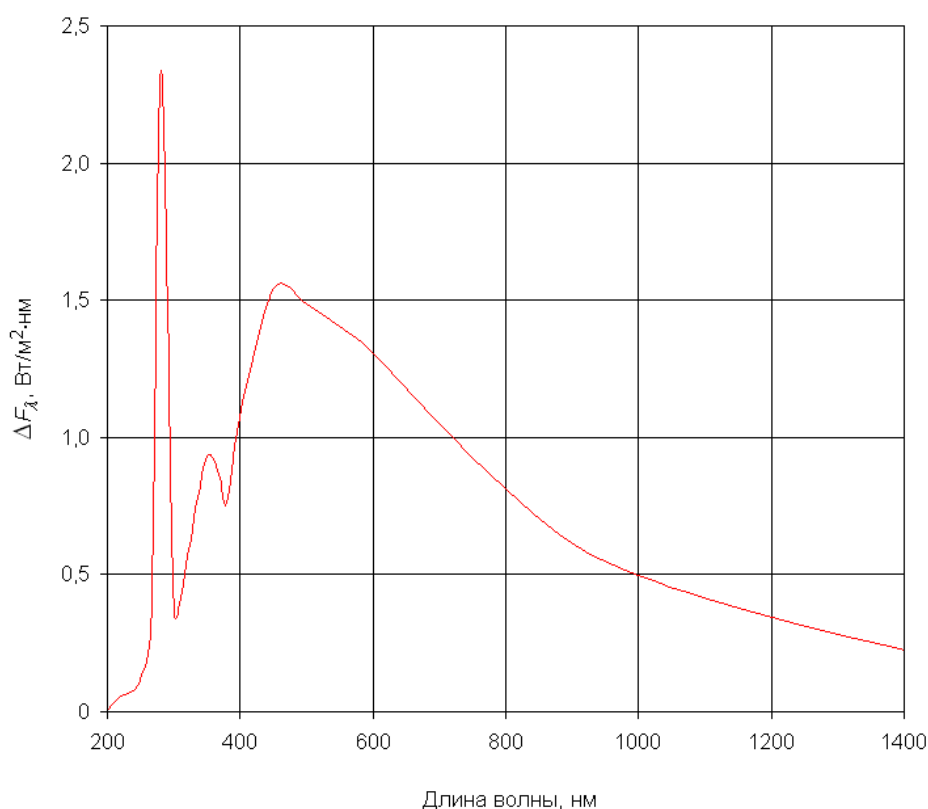


Рис. 5. Абсолютное ослабление спектральной плотности излучения Солнца в диапазоне 200...1400 нм при расположении СПК по центру диска Солнца

На рис. 5 заметно, что ΔF_λ больше всего в средневолновой УФ-области, а также вблизи максимума излучения Солнца в видимой области. Относительное ослабление потока излучения Солнца в спектральном диапазоне 200...400 нм (при $\omega_{СПК} = 0,329$ мрад) показано на рис. 6.

Как следует из рис. 6, наибольшее ослабление происходит на длине волны 280 нм. При этом явление потемнения диска Солнца к краю наблюдается до длины волны 500 000 нм, а для более коротких длин волн наоборот, происходит увеличение яркости излучения к краю, однако их вклад в солнечную постоянную составляет лишь тысячные доли процента [4].

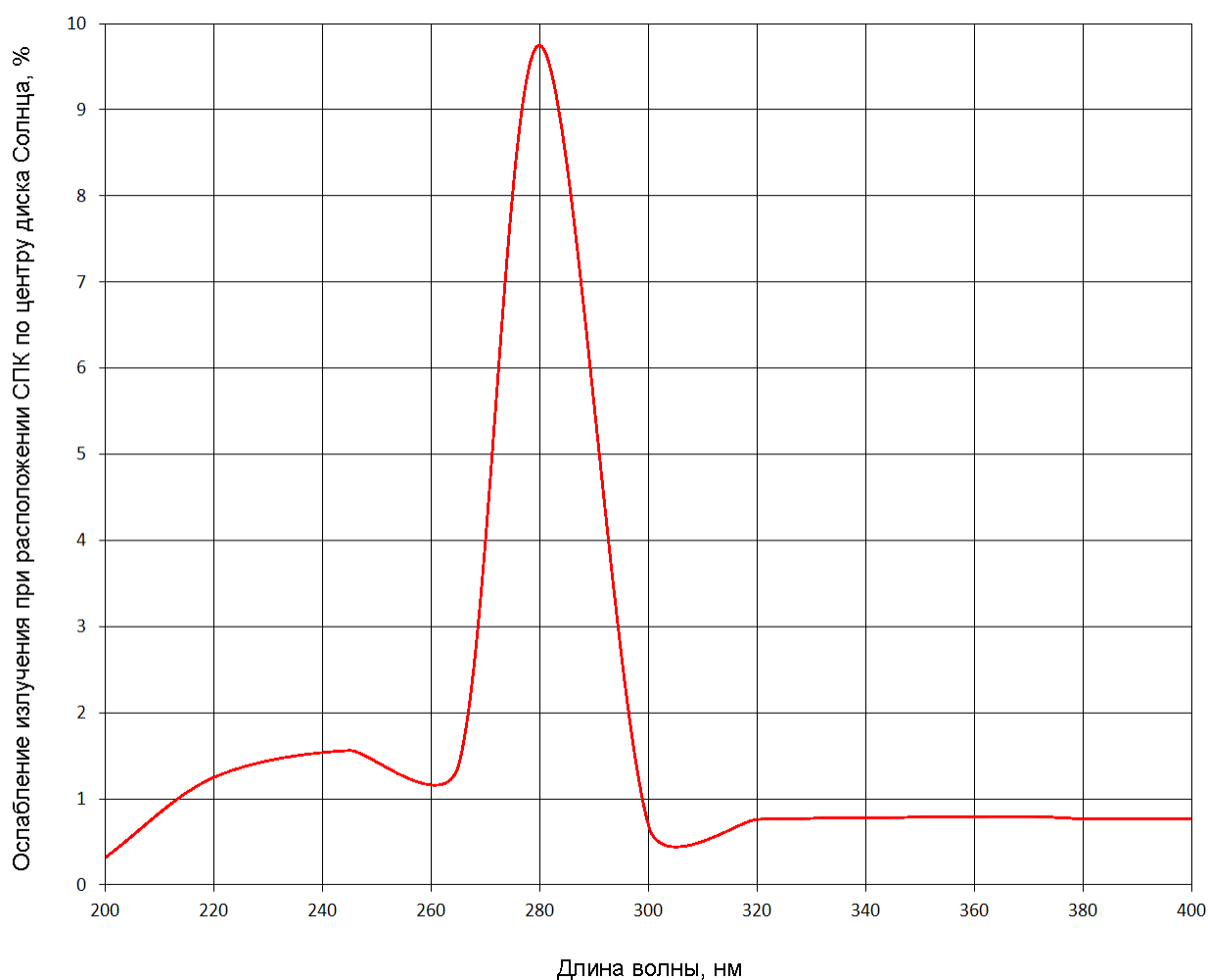


Рис. 6. Относительное ослабление в спектральном диапазоне 200...400 нм при расположении СПК по центру диска Солнца

Наличие полос поглощения в атмосфере Земли детерминирует различные эффекты при воздействии излучения разной длины волны. Излучение в средней и дальней УФ-области спектра вызывает фотохимические реакции, в результате которых на высотах 15...70 км образуется озон. Кроме поглощения излучения в спектральном диапазоне

150...290 нм, озон примечателен тем, что является одним из газов, вызывающих парниковый эффект – именно он вызывает нагрев стратосферы на высотах 30...55 км, но при этом климат в тропосфере более чувствителен к содержанию озона. Поэтому для прогнозирования климатических процессов необходимо количественная оценка содержания озона в атмосфере [11].

Несмотря на то, что на спектральный диапазон 200...300 нм приходится около 1 % всего потока излучения Солнца, его колебания составляют почти 20 % изменений потока излучения в целом (солнечной постоянной) [4].

В настоящее время имеются литературные данные о значительном влиянии колебаний излучения в УФ-области спектра на климат Земли. Данные спутниковых измерений в период 23-го солнечного цикла показывают очень сильное снижение потока УФ-радиации, при том, что значение солнечной постоянной остается в целом стабильным.

По мнению авторов [12] снижение потока УФ-радиации, приводит к холодным зимам в Северной Европе и Соединенных Штатах и мягкой зиме в южной Европе и Канаде, с небольшим изменением глобальной средней температуры.

Вариации УФ-радиации приводят к изменению содержания озона, которое в свою очередь вызывает изменения ветра и температуры. Отклик температуры имеет в значительной степени незональный характер, а эффект на уровне тропосферы составляет несколько кельвинов [13].

Следовательно, необходимы дополнительные исследования возможных последствий снижения потока излучения Солнца в УФ-области на климат Земли при регулировании солнечной постоянной с использованием СПК.

Заключение

Представлена оценка влияния эффекта потемнения диска Солнца на эффективность ослабления потока его излучения космической системой регулирования температурного режима земной атмосферы на базе СПК, размещенного в либрационной точке Лагранжа L_1 системы Земля-Солнце.

На основе представленного в литературе закона потемнения диска Солнца к краю получены выражение для ослабления потока излучения при нахождении СПК по центру диска Солнца и выражение для ослабления при отклонении СПК от центра диска на некоторый угол.

Оценка выполнена для полного потока и для отдельных участков спектра (от средней УФ- до ближней ИК-области). Установлено, что наибольшее ослабление происходит в спектральном диапазоне 260...300 нм (средневолновой УФ-области).

С учетом данных, представленных в ряде работ сделан вывод, что снижение УФ-радиации при регулировании солнечной постоянной с использованием СПК требует дополнительных исследований возможных последствий для климата Земли.

Список литературы

1. Сизенцев Г.А., Сотников Б.И. Концепция космической системы регулирования термического режима земной атмосферы // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 2. С. 91-100.
2. Луна – шаг к технологиям освоения Солнечной системы / под ред. В.П. Легостаева и В.А. Лопоты. М.: РКК «Энергия», 2011. 584 с.
3. Сизенцев Г.А. Космический комплекс для решения энергоклиматических проблем на Земле // Космическая техника и технологии. 2013. № 3. С. 82-95.
4. Макаров Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. М.: Наука, 1991. 400 с.
5. Общий курс астрономии: учеб. пособие / под ред. В.В. Иванова. 2-е изд., испр. М.: Едиториал УРСС, 2004. 544 с.
6. Аллен К.У. Астрофизические величины. М.: Мир, 1977. 448 с.
7. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. 352 с.
8. Douglass D.H., Clader B.D., Knox R.S. Climate sensitivity of Earth to solar irradiance: update // 2004 Solar Radiation and Climate (SORCE) meeting on Decade Variability in the Sun and the Climate. Meredith, New Hampshire, 27–29 October, 2004. P.1-16. Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/physics/0411002> (дата обращения 19.03.2014).
9. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология: учебник. 7-е изд. М.: Изд-во Моск. ун-та: Наука, 2006. 582 с.
10. Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Основы импульсной лазерной локации: учеб. пособие для вузов / под ред. В.Н. Рождествина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 512 с.
11. Зуев В.Е., Титов Г.А. Оптика атмосферы и климат. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1996. 272 с. (Сер. Современные проблемы атмосферной оптики; т. 9).
12. Ineson S., Scaife A.A., Knight J.R., Manners J.C., Dunstone N.J., Gray L.J., Haigh J.D. Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere // Nature Geoscience. 2011. Vol. 4, no. 11. P. 753-757. DOI: [10.1038/ngeo1282](https://doi.org/10.1038/ngeo1282)
13. Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Виссинг М., Захаров Г.Р., Вьюшкова Т.Ю. Трехмерное моделирование изменений температуры, ветра и химического состава атмосферы Земли, обусловленных активностью Солнца // Солнечно-земная физика: сб. науч. тр. Вып. 21. 2012. С. 37-45.

Evaluation of Attenuation of Solar Radiation by Space System for Regulate the Thermal Conditions of Earth's Atmosphere

07, July 2014

DOI: 10.7463/0714.0719558

E.I. Starovoitov^{1,a}

¹S.P. Korolev Rocket And Space Corporation «Energia»,
Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation

^aevgstarovojtov@yandex.ru

Keywords: [temperature](#), [sun](#), [solar wind ship](#), [UV-radiation](#), [the global climate](#), [Lagrange point L1](#)

Global warming in the future is an existential threat to human civilization. To prevent further changes in the Earth's climate is intended of space system for regulate the temperature of Earth's atmosphere, proposed of G.A. Sizentsev. In this system, the main role is played by the solar-sailing ship (SSS) arranged in a Lagrange point L_1 of the Earth-Sun system. Due to the large area of sails SSS, drifting in the plane normal to the flow of sunlight, reduces the amount of solar radiation incident on the Earth. For practical implementation of space system for regulate the temperature of Earth's atmosphere is necessary to solve complex problems related primarily to the efficiency of attenuation of solar radiation flux. In this paper we study the solar limb darkening on the reduce of the outgoing radiation flux from sun with using the SSS. On the basis of well-known law of solar limb darkening, expressions are obtained for attenuation of the radiation flux when the SSS is at the center of the solar disk, and with deviation the SSS from center of the solar disk at a certain angle. Evaluation is made for the total stream and separate sections the spectral range (from average UV- to the near IR-range). Found that attenuation will decrease at the displacement of SSS to solar disk center, because from there comes the most intense radiation flux. For constant attenuation values of the radiation flux is necessary to ensure a stable position of the SSS with respect to the center of the solar disk, or design should allow the SSS to regulate the transmission amount of the radiation flux. Is shown, that the greatest attenuation oc-

curs in the spectral range of 260 ... 300 nm, corresponding to middle UV-range. Currently, there are published data on the significant effect of fluctuations in the UV radiation on the Earth's climate. Conclusion, that more research is needed of possible effects of reduce UV-radiation on the Earth's climate when regulating of the solar constant with the SSS.

References

1. Sizentsev G.A., Sotnikov B.I. The concept of space system of the Earth atmosphere thermal mode regulation. *Izvestiia RAN. Energetika*, 2009, no. 2, pp. 91-100. (in Russian).
2. Legostaev V.P., Lopota V.A. *Luna – shag k tekhnologiiam osvoeniia Solnechnoi sistemy* [Moon is a step towards the development of technologies of the Solar System]. Moscow, Rocket and Space Corporation “Energia” after S.P. Korolev Publ., 2011. 584 p. (in Russian).
3. Sizentsev G.A. A space system to address energy and climate problems on Earth. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii = Space Engineering and Technology*, 2013, no. 3, pp. 82-95. (in Russian).
4. Makarov E.A., Kharitonov A.V., Kazachevskaya T.V. *Potok solnechnogo izlucheniia* [Solar irradiance]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 400 p. (in Russian).
5. Ivanov V.V., ed. *Obshchii kurs astronomii* [The general course of astronomy]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2004. 544 p. (in Russian).
6. Allen C.W. *Astrophysical Quantities*. 3rd ed. Athlone Press, University of London, 1973. (Russ. ed.: Allen C.W. *Astrofizicheskie velichiny*. Moscow, Mir Publ., 1977. 448 p.).
7. Budyko M.I. *Klimat v proshlom i budushchem* [The climate in the past and the future]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980. 352 p. (in Russian).
8. Douglass D.H., Clader B.D., Knox R.S. Climate sensitivity of Earth to solar irradiance: update. *Proc. of the 2004 Solar Radiation and Climate (SORCE) meeting on Decade Variability in the Sun and the Climate*. Meredith, New Hampshire, 27–29 October, 2004, pp. 1-16. Available at: <http://arxiv.org/abs/physics/0411002> , accessed 19.03.2014.
9. Khromov S.P., Petrosiants M.A. *Meteorologiya i klimatologiya* [Meteorology and climatology]. Moscow, MSU Publ., 2006. 582 p. (in Russian).
10. Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Osnovy impul'snoi lazernoi lokatsii* [The basics of pulsed laser location]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 511 p. (in Russian).
11. Zuev V.E., Titov G.A. *Optika atmosfery i klimat* [Optics of the atmosphere and climate]. Tomsk, “Spektr” Publ. of Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian

Academy of Science, 1996. 272 p. (Ser. *Sovremennye problemy atmosfernoï optiki* [Modern problems of atmospheric optics]; vol. 9). (in Russian).

12. Ineson S., Scaife A.A., Knight J.R., Manners J.C., Dunstone N.J., Gray L.J., Haigh J.D. Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere. *Nature Geoscience*, 2011, vol. 4, no. 11, pp. 753-757. DOI: [10.1038/ngeo1282](https://doi.org/10.1038/ngeo1282)
13. Krivolutskii A.A., Cherepanova L.A., Vissing M., Zakharov G.R., V'iushkova T.Iu. Three-dimensional simulation of changes in temperature, wind and the earth's atmosphere chemical composition caused by solar activity. *Solnechno-zemnaia fizika: sb. nauch. tr.* [Solar-terrestrial physics: collection of scientific papers]. Iss. 21. 2012, pp. 37-45. (in Russian).