

УДК 551.583+523.2+51-71

**ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ШИРОТА ИНСОЛЯЦИИ
КАК СПОСОБ ИЗУЧЕНИЯ ПАЛЕОКЛИМАТА**

И.И. Смутьский, А.А. Иванова

Институт Криосферы Земли Тюменский научный центр СО РАН

Аннотация

В статье рассмотрена инсоляция в эквивалентных широтах за год, за летнее и зимнее полугодия. На основании разработанного алгоритма создана программа расчета инсоляции в эквивалентных широтах в среде MathCad. Представлено изменение эквивалентной широты на разных широтах Земли за 200 тыс. лет назад (т.л.н.). Наибольшие отклонения количества тепла от современной эпохи наблюдаются в высоких широтах. Проанализированы отличия трех видов инсоляций в современную эпоху для Северного и Южного полушарий. Для трех оптимумов последних инсоляционных периодов: 1_I (15.88 т.л.н.), 2_I (31.28 т.л.н.) и 3_I (46.44 т.л.н.) проведен анализ изменения инсоляции в сравнении с современной эпохой.

Ключевые слова: инсоляция, эквивалентные широты, инсоляционные периоды, Северное полушарие, Южное полушарие.

**EQUIVALENT LATITUDE OF INSOLATION
AS A METHOD OF STUDYING PALEOCLIMATE**

J.J. Smulsky, A.A. Ivanova

Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen

Abstract

Insolation in equivalent latitudes for a year, for summer and winter half-years is considered in the article. A program for calculating insolation at equivalent latitudes has been created in the MathCad environment on the basis of the developed algorithm. The change of the equivalent latitude at different latitudes of the Earth during 200 thousand years ago (ka) is presented. The greatest deviations in the amount of heat from the contemporary epoch are observed in high latitudes. The differences in the three types of insolation in the contemporary epoch for the Northern and Southern Hemispheres are analyzed. For the three optimums of the last

insolation periods: 1I (15.88 ka), 2I (31.28 ka) and 3I (46.44 ka) an analysis of the change in insolation was compared with the contemporary epoch.

Key words: insolation, equivalent latitudes, insolation periods, Northern Hemisphere, Southern Hemisphere.

1. Введение

Современные процессы на Земле зависят от короткопериодических колебаний параметров ее орбитального и вращательного движений [1]. Астрономическая теория изменения климата основывается на долгопериодических колебаниях этих параметров [2], [3], [4], [5]. В ней определяется инсоляция Земли, которая в соответствии с долгопериодическими колебаниями орбитального и вращательного движения Земли изменяется с периодами в десятки и сотни тысяч лет. Из новых решений орбитальной и вращательной задачи получаются значительные изменения инсоляции, объясняющие эволюцию климата прошлого [5].

Для сравнения инсоляции с современной эпохой М. Миланкович [2] предложил летнюю инсоляцию в эквивалентных широтах I_s . Эта величина соответствует широте φ , которая в современную эпоху получает такое же количество тепла за летнее полугодие, как и в рассматриваемую эпоху. В работе [6] показано, как по инсоляции I_s можно реконструировать палеоклимат. В настоящей работе введены дополнительные величины: зимняя I_w и годовая I_T инсоляции в эквивалентных широтах, на основе которых изучена структура палеоклимата за последние 200 тыс. лет.

Цель работы – расчет и анализ изменения инсоляции в эквивалентных широтах на разных широтах Земли за год, летнее и зимнее полугодия.

2. Вычисление инсоляции в эквивалентных широтах

2.1. Распределение инсоляций в современную эпоху

Астрономическая теория изменения климата позволяет получить распределение годовой Q_T , летней Q_s или зимней Q_w инсоляции на заданной широте φ в определенный момент времени T . На рис. 1 показано изменение этих инсоляций в современную эпоху 1950 г. Она начинается с момента

30.12.49 г., от которого отсчитывается время T , т.е. этому моменту соответствует $T = 0$. Индексом « n » отмечено, что инсоляции $Q_{T,n}$, $Q_{s,n}$ и $Q_{w,n}$ относятся к современной эпохе. Годовая инсоляция $Q_{T,n}$ монотонно возрастает от полюса к экватору. На графике летней инсоляции $Q_{s,n}$ имеется небольшой минимум на широте 87.5° , после которого $Q_{s,n}$ увеличивается до широты $\varphi = 25^\circ$, после которой уменьшается. Инсоляция за зимнее полугодие $Q_{w,n}$ от полюса до широты $\varphi = 2.5^\circ$ монотонно растет.

При определении инсоляции в эквивалентных широтах I в какую-то эпоху $T \neq 0$ необходимо по количеству тепла Q этой эпохи определить широту φ , на которой имеется такое же количество тепла. Это возможно, если зависимость, например, летней инсоляции $Q_{s,n}(\varphi)$ в современную эпоху является монотонной. Поэтому далее используется инсоляция в современную эпоху на монотонных участках: летняя – от $\varphi = 25^\circ$ до 87.5° , зимняя – от 2.5° до 90° , а годовая – на всем диапазоне.

Было установлено [5], что на широте $\varphi = 45^\circ$ годовая инсоляция не изменяется со временем, поэтому значение $Q_T^{45} = 9.932$ Гдж/м² является инсоляционной характеристикой Земли. Поэтому далее рассматриваются безразмерные инсоляции Q_T^u , Q_s^u и Q_w^u , которые определяются так

$$Q_T^u = Q_T / Q_T^{45}; \quad Q_s^u = Q_s / Q_T^{45}; \quad Q_w^u = Q_w / Q_T^{45}. \quad (1)$$

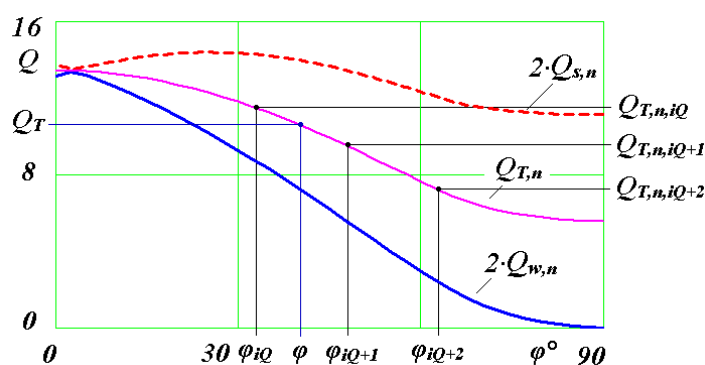


Рис. 1. Изменение инсоляций за год $Q_{T,n}$, летнее $Q_{s,n}$ и зимнее полугодия $Q_{w,n}$ в Гдж/м² в Северном полушарии в современную эпоху, 1950 г. Значения $Q_{s,n}$ и $Q_{w,n}$ увеличены в два раза.

2.2. Зависимость широты от инсоляции

Алгоритм вычисления инсоляции в эквивалентных широтах рассмотрим на примере годовой инсоляции Q_T . В Астрономической теории изменения климата [5] в дискретных точках $i3$ широты φ_{i3} рассчитываются значения годовой инсоляции $Q_{T,i3}$, т.е. в современную эпоху имеем функциональную зависимость – $Q_{T,n,i3}^u(\varphi_{n,i3})$. Чтобы определить широту, на которой инсоляция Q_T^u в эпоху T будет равна $Q_{T,n}^u$ в эпоху T_0 , необходимо воспользоваться обратной зависимостью широты от инсоляции $\varphi_{n,i3}(Q_{T,n,i3}^u)$. В промежуточных точках обратная зависимость может быть найдена с помощью параболической интерполяции

$$\varphi = A \cdot (Q_T^u)^2 + B \cdot Q_T^u + C. \quad (2)$$

Тогда на основании (2) коэффициенты параболы в точках $i3$ для современной инсоляции $Q_{T,n}^u$ определяются в результате решения системы уравнений в трех точках $i3$, $i3 + 1$ и $i3 + 2$:

$$A_{i3} \cdot (Q_{T,n,i3}^u)^2 + B_{i3} \cdot Q_{T,n,i3}^u + C_{i3} = \varphi_{n,i3}; \quad (3)$$

$$A_{i3} \cdot (Q_{T,n,i3+1}^u)^2 + B_{i3} \cdot Q_{T,n,i3+1}^u + C_{i3} = \varphi_{n,i3+1}; \quad (4)$$

$$A_{i3} \cdot (Q_{T,n,i3+2}^u)^2 + B_{i3} \cdot Q_{T,n,i3+2}^u + C_{i3} = \varphi_{n,i3+2}. \quad (5)$$

Уравнения (3) - (5) представляют собой систему линейных алгебраических уравнений с тремя неизвестными коэффициентами A_{i3} , B_{i3} и C_{i3} . Для ее решения из уравнения (4) выразим коэффициент C_{i3} через A_{i3} и B_{i3}

$$C_{i3} = \varphi_{n,i3+1} - A_{i3} \cdot (Q_{T,n,i3+1}^u)^2 - B_{i3} \cdot Q_{T,n,i3+1}^u. \quad (6)$$

Аналогично из уравнения (5) определяется коэффициент C_{i3} , и после подстановки его в (6) получаем выражение для коэффициента B_{i3} через A_{i3}

$$B_{i3} = \frac{\varphi_{n,i3+2} - \varphi_{n,i3+1}}{Q_{T,n,i3+2}^u - Q_{T,n,i3+1}^u} - A_{i3} \cdot (Q_{T,n,i3+2}^u + Q_{T,n,i3+1}^u). \quad (7)$$

После подстановки коэффициентов C_{i3} и B_{i3} из выражений (6) и (7) в уравнение (3) получаем соотношение для коэффициента A_{i3}

$$A_{i3} = \frac{\frac{\varphi_{n,i3+2} - \varphi_{n,i3+1}}{Q_{T,n,i3+2}^u - Q_{T,n,i3+1}^u} - \frac{\varphi_{n,i3+1} - \varphi_{n,i3}}{Q_{T,n,i3+1}^u - Q_{T,n,i3}^u}}{Q_{T,n,i3+2}^u - Q_{T,n,i3}^u}. \quad (8)$$

Выражения (6), (7) и (8) являются решением системы уравнений (3) - (5) для неизвестных коэффициентов A_{i3} , B_{i3} и C_{i3} . С помощью алгоритма (6) - (8) по распределениям $Q''_{T,n,i3}(\varphi_{n,i3})$, $Q''_{s,n,i3}(\varphi_{n,i3})$ и $Q''_{w,n,i3}(\varphi_{n,i3})$ были рассчитаны коэффициенты A_{i3} , B_{i3} и C_{i3} для годовой, летней и зимней инсоляций.

Результаты расчетов записаны в файлы InsKoeffQt.prn, InsKoeffQs.prn и InsKoeffQw.prn, соответственно для годовой, летней и зимней инсоляций. Файлы содержат 5 столбцов, например, для годовой инсоляции – $Q''_{T,n,i3}$, $\varphi_{n,i3}$, A_{i3} , B_{i3} , C_{i3} . Интервал по широте $\varphi_{i3} - \varphi_{i3-1} = 2.5^\circ$. Таким образом, были получены непрерывные функции (2) зависимости широты от инсоляции.

2.3. Расчет инсоляции в эквивалентных широтах

Расчет инсоляции в эквивалентных широтах ($I = \varphi$) согласно формуле (2) проводится с помощью параболической интерполяции при любом значении инсоляции Q . Для годовой инсоляции Q_T формула примет вид:

$$I_T = A_{iQ} \cdot (Q''_T)^2 + B_{iQ} \cdot Q''_T + C_{iQ}, \quad (9)$$

где величина Q''_T – это безразмерное значение инсоляции, вычисленное по формуле (1), а iQ – индекс начала участка аппроксимации. На рис. 1 показаны значения годовой инсоляции Q_T в трех соседних точках iQ , $iQ+1$ и $iQ+2$. Подбор индекса iQ происходит таким образом, чтобы значение инсоляции Q_T в эпоху T находилось между значениями $Q_{T,n,iQ}$ и $Q_{T,n,iQ+1}$.

По аналогичному алгоритму (1) - (9) рассчитываются инсоляции в эквивалентных широтах за летнее I_s и зимнее полугодия I_w . Алгоритм справедлив на монотонном участке изменения инсоляции по широтам Земли: летней Q_s – от 25° до 87.5° , зимней – Q_w от 2.5° до 90° .

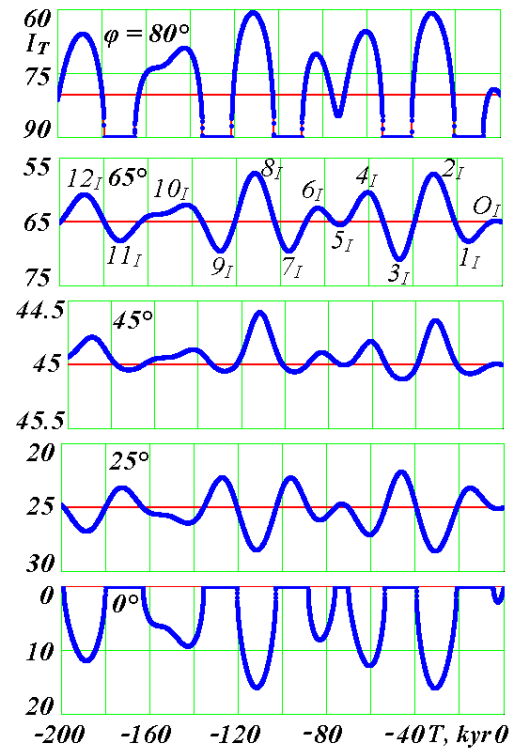
Программа вычисления инсоляции в эквивалентных широтах InsEqLt.mcd реализована в среде MathCad [7]. Программа использует файлы InsKoeffQt.prn, InsKoeffQs.prn и InsKoeffQw.prn. Во время работы программы изменения инсоляции Q на выбранной широте по времени пересчитываются в инсоляции в эквивалентных широтах I .

3. Эволюция инсоляции в эквивалентных широтах за 200 тыс. лет

3.1. Годовая инсоляция в эквивалентных широтах

На рис. 2 изображено изменение годовой инсоляции в эквивалентных широтах за 200 тыс. прошедших лет. Сначала рассмотрим ее изменение на широте 65° . За период времени 200 тыс. лет наблюдаются 13 экстремумов годовой инсоляции в эквивалентных широтах – из них 7 максимумов и 6 минимумов. Для удобства инсоляционная шкала перевернута: большие значения идут вниз, а меньшие – вверх. Поэтому минимумы кривой I_T соответствуют похолоданиям, а максимумы – потеплениям. В работе [8] по экстремумам введены инсоляционные периоды изменения климата и проведена их нумерация (от O_I до 12_I). Эти значения определены по летней инсоляции Q_s^{65N} на широте 65° Северного полушария. Экстремумы годовой инсоляции в эквивалентных широтах I_T соответствуют экстремумам Q_s^{65N} .

Рис. 2. Изменение годовой инсоляции I_T в эквивалентных широтах за 200 тыс. лет на пяти широтах Северного полушария: 80° , 65° , 45° , 25° и 0° . Горизонтальной линией изображена широта, к которой относится изменение инсоляции I_T . T – время в тыс. лет (кыр) от 30.12.1949 г., $O_I, 1_I, \dots, 12_I$ – оптимумы инсоляционных периодов.



Проанализируем годовую инсоляцию I_T , начиная с эпохи $T = 0$ (рис. 2). На широте 65° наблюдается небольшой оптимум O_I в эпоху $T \approx 3$ т.л.н., когда инсоляция уменьшается на 0.184° , т.е. происходит небольшое потепление. К моменту времени $T = 15.28$ т.л.н. (1_I на рис. 2) значение годовой инсоляция I_T возрастает на три градуса, т.е. в этот период на широту 65° приходилось такое же количество тепла как в современную эпоху на широту 68° . Это свидетельствует о том, что в эпоху $T = 15.28$ т.л.н. было холоднее, чем в современную эпоху.

При дальнейшем рассмотрении значение годовой инсоляции в эквивалентных широтах к моменту $T = 31.04$ т.л.н. уменьшается на 7.529° (2_I на рис. 2). В эту эпоху широта 65° с.ш. получает количество тепло, эквивалентное широте 57.471° с.ш. современной эпохи. Это существенное потепление климата, определяющее середину каргинского потепления Западной Сибири [6].

После этого экстремума годовая инсоляция I_T возрастает до 70.889° в эпоху $T = 46.44$ т.л.н. Это уменьшение годового количества тепла характерно смещению географической широты на 5.889° . Этот момент является серединой предпоследнего ледникового периода. Остальные экстремумы I_T на широте 65° происходят аналогично. В таблице 1 приведены значения экстремумов

$$\Delta I_{T\varphi} = I_{T\varphi} - \varphi^\circ. \quad (10)$$

Таблица 1. Величины экстремумов $\Delta I_{T\varphi}$, годовой инсоляции I_T в градусах, на трех широтах $\varphi = 80^\circ, 65^\circ, 45^\circ$ за 200 т.л.н.: IP – инсоляционный период, T – оптимумы годовой инсоляции в периоды IP . Отрицательные значения $\Delta I_{T\varphi}$ соответствуют потеплениям, а положительные – похолоданиям.

T , кур	IP	φ			T , кур	IP	φ		
		45°	65°	80°			45°	65°	80°
-2.8	O_I	-0.007	-0.184	-1.303	-96.44	7_I	0.055	4.557	10.000
-15.28	1_I	0.070	3.051	10.000	-111.84	8_I	-0.410	-7.627	-19.303
-31.04	2_I	-0.349	-7.529	-19.186	-127.56	9_I	0.049	4.564	10.000
-46.44	3_I	0.112	5.889	10.000	-142.8	10_I	-0.119	-2.705	-11.023
-60.84	4_I	-0.183	-4.634	-14.885	-172.4	11_I	0.041	2.961	10.000
-73.32	5_I	0.003	0.469	4.889	-189.12	12_I	-0.217	-4.306	-14.321
-83.4	6_I	-0.097	-2.168	-9.561					

По табл. 1 максимальные амплитуды колебания годовой инсоляции в эквивалентных широтах для широты 65° достигают: $\Delta I_{T\varphi} = 5.889^\circ$ для минимумов в эпоху $T_{min} = 46.44$ т.л.н. и для максимумов $\Delta I_{T\varphi} = -7.529^\circ$ и $\Delta I_{T\varphi} = -7.627^\circ$ в эпохи $T_{max1} = 31.04$ т.л.н. и $T_{max2} = 111.84$ т.л.н., соответственно.

Изменения годовой инсоляции на широте 80° с.ш. происходят идентично с широтой 65° с.ш., с отличием в амплитуде колебаний (табл. 1). Во время минимума годовая инсоляция I_T увеличивается до 90° с.ш., и на широте 80° с.ш.

годовая инсоляция становится меньше, чем в современную эпоху на полюсе. Горизонтальные участки I_T показывают длительность этих периодов.

Для широты 45° с.ш. характерны такие же изменения инсоляции I_T , как на широте 65° с.ш., но с небольшими амплитудами колебаний: величины экстремумов $\Delta I_{T\varphi}$ в табл. 1 не превышают 0.5° . Это свидетельствует, что значение годовой инсоляции на широте 45° практически не изменяется [5].

На широте 25° с.ш. инсоляции I_T изменяется в противофазе с инсоляцией на широте 65° с.ш. Моменты экстремумов совпадают, но минимальным значениям годовой инсоляции на широте 65° с.ш. соответствует максимальные на 25° с.ш., и, наоборот, максимумам соответствуют минимумы.

На экваторе (0°) также происходят изменения противофазные с широтой 65° . Отличием изменений от широты 25° являются завершения максимумов I_T горизонтальными площадками. Это означает, что в эти моменты времени на экватор поступало большее количество тепла, чем в современную эпоху. Наступают эти моменты в периоды минимумов для широты 65° с.ш.

Расчет годовой инсоляции I_T был выполнен для Северного и Южного полушарий. В ходе работы было установлено, что для полушарий характерны одинаковые изменения годовой инсоляции в эквивалентных широтах. Поэтому графики I_T для 80° , 65° , 45° и 25° ю.ш. идентичны графикам рис. 2.

Можно сделать вывод, что в один и тот же инсоляционный период на широты $\varphi \geq 45^\circ$ количества солнечного тепла за год поступает больше, а на широты $\varphi < 45^\circ$ – меньше. Это наблюдается в Северном и Южном полушариях. Как видно по экстремумам из табл. 1, чем больше широта, тем более существенные изменения происходят годового количества тепла.

3.2. Зимняя инсоляция в эквивалентных широтах

На рис. 3 изображено изменение зимней инсоляции в эквивалентных широтах I_w за 200 т.л.н. На графике для 65° с.ш. отмечены оптимумы O_I, I_I, \dots, I_{2I} . Оптимумы зимней инсоляции I_w находятся в противофазе колебаниям годовой I_T (рис. 2). Следовательно, на широте 65° в холодные периоды зимы теплее, а в теплые – холоднее.

За последние 200 тыс. лет наблюдается 6 максимумов и 7 минимумов (рис. 3) инсоляции за зимнее полугодие I_w . Начиная с момента времени $T = 0$, зимняя инсоляция I_w возрастает до $T \approx 5$ т.л.н., после чего уменьшается на 2° до момента $T = 15.88$ т.л.н. Это свидетельствует о том, что зимы последнего ледникового периода были теплее, чем в современную эпоху. В эпоху $T = 31.28$ т.л.н. – $I_w = 70.149^\circ$, т.е. зима на широте 65° была эквивалентна широте 70° . В этот момент времени значение $\Delta I_{w\varphi}$, вычисленное по формуле (10), равно $\Delta I_{w\varphi} = 5.149^\circ$. Величины $\Delta I_{w\varphi}$ для других эпох приведены в табл. 2.

Таблица 2. Величины экстремумов $\Delta I_{w\varphi}$, в градусах, зимней инсоляции I_w за 200 т.л.н. на трех широтах $\varphi = 80^\circ, 65^\circ, 45^\circ$; обозначения как в табл. 1.

T, кур	IP	φ			T, кур	IP	φ		
		45°	65°	80°			45°	65°	80°
-4.16	O_I	0.529	0.378	0.382	-95.92	7_I	-5.968	-5.091	-2.453
-15.88	1_I	-2.081	-2.104	-0.002	-110.8	8_I	6.678	4.307	2.131
-31.28	2_I	7.472	5.149	3.017	-127.56	9_I	-1.712	-2.437	0.973
-46.44	3_I	-6.407	-5.900	-2.267	-144.88	10_I	3.320	2.474	1.579
-60.8	4_I	5.720	4.272	2.867	-171.08	11_I	-1.740	-1.533	-0.541
-72.8	5_I	-0.892	-0.708	-0.520	-190.36	12_I	2.899	1.777	0.128
-83.4	6_I	4.591	3.697	3.141					

Изменения зимней инсоляции I_w на широте 80° с.ш. подобны ее изменениям на широте 65° . В дополнении к этому появляется экстремум между оптимумами 11_I и 12_I , а оптимум инсоляционного периода 9_I расщепляется на два. Для широты 65° эти явления наблюдаются в зачаточной форме. Значения отклонений $\Delta I_{w\varphi}$ на широте 65° больше примерно в два раза, чем на широте 80° (табл. 2).

Необходимо отметить, разнообразие климатических условий. Наличие двух дополнительных экстремумов на широте 80° свидетельствует об этом. Например, во время оптимума 9_I на широте $\varphi = 65^\circ$ зимы были теплее современных на $\Delta I_{w\varphi} = 2.437^\circ$, а на широте $\varphi = 80^\circ$ – холоднее на $\Delta I_{w\varphi} = 0.973^\circ$. Такая же ситуация наблюдается и между периодами 11_I и 12_I .

Изменения инсоляции I_w на широте 45° с.ш. подобны широте 65° . По табл. 2 величины отклонений $\Delta I_{w\varphi}$ примерно одинаковые. При сравнении с

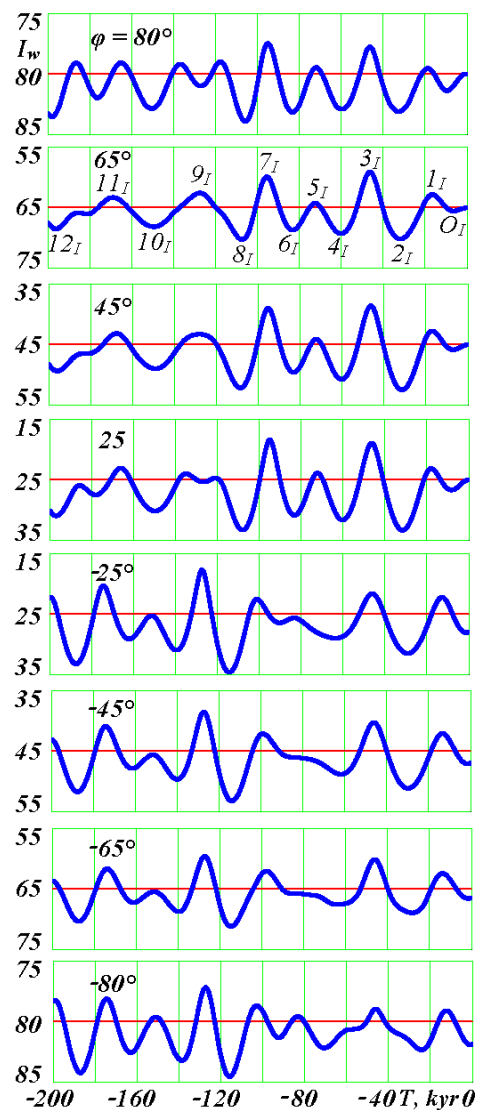
годовой инсоляцией I_T (см. табл. 1) диапазон колебаний экстремумов увеличился с 0.4° до $6^\circ-7^\circ$. Таким образом, при неизменности годовой инсоляции на широте 45° , зимняя изменяется существенно.

Рис. 3. Изменение зимней инсоляции I_w в эквивалентных широтах за 200 тыс. лет на восьми широтах Земли.

Для широты 25° (рис. 3) характерны изменения инсоляции I_w аналогичные широте 65° . Наблюдается отличие, как и на широте 80° , в период 9_I и между периодами 11_I и 12_I появляется дополнительные экстремумы.

В Южном полушарии (рис. 3) зимняя инсоляция I_w имеет значительные отличия от Северного полушария. С момента времени $T \approx 0$ на широте $\varphi = -65^\circ$ оптимум O_I сдвинут в современную эпоху, с величиной инсоляции $I_w = 66^\circ$. Таким образом, зима современной эпохи на широте 65° Южного полушария холоднее, чем в Северном. Также наблюдается небольшой сдвиг оптимумов 1_I , 2_I и 3_I по времени. Оптимумы 5_I и 6_I совсем вырождаются. Оптимумы 7_I , 8_I и 9_I имеют разные значения $\Delta I_{w\varphi}$ и не совпадают по времени. Небольшой максимум в эпоху 10_I в Южном полушарии соответствует минимуму в Северном. Наибольшая величина экстремумов на широте $\varphi = -65^\circ$ равна $-\Delta I_{w\varphi} = -5.4^\circ$ для оптимума 9_I , а наименьшая $-\Delta I_{w\varphi} = 2.2^\circ$ для 10_I .

Структура колебаний зимней инсоляции I_w на широте $\varphi = -65^\circ$ повторяется на других широтах Южного полушария с такими же особенностями, как в Северном. На широте $\varphi = -80^\circ$ некоторые колебания усиливаются и появляются новые с амплитудой колебаний почти в два раза



меньше по сравнению с широтой $\varphi = -65^\circ$. На широте $\varphi = -45^\circ$ амплитуда немножко увеличивается по сравнению с широтой $\varphi = -65^\circ$, а на широте $\varphi = -25^\circ$ увеличение амплитуд еще больше.

3.2. Летняя инсоляция в эквивалентных широтах

Изменение летней инсоляции в эквивалентных широтах I_s представлено в работе [8] на рис. 6 за 200 тыс. лет назад на восьми широтах Земли: 80° ; 65° ; 45° ; 25° ; -25° ; -45° ; -65° ; -80° . На графиках летней инсоляции, как и для годовой (рис. 2), имеются горизонтальные участки. Верхние горизонтальные участки соответствуют времени, когда инсоляция в эпоху T летом была больше, чем в современную эпоху на тропиках, а нижние отмечают эпохи, когда летняя инсоляция была меньше чем на полюсе. В табл. 3 аналогично (10) приведены величины экстремумов летней инсоляции $\Delta I_{s\varphi}$.

Таблица 3. Величины экстремумов $\Delta I_{s\varphi}$, в градусах, летней инсоляции I_s за 200 т.л.н. на трех широтах $\varphi = 80^\circ$, 65° , 45° ; обозначения как в табл. 1.

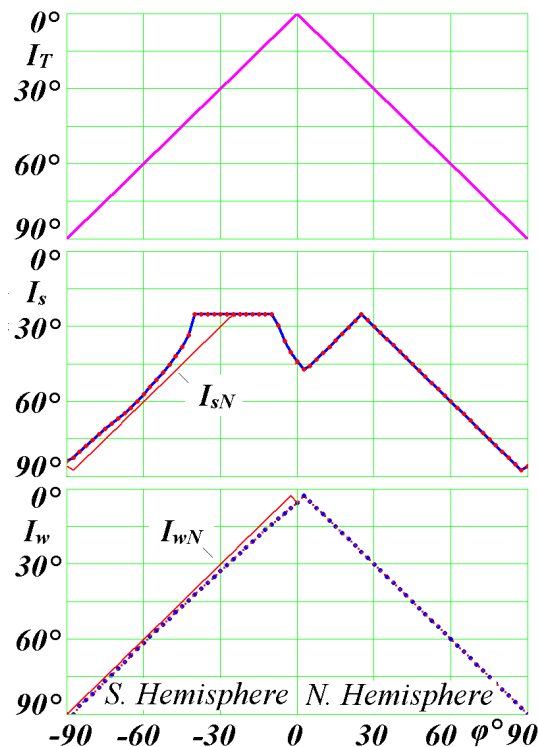
T , кыр	IP	φ			T , кыр	IP	φ		
		45°	65°	80°			45°	65°	80°
-4.16	O_I	-1.704	-1.158	-4.420	-95.92	7_I	14.466	22.500	7.500
-15.88	1_I	5.875	22.500	7.500	-110.8	8_I	-20.000	-40.000	-55.000
-31.28	2_I	-20.000	-40.000	-55.000	-127.56	9_I	4.892	22.500	7.500
-46.44	3_I	15.538	22.500	7.500	-144.88	10_I	-20.000	-11.684	-22.781
-60.8	4_I	-20.000	-22.868	-34.369	-171.08	11_I	3.694	22.500	7.500
-72.8	5_I	2.578	3.435	7.500	-190.36	12_I	-20.000	-15.960	-29.840
-83.4	6_I	-20.000	-12.320	-21.708					

При максимальных колебаниях, годовой $\Delta I_{T\varphi} = -19.186$ (табл. 1) и зимней $\Delta I_{w\varphi} = 3.017$ (табл. 2) инсоляций в эквивалентных широтах, летняя инсоляция испытывает более значительные колебания в $\Delta I_{s\varphi} = -55^\circ$.

4. Современное распределение инсоляций по широте Земли

На рис. 4 показано изменение инсоляций за год I_T , за летнее I_s и зимнее I_w полугодия по широте Земли в современную эпоху. Годовая инсоляция I_T симметрична относительно экватора ($\varphi = 0$): на экваторе она максимальна и равна нулю, а на полюсах $-I_T = 90^\circ$. Изменения годовой инсоляции I_T на всех широтах имеют линейную зависимость по широте, т.е. $I_T = \varphi$.

Рис. 4. Распределение инсоляции в эквивалентных широтах за год I_T , за летнее I_s и зимнее I_w полугодия по широте Земли в современную эпоху (1950 г.): -90° – Южный полюс, $+90^\circ$ – Северный полюс.



Летняя инсоляция I_s по широте изменяется более сложно. В Северном полушарии на полюсе имеется небольшой максимум $I_s = 85.934^\circ$, заканчивающийся минимумом $I_s = 87.5^\circ$ при $\varphi = 87.5^\circ$.

Максимум $I_s = 85.934^\circ$ обусловлен ограничением монотонного участка широтой 87.5° . Поэтому инсоляции I_s оцениваются в широтах $< 87.5^\circ$. Затем до широты $\varphi = 25^\circ$ летняя инсоляция изменяется по линейному закону $I_s = \varphi$. После максимума летняя инсоляция уменьшается до величины $I_s = 47.185^\circ$ вблизи экватора. Здесь имеется минимум летней инсоляции. Причем он находится в Северном полушарии. Затем инсоляция I_s увеличивается с переходом в Южное полушарие и достигает горизонтального участка, который расположен в диапазоне широт $-40^\circ \leq \varphi \leq -10^\circ$. На этом отрезке широт Южного полушария летняя инсоляция больше максимального значения на тропике Северного полушария.

После горизонтального участка летняя инсоляция I_s с дальнейшим увеличением широты Южного полушария нелинейно уменьшается до $I = 83.729^\circ$ на широте $\varphi = -90^\circ$. Линией I_{sN} показано изменение летней инсоляции в Северном полушарии. Как видим, горизонтальный и нелинейный участки I_s в Южном полушарии лежат выше инсоляции I_{sN} Северного полушария, т.е. лето во всем Южном полушарии теплее лета в Северном полушарии.

Зимняя инсоляция I_w практически симметрична относительно экватора: на полюсах имеет минимальные значения равные $I_w = 90^\circ$, а на экваторе – максимальное, которое находится вблизи 0° . В Северном полушарии до

максимума на широте $\varphi = 2.5^\circ$ она изменяется по линейному закону $I_w = \varphi$. От этого максимума до полюса в Южном полушарии I_w изменяется квазилинейно. Линия I_{wN} изменения инсоляции Северного полушария лежит выше инсоляции I_w Южного полушария, т.е. зимы в нем, холоднее зим Северного полушария.

5. Распределение инсоляций по широте в другие эпохи

На рис. 5 приведены инсоляции I_T , I_s и I_w в периоды трех инсоляционных оптимумов 1_I , 2_I и 3_I , а линиями I_{TNO} – показана годовая инсоляция Северного полушария в современную эпоху. В оптимум 1_I годовая инсоляция I_T по сравнению с I_{TNO} имеет горизонтальные участки в экваториальной области и приполярных областях. Они свидетельствуют, что в эту эпоху тепла за год в экваториальной области было больше, чем сейчас в этой области, а в полярной области $\varphi > 70^\circ$ тепла было меньше, чем сейчас на полюсе.

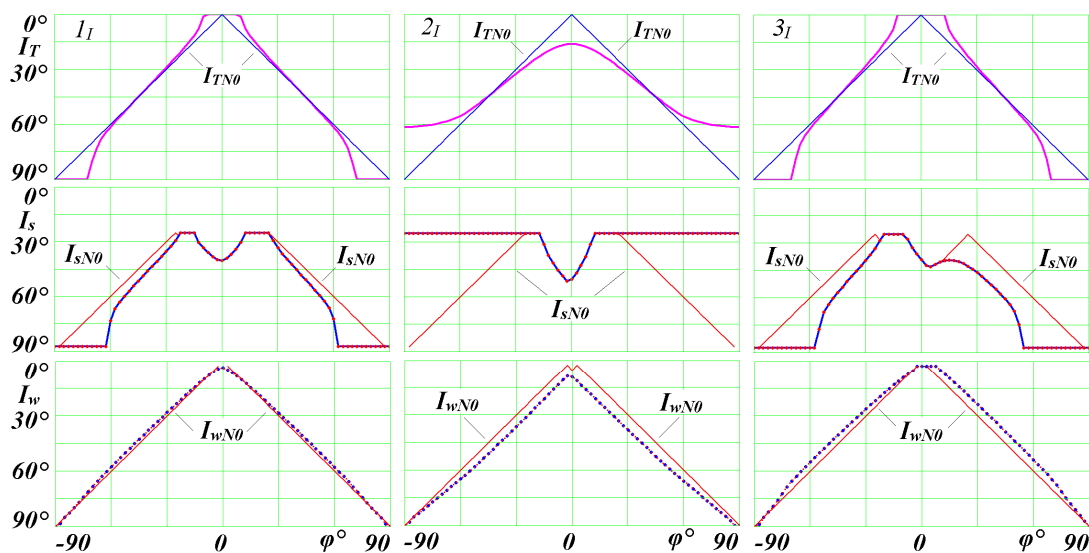


Рис. 5. Распределение по широте Земли инсоляции в эквивалентных широтах за год I_T , летнее I_s и зимнее I_w полугодия в три эпохи с инсоляционными экстремумами: 1_I – 15.88 т.л.н. 2_I – 31.28 т.л.н. и 3_I – 46.44 т.л.н.

Летняя инсоляция I_s в оптимум 1_I на рис. 5 отличается от современной эпохи I_{sNO} наличием горизонтальных участков в высоких широтах $\varphi > 62.5^\circ$. На этих широтах тепла летом было меньше чем сейчас на полюсе, т.е. действительно здесь был ледниковый период. В экваториальной области Северного полушария появился горизонтальный участок (рис. 5), т.е. здесь тепла было больше чем сейчас в экваториальной области. Однако в Южном

полушарии горизонтальный участок меньше чем в Северном полушарии. В области широт, где летняя инсоляция в современную эпоху I_{sNO} выше I_s было холоднее, чем в современную эпоху.

Зимняя инсоляция I_w в эпоху I_I на рис. 5 имеет более выпуклый профиль, чем в современную эпоху I_{wNO} . В большей части широт I_w проходит выше I_{wNO} , т.е. в этой области тепла зимой было больше чем в современную эпоху.

В эпоху сильного потепления оптимума 2_I график годовой инсоляции I_T (I_{TNO}) отличается от графиков I_T в холодные эпохи I_I и 3_I и в современную эпоху (рис. 4). В экваториальной области годовая инсоляция I_T меньше I_{TNO} на 15° , т.е. на экваторе годового количества тепла было существенно меньше. В высоких широтах, наоборот, даже на полюсе тепла было не меньше чем сейчас на широте 60° . При сравнении графика I_T с линиями I_{TNO} видно, что в экваториальных широтах было холоднее, а в средних и высоких – теплее.

Летняя инсоляция I_s в эпоху 2_I на широтах от 12.5° до 90° держится на уровне 25° , т.е. тепла в этой области летом было больше чем сейчас на тропиках. Об этом свидетельствует расположение графика I_s над линией I_{sNO} .

Зимняя инсоляция I_w в эпоху 2_I (рис. 5) имеет форму угла с вогнутыми сторонами, в отличие от угла с выпуклыми сторонами в холодные эпохи I_I и 3_I . По расположению I_w под графиком I_{wNO} (рис. 5) видно, что на всем земном шаре зима была холоднее современной.

В эпоху самого холодного периода 3_I за последние 200 тыс. лет инсоляция I_T (рис. 5) имеет вид аналогичный холодному периоду I_I , но с большим отклонением от линии I_{TNO} . Большие отклонения имеются также для летней I_s и зимней I_w инсоляций.

Заключение

Всем известно, как в современную эпоху изменяется климат по широте. Как видим, в другие эпохи климат изменяется по-другому. Лето может быть существенно теплее современного, а зима при этом – холоднее. А может быть наоборот. Также может быть другая структура изменений по широте Земли. Каждый инсоляционный период имеет свою структуру климатических

изменений отличных от другого инсоляционного периода. При анализе палеоклиматических данных необходимо учитывать все эти особенности. При современном понимании климата невозможно интерпретировать данные палеоклимата. Если это не учитывать, по этим данным можно классифицировать эпохи ледниковыми, хотя в действительности они были теплыми.

Настоящая работа выполнялась по проекту IX.135.2.4. Представленные результаты получены в результате численных решений задач на суперкомпьютерах ЦКП Сибирского Суперкомпьютерного Центра ИВМиМГ СО РАН.

Список литературы

1. Сидоренков Н.С. Соизмеримости между частотами земных процессов и частотами системы земля-луна-солнце // Процессы в геосредах, 2015, № 3, с. 88-89.
2. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. – М.-Л.: ГОНТИ, 1939. – 207 с.
3. Шараф Ш. Г. и Будникова Н. А. Вековые изменения элементов орбиты Земли и астрономическая теория колебаний климата // Тр. Инст. теоретич. астрономии. - Вып. XIV. - Л.: Наука. - 1969 г. - с. 48 - 109.
4. Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., and Levrard B. A Long-term numerical solution for the Earth // Icarus 170, 2004. Iss. 2: 343-364.
5. Смульский И.И. Эволюция оси Земли и палеоклимата за 200 тысяч лет. Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2016 – 228 с.
6. Смульский И.И., Иванова А.А. Опыт реконструкции палеоклимата по изменению инсоляции на примере Западной Сибири в позднем плейстоцене // Климат и природа, 1 (26), 2018, с. 3-21.
7. Иванова А. А., Смульский И.И. Инсоляция в эквивалентных широтах и специфика эволюции криосферы / Сборник докладов расширенного заседания научного совета по криологии Земли РАН «Актуальные проблемы

геокриологии», Том 1, МГУ имени М.В. Ломоносова, 15-16 мая. Москва: «КДУ», «Университетская книга», 2018, с. 69-76.

8. Смутьский 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.