

## Перспективная оценка температуры нижней тропосферы моделью «альbedo–температура»

Н.Н. Завалишин\*

ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт»  
630099, г. Новосибирск, 99, ул. Советская, 30

Поступила в редакцию 4.04.2010 г.

Приведена общая схема годового энергетического дисбаланса Земли, на основе которой построена модель, связывающая среднегодовую температуру приземной атмосферы с планетарным альbedo и тепловой инерцией гидросферы. Показано, что по введенному критерию период 1951–1980 гг. наиболее подходит к вычислению норм гидрометеоэлементов. Сделан модельный расчет изменений приземной температуры в зависимости от сценария изменения альbedo и типов функций передачи тепла из нижнего в верхний слой гидросферы.

*Ключевые слова:* энергетический дисбаланс, альbedo Земли, температура атмосферы, модель, перспективная оценка, реконструкция альbedo; energy imbalance, the Earth albedo, atmospheric temperature, model, long-range estimate, albedo reconstruction.

«Баланс» буквально означает «весы» и трактуется как равновесие. Факт регулярного чередования ледниковых периодов с потеплениями заставляет думать, что нормой является состояние неравновесия или энергетического дисбаланса, когда приток солнечной энергии к Земле не совпадает с ее уходом в космос в течение длительных периодов времени. Почему возникает дисбаланс? Куда и в каких количествах перераспределяются избыток или дефицит энергии? Каковы последствия?

В своей классической работе [1] М. Миланкович предположил постоянство альbedo Земли в межледниковый период и сосредоточил внимание на непостоянстве приходящего потока солнечной радиации, которое вызвано изменениями параметров орбиты Земли за десятки и сотни тысяч лет. В исследованиях [2, 3] и в данной статье рассматривается динамика климата на интервалах времени порядка сотен лет, когда колебания «солнечной постоянной» из-за изменения орбитальных параметров малы по отношению к флуктуациям уходящего от Земли потока энергии. Более того, на первом этапе считаем неизменным ежегодный приход интегрального потока солнечной радиации к Земле (TSI – Total Solar Irradiation). Объект нашего исследования – уходящий от Земли ежегодный поток энергии, вызванный изменениями альbedo: уходящая коротковолновая радиация (OSR – Outgoing Shortwave Radiation) и уходящая длинноволновая радиация (OLR – Outgoing Longwave Radiation). Цель работы – получение перспективной оценки изменения среднегодовой температуры приземной атмосферы в зависимости от сценария изменения альbedo.

В статье [3, формула (11)] построена модель «альbedo–температура», которая по заданному набору годовых значений альbedo  $\{A_k\}$  оценивает относительную аномалию среднегодовой температуры нижней тропосферы  $\Theta_k$  в  $k$ -м году:

$$\frac{\Theta_k - \Theta_N}{\Theta_N} = \frac{(A_N - A_k)}{4(1 - A_N)} + \frac{1}{4d_0(1 - A_k)} \sum_{j=1}^L h_j (A_k - A_{k-j}), \quad (1)$$

где  $\Theta$  – температура в кельвинах; индекс  $N$  означает «норму»;  $d_0$ ,  $L$ ,  $h_1$ , ...,  $h_L$  – константы. В качестве сценария межгодовых изменений альbedo был принят «скачок»: переход от одного многолетнего значения альbedo к другому фиксированному значению. В настоящем исследовании рассмотрим максимально реалистичный сценарий изменения альbedo, т.е. сценарий, наиболее близкий к известным экспериментальным данным.

В основу модели заложена общая схема энергетического дисбаланса Земли (рис. 1). Схема иллюстрирует перераспределение солнечной энергии по геосферам в зависимости от годовых аномалий планетарного альbedo. Изменение альbedo, например его уменьшение, приводит к увеличению поступающей солнечной радиации, что повышает теплосодержание в гидросфере, нагревает нижнюю атмосферу, уменьшает объем и площадь криосферы и, как следствие, повышает уровень Мирового океана и высоту снеговой линии.

Основным теплоносителем является гидросфера, обладающая значительной тепловой инерцией, т.е. способностью накапливать большие объемы тепла и возвращать его в течение десятков, сотен и многих тысяч лет. Криосфера в этих процессах играет роль термического стабилизатора и индикатора тепловых процессов Земли, забирая излишки

\* Николай Николаевич Завалишин (znn@sibnigmi.ru).

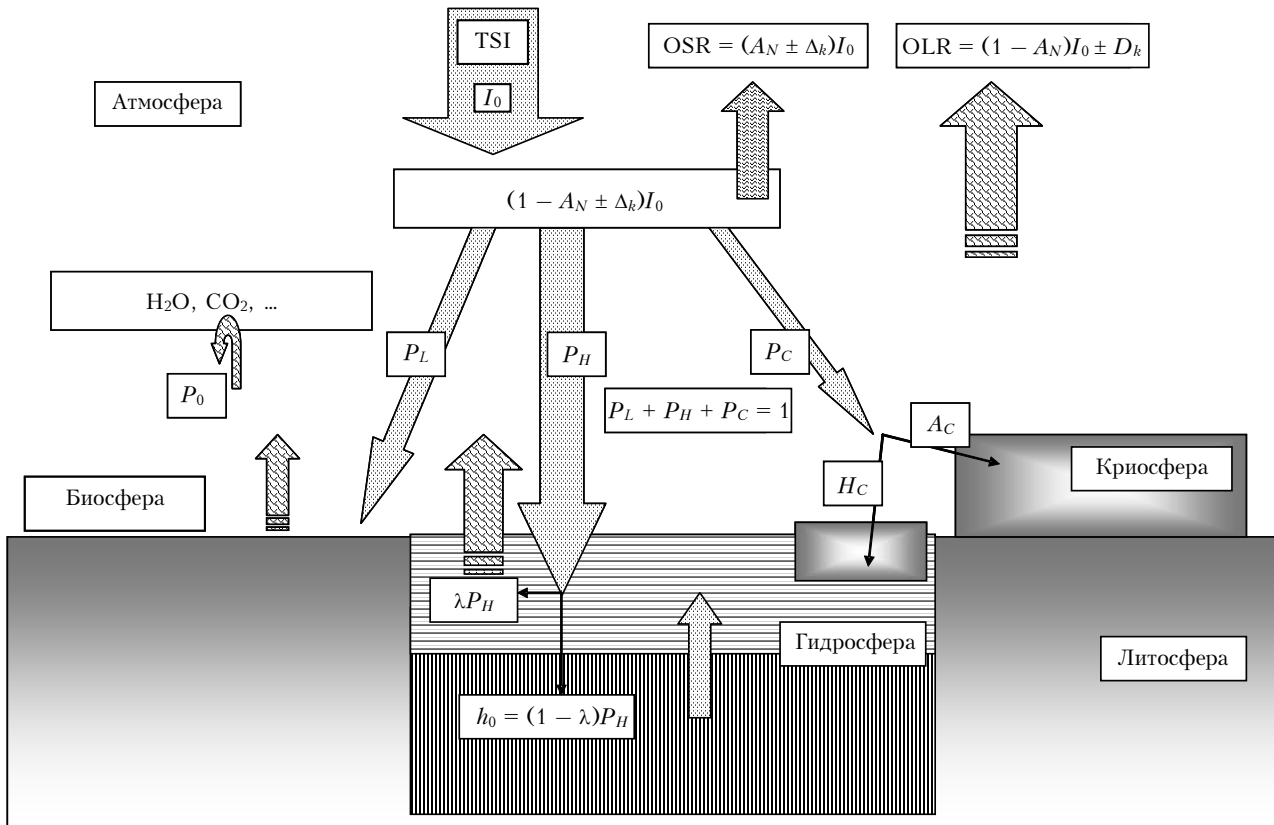


Рис. 1. Схема энергетического дисбаланса Земли

( $P_L$ ,  $P_H$ ,  $P_C$  – доли солнечной радиации, поступившие в течение года в литосферу, гидросферу и криосферу соответственно;  $H_C$  – доля радиации, ушедшей в морские льды;  $A_C$  – в материковую криосферу;  $\lambda$ ,  $(1 - \lambda)$  – доли перераспределения  $P_H$  между верхним и глубинным слоями;  $D_k$  – энергетический дисбаланс в  $k$ -м году)

тепла из гидросферы и атмосферы на фазовые превращения льда и снега в воду, а при увеличении альbedo забирает излишки холода на превращения воды в лед. Атмосфера по сравнению с гидросферой обладает несравненно меньшей теплоемкостью и ее состояние в значительной мере предопределяется состоянием верхних слоев гидросферы и литосферы. Относительно литосферы предполагается, что ее годовой энергетический баланс равен нулю. Это не значит, что литосфера не влияет на энергетический дисбаланс, влияние вулканизма на альbedo очевидно. Биосфера также влияет на альbedo. Так, по некоторым оценкам она вызвала уменьшение температуры приземной атмосферы на  $1^\circ$  из-за все увеличивающейся вырубки лесов.

Набор констант  $h_j$  ( $j = 1, \dots, L$ ) задает доли тепла, которое глубинный слой возвращает в верхний слой в течение последующих  $L$  лет. «Верхним» считается слой воды гидросферы, тепло из которого было передано в атмосферу и криосферу в течение года, а «глубинным» – нижележащий слой. Установить границу раздела между верхним и глубинным слоями трудно, так как она значительно изменяется из-за разной энергоактивности океанов. Еще труднее найти баланс тепла на этой границе. По этим причинам будем рассматривать следующие три сценария функций возврата тепла:

$$h_j(1) \sim 1 - \exp(-bj) \text{ (медленный),}$$

$$h_j(2) \sim 1 - \frac{j}{L} \text{ (линейный),}$$

$$h_j(3) \sim \exp(-cj) \text{ (быстрый),}$$

где  $L$  – глубина тепловой инерции гидросферы в годах;  $j = 1, \dots, L$ ;  $b, c$  – константы.

Пусть  $i$  означает номер сценария (для простоты иногда будем его опускать). Обозначим

$$e_j(i) = \frac{h_j(i)}{h_0(i)}; \quad h_0(i) = \sum_{j=1}^L h_j(i); \quad \sum_{j=1}^L e_j(i) \equiv 1. \quad (2)$$

Тогда все сценарии будут иметь общий вид

$$h_j(i) = h_0(i)e_j(i). \quad (3)$$

Рис. 2 иллюстрирует все три сценария изменения функций передачи тепла из глубинного слоя в верхний слой как в абсолютном, так и в нормированном виде.

Перепишем теперь (1) с учетом (2), (3):

$$\frac{\Theta_k(i) - \Theta_N}{\Theta_N} = \frac{(A_N - A_k)}{4(1 - A_N)} + \frac{h_0(i)}{4d_0} \sum_{j=1}^L e_j \frac{(A_k - A_{k-j})}{(1 - A_k)}. \quad (4)$$

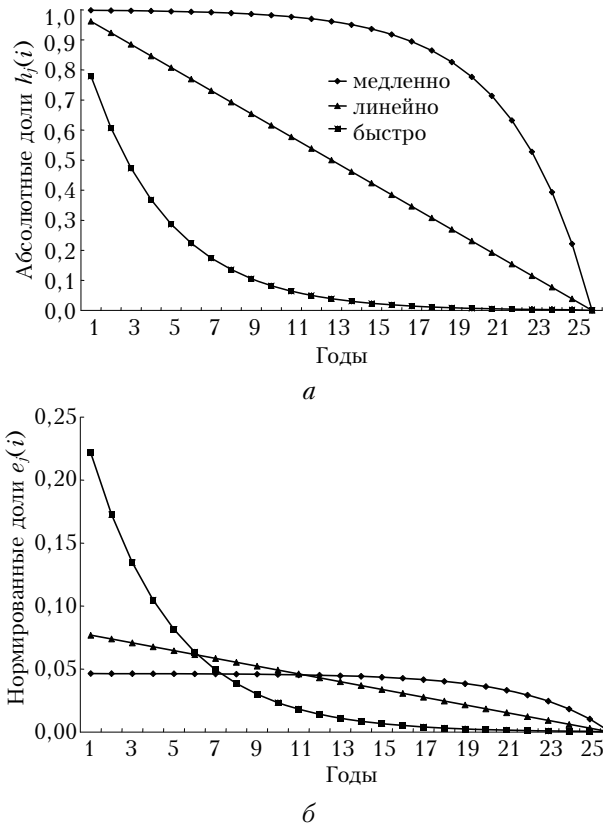


Рис. 2. Типы функций передачи тепла ( $L = 25$  лет) из глубинного в верхний слой гидросферы в абсолютной (а) и нормированной (б) формах

Для решения поставленной задачи нам, в соответствии с (4), необходимо определить:

1)  $A_N$  и  $\Theta_N$  – «нормы» альbedo и приземной температуры;

2)  $A_k$  – сценарий изменения альbedo Земли;

3)  $Z_0(i) = \frac{h_0(i)}{d_0}$  – константу.

Начнем с нормы. В работе [3] норма альbedo определяется как год  $N$ , в котором достигнут баланс тепла между верхним и глубинным слоями гидросферы, т.е.

$$A_N = \sum_{j=1}^L e_j A_{N-j}. \quad (5)$$

Напрямую найти год, удовлетворяющий (5), сложно из-за малого объема инструментальных данных по альbedo Земли (менее 30 лет), и, кроме того, по одному году оценка будет весьма ненадежной. На этом основании будем искать норму по динамике средних многолетних значений, связанных с альbedo параметров.

Нулевой баланс между слоями гидросферы означает стабильность тепловых потоков в гидросфере и, как следствие, в атмосфере. Следовательно, можно предположить, что та серия лет, в которой минимально изменяются такие среднегодовые значения, как температура поверхности Мирового

океана или температура нижней атмосферы  $x_k$ , и будет ближе всего к искомой норме.

В качестве серии лет возьмем 31-летний скользящий интервал, а за меру стабильности примем среднеквадратическое отклонение (СКО):

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{31} \sum_{j=-15}^{j=15} (x_{k+j} - \bar{x}_k)^2}; \quad \bar{x}_k = \frac{1}{31} \sum_{j=-15}^{j=15} x_{k+j}.$$

Исходные данные для расчета взяты из [4].

Для атмосферы над Мировым океаном и в целом для приповерхностной атмосферы минимум СКО достигается в 1960 г. (учитывая статистическую погрешность СКО, более точным будет начало 60-х гг.). Наиболее близкий к минимуму СКО стандартный 30-летний интервал есть интервал 1951–1980 гг., который и примем для расчета нормы гидрометеоэлементов и альbedo. Ближайшие варианты (периоды 1941–1970 и 1961–1990 гг.) не подходят из-за больших значений СКО.

Перейдем ко второй задаче – выбору сценария изменения среднегодового альbedo Земли. Зная по экспериментальным данным тот факт, что межгодовые колебания OSR за прошедшие десятилетия почти на порядок превышают флуктуации годовых TSI, можно с хорошей точностью оценить динамику альbedo по изменчивости OSR. В свою очередь облачность является важнейшим фактором, формирующим OSR. В работах [5, 6] опубликованы графики экспериментальных данных по альbedo и общей облачности (основные результаты исследований [7, 8] относятся к тропической зоне и поэтому не приводятся). Общей чертой и альbedo, и балла облачности является их падение до конца прошлого века с последующим подъемом. На рис. 3 схематически изображены их локальные тренды.

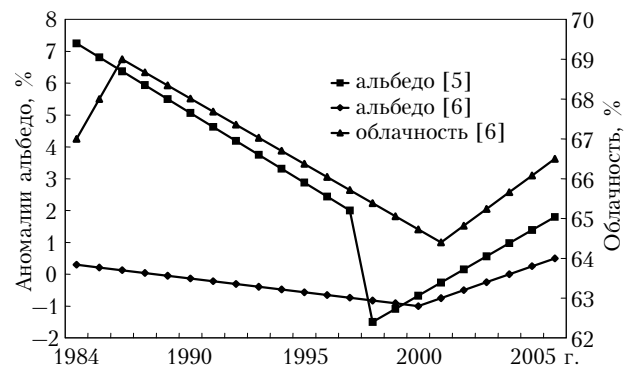


Рис. 3. Схема трендов альbedo и общей облачности по работам [5, 6]

Если принять, что начавшийся процесс увеличения альbedo будет иметь симметричный вид к прошедшему процессу его уменьшения (а какая у нас иная обоснованная альтернатива?), то получим искомый сценарий годового изменения альbedo Земли:

$$A_k = A_N, \quad k \leq 1984 \text{ и } k > 2014,$$

$$A_k = A_N \left( 1 - \frac{k-1984}{15} \delta \right), \quad 1984 \leq k \leq 1999,$$

$$A_k = A_N \left( 1 - \delta + \frac{k-1999}{15} \delta \right), \quad 2000 \leq k \leq 2014.$$

Константа  $\delta$  — это очень чувствительный параметр: отличие варианта с  $\delta = 0,011$  от варианта  $\delta = 0,009$  по модели (4) весьма значительно. Проблема в том, что пока у нас нет многолетних надежных инструментальных измерений альbedo Земли: результат [5] был подтвержден независимым методом оценки альbedo по отраженному свету Луны и все же через год был пересмотрен [6]. По этой причине примем за модельный вариант  $\delta = 0,01$ , который дает наиболее близкие к экспериментальным данным значения, вычисленные по (4).

Третью задачу — поиск константы  $Z_0$  — решим, как обычно, с помощью метода минимальных квадратов, исходя из принятого сценария.

Итак, основные параметры определены, и можно перейти к вычислениям по (4). Сначала рассмотрим тип линейной функции как наиболее простой: у нее только один параметр — глубина тепловой инерции. Для значений  $L = 10, 25, 50, 100, 200$  были найдены аномалии температуры по формуле (4) и сопоставлены с данными по фактической температуре за период с 1984 по 2009 г. Оказалось, что из выбранных вариантов ближе всего к экспериментальным данным вариант  $L = 25$  лет, при этом методом наименьших квадратов получена следующая оценка:  $Z_0 = 0,9$ . Здесь надо понимать, что это следствие выбранного сценария изменения альbedo: если бы мы знали его динамику на протяжении хотя бы ста лет, то получили бы другие оценки, в том числе и константу  $Z_0$ . Пока что опираемся на то, что знаем.

По этой причине подбор параметров «медленного» и «быстрого» сценариев изменения функций передачи тепла мы ограничили 25 годами, обрезая «хвосты» этих функций и подбирая их параметры так, чтобы оценки по (4) были близки к экспериментальным данным.

Результат на рис. 4 свидетельствует о том, что тип функций передачи тепла — вторичный фактор. Самые важные факторы: аномалии альbedo, глубина в годах тепловой инерции Мирового океана и параметр  $Z_0$ . Видно, что при возрастании альbedo температура приземной атмосферы также может возрастать за счет теплоотдачи Мирового океана: рост модельной температуры в 2001–2005 гг. при одновременном увеличении альbedo дает однозначный положительный ответ на вопрос, поставленный в [9].

Что дальше? Знаем не очень уверенно значения годовых альbedo на протяжении менее 30 лет. Собирайте данные еще десятилетия, чтобы понять, почему изменяется альbedo и как эти изменения влияют на климат Земли? Конечно, совершенствование инструментальных наблюдений за альbedo, как отечественных, так и международных, — это проблема номер один. Но можно параллельно идти и другим путем.

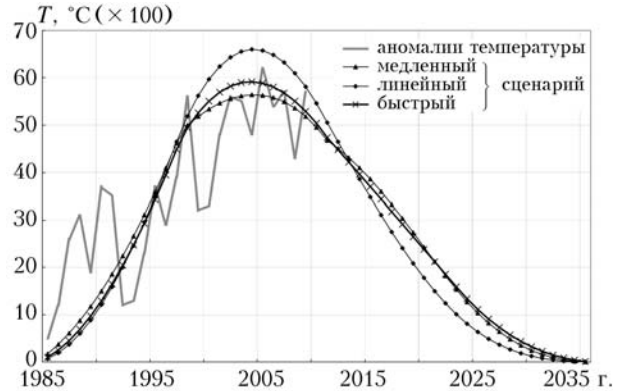


Рис. 4. Перспективная оценка аномалии температуры нижней тропосферы моделью (4)

В силу закона сохранения энергии любые изменения годовых значений альbedo Земли оставляют свой след в геосферах: температура верхнего и глубинного слоев гидросферы, температура приземной тропосферы, объем и площадь криосферы, уровень Мирового океана, высота снеговой линии. Почему бы не попытаться реконструировать годовые аномалии альbedo Земли по перечисленным параметрам, т.е. решить задачу, обратную к модели (1)? Известны и попытки такого рода, например нестационарная модель энергетического баланса Земли Винникова–Гройсмана [10], в которой авторы оценили динамику альbedo Земли по аномалиям температуры приземной атмосферы и оптическим свойствам атмосферы. В случае успешного решения поставленной проблемы ряд данных по альbedo Земли увеличится в 4–5 раз, что позволит перейти к моделированию межгодовой изменчивости альbedo с учетом внутренних и внешних факторов и впоследствии к надежным прогнозам климатических изменений.

Подведем итог. Если процесс возвращения альbedo к норме продолжится, то появление тренда на уменьшение средней годовой температуры приземной атмосферы с темпом примерно  $-0,25$  °C за 10 лет станет неоспоримым фактом в ближайшее время (рис. 4).

1. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л.: ГОНТИ, 1939. 194 с.
2. Завалишин Н.Н. Оценка влияния смещения Солнца от центра инерции на температуру тропосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 31–33.
3. Завалишин Н.Н. Модель зависимости температуры приземной атмосферы от альbedo Земли и тепловой инерции гидросферы // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 480–484.
4. <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata/GLB.Ts+dSST.txt>
5. Goode P.R., Palle E. Shortwave forcing of the Earth's climate: Modern and historical variations in the Sun's irradiance and the Earth's reflectance // J. Atmos. and Sol-Terr. Phys. 2007. V. 69, N 13. P. 1556–1568.
6. Palle E., Goode P.R., Montanes-Rodriguez P. Interannual variations in Earth's reflectance 1999–2007 // [http://bbo.njit.edu/Research/EarthShine/literature/Palle\\_et\\_al\\_2008\\_JGR.pdf](http://bbo.njit.edu/Research/EarthShine/literature/Palle_et_al_2008_JGR.pdf)

7. Головки В.А., Пахомов Л.А., Успенский А.Б. Исследование поля уходящего излучения Земли с помощью сканирующего радиометра радиационного баланса на российских спутниках серии «Метеор» и «Ресурс» // Электрон. ж. «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ». URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/106.pdf>
8. Головки В.А. Современный энергетический дисбаланс Земли. Доказательство существования и возможные последствия. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/pres2006/golovko.pdf>
9. *Palle E., Goode P.R., Montanes-Rodriguez P., Koornin S.E.* Can Earth's Albedo and Surface Temperatures Increase Together? // EOS Trans. AGU. 2006. V. 87, N 4. P. 37–43.
10. *Переведенцев Ю.П.* Теория климата. Казань: Казанский гос. ун-т, 2009. 504 с.

*N.N. Zavalishin. Long-term evaluation by the low troposphere temperature in the albedo-temperature model.*

The paper presents a general scheme of the Earth's annual energy imbalance, which served as a basis for development of the model, linking the average annual near-surface atmospheric temperature with planetary albedo and thermal inertia of the hydrosphere. The period from 1951 to 1980 was shown to be the most appropriate for computing the standards for hydrometeorological elements. The model, calculated variations in the surface temperature, depending on the albedo change scenario and the type of the heat transfer from the lower to the upper layer of the hydrosphere, is made.