

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ИФЖ

И
**НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

**Отдельный оттиск
Offprint**

**Том 95, № 2
Vol. 95, No. 2**

МАРТ–АПРЕЛЬ
MARCH–APRIL

2022

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в январе 1958 г.

2022. ТОМ 95, № 2 (МАРТ–АПРЕЛЬ)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА

Цирлин А. М., Гагарина Л. Г. Расчет теплообмена для потоков с переменной теплоемкостью	289
Смутьский И. И. Палеотемпературы поверхности Земли.	
1. Определение среднегодовой температуры Земли и полушарий	298
Смутьский И. И. Палеотемпературы поверхности Земли.	
2. Определение среднеширотной приповерхностной теплоемкости Земли	306
Ушаков А. А., Орлов А. А., Совач В. П. Накопление компонентов изотопной смеси в разделительном каскаде.....	316

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Фираго В. А. Коррекция сигналов микроболометрической матрицы, обеспечивающая повышение достоверности изменения температуры объектов. Часть 2	323
Ефимов К. Н., Овчинников В. А., Якимов А. С. Численное моделирование термоэлектронной тепловой защиты при высокосубзвуменном обтекании многослойной оболочки	335
Соловьев С. В. Моделирование конвективного теплопереноса в сферическом слое электропроводной жидкости при подводе и отводе тепла	350
Рудобашта С. П., Карташов Э. М., Зуева Г. А. ИК-сушка пластины в непрерывно действующем электромагнитном поле.....	364
Формалев В. Ф., Карташов Э. М., Колесник С. А. Волновой теплоперенос в анизотропном полупространстве под действием точечного источника теплоты экспоненциального характера на основе волнового уравнения параболического типа	373
Мацевитый Ю. М., Стрельникова Е. А., Повгородный В. О., Сафонов Н. А., Ганчин В. В. К решению обратных задач теплопроводности и термоупругости.....	381
Redko A., Redko O., Kulikova N., Pavlovskiy S., and DiPippo R. Rational Thermodynamic Parameters of Multistage Power Cycles Appropriate for Low-to-Moderate Geothermal Resources.....	387
Babitha and Madhura K. R. Analysis of Thermal Performance, Efficiency, and Effectiveness of a Straight Porous Fin with Variable Thermal Conductivity	399

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Сергеев Д. А., Кандауров А. А., Стуленков А. В., Суворов А. С. Лабораторное моделирование процессов возбуждения звука автоколебательными режимами в течениях в трубопроводах систем теплообмена	408
Волков К. Н., Емельянов В. Н., Чернышов П. С. Газодинамические и акустические характеристики струи, истекающей из конического сопла в затопленное пространство.....	416
Дмитриев А. В., Фарахов М. М., Хафизова А. И., Дмитриева О. С., Мадышев И. Н., Гилязов А. Д., Ахмитшин А. А. Исследование процесса взаимодействия жидкости и газа в струйно-плечном контактном устройстве	428
Матвиенко О. В., Мартынов П. С. Математическое моделирование теплопереноса и химического реагирования в закрученном потоке равновесно-диссоциирующего газа	435
Богданов В. И., Хантлин Д. С. Выходные устройства с резонаторами-усилителями тяги для реактивных двигателей	448
Албагачиев А. Ю., Холин Н. Н. Высокоскоростное проникание вязкоупругого стержня в металлическую преграду.....	459

Танашева Н. К., Бахтыбекова А. Р., Шаймерденова Г. М., Сакипова С. Е., Шуюшбаева Н. Моделирование аэродинамических характеристик ветроэнергетической установки с вращающимися цилиндрическими лопастями на основе пакета ANSYS	465
Суров В. С. К расчету течений гетерогенных сред многомерным узловым методом характеристик.....	471

ТЕПЛОПЕРЕНОС ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

Федорович Е. Д., Коваленко А. Н., Макухин С. С. Моделирование капиллярного подсоса жидкости к сухим пятнам под паровыми пузырями как фактора повышения критической плотности теплового потока при кипении на пористой поверхности.....	481
---	-----

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Долгунин В. Н., Куди А. Н., Тараканов А. Г. Структурная неоднородность и эффекты сепарации по размеру и плотности при гравитационном течении зернистых материалов	492
Крючков Ю. Н. Оценка параметров пористой структуры порошковых материалов	504
Келбалиев Г. И., Расулов С. Р., Тагиев Д. Б. Моделирование процессов гидравлической диффузии и фильтрации нефти в пористом пласте	508

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА

Ни А. Э. Гибридная LBGK-FD модель для исследования турбулентной естественной конвекции	518
---	-----

НАНОСТРУКТУРЫ

Гузей Д. В., Минаков А. В., Рудяк В. Я. Численное моделирование вынужденной конвекции наножидкости при ее ламинарном течении с учетом термодиффузии	526
Махманов У. К. Рефрактивные и электрофизические свойства дисперсных растворов фуллерена C ₆₀ в двухкомпонентных растворителях	537
Okafor Anthony Amaechi and Mgbemena Chinedum Ogonna Preparation of Hybrid Nanofluids, Their Thermophysical Properties, and Stability Parameters	543

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Щемелёв А. П., Самуйлов В. С., Голубева Н. В., Поддубский О. Г. Термодинамические свойства жидкой смеси циклогексан + декалин при температурах 298.15–433.15 К и давлениях до 100 МПа.....	549
---	-----

РАЗНОЕ

Дубинов А. Е., Тараканов В. П. Влияние проводимости стенок резонатора на характеристики СВЧ-генератора с виртуальным катодом: численные эксперименты	562
--	-----

Ответственный за выпуск: Л. Н. Шемет

Подписано в печать 01.03.2022. Формат 60×84%. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 32,43. Уч.-изд. л. 29,93. Тираж 64 экз. Заказ № 32

Отпечатано в Республиканском унитарном предприятии "Издательский дом "Беларуская навука".
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/18 от 02.08.2013.
ЛП № 02330/455 от 30.12.2013.

220141, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 40

© Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси

УДК 551.581+551.583+523.2

*И. И. Смольский***ПАЛЕОТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ.****1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМЛИ И ПОЛУШАРИЙ**

Представлены функциональные зависимости для определения распределения среднегодовой температуры и годовой инсоляции по широте Земли.

Ключевые слова: *среднеширотная температура, годовая инсоляция, палеоклимат.*

Введение. Солнце освещает Землю и в зависимости от количества тепла устанавливается температура ее поверхности: в экваториальных широтах она наибольшая, а в полярных — наименьшая. Поскольку параметры орбитального и вращательного движения Земли эволюционируют, то распределение солнечного тепла по ее поверхности изменяется со временем. Согласно новой астрономической теории климата [1] эти изменения таковы, что в одни эпохи в высоких широтах количество тепла, поступающего за летнее полугодие, больше, чем сейчас на экваторе. Тогда наступает теплый период, тают ледники Гренландии и Антарктиды, поднимается уровень моря. В другие эпохи в высоких широтах (от 90 до 55°) летом поступает меньше тепла, чем сейчас на полюсе. Выпавший зимой снег не успевает растаять и образуется ледник, т. е. наступает ледниковый период. Вода накапливается в полярных ледниках и уровень океана понижается. Распределение тепла по широте Земли в указанные эпохи точно рассчитывается. Поэтому, если известна зависимость температуры поверхности Земли от количества солнечного тепла, то по ней можно рассчитать температуру поверхности Земли и в другие эпохи.

В астрономической теории изменения климата рассматриваются распределения количества тепла по широте Земли за летнее и зимнее полугодия и за год в целом. Они изменяются на интервалах времени в десятки тысяч лет. За промежутки времени, исчисляемые годами, инсоляция Земли практически не изменяется. Температуры за полугодия и за год изменяются от года к году в небольших пределах. Поэтому рассчитываются их средние значения за несколько десятилетий. В настоящей работе рассматривается распределение среднегодовой температуры Земли по ее широте и связь этого распределения с распределением годовой инсоляции Земли.

Существуют методы оценки палеотемпературы [2, 3] с использованием различных предположений, не имеющих такой строгой количественной основы как инсоляция Земли. Поэтому рядом исследователей предпринимались попытки найти функциональную зависимость температуры Земли от ее инсоляции. М. Миланкович на основе физических законов радиационного теплопереноса создал теорию, которая позволяет по инсоляции Земли определить распределение температуры Земли по ее широте за летнее и зимнее полугодия и за год в целом [4]. Он установил, что при неподвижной атмосфере и однородной земной поверхности температура Земли изменяется от 32.8°С на экваторе до –34.8°С на полюсах. Однако определить температуру реальной Земли таким способом затруднительно. Поэтому предпринимаются попытки установить корреляционную зависимость между массивом данных по наблюдаемой температуре Земли и ее инсоляцией [5].

Изменение среднегодовой температуры приповерхностного слоя Земли по ее широте называют меридиональным распределением средней зональной температуры, средней зональной температурой, нормальной температурой или среднеширотной температурой. В настоящей работе эта температура рассматривается как математическая функция широты φ , поэтому она упоминается как распределенная по

Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН. 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86; э-почта: jsmulsky@mail.ru. Поступила 10.08.2020.

широте величина или среднеширотная температура. Определение распределения температуры Земли по ее широте $t(\varphi)$ является сложной задачей, отягощаемой многими обстоятельствами [5, 6].

На протяжении последних 170 лет работы по анализу температурных рядов и по определению среднеширотной температуры Земли проводились многими исследователями [6–23]. G. Kramm et al. нанесли 15 профилей среднеширотной температуры Земли на общий график [6], на основании которого нами предложена обобщенная среднегодовая температура Земли t_{oi} (рис. 1). J. Forbes предложил формулу для распределения температуры Земли по ее широте в Северном полушарии [8]:

$$t_F(\varphi) = A + B(\cos \varphi)^m + Cn \cos 2\varphi, \quad (1)$$

где $A = -10.8^\circ\text{C}$, $B = 32.9^\circ\text{C}$, $C = 21.2^\circ\text{C}$ и $m = 1.25$.

При этом коэффициент $n = 1$, если поверхность Земли является сушей, и $n = 0$ для Земли, полностью покрытой океаном. Из рис. 1 видно, что изменения температуры суши от полюсов до экватора в два раза больше, чем изменения температуры Земли, покрытой океаном. На широте 45° значения обобщенной среднегодовой температуры Земли t_{oi} совпадают с аналогичными значениями, определенными по формуле (1). По аналогии с зависимостью (1) нами была построена функциональная зависимость, состоящая из двух гармоник,

$$t_{o,a} = k_1 + k_2 \sin(k_3\varphi + k_4) + k_5 \sin(k_6\varphi + k_7), \quad (2)$$

которая аппроксимирует среднегодовую температуру t_{oi} , где $k_1 = -48.841^\circ\text{C}$, $k_2 = 47.840^\circ\text{C}$, $k_3 = 0.12389$, $k_4 = 0.81818$, $k_5 = 40.602^\circ\text{C}$, $k_6 = 1.2165$ и $k_7 = 1.6566$. Среднее отличие $t_{o,a}$ от индексированной годовой температуры t_{oi} составляет 0.44°C , а наибольшее — 2°C на широте $\varphi = 20^\circ$. Из рис. 1 следует, что на широтах Северного полушария от 10° до 30° годовая температура на $1\text{--}2^\circ\text{C}$ выше по сравнению с теми же широтами Южного полушария. По-видимому, это обусловлено тем, что в Северном полушарии сушей занята большая часть поверхности Земли по сравнению с Южным полушарием. В дальнейшем в качестве среднегодовой приповерхностной температуры Земли в современную эпоху будем использовать индексированную температуру t_{oi} . С целью проверки различных вычислений будем также применять аппроксимирующую зависимость (2).

Среднегодовая температура Земли и полушарий. Пусть имеется величина f , распределенная по широте Земли φ . Найдем ее среднее значение по всей поверхности Земли и по полушариям. Используем сферическую модель Земли со средним радиусом $R_{E,m} = (R_{E,e} + R_{E,p})/2 = 6367.5$ км, где $R_{E,e} = 6378.1$ км и $R_{E,p} = 6356.8$ км — экваториальный и полярный радиусы Земли. Рассмотрим полосу на широте φ шириной $\Delta\varphi$, длиной $2\pi R_{E,m} \cos \varphi$ и площадью

$$\Delta F = 2\pi R_{E,m} \cos \varphi R_{E,m} \Delta\varphi.$$

Вводя обозначение

$$\Delta S = f \Delta F = 2\pi f R_{E,m}^2 \cos \varphi \Delta\varphi,$$

среднее значение функции f_E по всей поверхности Земли $4\pi R_{E,m}^2$ можно представить в виде

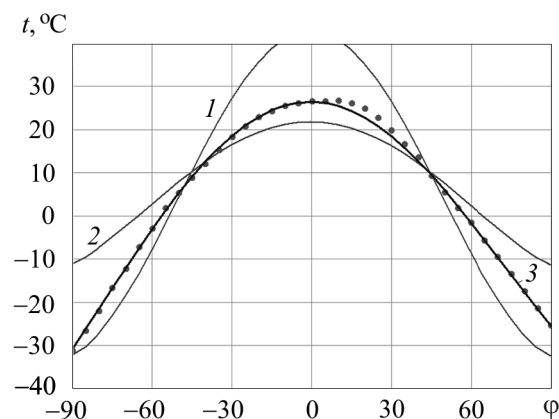


Рис. 1. Сравнение обобщенной среднегодовой температуры t_{oi} (точки) с температурами, определенными по зависимостям (1) (1, 2) и (2) (3): 1 — твердая поверхность Земли; 2 — поверхность Земли, покрытая водой

$$f_E = \left(\int_{-0.5\pi}^{0.5\pi} \Delta S d\varphi \right) / 4\pi R_{E,m}^2 = 0.5 \int_{-0.5\pi}^{0.5\pi} f \cos \varphi d\varphi, \quad (3)$$

где угол φ изменяется от отрицательных значений до положительных. Аналогично (3) запишем средние значения величины f для Южного и Северного полушарий:

$$f_{SH} = \int_{-0.5\pi}^0 f \cos \varphi d\varphi, \quad f_{NH} = \int_0^{0.5\pi} f \cos \varphi d\varphi. \quad (4)$$

Воспользуемся формулами (3) и (4) для определения средних по поверхности Земли температур. Для температуры в виде индексированной переменной t_{oi} вместо интегрирования на бесконечно малом приращении широты $d\varphi$ используем суммирование на небольших интервалах $\Delta\varphi$. При этом температура t_{oi} и широта φ_i должны относиться к середине интервала $\Delta\varphi$. Тогда, согласно (3), средняя по поверхности Земли температура будет определяться как

$$t_{o,E} = 0.5 \sum_{i=1}^{I_{f,2}} t_{oi} \cos \varphi_i \Delta\varphi_i, \quad (5)$$

где $i = 1, 2, \dots, I_{f,2}$, $I_{f,2}$ — целое число интервалов $\Delta\varphi$, $\Delta\varphi = 180^\circ / I_{f,2}$, $\varphi_1 = -0.5 \cdot 180^\circ + 0.5\Delta\varphi$, $\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta\varphi$. При указанном значении φ_1 широта φ_i и значение температуры t_{oi} вычисляются для середины разности широт $\Delta\varphi$. Аналогично (4) и (5) запишем средние по поверхности температуры полушарий:

$$t_{o,SH} = \sum_{i=1}^{0.5I_{f,2}} t_{oi} \cos \varphi_i \Delta\varphi, \quad t_{o,NH} = \sum_{i=0.5I_{f,2}+1}^{I_{f,2}} t_{oi} \cos \varphi_i \Delta\varphi. \quad (6)$$

Для аппроксимационной зависимости $t_{o,a}$ (2) среднюю температуру Земли определим интегрированием выражения (3). После подстановки (2) в (3) имеем

$$t_{o,E,a} = 0.5 \int_{-0.5\pi}^{0.5\pi} k_1 \cos \varphi d\varphi + 0.5k_2 J_1 + 0.5k_5 J_2, \quad (7)$$

$$J_1 = \int_{-0.5\pi}^{0.5\pi} \sin(k_3\varphi + k_4) \cos \varphi d\varphi, \quad J_2 = \int_{-0.5\pi}^{0.5\pi} \sin(k_6\varphi + k_7) \cos \varphi d\varphi.$$

Интегралы J_1 и J_2 могут быть двукратно взяты по частям. После их взятия температура Земли по аппроксимационной зависимости (2)

$$t_{o,E,a} = k_1 + 0.5k_2 \frac{\sin(0.5\pi k_3 + k_4) + \sin(-0.5\pi k_3 + k_4)}{1 - k_3^2} +$$

$$+ 0.5k_5 \frac{\sin(0.5\pi k_6 + k_7) + \sin(-0.5\pi k_6 + k_7)}{1 - k_6^2}. \quad (8)$$

Аналогичным образом может быть получена среднегодовая температура полушарий.

По выражениям (5) и (6) были рассчитаны средние температуры Земли и полушарий в терминах обобщенной температуры t_{oi} . Расчет проводится для $I_{f,2} = 90$, т. е. через 2° широты. Изначально температура t_{oi} определялась через 5° , поэтому ее значения в промежуточных точках определялись параболической интерполяцией. Получены следующие значения средней температуры:

$$t_{o,E} = 14.41^\circ\text{C}, \quad t_{o,NH} = 15.10^\circ\text{C}, \quad t_{o,SH} = 13.73^\circ\text{C}. \quad (9)$$

Средняя температура Земли, определенная по аппроксимационной зависимости (8), $t_{0,E,a} = 14.07^{\circ}\text{C}$, т. е. она немного меньше температуры $t_{0,E}$. Это обусловлено тем, что аппроксимационная зависимость (2) (линия 3 на рис. 1) не учитывает избыток температуры t_{0i} на широтах от 10 до 30° Северного полушария. Значения температур (9) практически не отличаются от средней температуры Земли и полушарий, определенных в период с 1991 по 2018 гг. [6, 25–27], поэтому можно считать, что обобщенное распределение температуры по широте Земли $t_{0,i}$, основанное на всех имеющихся исследованиях, достоверно отображает широтное изменение температуры в современную эпоху.

Инсоляция Земли. Под инсоляцией Земли понимается количество тепла, поступающего от Солнца на 1 м^2 земной поверхности за определенный период времени, например, за летнее (Q_s) или зимнее (Q_w) полугодия или за год в целом (Q_t). Будем рассматривать годовую инсоляцию Q_t . Первый вариант астрономической теории изменения климата, созданной почти 100 лет назад М. Миланковичем [4], не учитывал эволюцию вращательного движения Земли. Поэтому изменения инсоляции Земли в этом варианте не могли объяснить изменения палеоклимата [28, 29]. В новой астрономической теории [1, 30, 31] изменения инсоляции определялись с учетом эволюции вращательного движения Земли [32]. Полученные в ней колебания инсоляции как по амплитудам, так и по моментам наступления потеплений и похолоданий совпадают с соответствующими изменениями палеоклимата [30].

В работах [1, 31] установлено, что в разные эпохи годовая инсоляция Q_t значительно изменяется по широте. Однако на широте 45° она практически не изменяется и с точностью до 4-х знаков равна $Q_{t0}^{45} = 9.932 \cdot 10^6$ кДж/м². Поэтому величина Q_{t0}^{45} может быть принята за характеристику облучения Земли Солнцем. Следует отметить, что это значение Q_{t0}^{45} получено для солнечной постоянной $J_0 = 2$ кал/(см² · мин) = 1.3956 кВт/м², которое было использовано М. Миланковичем. В настоящей работе также используется это значение для сопоставления полученных результатов. Отметим, что в качестве космического абсолютного радиометрического эталона (SARR) принято значение солнечной постоянной $J_0 = 1.36622$ кВт/м² [33].

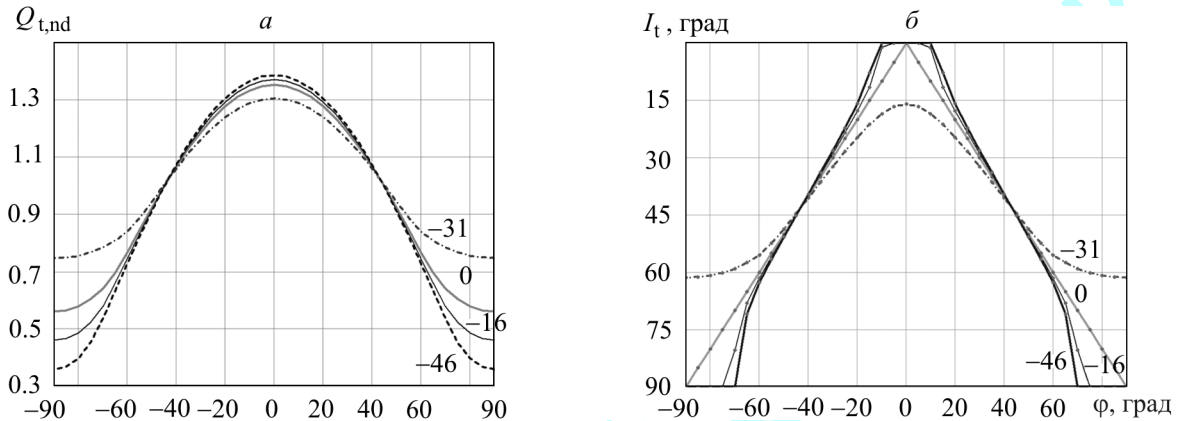
В дальнейшем будем рассматривать годовую инсоляцию в безразмерных единицах $Q_{t,nd} = Q_t/Q_{t0}^{45}$. На рис. 2, а безразмерная годовая инсоляция $Q_{t,nd}$ показана для современной эпохи ($T = 0$ кур) и эпох $T = -15.88, -31.28$ и 46.44 кур, где 1 кур — 1 тыс. лет. Последние эпохи характеризуются тем, что в них были существенные изменения инсоляции [30]. Как следует из рис. 2, а, величина $Q_{t,nd}$ в высоких широтах, в частности, на полюсах, изменяется от 0.361 для очень холодного периода 46.44 тысяч лет назад (т.л.н.) до 0.748 для очень теплого периода 31.28 т.л.н., т. е. больше чем в два раза. На экваторе изменения количества тепла за год значительно меньшие: от $Q_{t,nd} = 1.306$ в теплую эпоху 31.28 т.л.н. до $Q_{t,nd} = 1.388$ в ледниковый период 46.44 т.л.н. Это изменение имеет обратное направление, т. е. в экваториальных широтах в холодные эпохи становится теплее. Как видим, основные изменения тепла проходят в высоких широтах.

М. Миланкович ввел летнюю инсоляцию I в эквивалентных широтах [4]. Такие же инсоляции в эквивалентных широтах за год I_t и для зимнего полугодия I_w были введены в [34]. На рис. 2, б для этих же четырех эпох, что и на рис. 2, а, приведены годовые инсоляции в эквивалентных широтах I_t . Градусы широты I_t по вертикальной оси отложены в обратном порядке: 0° — вверху и 90° — внизу, т. е. верхние значения относятся к теплым периодам, а нижние — к холодным. Как видно из рис. 2, б, в современную эпоху ($T = 0$ кур) инсоляция I_t отображается прямыми линиями, идущими по диагонали. Инсоляции I_t в другие эпохи, находящиеся под этими линиями, свидетельствуют о более холодном климате, а находящиеся над ними — о более теплом климате. Например, в эпоху 31.28 т.л.н. годовая инсоляция I_t на широтах 90 – 70° находится вблизи 60° , т. е. в эту эпоху на полярных широтах климат был такой, как сейчас на широте 60° . Инсоляция в эквивалентных широтах определяется по количеству тепла Q . Алгоритм ее вычисления для летнего периода приведен в [35, 36], а для зимнего полугодия и для года — в [34].

Годовая инсоляция $Q_{t,nd}(\varphi)$ — это удельное количество солнечного тепла, приходящегося в течение года на единицу площади (1 м^2) Земли на широте φ . Определим удельное количество тепла для всей Земли ($Q_{t,nd,E}$) и для Северного ($Q_{t,nd,NH}$) и Южного ($Q_{t,nd,SH}$) полушарий. Эти величины были рассчитаны по формулам (5) и (6), в которых вместо t_{0i} используется $Q_{t,nd}$. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица. 1. Удельные годовые инсоляции Земли и полушарий в четыре эпохи при $Q_{t0}^{45} = 9.932 \cdot 10^6$ кДж/м²

$T, \text{ kyr}$	$Q_{t,nd,E}$	$Q_{t,nd,NH}$	$Q_{t,nd,SH}$
0	1.108676	1.108627	1.108725
-15.88	1.108723	1.108670	1.108775
-31.28	1.108677	1.108634	1.108720
-46.44	1.108601	1.108546	1.108655

Рис. 2. Распределение годовых инсоляций $Q_{t,nd}$ (а) и I_t (б) по широте Земли в современную эпоху $T = 0$ куг (0) и в три экстремальные эпохи $T = -15.88$ (-16), -31.28 (-31) и -46.44 куг (-46)

Как видно из этой таблицы, во-первых, удельная годовая инсоляция Земли $Q_{t,nd,E}$ практически одинакова для всех эпох. В современную эпоху ($T = 0$ куг) она равна с точностью до 4-х десятичных знаков $Q_{t,nd,E,0} = 1.1087$. Изменения величины $Q_{t,nd,E}$ в другие эпохи не превосходят 0.01%. При этом в самую холодную эпоху ($T = -46.44$ куг) она меньше $Q_{t,nd,E,0}$ на 0.0001. Во-вторых, безразмерная удельная годовая инсоляция Земли $Q_{t,nd,E,0}$ составляет 1.1087 инсоляции на широте 45° , т. е. размерная удельная годовая инсоляция равна

$$Q_{t,E,d} = 1.1087 Q_{t0}^{45}. \quad (10)$$

В-третьих, удельная годовая инсоляция по полушариям практически не отличается от $Q_{t,nd,E,0}$ для всех эпох, за исключением Северного полушария самой холодной эпохи 46.44 т.л.н., где она на 0.0002 меньше. Следует также отметить, что для Южного полушария в рассматриваемые четыре эпохи $Q_{t,nd,SH}$ на 0.0001 выше, чем $Q_{t,nd,NH}$ для Северного полушария. Однако этот результат получен для четырех эпох, три из которых являются экстремальными, поэтому его нельзя распространить на все эпохи.

Общее количество солнечного тепла за год в размерном виде по всей поверхности Земли $4\pi R_{E,m}^2$ равно

$$Q_{t,E,d} = 4\pi R_{E,m}^2 Q_{t,nd,E,0} Q_{t0}^{45} = 5.6105 \cdot 10^{21} \text{ кДж/год}. \quad (11)$$

Входящие в (11) величины $Q_{t,nd,E,0}$ и Q_{t0}^{45} определены в результате суммирования суточных инсоляций за одно обращение Земли по орбите по отношению к Солнцу, т. е. за тропический год $P_{tr} = 365.24219879$ дней. Суточная инсоляция определяется с учетом расстояния Земли от Солнца, угла падения солнечных лучей на площадку земной поверхности на широте ϕ и длительности светового дня.

Общее количество тепла за год можно рассчитать и по-другому. Радиационный поток от Солнца поступает на диаметрально сечение Земли $\pi R_{E,m}^2$. Поэтому она за год P_{tr} получит количество тепла

$$Q_{t,E,d,D} = J_0 P_{tr,sc} \pi R_{E,m}^2, \quad (12)$$

где $P_{tr,sc} = P_{tr}(24 \cdot 3600)$ — тропический год в секундах.

Определим соотношение между поступлениями тепла по сферической поверхности Земли (11) и по ее диаметральному сечению (12):

$$k_{sD} = \frac{Q_{t,E,d}}{Q_{t,E,d,D}} = \frac{4Q_{t,E,0}Q_{t,0}^{45}}{J_0 P_{tr,sc}} = 1.00013. \quad (13)$$

Как видим из (13) значение k_{sD} практически не отличается от 1. Поэтому общее количество тепла, поступающего на Землю от Солнца, можно определять по простой зависимости (12) с погрешностью до 0.01%. Распределение по широте температуры t_{oi} и безразмерных инсоляций $Q_{t,nd}$ приведено в табл. 2.

Таблица 2. Распределение по широте Земли ϕ среднегодовой приповерхностной температуры Земли t_{oi} в современную эпоху (30.12.1949 г.), относительной теплоемкости $C_{\phi,i}$ и безразмерных годовых инсоляций $Q_{t,nd}$ в пять эпох T , при $Q_{t0}^{45} = 9.932$ ГДж/м² и $J_0 = 1.3956$ кВт/м² = 2 кал/(см² · мин); время T отсчитывается от 30.12.1949 г.

i	ϕ_i°	$t_{oi}, ^\circ\text{C}$	$C_{\phi,i}, 1/^\circ\text{C}$	Безразмерная инсоляция $Q_{t,nd}$ в эпохи T , кур				
				0	–4.16	–15.88	–31.28	–46.44
1	90	–25.3	0.0082387	0.561598	0.565376	0.461674	0.748198	0.360717
2	85	–21.30	0.0098134	0.566225	0.569951	0.468165	0.750422	0.369929
3	80	–17.42	0.0115919	0.580347	0.583889	0.488071	0.757192	0.398582
4	75	–13.45	0.0137756	0.604734	0.607949	0.523033	0.768796	0.451937
5	70	–9.44	0.0167250	0.641215	0.643904	0.579104	0.785794	0.538128
6	65	–5.59	0.0180904	0.696186	0.697851	0.659872	0.809206	0.633598
7	60	–1.48	0.0196409	0.769922	0.770953	0.747047	0.841166	0.730021
8	55	1.87	0.0206529	0.848057	0.848684	0.834373	0.888389	0.824123
9	50	5.52	0.0210592	0.925603	0.925927	0.918946	0.945931	0.914011
10	45	9.33	0.0211920	0.999987	1.00007	0.998978	1.00500	0.99837
11	40	13.54	0.0211837	1.06956	1.06944	1.07320	1.06223	1.07619
12	35	16.62	0.0211034	1.13313	1.13285	1.14065	1.11567	1.14664
13	30	19.85	0.0209811	1.18980	1.18939	1.20053	1.16399	1.20902
14	25	22.82	0.0208439	1.23885	1.23832	1.25222	1.20622	1.26277
15	20	24.92	0.0206845	1.27971	1.27910	1.29520	1.24165	1.30740
16	15	26.19	0.0205113	1.31194	1.31126	1.32905	1.26972	1.34251
17	10	26.71	0.0202879	1.33519	1.33447	1.35345	1.29004	1.36781
18	5	26.63	0.0198350	1.34924	1.34849	1.36818	1.30235	1.38307
19	0	26.50	0.0204487	1.35394	1.35317	1.37310	1.30646	1.38817
20	–5	26.16	0.0210625	1.34924	1.34849	1.36818	1.30235	1.38307
21	–10	25.47	0.0206186	1.33519	1.33447	1.35345	1.29005	1.36781
22	–15	24.30	0.0204343	1.31194	1.31126	1.32905	1.26972	1.34251
23	–20	22.92	0.0203026	1.27971	1.27910	1.29520	1.24165	1.30740
24	–25	20.82	0.0201992	1.23885	1.23833	1.25223	1.20623	1.26278
25	–30	18.27	0.0200953	1.18980	1.18939	1.20054	1.16400	1.20903

Продолжение таблицы 2.

26	-35	15.33	0.0199759	1.13314	1.13286	1.14065	1.11568	1.14664
27	-40	12.03	0.0198210	1.06957	1.06945	1.07321	1.06224	1.07619
28	-45	8.91	0.0195934	0.999996	1.00008	0.998986	1.00501	0.998376
29	-50	5.38	0.0192368	0.925613	0.925937	0.918955	0.945943	0.914017
30	-55	1.79	0.0186257	0.848068	0.848694	0.834383	0.888402	0.824130
31	-60	-2.85	0.0174748	0.769933	0.770964	0.747057	0.841180	0.730029
32	-65	-7.20	0.0157645	0.696198	0.697863	0.659882	0.809221	0.633605
33	-70	-12.23	0.0139977	0.641227	0.643916	0.579115	0.785809	0.538135
34	-75	-16.54	0.0120398	0.604746	0.607962	0.523045	0.768812	0.451945
35	-80	-22.00	0.0095973	0.580360	0.583902	0.488082	0.757208	0.398590
36	-85	-26.49	0.0081760	0.566238	0.569964	0.468176	0.750438	0.369937
37	-90	-31.12	0.0069031	0.561611	0.565389	0.461686	0.748214	0.360725

Закключение. Предложен обобщенный профиль среднеширотной годовой температуры в современную эпоху. Рассчитаны средние температуры Земли и полушарий. Проанализированы профили годовой инсоляции в современную и в три экстремальные эпохи за последние 50 тыс. лет. Рассчитаны годовые инсоляции Земли и полушарий в разные эпохи и показана их неизменность во времени.

Работа выполнялась в рамках госзадания № НИОКТР АААА-А17-117051850061-9. Расчеты проводились на суперкомпьютерах ЦКП Сибирского суперкомпьютерного центра ИВМиМГ СО РАН.

Обозначения

D — диаметрально сечение Земли, км; J_0 — солнечная постоянная, кВт/м²; Q_t , Q_s и Q_w — инсоляции за год и за летний и зимний периоды, кДж/м²; R_E — радиус Земли, км; T — время, тыс. лет; t — температура, °C; t_{oi} — обобщенное распределение температуры по i -й широте по данным наблюдений; φ — широта. Индексы: а — аппроксимация; d — размерный; E — Земля; e — экваториальный; f — конечный; m — средний; nd — безразмерный (non-dimensional); NH и SH — Северное и Южное полушария; o — наблюдение; p — полярный; r — относительный; s — летний; t — полный; tr — тропический; w — зимний.

Литература

1. Смутьский И. И. *Новая астрономическая теория ледниковых периодов*. Рига: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018.
2. Никитин Д. С., Ахмедзянов В. Р., Демежко Д. Ю., Хуторской М. Д. Восстановление палеотемпературы земной поверхности на о. Южный (арх. Новая земля) по геотермическим данным. *Георесурсы*. 2019. Т. 21, № 3. С. 136–140.
3. Мухин Ю. В. К вопросу о палеотемпературах земной поверхности. *Докл. АН СССР*. 1978. Т. 238, № 1. С. 39–41.
4. Миланкович М. *Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата*. Москва–Ленинград: ГОНТИ, 1939.
5. Тартаковский В. А., Чередыко Н. Н., Максимов В. Г. Определение средней широтной температуры путем линейной трансформации астрономической инсоляции. *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32, № 11. С. 902–907.
6. Kramm G., Dlugi R., Berger M., and Molders N. Meridional distributions of historical zonal averages and their use to quantify the global and spheroidal mean near-surface temperature of the terrestrial atmosphere. *Nat. Sci.* 2020. Vol. 12. Pp. 80–124.
7. Dove H. W. *Verbreitung der Wärme auf der Oberfläche der Erde: Erlautert durch Isothermen, thermische Isanomalien und Temperaturkurven*. Berlin, Dietrich Reimer, 1852.
8. Forbes J. D. Inquiries about terrestrial temperatures. *Trans. Royal Soc. Edinburgh*. 1859. Vol. 22. Pp. 75–92.
9. Ferrel W. *Meteorological Researches*. Washington: Govt. Print. Off., 1877.
10. Spitaler R. Die Wärmeverteilung auf der Erdoberfläche. In: *Denkschriften der Mathem. Naturwiss. Klasse der Kaiserl. Vienna: Akademie der Wissenschaften*, 1885.

11. **Batchelder S. F.** A new series of isanomalous temperature charts, based on Buchan's isothermal charts. *Am. Meteorol. J.* 1894. Vol. 10. Pp. 451–474.
12. **Arrhenius S.** Ueber den Einfluss des atmosphärischen Kohlensäuregehalts auf die Temperatur der Erdoberfläche. In: *Bihang till Kongl. Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar*. Stockholm: K. Svenska Vetenskaps-Akademien. 1896. Pp. 1–102.
13. **Von Bezold W.** Zur Thermodynamik der Atmosphäre. In: *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen*. Berlin: Verlag der Akademie der Wissenschaften, 1888. Pp. 1189–1206.
14. **Hopfner F.** Die thermischen Anomalien auf der Erdoberfläche. *Petermanns Geographische Mitteilungen*. 1906. Vol. 52. Pp. 32–36.
15. **Hann J.** Handbuch der Klimatologie. *J. Engelhorn*, 1908.
16. **Von Bezold W.** Über klimatologische Mittelwerthe für ganze Breitenkreise. In: *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen*. Berlin: Verlag der Akademie der Wissenschaften, 1901.
17. **Von Bezold W.** Über Strahlungsnormalen und Mittellinien der Temperatur. In: *Meteorologische Zeitschrift*: Hann-Band zum vierzigjährigen Redaktionsjubiläum *J. Hann's von Freunden und Kollegen gewidmet*, F. Vieweg, 1906. Pp. 279–287.
18. **Bornstein R.** *Leitfaden der Wetterkunde*. F. Vieweg und Sohn, 1913.
19. **Defant A. and Obst E.** *Lufthülle und Klima*. Leipzig, Berlin: F. Deuticke, 1923.
20. **Koppen W.** *Das geographische System der Klimate*. Berlin: Borntraeger, 1936. C. 5–44.
21. **Von Hann J. and Suring R.J.** *Lehrbuch der Meteorologie*. Leipzig: W. Keller, 1939.
22. **Sellers W. D.** *Physical Climatology*. Chicago: University of Chicago Press, 1965.
23. **Arrhenius S.** On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosoph. Mag. J. Sci.* 1896. Vol. 41. Pp. 237–276.
24. **Hann J.** *Handbuch der Klimatologie*. Stuttgart: Englehorn, 1897.
25. **Morice C. P., Kennedy J. J., Rayner N. A., and Jones P. D.** Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2012. Vol. 117. Article D08101.
26. **Rohde R., Muller R., Jacobsen R., Perlmuter S., Rosenfeld A., Wurtele J., Curry J., Wickham C., and Mosher S.** Berkeley earth temperature averaging process. *Geoinform. Geostat.* 2013. Vol. 1, No. 2. Pp. 1–13.
27. **Hansen J., Ruedy R., Sato M., and Lo K.** Global surface temperature change. *Rev. Geophys.* 2010. Vol. 48. Article RG4004.
28. **Большаков В. А., Капица А. П.** Уроки развития орбитальной теории палеоклимата. *Вестн. РАН*. 2011. Т. 81, № 7. С. 603–612.
29. **Смульский И. И.** Анализ уроков развития астрономической теории палеоклимата. *Вестн. РАН*. 2013. Т. 83, № 1. С. 31–39.
30. **Смульский И. И.** Новые результаты по инсоляции Земли и их корреляция с палеоклиматом Западной Сибири в позднем плейстоцене. *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57, № 7. С. 1393–1407.
31. **Смульский И. И.** *Эволюция оси Земли и палеоклимата за 200 тысяч лет*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2016.
32. **Смульский И. И.** Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет. *Сложные системы*. 2020. № 1 (34). С. 4–49.
33. **Crommelynck D., Fichot A., Lee III R. B., and Romero J.** First realisation of the space absolute radiometric reference (SARR) during the ATLAS 2 flight period. *Adv. Space Res.* 1995. Vol. 16. Pp. 17–23.
34. **Смульский И. И., Иванова А. А.** Эквивалентная широта инсоляции как способ изучения палеоклимата. *Процессы в геосредах*. 2019. № 1 (19). С. 97–106.
35. **Смульский И. И., Кротов О. И.** *Новый алгоритм расчета инсоляции Земли*. Тюмень: Ин-т криосферы Земли СО РАН, 2013.
36. **Smulsky J. J. and Krotov O. I.** New computing algorithm of the Earth's insolation. *Appl. Phys. Res.* 2014. Vol. 6, No. 4. Pp. 56–82.