

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.90>**МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА К ИЗМЕНЕНИЯМ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Научная статья

Пархоменко В.П.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0002-9963-0496;¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии Наук, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (vparhom[at]yandex.ru)

Аннотация

Предложена глобальная зональная нестационарная энергобалансовая модель климата с совместным рассмотрением северного и южного полушарий, каждое со своими специфическими параметрами, в частности с зависящим от широты коэффициентом поглощения солнечной радиации, задаваемым из данных наблюдений. Расчёты проведены в режиме реального сезонного хода солнечной радиации, учета альbedo-температурной обратной связи через введение описания снежного покрова. Исследуется влияние на модельный климат изменения солнечной постоянной. Подтвержден классический результат, что и в этой постановке при уменьшении солнечной постоянной на 4% происходит лавинообразное смещение снеговой линии до экватора, и Земля полностью покрывается снегом и льдом (режим оледенения).

Ключевые слова: нестационарная энергобалансовая модель климата, численные эксперименты.**A MODEL STUDY OF GLOBAL CLIMATE SENSITIVITY TO CHANGES IN SOLAR RADIATION**

Research article

Parkhomenko V.P.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0002-9963-0496;¹ Federal Research Center "Informatics and Management" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (vparhom[at]yandex.ru)

Abstract

A global zonal non-stationary energy-balance model of the climate with a joint view of the northern and southern hemispheres, each with its own specific parameters, in particular with the latitude-dependent solar radiation absorption coefficient set from observational data, is proposed. Calculations are made in the mode of real seasonal course of solar radiation, taking into account the albedo-temperature feedback through the implementation of the description of the snow cover. The influence of changes in the solar constant on the model climate is examined. The classical result is confirmed that in this setting, when the solar constant decreases by 4%, an avalanche-like shift of the snow line to the equator occurs, and the Earth is completely covered with snow and ice (glaciation mode).

Keywords: non-stationary energy-balance model of climate, numerical experiments.**Введение**

Климатическая система включает атмосферу, океан (с морским льдом) и деятельный слой суши (почва и растительность) как взаимодействующие между собой блоки [1]. Неоднородность нагрева различных частей климатической системы солнечной радиацией, наличие влаги и вращение Земли приводит к появлению гидродинамических движений, тепловых и гидрологических процессов в атмосфере и океане.

Существует спектр моделей климата, от простейших точечных, предельно осреднённых, до сложнейших трехмерных, с развитыми блоками радиации, океана и атмосферы [2], [3]. Применение тех или иных из них зависит от поставленных задач. Особое место занимают модели, в которых параметризованы все гидродинамические процессы в атмосфере и океане. Они получили название энергобалансовых. Такой подход имеет глубокий физический смысл, так как позволяет исследовать важные обратные связи в климатической системе.

Параметризацию гидродинамических процессов естественно реализовывать путём термодинамического описания системы в целом. Адем [4], рассмотрев полную систему уравнений гидротермодинамики, впервые указал на возможность использования принципа энергетического баланса при описании климата. Эффективное развитие энергобалансовых моделей климата (ЭБМК) началось с пионерской работы М.И.Будыко [5], в которой впервые была учтена важнейшая сильная альbedo-температурная связь, определившая высокую чувствительность земного климата к изменениям притока тепла и возможности перехода климатической системы в состояние глобального оледенения.

При понижении приземной температуры увеличивается доля площади Земли, покрытой снегом и льдом, увеличивается количество отраженной в космос радиации (увеличивается альbedo земной поверхности и системы в целом) и температура еще более понижается. Эта альbedo-температурная обратная связь – положительная, она усиливает воздействие первоначальной причины.

Методы и принципы исследования

Климатическая система представлена в виде двух блоков: блок атмосферы и блок деятельного слоя (океан или почва – в зависимости от локализации блока). В предположении, что теплоёмкость атмосферы мала по сравнению с теплоёмкостью деятельного слоя, уравнение энергетического баланса климатической системы можно записать в виде [6]:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = s(1 - \alpha) - I - F$$

где T – температура приземного слоя атмосферы, c – теплоемкость деятельного слоя, t – время, s – поток солнечной энергии на верхней границе атмосферы, α – альbedo климатической системы, I – длинноволновое (тепловое) излучение в пространство, F – параметр, описывающий горизонтальный меридиональный суммарный турбулентный перенос тепла. В качестве независимой переменной использована величина $x = \sin \varphi$, где φ – географическая широта.

Гидродинамические потоки тепла F , в предположении макротурбулентной теплопроводности по типу законов Фурье, пропорциональны градиенту температуры $D_0(x)\nabla T(x)$, где D_0 – коэффициент макротурбулентной теплопередачи или диффузии. Количество тепла, покидающее единичную площадку данной широтной полосы за единицу времени, есть дивергенция указанной величины:

$$F = -\nabla D_0(x)\nabla T(x)$$

Окончательно получим следующую систему:

$$\begin{cases} c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{R^2} \frac{d}{dx} \left(D_0(x) (1 - x^2) \frac{dT}{dx} \right) - QS(x, t)(1 - \alpha) - A - BT \\ D_0(x) (1 - x^2) \frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_1, x_2} = 0 \end{cases}$$

Второе уравнение определяет отсутствие горизонтального макротурбулентного потока тепла в граничных точках x_1 и x_2 (южный и северный полюса, соответственно). Эти условия необходимы при использовании сферической системы координат, в которой на полюсах существуют особые точки, где пересекаются меридианы. Поток солнечной энергии на верхней границе атмосферы $s=Q S(x, t)$ представлен произведением солнечной постоянной Q на заданную функцию $S(x, t)$, определяющую распределение этого потока на Земле в зависимости от широты и времени года [7]. Комбинация $I=A+BT$ описывает поток теплового излучения в пространство [5]. Значения параметров A и B задаются из данных наблюдений, R – радиус Земли [5], [8].

Важной особенностью модели является наличие зависимости коэффициента поглощения $a = 1 - \alpha$ от температуры. Предполагается, что в тех областях, где температура атмосферы становится ниже -10°C , присутствует устойчивый снежный покров и коэффициент поглощения резко понижается до постоянной величины $a=0,395$ [5], [9]. В остальных областях коэффициент поглощения выше и определяется функциональной зависимостью от широты из данных наблюдений и в общем случае различен для северного и южного полушарий, в частности, моделирует наличие больших площадей океана в южном полушарии по сравнению с северным. Этот механизм эффективно описывает положительную альbedo-температурную обратную связь в климатической системе. По сравнению с классическим построением энергобалансовых моделей здесь предполагается совместное рассмотрение северного и южного полушарий, со своими параметрами, и использование реального сезонного хода солнечной радиации.

Основные результаты

Первый численный эксперимент в рамках модели был проведен для определения выхода на установившийся климат в условиях сезонного хода солнечной радиации. В качестве начальных условий использована постоянная нулевая температура атмосферы. Примерно через 4 расчетных года достигается стационарное состояние с меняющейся в соответствии с сезоном температурой и положением снеговой линии. Изменение среднеглобальной температуры атмосферы представлено на рис. 1а. На рис. 1б показаны сезонные изменения положения снеговой линии для северного полушария. В летний сезон снег полностью тает ($\sin \varphi = 1$), а в зимний граница расположена примерно на широте 60° . Период колебаний на рис.1 равен 1 году. Расчеты здесь и далее проведены для значения теплоемкости, соответствующей толщине деятельного слоя примерно 10 м [10].

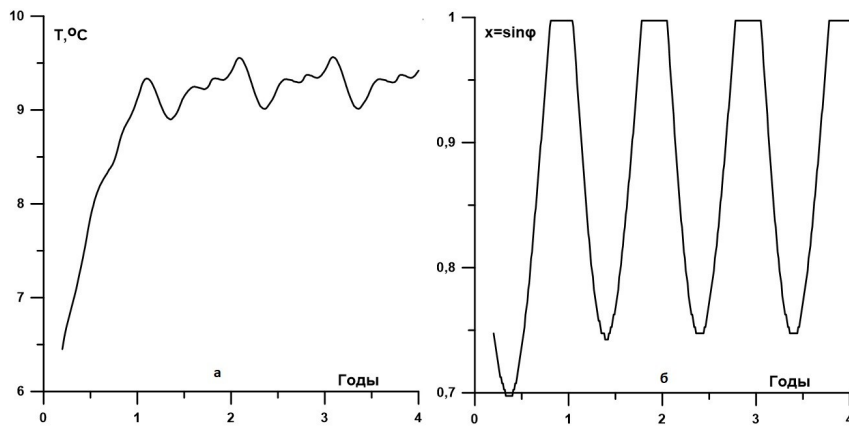


Рисунок 1 - Выход на установившийся сезонный режим климата:
 а - средне глобальная приземная температура атмосферы; б - положение снеговой линии
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.90.2>

В дальнейших расчетах исследуется влияние на модельный климат изменения солнечной постоянной Q . Расчеты ведутся с начальных условий, соответствующих установившемуся климатическому состоянию. На этапе 1 (рис. 2) происходит плавное уменьшение относительного значения солнечной постоянной (красные линия и шкала) во времени и координата снеговой линии (чёрная линия) в зимний период постепенно смещается к экватору. Для каждого фиксированного значения Q расчет ведется в течение 2-х лет. Колебания снеговой линии имеют период 1 год и соответствуют сезонным изменениям. При дальнейшем уменьшении Q снег даже в летний период присутствует в приполярных областях. При $Q = 0,96$ происходит лавинообразное смещение снеговой линии до экватора, и Земля полностью покрывается снегом и льдом (режим оледенения). При дальнейшем уменьшении Q температуры просто понижаются. На этапе 2 расчетов происходит постепенное увеличение Q , климат постепенно теплеет, но Земля по-прежнему полностью покрыта снегом и льдом и при $Q=1$. Всё начинает стремительно таять только при увеличении Q до значения 1,42 и Земля полностью освобождается от снега и льда, устанавливается бесснежный теплый период. Далее, на этапе 3, моделируем уменьшение Q , при этом постепенно появляются снежные области в зимние периоды и при $Q=1$ климат возвращается к исходному. Аналогичные результаты и выводы относятся и к южному полушарию (рис. 2). Всего расчеты проведены на период около 400 лет, на рис. 2 некоторые неинформативные промежутки времени опущены.

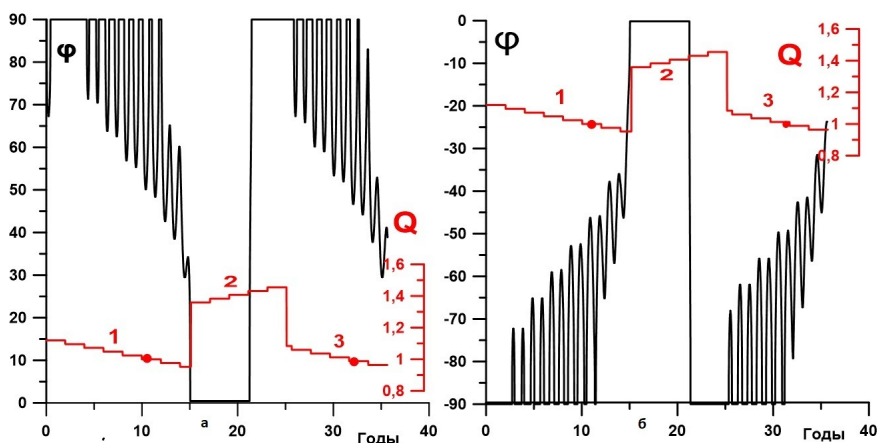


Рисунок 2 - Эволюция положения снеговой линии (чёрная линия) при изменении солнечной постоянной (красная линия):
 а - Северное полушарие; б - Южное полушарие

На рис. 3 приведены изменения во времени средне глобальных значений температуры при описанных выше изменениях Q . Отметим резкое понижение температуры при наступлении оледенения (период 1) и необходимое значительное её повышение в периоде 2 для начала таяния снега и льда и прекращения оледенения.

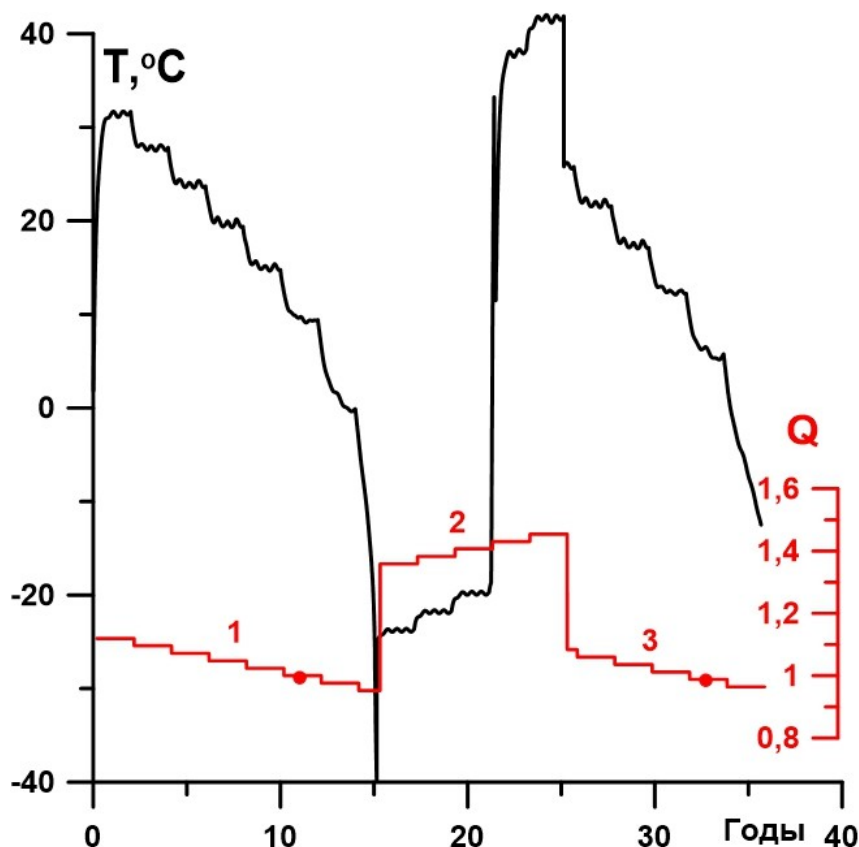


Рисунок 3 - Эволюция средне глобальной приземной температуры атмосферы (чёрная линия) при изменении солнечной постоянной (красная линия)

Заключение

По сравнению с классическим построением энергобалансовых моделей здесь введена эволюция во времени и совместное рассмотрение северного и южного полушарий, имеющих свои специфические характеристики, в частности зависящий от широты коэффициент поглощения солнечной радиации, задаваемый из данных наблюдений. Расчеты проведены в режиме реального сезонного хода солнечной радиации. Исследуется влияние на модельный климат изменения солнечной постоянной. Подтвержден классический результат, что и в этой постановке при уменьшении солнечной постоянной на 4% происходит лавинообразное смещение снеговой линии до экватора, и Земля полностью покрывается снегом и льдом (режим оледенения). Выход из этого режима наступает только при её увеличении на 40,2% по сравнению с современным значением.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика / Дж. Педлоски. — М.: Мир, 1984. — Т. 1. — 398 с.
2. Пархоменко В.П. Организация численных экспериментов на модели общей циркуляции атмосферы и глобальной модели океана. / В.П. Пархоменко // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2021. — 10. — с. 1693–1703. — DOI: 10.31857/S0044466921100148
3. Толстых М.А. Модели глобальной атмосферы и мирового океана: алгоритмы и суперкомпьютерные технологии / М.А. Толстых, Р.А. Ибраев — М.: МГУ, 2013. — 144 с.
4. Adem J. On the theory of the general circulation of the atmosphere. / J. Adem // Tellus. — 1962. — 14. — p. 102-115.
5. Будыко М.И. О происхождении ледниковых эпох. / М.И. Будыко // Метеорология и гидрология. — 1968. — 11. — с. 3-12.
6. Stocker T.F. The Role of Simple Models in Understanding Climate Change. / T.F. Stocker // Continuum Mechanics and Applications in Geophysics and the Environment; edited by B. STRAUGHAM, R. GREVE, H. EHRENTAUT, Y. WANG — N-Y.: Springer Verlag, 2001. — p. 337-367.
7. Монин А.С. Введение в теорию климата / А.С. Монин — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 296 с.

8. Parkhomenko V.P. Numerical 3-d model experiments on global climate sensitivity to solar constant variations. / V.P. Parkhomenko // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — 1391. — DOI: 10.1088/1742-6596/1391/1/012082
9. Пархоменко В.П. Анализ чувствительности арктического морского ледового покрова в глобальной климатической модели. / В.П. Пархоменко // Наука и образование. — 2014. — 3. — с. 372-387.
10. Мошонкин С.Н. Циркуляционные механизмы стабилизации региональной динамики деятельного слоя океана. / С.Н. Мошонкин, В.Б. Залесный, А.В. Гусев и др. // Океанологические исследования. — 2019. — 2. — с. 198-219.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Pedloski Dzh. Geofizicheskaya gidrodinamika [Geophysical Hydrodynamics] / Dzh. Pedloski. — М.: Mir, 1984. — Vol. 1. — 398 p. [in Russian]
2. Parxomenko V.P. Organizaciya chislenny'x e'ksperimentov na modeli obshhej cirkulyacii atmosfery' i global'noj modeli okeana [Organization of Numerical Experiments with an Atmospheric General Circulation Model and an Ocean Global Model]. / V.P. Parxomenko // Zhurnal vy'chislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki [Computational Mathematics and Mathematical Physics]. — 2021. — 10. — p. 1693–1703. — DOI: 10.31857/S0044466921100148 [in Russian]
3. Tolsty'x M.A. Modeli global'noj atmosfery' i mirovogo okeana: algoritmy' i superkomp'yuterny'e tekhnologii [Models of the global atmosphere and the world ocean: algorithms and supercomputer technologies] / M.A. Tolsty'x, R.A. Ibraev — М.: MGU, 2013. — 144 p. [in Russian]
4. Adem J. On the theory of the general circulation of the atmosphere. / J. Adem // Tellus. — 1962. — 14. — p. 102-115.
5. Budy'ko M.I. O proisxozhdenii lednikovyx e'pox [On the origin of the glacial epochs]. / M.I. Budy'ko // Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]. — 1968. — 11. — p. 3-12. [in Russian]
6. Stocker T.F. The Role of Simple Models in Understanding Climate Change. / T.F. Stocker // Continuum Mechanics and Applications in Geophysics and the Environment; edited by B. STRAUGHAM, R. GREVE, H. EHRENTAUT, Y. WANG — N-Y.: Springer Verlag, 2001. — p. 337-367.
7. Monin A.S. Vvedenie v teoriyu klimata [Introduction to Climate theory] / A.S. Monin — L.: Gidrometeoizdat, 1982. — 296 p. [in Russian]
8. Parkhomenko V.P. Numerical 3-d model experiments on global climate sensitivity to solar constant variations. / V.P. Parkhomenko // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — 1391. — DOI: 10.1088/1742-6596/1391/1/012082
9. Parxomenko V.P. Analiz chuvstvitel'nosti arkticheskogo morskogo ledovogo pokrova v global'noj klimaticheskoy modeli [Sensitivity analysis of the Arctic sea ice cover in the global climate model]. / V.P. Parxomenko // Nauka i obrazovanie [Science and education]. — 2014. — 3. — p. 372-387. [in Russian]
10. Moshonkin S.N. Cirkulyacionny'e mexanizmy' stabilizacii regional'noj dinamiki deyatel'nogo sloya okeana [Circulation mechanisms of stabilization of regional dynamics of the active ocean layer]. / S.N. Moshonkin, V.B. Zalesny'j, A.V. Gusev et al. // Okeanologicheskie issledovaniya [Oceanological research]. — 2019. — 2. — p. 198-219. [in Russian]