

# ЭВОЛЮЦИЯ ИНСОЛЯЦИИ В ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ШИРОТАХ В АРКТИКЕ И АНТАРКТИКЕ

**Проф. д. ф.м.-н. И.И. Смульский**

**А.А. Иванова**

ИКЗ ТюмНЦ СО РАН, Россия

## **АННОТАЦИЯ**

Количество солнечного тепла, поступающего на Землю, определяется эксцентриситетом орбиты, ее наклоном к плоскости экватора и положением перигелия. Все эти параметры со временем меняются, поэтому изменяется количество солнечного тепла или инсоляция. Милутин Миланкович для анализа изменения инсоляции ввел инсоляцию в эквивалентных широтах за летнее полугодие. Она выражается в виде широты Северного полушария, на которую в рассматриваемую эпоху поступает такое же количество тепла, как и в современную эпоху. В работе введены инсоляции в эквивалентных широтах: за год и за зимнее полугодие. Приведен алгоритм для их расчета, на основе которого создана компьютерная программа. Проанализированы отличия этих инсоляций в современную эпоху для Северного и Южного полушарий. Рассмотрены все три инсоляции в эквивалентных широтах для трех разных эпох, которые соответствуют экстремумам: 1) последнего ледникового максимума (15.88 тыс. лет назад), 2) потепления (31.28 т.л.н.) и 3) более раннего ледникового периода (46.44 т.л.н.). Инсоляция в эквивалентных широтах за год симметрична относительно экватора, т.е. эта инсоляция одинакова для обоих полушарий. Однако вид годовой инсоляции для разных эпох сильно отличается, особенно в теплую эпоху 31.28 т.л.н. Инсоляция в эквивалентных широтах за летнее полугодие в холодные эпохи 15.88 и 46.44 тыс. лет назад на широтах  $60^\circ$  и выше показывает меньшее количество тепла, чем сейчас на полюсе. А в теплую эпоху на широтах от  $17^\circ$  до полюсов в летний период тепла больше, чем сейчас на экваторе. Инсоляция в эквивалентных широтах за зимнее полугодие для всех рассматриваемых эпох имеет примерно одинаковый вид с экстремумом вблизи экватора. Графики отличаются только выпуклостью распределений: для холодных эпох она одна, а для теплой эпохи – другая.

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

## **ВВЕДЕНИЕ**

Астрономическая теория изменения климата базируется на изменении орбитального и вращательного движений Земли. За счет эволюции этих движений во времени изменяется количество солнечного тепла, поступающего на Землю, или ее инсоляция. В результате нового решения этих проблем [1] получены значительные колебания инсоляции, которые объясняют эволюцию палеоклимата [2].

М. Миланкович [3] для анализа изменения инсоляции ввел летнюю инсоляцию в эквивалентных широтах  $I_s$ . Она измеряется в широте  $\varphi$ , на которую в современную эпоху за летнее полугодие поступает такое же количество тепла, как

и в рассматриваемую эпоху. Инсоляция в эквивалентных широтах позволяет эффективно анализировать климаты прошлого.

В настоящей работе выполнено сравнение изменения инсоляции в эквивалентных широтах (за год  $I_T$ , летнее  $I_s$  и зимнее  $I_w$  полугодия) в Северном и Южном полушариях в современную эпоху.

Для трех последних инсоляционных периодов:  $I_I$  (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.

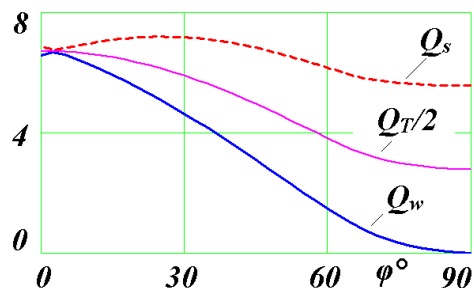
## АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНСОЛЯЦИИ В ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ШИРОТАХ

С помощью Астрономической теории изменения климата в любую заданную эпоху  $T$  можно получить изменение инсоляции, например, летней  $Q_s$  по широте Земли  $\varphi$ .

На рис. 1 показано изменение инсоляций за летнее  $Q_s$  и зимнее  $Q_w$  полугодия, а также за год  $Q_T$  на широте  $\varphi$  Северного полушария в современную эпоху 1950 г. Эта эпоха со временем  $T = 0$ , с конкретной датой 30.12.1949 г. принята за стандартную. Для стандартной эпохи, например, летняя инсоляция является функцией широты  $Q_{s,n}(\varphi)$ ,  $n$  – символ стандартной инсоляции. Графики инсоляций  $Q_s$ ,  $Q_w$  и  $Q_T$  получены в результате вычислений для конкретных широт и для конкретных значений времени, т.е. они являются дискретными. А сами функции  $Q_{s,n}(\varphi)$  являются нелинейными. Чтобы иметь их значения при любых значениях широты  $\varphi$  и времени  $T$ , эти функции интерполируются параболической зависимостью по трем точкам. После нахождения коэффициентов интерполяционных парабол можно получить обратную зависимость широты  $\varphi$  от инсоляции, например для летнего полугодия  $\varphi_s(Q_{s,n})$ . Если в какую-то эпоху  $T$  на широте  $\varphi_T$  летнюю инсоляцию обозначим  $Q_{s,i}$ , то с помощью обратной зависимости  $\varphi_s(Q_{s,n})$  инсоляцию в эквивалентных широтах определяем так  $I_s = \varphi(Q_{s,i})$ . Так как инсоляции за летнее  $Q_s$  и зимнее  $Q_w$  полугодия имеют свои отличия для Северного и Южного полушарий, то за стандартную инсоляцию берется инсоляция Северного полушария.

Для работы алгоритма обязательным условием является монотонность функции. Каждый вид инсоляции в Северном полушарии имеет экстремумы на разных широтах. Годовая инсоляция  $Q_T$  монотонно убывает от экватора ( $0^\circ$ ) до северного полюса ( $90^\circ$ ), летняя  $Q_s$  монотонно убывает от  $25^\circ$  до  $87.5^\circ$ , а зимняя  $Q_w$  от  $2.5^\circ$  до  $90^\circ$  (рис. 1).

Рис. 1. Изменение годовой  $Q_T$ , летней  $Q_s$  и зимней  $Q_w$  инсоляции в Гдж/м<sup>2</sup> в Северном полушарии в современную эпоху.



Основные зависимости для расчета инсоляции в эквивалентных широтах рассмотрим на примере летней инсоляции. Обозначим значения летней инсоляции на разных широтах  $\varphi_{n,i3}$  как  $Q_{s,n,i3}$ , где  $n$  – значок стандартной широты,  $i3$  – индекс конкретного значения широты. Тогда функциональная зависимость для стандартной летней инсоляции будет  $Q_{s,n,i3}(\varphi_{n,i3})$ . Для определения стандартной

широты, на которой инсоляция  $Q_s$  в эпоху  $T$  будет равна  $Q_{s,n}$  в эпоху  $T_0$ , необходимо использовать обратную зависимость  $\varphi_{n,i3}(Q_{s,n,i3})$ .

Так как зависимость  $\varphi_{n,i3}(Q_{s,n,i3})$  для стандартной инсоляции дискретна, то инсоляция в эквивалентных широтах при любом значении инсоляции  $Q_s$  находится с помощью параболической интерполяции

$$I_s = A_{iQ-1} \cdot Q_s^2 + B_{iQ-1} \cdot Q_s + C_{iQ-1}; \quad (1)$$

где  $iQ$  – индекс начала параболического участка аппроксимации.

Уравнения (1) используются для нахождения коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  интерполяционных парабол, только вместо  $I_s$  используются широты  $\varphi_{i3}$  стандартного распределения инсоляции. Тогда выражение (1) представляет систему линейных алгебраических уравнений, в которых неизвестны группы по трем коэффициентам  $A_{i3}$ ,  $B_{i3}$  и  $C_{i3}$ , где  $i3$  – индекс конкретного значения широты. Составляем системы уравнений в трех точках  $i3 - 1$ ,  $i3$ ,  $i3 + 1$ , в результате их решения находим выражения для этих индексов:

$$A_{i3} = \frac{\frac{\varphi_{n,i3+2} - \varphi_{n,i3+1}}{Q_{s,n,i3+2} - Q_{s,n,i3+1}} - \frac{\varphi_{n,i3+1} - \varphi_{n,i3}}{Q_{s,n,i3+1} - Q_{s,n,i3}}}{Q_{s,n,i3+2} - Q_{s,n,i3}}; \quad (2)$$

$$B_{i3} = \frac{\varphi_{n,i3+2} - \varphi_{n,i3+1}}{Q_{s,n,i3+2} - Q_{s,n,i3+1}} - A_{i3} \cdot (Q_{s,n,i3+2} + Q_{s,n,i3+1}); \quad (3)$$

$$C_{i3} = \varphi_{n,i3+1} - A_{i3} \cdot (Q_{s,n,i3+1})^2 - B_{i3} \cdot Q_{s,n,i3+1}. \quad (4)$$

При расчете инсоляции в эквивалентных широтах согласно формуле (1) индекс  $iQ$  подбирается так, чтобы рассматриваемое в эпоху  $T$  значение инсоляции  $Q_s$  находилось между значениями  $Q_{s,n,iQ-1}$  и  $Q_{s,n,iQ}$ .

По аналогичному алгоритму рассчитываются годовая  $I_T$  и зимняя  $I_w$  инсоляции в эквивалентных широтах. Как упоминалось ранее, они справедливы на монотонном участке изменения инсоляции по широте: годовая  $Q_T$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , зимняя  $Q_w$  от  $2.5^\circ$  до  $90^\circ$ .

## ИНСОЛЯЦИОННЫЕ ПЕРИОДЫ

В работе [2] по изменению летней инсоляции  $Q_s^{65N}$  на широте  $65^\circ$  были установлены 13 инсоляционных периодов со следующими градациями: очень холодный, холодный, умеренно холодный, умеренно теплый, теплый и очень теплый (рис. 2). Границы периодов были определены по отклонению инсоляции  $Q_s^{65N}$  от среднего значения  $Q_{sm}$  (линия 1, рис. 2).

За 200 тыс. лет было два очень теплых периода:  $2_I$  и  $8_I$ , и два очень холодных периода:  $3_I$  и  $7_I$ . Теплых периодов было два ( $4_I$  и  $12_I$ ), а холодных три ( $1_I$ ,  $9_I$  и  $11_I$ ). Остальные периоды были умеренно теплыми или умеренно холодными. В результате сопоставления с палеоклиматом в работе [2] показано, что в Западной Сибири период  $0_I$  соответствует оптимуму голоцена,  $1_I$  – сарганскому оледенению,  $2_I$  – каргинскому потеплению, а  $3_I$  – ермаковскому ледниковому периоду. Аналогичные изменения климата в эти периоды происходили на европейском континенте и в Северной Америке.

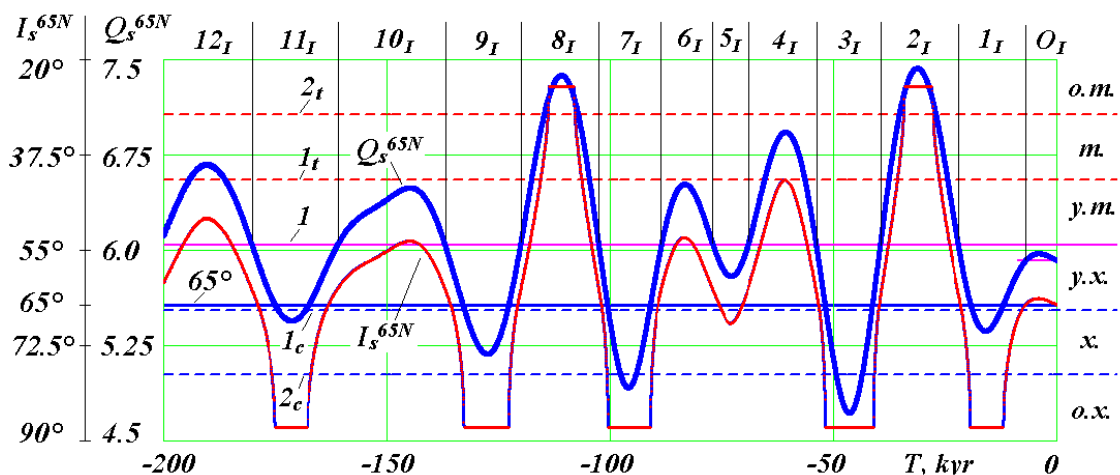


Рис. 2. Инсоляционные периоды изменения климата  $O_I, 1_I, 2_I, \dots, 12_I$  за 200 т.л.н. и летняя инсоляция в эквивалентных широтах  $I_s^{65N}$  на широте  $65^\circ$ :  $Q_s^{65N}$  – инсоляция за летнее полугодие в Гдж/м<sup>2</sup>;  $I$  – средняя инсоляция  $Q_{sm}$ ;  $1_t$  и  $2_t$  – первая и вторая границы теплых уровней;  $1_c$  и  $2_c$  – первая и вторая границы холодных уровней; у.т., т., о.т. – теплые уровни; у.х., х., о.х. – холодные уровни.

На рис. 2 приведен также график летней инсоляции в эквивалентных широтах  $I_s$ . Колебания  $I_s$  идентичны колебаниям  $Q_s$ , однако их выраженная в широтах амплитуда свидетельствует, насколько существенны эти колебания. Верхние горизонтальные площадки в периоды  $2_I$  и  $8_I$  показывают, что на широте  $65^\circ$  в эти периоды летом тепла было больше, чем сейчас на экваторе. Это действительно были очень теплые периоды. Горизонтальные нижние участки в периоды  $1_I, 3_I, 7_I, 9_I$  и  $11_I$  показывают, что в это время тепла на широте  $65^\circ$  летом было меньше, чем сейчас на полюсе. Это означает, что снег за лето не таял и образовывался ледниковый покров. То есть, это действительно были ледниковые периоды.

### СОВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНСОЛЯЦИЙ ПО ШИРОТЕ ЗЕМЛИ

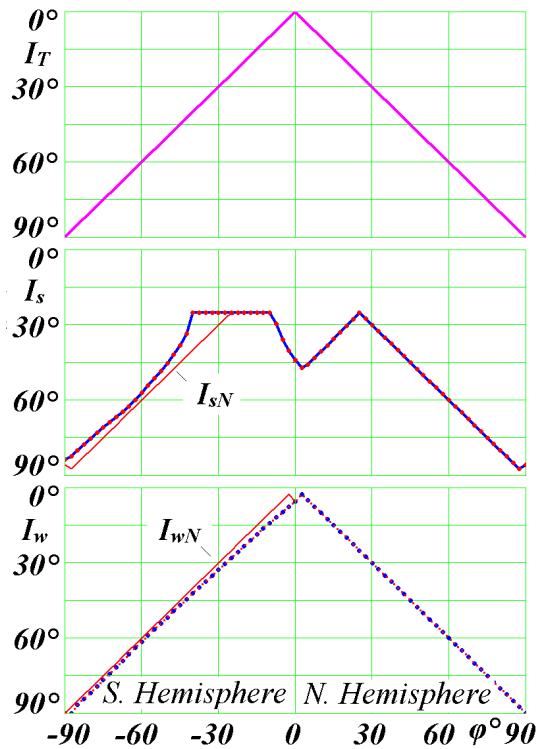
На рис. 3 показано изменение инсоляций за год  $I_T$ , за летнее  $I_s$  и зимнее  $I_w$  полугодия по широте Земли в современную эпоху. Годовая инсоляция  $I_T$  симметрична относительно экватора ( $\varphi = 0$ ): на экваторе она максимальна и равна нулю, а на полюсах  $-I_T = 90^\circ$ . Изменения  $I_T$  на всех широтах линейны по широте, т.е.  $I_T = \varphi$ .

Летняя инсоляция  $I_s$  по широте изменяется более сложно. В Северном полушарии на полюсе имеется небольшой максимум  $I_s = 85.934^\circ$ , заканчивающийся минимумом  $I_s = 87.494^\circ$  при  $\varphi = 87.5^\circ$ . 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 находится на широтах  $-40^\circ \leq \varphi \leq -10^\circ$ . Горизонтальный участок означает, что летняя инсоляция на этом диапазоне широт в Южном полушарии больше, чем максимальная на тропике Северного полушария.

Рис. 3. Распределение по широте Земли инсоляции в эквивалентных широтах за год  $I_T$ , за летнее  $I_s$  и зимнее  $I_w$  полугодия в современную эпоху (30.12.1949 г.):  $-90^\circ$  – Южный полюс,  $+90^\circ$  – Северный полюс.

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  $I_{sN}$  для сравнения 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  $I_w$  почти симметрична относительно экватора: на полюсах она минимальна и равна  $I_w = 90^\circ$ , а на экваторе – максимальна и находится вблизи  $0^\circ$ . 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.



### СРАВНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНСОЛЯЦИЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПЕРИОДЫ

На рис. 3 были рассмотрены распределения инсоляции по широте Земли в современную эпоху. На рис. 4 приведены инсоляции  $I_T$ ,  $I_s$  и  $I_w$  в периоды трех инсоляционных оптимумов  $1_I$ ,  $2_I$  и  $3_I$ . Как уже отмечалось, оптимум  $1_I$  соответствует середине последнего ледникового периода. По сравнению с современной эпохой (рис. 3) годовая инсоляция  $I_T$  на рис. 4 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. На рис. 4 линиями  $I_{TN0}$  – приведена годовая инсоляция Северного полушария в современную эпоху. В той области широт, где  $I_T$  находится выше  $I_{TN0}$  – годовое количество тепла в оптимуме  $1_I$  было больше, а на широтах, где  $I_T$  ниже  $I_{TN0}$ , тепло за год было меньше.

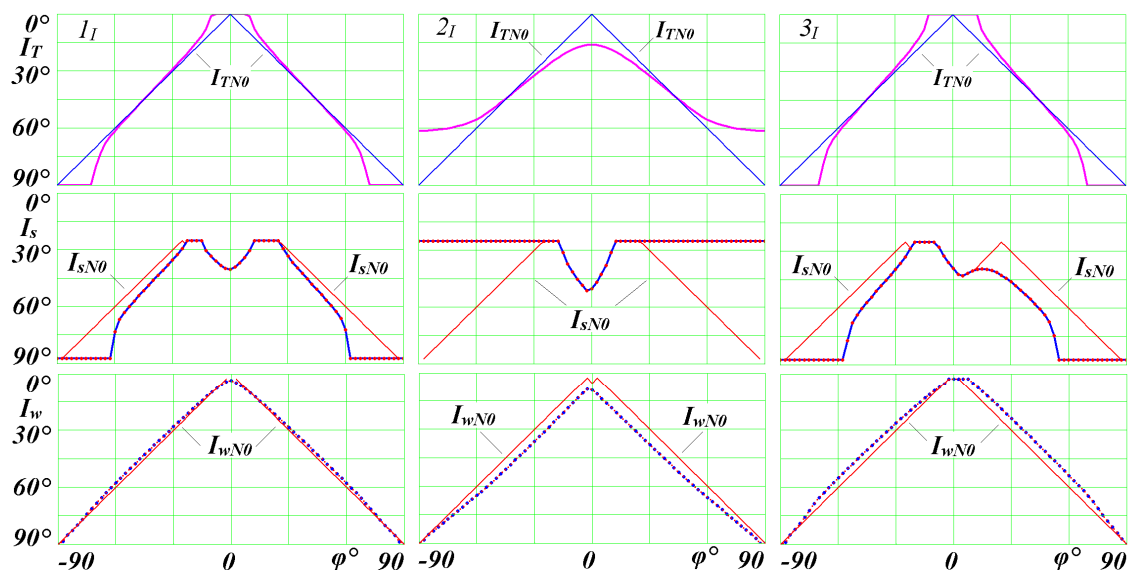


Рис. 4. Распределение по широте Земли инсоляции в эквивалентных широтах за год  $I_T$ , летнее  $I_s$  и зимнее  $I_w$  полугодия в три эпохи с инсоляционными экстремумами:  $I_1$  – 15.88 т.л.н.  $2_I$  – 31.28 т.л.н. и  $3_I$  – 46.44 т.л.н.

Летняя инсоляция  $I_s$  в оптимум  $I_1$  на рис. 4 отличается от современной эпохи на рис. 3 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. 4), т.е. здесь тепла было больше чем сейчас в экваториальной области. С другой стороны, в Южном полушарии в экваториальной области горизонтальный участок уменьшается по сравнению с рис. 3, т.е. в эпоху  $I_1$  тепла летом в экваториальной области Южного полушария было меньше чем сейчас.

Линиями  $I_{sNO}$  на рис. 4 нанесена летняя инсоляция в современную эпоху. В области широт, где она выше  $I_s$  было холоднее, чем в современную эпоху.

Зимняя инсоляция  $I_w$  в эпоху  $I_1$  на рис. 4 имеет более выпуклый профиль, чем в современную эпоху на рис. 3. Как видно из рис. 4, 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 оптимума  $2_I$ , сильного потепления, график годовой инсоляции  $I_T$  (рис. 4) существенно отличается от графиков  $I_T$  в холодные эпохи  $I_1$  и  $3_I$  и в современную эпоху (рис. 3). В экваториальной области годовая инсоляция  $I_T$  на рис. 4 больше  $15^\circ$ , т.е. на экваторе годового количества тепла было существенно меньше чем сейчас. В высоких широтах, наоборот, даже на полюсе тепла было не меньше чем сейчас на широте  $60^\circ$ . 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  $12.5^\circ$  до  $90^\circ$  держится на уровне  $25^\circ$ , т.е. тепла в этой области летом было больше чем сейчас на экваторе. Достоинно удивления такое жаркое лето в большей части земного шара. Об этом также свидетельствует расположение графика  $I_s$  над линией  $I_{sNO}$ .

Зимняя инсоляция  $I_w$  в эпоху  $2_I$  (рис. 4) имеет форму угла с вогнутыми сторонами, в отличие от угла с выпуклыми сторонами в холодные эпохи  $1_I$  и  $3_I$ , и с прямыми сторонами в современную эпоху на рис. 3. По расположению графика  $I_w$  под графиком  $I_{wNO}$  (рис. 4) 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. 4) имеет вид аналогичный холодному периоду  $1_I$ , но с большим отклонением от линии  $I_{TNO}$ . Это означает, что в высоких широтах тепла за год было меньше, а в экваториальных больше по сравнению с периодом  $1_I$ .

Такой же вывод следует из сравнения в период  $3_I$  летней инсоляции  $I_s$  на рис. 4. Например, летом тепла меньше чем сейчас на полюсе в период  $3_I$  было на широтах  $\varphi > 55^\circ$ , в то время как в период  $1_I$  на широтах  $\varphi > 62.5^\circ$ . Наряду с этим в период  $3_I$  имеется качественное отличие от периода  $1_I$ : в Северном полушарии в экваториальные широты летом тепла поступало меньше чем сейчас на широты  $42^\circ$ . Таким образом, в период  $3_I$  лето было очень холодным во всем Северном полушарии.

Зимняя инсоляция  $I_w$  в период  $3_I$ , как уже отмечалось, имеет форму угла с выпуклыми сторонами. Причем горизонтальная площадка в экваториальной области свидетельствует, что в этой области зима была теплее, чем сейчас на экваторе. А по расположению графика  $I_w$  над графиком  $I_{wNO}$  видно, что на всей Земле в период  $3_I$  зима была теплее, чем сейчас.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Выполненные исследования по изменению инсоляции в эквивалентных широтах позволяют сравнить климатическое состояние Северного и Южного полушарий. Структура современного климата на Земле отражена графиками изменения количества тепла за год  $I_T$  и за полугодия  $I_s$  и  $I_w$  на рис. 3. Оказалось, что годовая инсоляция в эквивалентных широтах  $I_T$  одинакова для обоих полушарий, тогда как летняя  $I_s$  и зимняя  $I_w$  отличаются. Этой структурой солнечного тепла обусловлены атмосферные и океанические процессы на Земле. Совместно с инсоляцией они создают климат Земли, который мы наблюдаем.

Как видно из рис. 4, в другие эпохи структура инсоляции Земли может существенно отличаться от современной. Это приводит к изменению атмосферных и океанических процессов и в совокупности приводит к существенному изменению климата. Он становится таким, которого мы не знаем. Это необходимо учитывать при интерпретации палеосвидетельств. Например, если их интерпретировать с позиции современного климата, то некоторые из них, которые обусловлены холодной зимой, можно отнести к ледниковому периоду. В действительности холодная зима присуща теплему периоду, а в ледниковый период – зима всегда теплая.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Смутьский И.И. Эволюция оси Земли и палеоклимата за 200 тысяч лет. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2016 – 228 с.
2. 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.
3. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. – М.-Л.: ГОНТИ, 1939 – 207 с.