

# ПРОШЛЫЕ И БУДУЩИЕ ЛЕДНИКОВЫЕ ПЕРИОДЫ В АРКТИКЕ ЗА 100 ТЫС. ЛЕТ

Смульский И.И.

*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Федеральный Исследовательский Центр, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, [jmulsky@mail.ru](mailto:jmulsky@mail.ru)*

## Реферат

На интервале  $\pm 100$  тыс. лет рассматривается изменение летней, зимней и годовой инсоляций, а также годовой температуры на основании эволюции орбитального и вращательного движения Земли. На этом интервале имеется 5 ледниковых периодов. Приведены их характеристики.

**Ключевые слова:** Инсоляция; ледниковые периоды; орбита; ось; эволюция.

## PAST AND FUTURE ICE AGES IN THE ARCTIC OVER 100 THOUSAND YEARS

Smulsky J.J.

*Institute of Earth's Cryosphere, Tyum. SC of SB RAS, Federal Research Center, 625026, Tyumen, Malygina Str. 86, [jmulsky@mail.ru](mailto:jmulsky@mail.ru)*

## Abstract

On an interval of  $\pm 100$  thousand years, changes in summer, winter and annual insolation, as well as annual temperature, are considered based on the evolution of the Earth's orbital and rotational motion. There are 5 ice ages in this interval. Their characteristics are given.

**Key Words:** Axis; evolution; insolation; ice ages; orbit.

## Введение

В результате взаимодействия тел Солнечной системы изменяется орбита Земли и положение ее оси вращения, что приводит к изменению распределения солнечного тепла по поверхности Земли. В результате наступают холодные и теплые периоды, наиболее выраженные в высоких широтах. Первый вариант такой астрономической теории изменения климата за 600 тыс. лет был создан Милутиным Миланковичем [Миланкович, 1939] в первой четверти XX века. Он использовал теорию эволюции орбитального движения Земли, созданную на то время в небесной механике. В 20-ом веке теорию Миланковича развивали и продолжили на десятки миллионов лет другие исследователи, в том числе: [Brouwer, Van Woerkom, 1950; Шараф, Будникова, 1969; Berger, Loutre, 1991; Laskar et al, 2004; Edvardsson et al, 2002]. Этот вариант теории еще называют орбитальной теорией палеоклимата. Её результаты не устраивали палеоклиматологов [Большаков и Капица, 2011], так как небольшие изменения тепла в ней не могли приводить к наступлению ледниковых периодов. В 21-ом веке была решена задача об эволюции вращательного движения Земли [Smulsky, 2011; Смульский, 2020a], что привело к большим в 7 – 8 раз колебаниям наклона плоскости экватора к плоскости орбиты Земли. Результаты новой астрономической теории изменения климата дали большие колебания инсоляции, т.е. солнечного тепла, по поверхности Земли, другие их периоды, а эпохи похолоданий и потеплений совпали с известными ледниковыми периодами и межледниковьями [Смульский, 2016]. Далее рассмотрим результаты этой теории за  $\pm 100$  тыс. лет от современной эпохи.

## Изменения инсоляции и температуры в Арктике за $\pm 100$ тыс. лет

В виде инсоляции рассматривается удельное количество солнечного тепла на  $1 \text{ м}^2$  поверхности Земли за полугодия: летнее  $Q_s$  и зимнее  $Q_w$ , и за год в целом  $Q_T$ , которое

измеряется в Гдж/м<sup>2</sup>. На рис. 1а сопоставлены изменения этих инсоляций за ±100 тыс. лет на широтах 80° и 65° Северного полушария. Так как летняя инсоляция  $Q_s$  на широте 65° Северного полушария принята за характеристику климата, то начнем рассмотрение с этой величины. Начиная с современной эпохи,  $T = 0$ , величина  $Q_s$  имеет небольшой оптимум в эпоху  $T = -4.2$  куг, который совпадает с оптимумом Голоцена [Смульский, 2016]. Здесь 1 куг – 1 тыс. лет. Затем в эпоху  $T = -15.9$  куг наступает минимум инсоляции, который совпадает с серединой последнего ледникового периода. В Западной Сибири его называют Сарганским. В эпоху  $T = -31.3$  куг имеется максимум инсоляции, который совпадает с серединой межледниковья, называемого в Западной Сибири Каргинским потеплением. В эпоху  $T = -46.4$  куг имеется значительный минимум инсоляции, который совпадает с серединой предпоследнего ледникового периода, более сурового чем последний. Остальные три экстремума инсоляции за прошедшее до -100 куг также отражают имевшие место потепления и похолодания [Смульский, 2016].

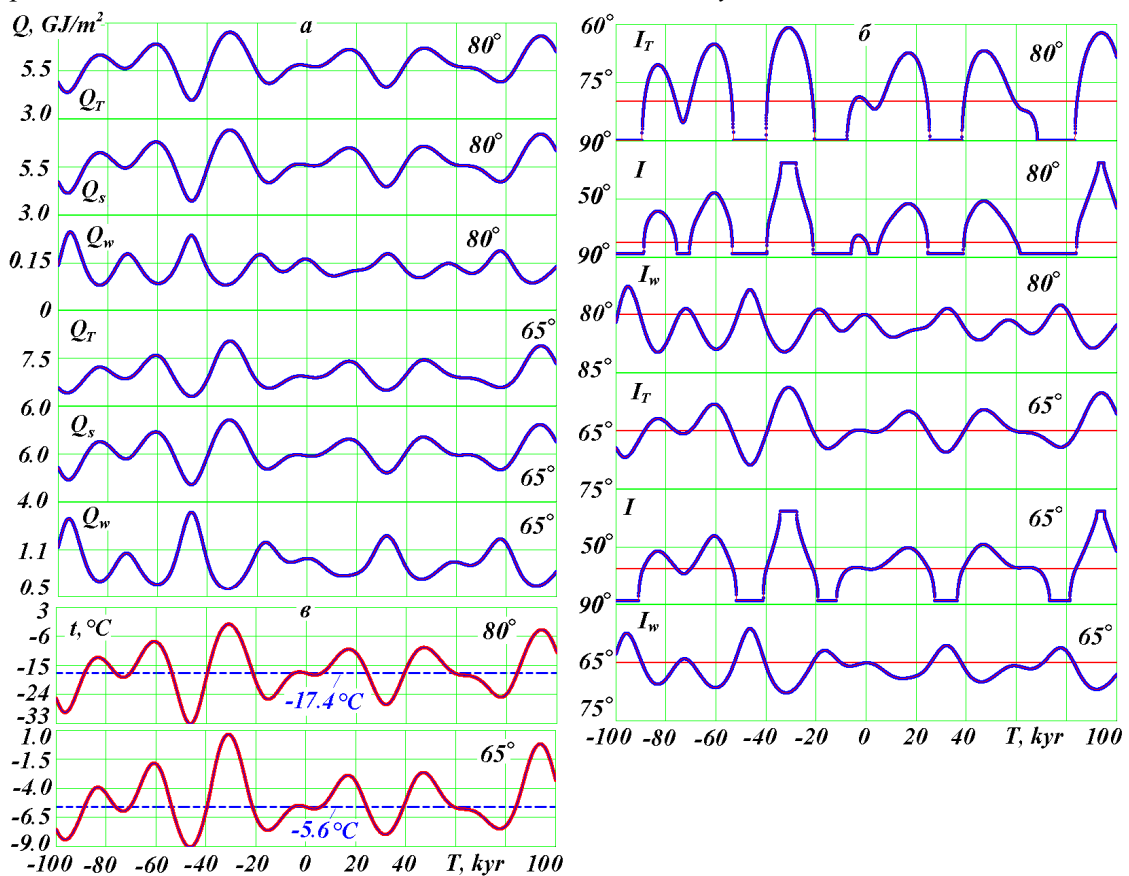


Рис. 1. Эволюция инсоляции и температуры за ±100 тыс. лет на широтах 80° и 65°.

а) Инсоляции:  $Q_T$  – за весь год,  $Q_s$  – за летнее полугодие,  $Q_w$  – за зимнее полугодие.

б) Инсоляции в эквивалентных широтах:  $I_T$  – за год,  $I$  и  $I_w$  – за летнее и за зимнее полугодия; красной линией приведена широта, к которой относится изменение инсоляции.

в)  $t$  – среднегодовая приземная температура, осредненная по широте Земли; штриховой линией обозначена среднеширотная температура в современную эпоху.

$T, kyr$  – время в тыс. лет от 30.12.1949 г.

В будущую эпоху  $T = 1.9$  куг имеется небольшой минимум  $Q_s$ , который приведет к небольшому похолоданию перед теплым периодом в эпоху  $T = 16.5$  куг. Он будет менее теплым, чем в эпоху  $T = -31.3$  куг. Затем похолодание в эпоху  $T = 32$  куг приведет к первому будущему ледниковому периоду, который сменится потеплением в эпоху  $T =$

46.9 куг. Второй будущий ледниковый период наступит в эпоху  $T = 77.6$  куг. Эти два периода по интенсивности будут такого же уровня как Сартанский в эпоху  $T = -15.9$  куг. А более суровый ледниковый период наступит в эпоху  $T = 109.1$  куг [Смульский, 2018], которая находится вне пределов графика на рис. 1а. С учетом последнего за  $\pm 100$  тыс. лет происходит 6 ледниковых периодов, т.е. средний интервал между ними 35 тыс. лет.

Изменение годовой инсоляции  $Q_T$  на широте  $65^\circ$  повторяет изменение летней инсоляции  $Q_s$ . А зимняя инсоляция  $Q_w$  изменяется в противофазе с летней: при теплом лете зима немного холоднее. Таким образом, для широты  $65^\circ$  годовая  $Q_T$  и летняя  $Q_s$  инсоляции изменяются софазно, а зимняя  $Q_w$  – в противофазе первым двум.

Такой же характер изменения инсоляций наблюдается для широты  $80^\circ$ . Софазность и противофазность изменения свидетельствует, что на этих широтах в теплую эпоху лета – более теплые, а зимы – более холодные. Амплитуды колебаний  $Q_T$  и  $Q_s$  на широте  $80^\circ$  примерно в 1.5 раза больше, чем на широте  $65^\circ$ , т.е. в высоких широтах происходят более существенные изменения инсоляции.

На рис. 1б показаны изменения инсоляций в эквивалентных широтах за год  $I_T$ , за летнее  $I$  и зимнее  $I_w$  полугодия. Инсоляция за летнее полугодие  $I$  была введена М. Миланковичем [1939] для представления инсоляция  $Q_s$  в виде широты, на которой в современную эпоху приходится такое же количество солнечного тепла. Инсоляции  $I_T$  и  $I_w$  введены нами [Смульский, Иванова, 2019]. Инсоляции в эквивалентных широтах на вертикальной оси отложены в обратном порядке, т.е. верхние значения относятся к теплым эпохам, а нижние – к холодным.

Рассмотрим вначале летнюю инсоляцию  $I$  на широте  $65^\circ$ . Верхние горизонтальные участки графиков отмечают отрезок времени, когда инсоляция в эпоху  $T$  летом больше чем в экваториальной зоне в современную эпоху. А нижние горизонтальные участки обозначают эпохи, когда летняя инсоляция меньше чем на полюсе. По верхним горизонтальным участкам  $I$  видно, что имеются две теплые эпохи при  $T = -31.3$  и  $T = 93.6$  куг, в которые солнечного тепла больше, чем сейчас на экваторе. Это также относится к широте  $80^\circ$ , но длительность теплых периодов здесь меньше.

По нижним горизонтальным участкам  $I$  на широте  $65^\circ$  видно, что было 5 холодных эпох. В эти эпохи количества тепла за летнее полугодие было меньше, чем сейчас на полюсе. Это означает, что выпавший за зиму снег летом не успевал растаять, и начинал образовываться ледниковый покров, т.е. наступал ледниковый период. На широте  $80^\circ$  инсоляция  $I$  изменяется подобным образом. Отличие заключается в том, что длительность холодных периодов увеличивается и добавляется еще два при  $T = -75$  куг и 2 куг. По летним инсоляциям  $Q_s$  на рис. 1а видно, что похолодания здесь были небольшие и кратковременные.

На широте  $\varphi = 65^\circ$  годовая инсоляция  $I_T$  изменяется от  $I_T = 57.5^\circ$  в эпоху  $T = -31.0$  куг до  $I_T = 70.9^\circ$  в эпоху  $T = -46.4$  куг (рис. 1б). Таким образом, в отличие от летней инсоляции  $I$  нет горизонтальных участков, на которых инсоляция  $I_T$  была бы меньше, чем на полюсе, или превышала бы инсоляцию на экваторе.

Изменение годовой инсоляции  $I_T$  на широте  $80^\circ$  похоже на ее изменение на широте  $65^\circ$ , но диапазон колебаний больше: от  $60.8^\circ$  до  $90^\circ$ . Нижние горизонтальные участки показывают, что годовая инсоляция  $I_T$  на широте  $80^\circ$  превышает  $90^\circ$ , т.е. ниже, чем годовая инсоляция в современную эпоху на полюсе.

Зимняя инсоляция в эквивалентных широтах  $I_w$  на широте  $65^\circ$  изменяется от  $59.4^\circ$  до  $70.2^\circ$  (рис. 1б). Ее колебания находятся в противофазе к колебаниям годовой  $I_T$  и летней  $I$

инсоляций. Изменение зимней инсоляции на широте  $80^\circ$  происходит от  $77.5^\circ$  до  $83.3^\circ$ . Они аналогичны изменениям  $I_w$  на широте  $65^\circ$ , но амплитуда колебаний примерно в два раза меньше. Ее колебания также находятся в противофазе к колебаниям годовой инсоляции  $I_T$ . Следовательно, на этих широтах зима теплее в холодные эпохи и холоднее в теплые.

По летней инсоляции  $I$  видно, что за  $\pm 100$  тыс. лет имеется всего два очень теплых периода: 31.3 тыс. лет назад и 93.6 тыс. лет в будущем. Причем прошедший теплый период был теплее и протяженнее будущего периода.

На рис. 1в показана эволюция среднеширотной годовой температуры, которая определена по годовой инсоляции  $Q_T$  [Смольский, 2020б]. На широте  $65^\circ$  она изменяется от  $-9.0^\circ\text{C}$  до  $0.66^\circ\text{C}$  при современной температуре  $-5.6^\circ\text{C}$ . В ледниковые периоды  $-46.4$ ,  $-15.9$ ,  $32$  и  $77.6$  куг среднегодовая температура будет меньше современной на  $6.3^\circ\text{C}$ ,  $3.5^\circ\text{C}$ ,  $2.4^\circ\text{C}$  и  $1.9^\circ\text{C}$ , соответственно. На широте  $80^\circ$  это понижение относительно современной температуры  $-17.4^\circ\text{C}$  будет на  $15.6^\circ\text{C}$ ,  $8.7^\circ\text{C}$ ,  $9.8^\circ\text{C}$  и  $7.5^\circ\text{C}$ , соответственно, т.е. более значительно, чем на широте  $65^\circ$ .

### Распределение инсоляции по широте Земли

На рис. 2 приведено изменение по широте  $\varphi$  инсоляций за год  $Q_T$ , за летнее  $Q_s$  и зимнее  $Q_w$  полугодия в 5 эпох: в современную  $T = 0$ , в самую теплую  $T = -31.28$  куг и в самую холодную эпоху  $T = -46.44$  куг за прошедшие 100 тыс. лет, в самую теплая  $T = 93.6$  куг и самую холодную  $T = 109.1$  куг в ближайшие 100 тыс. лет.

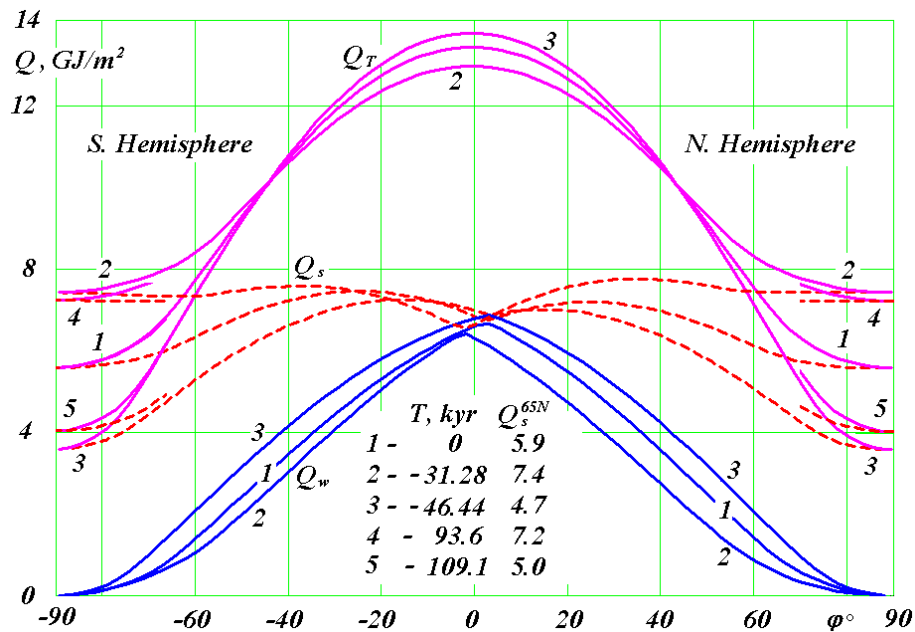


Рис. 1. Распределение инсоляций по широте Земли  $\varphi$  в экстремальные эпохи.

Эпохи: 1 – современная; 2 – самая теплая и 3 – самая холодная за прошедшие 100 тыс. лет; 4 – самая теплая и 5 – самая холодная в ближайшие 100 тыс. лет;  $Q_s^{65N}$  – инсоляция в  $\text{ГДж}/\text{м}^2$  за летнее полугодие на северной широте  $65^\circ$ .

Летняя инсоляция  $Q_s$  (рис. 2, пунктирные линии) в современную эпоху 1 имеет минимальное значение на полюсах и достигает максимального значения на тропиках  $\varphi = \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  угол наклона экватора к орбите Земли. Вблизи экватора  $Q_s$  имеет минимум. От самой холодной эпохи (линия 3) до самой теплой 2 летняя инсоляция  $Q_s$  на полюсах увеличивается в 2.07 раза. На широте  $65^\circ$  она изменяется в 1.57 раза. В теплую эпоху 2

летняя инсоляция  $Q_s$  имеет экваториальный минимум в Южном полушарии, а в холодную эпоху 3 – в Северном полушарии.

Зимняя инсоляция  $Q_w$  (рис. 2) на полюсах равна нулю и монотонно растет к экваториальной области. В экваториальной области  $Q_w$  имеет максимум на той же широте  $\varphi$ , на которой расположен минимум летней инсоляции  $Q_s$ . От самой холодной эпохи 3 к самой теплой 2 зимняя инсоляция  $Q_w$  больше всего изменяется на средних широтах. При этом, для рассматриваемых 2 и 3 эпох изменения, например, на широте  $\varphi = 40^\circ$ , в 1.38 раза больше Северном полушарии, чем в Южном. Зимняя инсоляция в холодную эпоху 3 на всех широтах больше, чем в теплую эпоху 2. То есть, зимы на всей Земле в холодные эпохи теплее, нежели в теплые.

Годовая инсоляция  $Q_T$  (рис. 2) монотонно увеличивается от полюсов к экватору. На экваторе находится ее максимум, и годовая инсоляция симметрична относительно экватора. То есть, количество тепла за год одинаково по обоим полушариям. От самой холодной эпохи 3 к самой теплой 2 инсоляция  $Q_T$  за год на полюсах увеличивается во столько раз, как и летняя  $Q_s$ . С уменьшением широты разница между годовыми инсоляциями уменьшается, и на широте  $\varphi \approx 45^\circ$  годовая инсоляция не изменяется. В экваториальной области изменения  $Q_T$  обратные ее изменениям на высоких широтах: в холодную эпоху 3 тепла за год больше, чем в теплую. При этом изменение инсоляции  $Q_T$  в 4 раза меньше чем в высокоширотной области. Поэтому основные изменения годовой инсоляции происходят в высоких широтах.

### Литература

Большаков В.А., Капица А.П. Уроки развития орбитальной теории палеоклимата // Вестник Российской Академии Наук. Т. 81, № 7. – 2011 – С. 603-612.

Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. – М.-Л.: ГОНТИ, 1939 – 207 с.

Смульский И.И. Новые результаты по инсоляции Земли и их корреляция с палеоклиматом Западной Сибири в позднем плейстоцене // Геология и Геофизика. Т. 57, № 7 – 2016 – с. 1393-1407. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20160709>.

Смульский И.И. Новая Астрономическая теория ледниковых периодов. – Riga, Latvia: "LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018 – 132 с. ISBN 978-613-9-86853-7.

Смульский И.И. Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет // Сложные системы. № 1 (34). – 2020а – С. 4-49. <https://thecomplexsystems.ru/archive/>.

Смульский И.И. Среднегодовые палеотемпературы на поверхности Земли // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 25-27 ноября 2020 г. – 2020б – С. 98-107.

Смульский И.И., Иванова А.А. Эквивалентная широта инсоляции как способ изучения палеоклимата // Процессы в геосредах. №1 (19) – 2019 – С. 97-106.

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 –С. 48 - 109.

Berger A. and Loutre M. F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quaternary Science Reviews. № 10 – 1991 – Pp. 297-317.

Brouwer D., Van Woerkom A. J. J. The secular variation of the orbital elements of the principal planets // Astr. Pap. 13, 1950 – Pp. 81- 107.

Edvardsson S., Karlsson K.G. and Engholm M. Accurate Spin Axes and Solar System Dynamics: Climatic Variations for the Earth and Mars // Astronomy & Astrophysics. 384 – 2002 – Pp. 689-701.

Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M. Correia, A. C. M. & Levrard, B.. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. Astronomy & Astrophysics. Vol. 428, No. 1 – 2004. 261–285.

Smulsky J.J. The Influence of the Planets, Sun and Moon on the Evolution of the Earth's Axis // International Journal of Astronomy and Astrophysics. Vol. 1, Issue 3 – 2011 – Pp. 117-134. <http://dx.doi.org/10.4236/ijaa.2011.13017>.