

## МОНИТОРИНГ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ЗЕМЛИ ИЗ ТОЧКИ ЛАГРАНЖА L1

© 2014 г. **Х. И. Абдусаматов**, доктор физ.-мат. наук; **Е. В. Лаповок**, канд. техн. наук;  
**С. И. Ханков**, доктор техн. наук

Главная астрономическая обсерватория Российской академии наук,  
Санкт-Петербург

E-mail: leva0007@rambler.ru, abduss@gao.spb.ru

Исследован метод мониторинга вариаций энергетического баланса Земли из точки Лагранжа L1. Метод основан на измерениях вариации солнечной постоянной в полном спектральном диапазоне и радиационного потока Земли в спектральных диапазонах 0,2–100 мкм, 8–13 мкм и в ряде других диапазонов. Пороговая чувствительность телескопа с диаметром входного зрачка 400 мм должна быть равна  $10^{-7}$  Вт при динамическом диапазоне четыре порядка. Метод позволяет регистрировать вариации альbedo Бонда на уровне 0,1%, что соответствует изменению температуры Земли на 0,03 К при учете вариации солнечной постоянной. Определены зависимости приращений альbedo Бонда, поглощаемой планетой удельной мощности солнечного излучения, а также планетарной температуры от вариации альbedo атмосферы и земной поверхности и пропускания атмосферой солнечного излучения.

*Ключевые слова:* точка Лагранжа, энергетический баланс Земли, солнечная постоянная, альbedo Бонда.

Коды OCIS: 120.4640, 120.0280, 350.1246, 350.6050, 350.6090

*Поступила в редакцию 26.12.2012*

### Введение

Энергетический баланс Земли определяет ее эффективную  $T_e$  и планетарную  $T_p$  термодинамические температуры. При этом эффективная температура характеризует излучательную способность Земли как абсолютно черного излучателя, а планетарная требует учета эффективной излучательной способности (степени черноты) планеты в целом (как земной поверхности, главным образом – океана, так и атмосферы). Излучение земной поверхности и атмосферы, строго говоря, не описывается законом Стефана–Больцмана. Для описания энергетического баланса планеты вблизи положения теплового равновесия и для определения на этой основе планетарной температуры необходимо введение и определение эффективной степени черноты системы океан–атмосфера. Величина  $T_p$  является результатом усреднения по всей поверхности температурного поля планеты (земной поверхности и атмосферы), и, также как  $T_e$  является эквивалентом поверхностной температуры изотермического шара с радиу-

сом, равным радиусу верхней границы атмосферы. Альbedo Бонда Земли, солнечная постоянная и тепловое излучение планеты являются главными факторами, определяющими энергетический баланс и климат Земли [1], что требует непрерывной информации о вариациях этих величин.

Целью данного исследования является определение возможностей надежной диагностики тенденций изменения климата на основе мониторинга энергетического баланса из точки Лагранжа L1 в системе Солнце–Земля.

Задачи исследований состояли в определении структуры альbedo Бонда, оценке достоверности получаемой информации о его изменении с учетом вариаций солнечной постоянной, а также определении требований к пороговой чувствительности и динамическому диапазону измерительной аппаратуры. В задачи исследований также входило сопоставление эффективности мониторинга в интегральном спектре излучения и в окне прозрачности атмосферы 8–13 мкм.

Для решения этих задач исследованы возможности наиболее эффективного метода глобального

синоптического обзора и мониторинга долговременных вариаций альbedo Бонда из точки Лагранжа L1, который прорабатывался ранее, но не был осуществлен [2, 3]. При этом основное внимание уделено спектральному диапазону солнечного излучения и интегральному излучению Земли во всем спектре – от 0,2 до 100 мкм.

Поскольку динамика изменения альbedo Бонда наперед достоверно не известна, целесообразно ограничиться анализом конечных приращений альbedo Бонда, поглощаемых и отражаемых тепловых потоков и температуры под действием приращений исходных определяющих параметров. Для эффективной температуры как безынерционного параметра, мгновенно отслеживающего приращение поглощаемой планетой солнечной энергии, это тем более оправдано.

### Энергетический баланс Земли и его вариации

Нестационарное уравнение энергетического баланса Земли как планеты описывается уравнением

$$C \frac{dT_p}{d\tau} + q + \Delta q = Q_{\Sigma} + \Delta Q_{\Sigma}, \quad (1)$$

где  $C$  – суммарная удельная поверхностная теплоемкость активного слоя океана и атмосферы (полная теплоемкость, отнесенная к общей площади поверхности планеты),  $q$  – средний по поверхности удельный тепловой поток, излучаемый Землей в космическое пространство в состоянии теплового равновесия,  $\Delta q$  – его приращение,  $Q_{\Sigma}$  – поглощенная Землей (суммарно океаном и атмосферой) удельная мощность солнечного излучения, соответствующая тепловому равновесию,  $\Delta Q_{\Sigma}$  – ее приращение.

Удельные тепловые потоки и их приращение определяются из соотношений

$$\begin{aligned} q &= \varepsilon \sigma T_p^4, \quad Q_{\Sigma} = (1-A)Q_{in}, \quad Q_{in} = \frac{E}{4}, \\ \Delta q &= q(T_p + \Delta T_p) - q(T_p), \\ \Delta Q_{\Sigma} &= Q_{\Sigma}(Q_{in} + \Delta Q_{in}, A + \Delta A) - Q_{\Sigma}(Q_{in}, A), \end{aligned}$$

где  $\varepsilon$  – излучательная способность (эффективная степень черноты) планеты,  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана,  $A$  – альbedo Бонда,  $Q_{in}$  – инсоляция верхней границы атмосферы,  $E$  – солнечная постоянная.

При заранее неизвестных законах изменения во времени величин  $\Delta Q_{in}$  и  $\Delta A$  целесообразно

проводить анализ влияния конечных приращений удельных тепловых потоков, приняв в выражении (1)  $dT_p/d\tau = 0$ . Поскольку величины  $q$  и  $Q_{\Sigma}$  соответствуют условию равновесного состояния и  $q = Q_{\Sigma}$ , уравнение (1) преобразуется к виду

$$\Delta q = \Delta Q_{\Sigma}. \quad (2)$$

Малым приращениям  $\Delta Q_{in} \ll Q_{in}$  и  $\Delta A \ll A$  соответствуют малые приращения температур  $\Delta T_p \ll T_p$ , тогда выполняется равенство

$$\Delta q = 4\alpha \Delta T_p, \quad \alpha = \varepsilon \sigma T_p^3 = \frac{q}{T_p}. \quad (3)$$

Подставив выражения (3) в уравнение (2) получим

$$\Delta T_p = \frac{\Delta Q_{\Sigma}}{4\alpha}. \quad (4)$$

Для прогноза изменения планетарной температуры, определяющего грядущие изменения климата, необходима информация о приращениях поглощаемой планетой мощности солнечного излучения на основе мониторинга вариаций солнечной постоянной и альbedo Бонда. Для этого необходимо предварительное проведение теоретических исследований.

### Структура альbedo Бонда и вариации поглощаемой Землей мощности солнечного излучения и планетарной температуры под действием изменения оптических характеристик земной поверхности и атмосферы

Ранее авторами настоящей статьи были выведены формулы [4], описывающие поверхностные плотности тепловых мощностей, поглощаемых земной поверхностью  $Q_s$  и атмосферой  $Q_a$  как функции удельной мощности инсоляции верхней границы атмосферы  $Q_{in}$ .

$$\left. \begin{aligned} Q_s &= (1-A_a)(1-A_s)\beta Q_{in} \\ Q_a &= (1-A_a)(1-\beta)Q_{in} \\ Q_{\Sigma} &= Q_s + Q_a = (1-A)Q_{in} = (1-A_a)(1-A_s\beta)Q_{in} \\ A &= A_a + (1-A_a)A_s\beta = A_s\beta + A_a(1-A_s\beta) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $A_a$  и  $A_s$  – альbedo атмосферы и земной поверхности,  $\beta$  – пропускание атмосферы в спектре солнечного излучения.

Будем рассматривать все параметры в уравнениях (5) как начальные значения, соответствующие нынешнему состоянию, и введем

приращения параметров  $\Delta A_a$ ,  $\Delta A_s$ ,  $\Delta \beta$ . Задача состоит в определении относительного приращения величины  $\eta_\Sigma = \Delta Q_\Sigma / Q_{in}$ , а также планетарного альбеда  $A$  под действием приращений  $\Delta A_a$ ,  $\Delta A_s$ ,  $\Delta \beta$ . Это позволит определить как изменение планетарного теплового баланса, так и планетарной температуры.

После преобразований были получены следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta A &= D_x \Delta A_a + D_y \Delta A_s + D_z \Delta \beta + F \\ \eta_\Sigma &= -D_x x - D_y y - D_z z + f \\ D_x &= (1 - A_s \beta), \quad D_y = (1 - A_a) \beta, \quad D_z = (1 - A_a) A_s \\ F &= -\beta \Delta A_a \Delta A_s - A_s \Delta A_a \Delta \beta + \\ &+ (1 - A_a) \Delta A_s \Delta \beta - \Delta A_a \Delta A_s \Delta \beta \\ f &= \beta x y + A_s x z - (1 - A_a) y z + x y z \end{aligned} \right\} (6)$$

В формулах (6) использованы обозначения

$$x = \frac{\Delta A_a}{1 - A_a}, \quad y = \frac{\Delta A_s}{1 - A_s}, \quad z = \frac{\Delta \beta}{\beta}.$$

Для расчетов приращений температур удобно ввести коэффициент относительного приращения поглощаемой мощности вида  $N_\Sigma = \Delta Q_\Sigma / Q_\Sigma = \eta_\Sigma / (1 - A_p)$ .

Планетарная термодинамическая температура определяется из соотношения

$$T_p = \sqrt[4]{\frac{(1 + N_\Sigma) Q_\Sigma}{\varepsilon \sigma}} = T_{p0} \sqrt[4]{1 + N_\Sigma}, \quad (7)$$

где  $T_{p0}$  – начальное значение планетарной температуры.

Поскольку  $N_\Sigma \ll 1$ , вместо соотношения (7) можно записать

$$T_p = T_{p0} \left( 1 + \frac{N_\Sigma}{4} \right), \quad \Delta T = T_p - T_{p0} = \frac{N_\Sigma}{4} T_{p0}. \quad (8)$$

Принимая  $T_{p0} = 284$  К [4], получаем из выражения (8)

$$\Delta T_p = 71 N_\Sigma = 103 \eta_\Sigma. \quad (9)$$

Важно отметить, что приняв в формуле (7)  $\varepsilon = 1$ , можно в выражении (8) вместо  $T_p$  использовать  $T_e$ . В этом случае, учитывая нынешнее значение  $T_e = 254,8$  К, получим  $\Delta T_e = 63,5 = N_\Sigma = 92 \eta_\Sigma$ , что ниже значения приращения планетарной термодинамической температуры в уравнении (9). Следует подчеркнуть, что для определения приращения планетарной температуры нет необходимости в информации о значении  $\varepsilon$ , достаточно использовать информацию о нынешнем значении планетарной температуры.

Ранее на основании данных по компонентам энергетического баланса [5] авторами статьи были определены значения компонент альбеда Бонда [4]:  $A_a = 0,225$ ,  $A_s = 0,15$ ,  $\beta = 0,747$ ,  $\Delta A = 0,888 \Delta A_a$ ,  $\Delta A = 0,579 \Delta A_s$ ,  $\Delta A = 0,116 \Delta \beta$ . Коэффициенты  $D_i$  из формул (6) в точности соответствуют коэффициентам пропорциональности в зависимостях  $\Delta A$  от  $\Delta A_a$ ,  $\Delta A_s$  и  $\Delta \beta$ .

Рассчитаем влияние вариаций компонент альбеда Бонда на приращение планетарной температуры с использованием формул (6)

$$\begin{aligned} D_x x &= 1,146 \Delta A_a, \quad D_y y = 0,681 \Delta A_s, \\ D_z z &= 0,155 \Delta \beta. \end{aligned} \quad (10)$$

При изменении только одной из компонент альбеда Бонда – при  $F = 0$  и  $f = 0$  из выражений (9), (6) и (10) получим

$$\begin{aligned} \Delta T_x &= -81,4 \Delta A_a, \quad \Delta T_y = -48,4 \Delta A_s, \\ \Delta T_z &= -11 \Delta \beta. \end{aligned} \quad (11)$$

### Метод регистрации интегральных потоков излучения Земли и Солнца из точки Лагранжа L1

Метод основан на измерении интегрального потока излучения Земли во всем спектральном диапазоне (от 0,2 до 100 мкм) в направлении входного зрачка телескопа. Предлагается использовать телескоп и радиометры. При этом телескоп с диаметром главного зеркала 400 мм направлен на Землю. Он содержит матричный приемник и радиометр. Рабочие спектральные диапазоны 0,2–1 мкм, 0,2–3 мкм, 0,2–100 мкм, а также 8–13 мкм. Предложенный метод обладает высокой чувствительностью и позволяет регистрировать вариации альбеда Бонда Земли на уровне не менее 0,1%. Радиометр, направленный на Солнце, имеет спектральный диапазон от 0 до  $\infty$  мкм и осуществляет мониторинг солнечной постоянной.

Новым в данных исследованиях является разработка теории и метода мониторинга солнечной постоянной и альбеда Бонда Земли по регистрации всего спектра электромагнитного излучения, включая коротковолновый диапазон отраженного Землей солнечного излучения, а также собственного теплового инфракрасного излучения Земли. При этом исключается необходимость анализа погрешностей, связанных с неполным соответствием спектра отраженного планетой потока солнечного излучения и спектральной чувствительностью

приемника, а также его ограниченным спектральным диапазоном.

Предложенный комплекс аппаратуры позволяет:

- осуществлять ежечасный обзор всей подсвеченной Солнцем части поверхности Земли в различных полосах (порядка 10–12) спектрального диапазона 0,2–1 мкм для мониторинга вариаций облачности, растительности, аэрозолей, водяного пара и пр.,

- осуществлять мониторинг интегрального излучения Земли, излучения Земли в окне прозрачности атмосферы (8–13 мкм), а также в диапазоне солнечного спектра (0,2–3 мкм),

- осуществлять мониторинг солнечной постоянной,

- учитывать вклад в вариации отражаемого Землей светового потока изменения солнечной постоянной.

### Оценка чувствительности метода измерения интегрального потока излучения Земли из точки Лагранжа

Рассмотрим требования к чувствительности приемника на основе анализа лучистых потоков в рамках общепринятого допущения: отражение и собственное излучение Земли подчиняется закону Ламберта.

Регистрируемый телескопом полный лучистый поток складывается из отраженного Землей коротковолнового солнечного излучения и собственного теплового излучения.

Яркость отраженного Землей коротковолнового солнечного излучения

$$B_R = \frac{1}{2\pi} Q_R = \frac{2A}{\pi} Q_{in}, \quad (12)$$

где  $Q_R$  – отраженный Землей удельный поток солнечного излучения, равный  $Q_R = AE = 4AQ_{in}$ .

Яркость собственного теплового излучения Земли, усредненная по всей поверхности, при допущении о нахождении планеты в состоянии теплового равновесия

$$B_H = \frac{1}{4\pi} Q_{\Sigma} = \frac{1-A}{4\pi} Q_{in} = \frac{1}{4\pi} \sigma T_e^4. \quad (13)$$

Суммарная яркость полусферы Земли, обращенной к Солнцу, во всем спектральном диапазоне

$$B = B_H + B_R = \frac{1-A}{4\pi} Q_{in} + \frac{2A}{\pi} Q_{in} = \frac{1+7A}{4\pi} Q_{in}. \quad (14)$$

Интегральная сила излучения полусферы Земли ( $J$ ), обращенной к Солнцу, определяется из соотношения

$$J = BF, \quad F = \pi R^2, \quad (15)$$

где  $F$  – площадь миделя Земли,  $R$  – ее радиус.

Полная мощность лучистого потока на входном зрачке телескопа ( $P$ ), наблюдающего Землю из точки Лагранжа

$$P = \frac{\pi \left(\frac{D}{L}\right)^2}{4} J = \frac{1+7A}{16} Q_{in} F \left(\frac{D}{L}\right)^2. \quad (16)$$

Принимая при нынешнем значении солнечной постоянной  $E = 1366$  Вт/м<sup>2</sup> значение инсоляции  $Q_{in} = 341,5$  Вт/м<sup>2</sup>, а также исходное значение альbedo Бонда  $A = 0,3$  [5], из уравнения (14) можно получить  $B = 86,2$  Вт/м<sup>2</sup> ср.

Если  $R = 6375$  км =  $6,375 \times 10^6$  м, то  $F = 1,27 \times 10^{14}$  м<sup>2</sup>, и из соотношения (15) найдем интегральную силу излучения Земли  $J = 1,1 \times 10^{16}$  Вт/ср. При диаметре входного зрачка  $D = 0,4$  м из формулы (16) получим  $P = 6,16 \times 10^{-4}$  Вт.

Приращение яркости отраженного Землей коротковолнового излучения можно записать, пренебрегая произведениями малых значений  $\Delta Q_{in}$  и  $\Delta A$ , в следующем виде:

$$\Delta B_E = (2/\pi)(A\Delta Q_{in} + Q_{in}\Delta A). \quad (17)$$

Приращение собственного теплового излучения описывается формулой

$$\Delta B_H = \frac{1}{4\pi} [(1-A)\Delta Q_{in} - Q_{in}\Delta A]. \quad (18)$$

Приращение суммарной яркости за счет приращения солнечной постоянной и альbedo Бонда

$$\Delta B = (1/4\pi)[(1+7A)\Delta Q_{in} + 7Q_{in}\Delta A]. \quad (19)$$

Примем  $A = 0,3$ ,  $Q_{in} = 341,5$  Вт/м<sup>2</sup>, тогда из выражений (17)–(19) следует, что

$$\left. \begin{aligned} \Delta B_E &= 0,191\Delta Q_{in} + 217,2\Delta A \\ \Delta B_H &= 0,056\Delta Q_{in} - 27,2\Delta A \\ \Delta B &= 0,247\Delta Q_{in} + 190\Delta A \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

Вариации принимаемого оптической системой интегрального потока излучения, определяемые приращениями  $\Delta Q_{in}$  и  $\Delta A$ , можно получить из соотношений (16) и (20)

$$\Delta P = K\Delta B, \quad K = \frac{\pi \left(\frac{D}{L}\right)^2}{4} F = 7,1 \times 10^{-6}. \quad (21)$$

При изменениях солнечной постоянной на 0,5% и альbedo Бонда на 0,1% значение  $\Delta P$

составит  $3,38 \times 10^{-6}$  Вт, а относительное приращение  $\Delta P/P = 5,5 \times 10^{-4}$ .

При параллельном мониторинге солнечной постоянной приращение  $\Delta Q_{in}$  должно вычитаться из суммарного сигнала. При этом необходимо измерять вариации альбедо с точностью не хуже 0,1%. Это соответствует приращению потока  $\Delta P = 4 \times 10^{-7}$  Вт и относительному изменению принимаемого сигнала  $\Delta P/P = 6,6 \times 10^{-4}$ . В итоге требуемый динамический диапазон приемника составляет менее четырех порядков.

Из анализа соотношений (12) и (13) следует, что приращение эффективной температуры Земли  $\Delta T_e$ , возникающее под действием малого приращения альбедо  $\Delta A$ , определяется из соотношения

$$\Delta T_e = \frac{Q_{in}}{4\alpha_e} \Delta A, \quad \alpha_e = \sigma T_{e0}^3, \quad (22)$$

где  $\alpha_e$  – эффективный коэффициент теплоотдачи излучением от Земли с эффективной температурой  $T_{e0}$  в космическое пространство,  $T_{e0}$  – исходное значение эффективной температуры Земли в настоящее время.

Принимая нынешнее значение эффективной температуры Земли  $T_{e0} = 254,8$  К, получим  $\alpha_e = 0,93$  Вт/м<sup>2</sup>К. Подставив в соотношение (22) это значение, с учетом ранее указанного значения  $Q_{in}$  получим

$$\Delta T_e = -91 \Delta A. \quad (23)$$

Из результата (23) следует, что при увеличении альбедо Бонда на 0,1% эффективная температура Земли снизится почти на 0,03 К.

Планетарная термодинамическая температура  $T_p$  в установившемся тепловом режиме определяется через эффективную температуру  $T_e$  с помощью соотношения

$$T_p = \varepsilon^{-0,25} T_e. \quad (24)$$

Соотношения (24) и (23) позволяют описать приращение планетарной температуры в равновесном состоянии, однако установление нового значения планетарной температуры происходит с определенной временной задержкой, определяемой термической инерцией системы океан–атмосфера. Эффективная температура является радиационной температурой планеты и не отражает временных изменений планетарной температуры, но указывает тенденции в направлении изменения климата планеты.

Значение  $\varepsilon$  в настоящее время неизвестно. Но если принять за максимальное значение

планетарной температуры температуру океана 287 К, то получится  $\varepsilon = 0,613$ . В действительности планетарная термодинамическая температура определяется как эффективное значение температуры системы океан–атмосфера. Значение  $T_p$  ниже принятого в данных расчетах, поэтому  $\varepsilon$  больше вычисленного значения 0,613.

Предложенный метод регистрации вариаций альбедо Бонда обладает весьма высокой чувствительностью – при изменении регистрируемого интегрального потока на  $\Delta P$  в мкВт изменение альбедо определяется из соотношения  $\Delta A = k \Delta P$ , где  $k = 1,3 \times 10^{-3}$  (мкВт)<sup>-1</sup> – коэффициент пропорциональности, характеризующий чувствительность метода.

### Регистрация собственного теплового излучения Земли в окне прозрачности

Удельная мощность собственного теплового излучения поверхности Земли  $q_s$ , а также собственного теплового излучения атмосферы  $q_a$  в окне прозрачности (при неполном пропускании атмосферы  $\gamma \neq 1$ ) определяются из соотношений

$$q_s = \delta_s \gamma \varepsilon_s \sigma T_s^4, \quad q_a = \delta_a (1 - \gamma) \varepsilon_a \sigma T_a^4, \quad (25)$$

где  $\delta_s$ ,  $\delta_a$  – доли энергии в заданном спектральном диапазоне от полной энергии теплового излучения во всем спектре, соответственно, при температуре поверхности Земли  $T_s$  и эффективной температуре атмосферы  $T_a$ ,  $\gamma$  – пропускание атмосферы в окне прозрачности, в данном случае в диапазоне 8–13 мкм,  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_a$  – эффективные степени черноты (излучательные способности) земной поверхности и атмосферы соответственно.

Суммарная мощность теплового излучения  $q_\Sigma = q_s + q_a$  в данном спектральном диапазоне определяется из соотношения

$$q_\Sigma = \varepsilon_{ef} \sigma T_p^4, \quad \varepsilon_{ef} = \delta [\gamma \varepsilon_s + (1 - \gamma) \varepsilon_a], \quad (26)$$

где  $\varepsilon_{ef}$  соответствует эффективной степени черноты излучения планеты в ограниченном спектральном диапазоне 8–13 мкм с учетом доли энергии, заключенной в этом диапазоне.

При выводе формулы (26) принято допущение о малой разности температур между земной поверхностью и атмосферой ( $T_s - T_a \ll T_s$ ), что подтверждено результатами оценок на основе анализа уравнений энергетического баланса при нынешних значениях эффективных параметров уравнений [4]. В этом случае

с малой погрешностью выполняются допущения:  $T_s \approx T_a = T_p$ ,  $\delta_s \approx \delta_a = \delta$ .

При малом приращении планетарной температуры  $\Delta T_p$  соответствующее приращение теплового потока  $\Delta q_\Sigma$  описывается формулой, следующей из соотношений (26)

$$\Delta q_\Sigma = 4\sigma T_p^3 \Delta T_p \epsilon_{ef}. \quad (27)$$

Значение  $\epsilon_{ef}$  достоверно неизвестно. Поэтому по измеренным вариациям потока излучения в окне прозрачности атмосферы точно определить приращение планетарной температуры затруднительно. Однако, задавая значения, удовлетворяющие уравнениям энергетического баланса [4, 5], а именно:  $\gamma = 0,8$ ,  $\epsilon_s = 0,417$ ,  $\epsilon_a = 0,7$ ,  $\delta = 0,3$ , можно получить  $\epsilon_{ef} = 0,142$ .

В результате при  $T_p = 284$  К получим

$$\Delta T_p = \frac{\Delta q_\Sigma}{4\sigma T_p^3 \epsilon_{ef}} = \frac{\Delta q_\Sigma}{74} = 0,0136 \Delta q_\Sigma. \quad (28)$$

Из последнего соотношения можно определить приращение яркости Земли в диапазоне 8–13 мкм, например, при  $\Delta T_p = 0,03$  К

$$\Delta B_\Sigma = \frac{1}{4\pi} \Delta q_\Sigma = \frac{74}{4\pi} \Delta T_p = 0,177. \quad (29)$$

Подставив это значение в соотношение (21), определим приращение принимаемого оптической системой суммарного потока излучения от Земли в окне прозрачности 8–13 мкм:  $\Delta P_\Sigma = K \Delta B_\Sigma = 1,26 \times 10^{-6}$  Вт. Это в почти 2,5 раза меньше, чем приращение  $\Delta P$  в этом соотношении при одновременных вариациях солнечной постоянной на 0,5% и альbedo Бонда на 0,1%. Однако, это примерно в 3 раза больше  $\Delta P = 4 \times 10^{-7}$  Вт, соответствующего только приращению альbedo Бонда на 0,1%.

Проведенные оценки подтверждают высокую эффективность мониторинга теплового излучения Земли в спектральном диапазоне 8–13 мкм.

### Выводы

В результате проведенных исследований поставленная цель достигнута, разработаны теория и метод долговременного мониторинга полного энергетического баланса Земли и показана возможность диагностики тенденций изменения планетарной температуры и глобального климата.

\* \* \* \* \*

Важно особо подчеркнуть, что прямые и достоверные измерения альbedo Бонда Земли невозможны ни из какой точки, поскольку альbedo Бонда является характеристикой отражения в полусферу, тогда как из любой точки осуществляется наблюдение в узком телесном угле отраженного Землей излучения. Однако это излучение в обратном направлении (строго на Солнце) является наиболее точной характеристикой альbedo для диффузного ламбертовского шара, которым представляется модель Земли. В любом случае значение альbedo Бонда точно вычисляется по результатам измерения световых потоков из точки Лагранжа L1, при этом его вариации определяются абсолютно достоверно.

В процессе исследований решены следующие задачи:

- определена структура альbedo Бонда, а также зависимость его приращения от вариаций альbedo атмосферы, земной поверхности, а также пропускания атмосферы в спектре солнечного излучения с учетом произведения этих малых приращений – формулы (5) и (6),
- установлена зависимость планетарной температуры от относительных приращений поглощаемого планетой потока солнечного излучения и компонент альbedo Бонда – соотношения (8)–(11),
- на основе определенных количественных зависимостей приращений яркостей отраженного и излученного Землей потоков, а также суммарной яркости – формулы (17)–(20) и с использованием соотношения (21) определена требуемая чувствительность регистрирующей аппаратуры (порядка  $10^{-7}$  Вт), а также требуемый динамический диапазон приемника излучения (менее четырех порядков),
- показана высокая эффективность использования спектрального диапазона в окне прозрачности атмосферы и определено, что регистрируемое приращение мощности в этом диапазоне примерно того же порядка, что и приращение мощности в интегральном спектральном диапазоне,
- достоверность получаемой информации об изменении альbedo Бонда на основе мониторинга энергетического баланса Земли определяется тем, что вариации солнечной постоянной регистрируются радиометром, наблюдающим за Солнцем; этот фактор может быть учтен и исключен при обработке результатов измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдусаматов Х.И.* Двухвековое снижение солнечной постоянной приводит к несбалансированному тепловому бюджету Земли и глубокому похолоданию климата // *Кинематика и физика небесных тел.* 2012. Т. 28. № 2. С. 22–33.
2. Triana – a deep space earth and solar observatory. Report prepared for the National Academy of Sciences by: *Valero F.P.J., Herman J., Minnis P., Collins W.D., Sadourny R., Wiscombe W., Lubin D., Ogilvie K.* [www-pm.larc.nasa.gov/triana/NAS.Triana.report.12.99.pdf](http://www-pm.larc.nasa.gov/triana/NAS.Triana.report.12.99.pdf)
3. *Smith G.L.* Simulation of full Earth disc measurement at L-1 of reflected solar radiation // 5th Conf. on Sensors, Systems and Next Generation Satellites, EOS/SPIE Symposium. University of Florence, 20–24 Sept. 1999.
4. *Abdussamatov H.I., Bogoyavlenskii A.I., Khankov S.I., Lapovok E.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. V. 2. P. 194–200.  
doi:10.4236/jgis.2010.24027
5. *Trenberth K.E., Fasullo J.T., Keihl J.* Earth's global energy budget // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2009. V. 90. № 3. P. 311–323.