

ИЗМЕНЕНИЕ ИНСОЛЯЦИИ МАРСА ЗА 1 МЛН. ЛЕТ

И.И. Смутьский¹

¹ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, ФИЦ, г. Тюмень

1. Введение. Созданная нами новая Астрономическая теория изменения климата Земли согласуется со всеми потеплениями и похолоданиями, которые можно проследить за 250 тыс. лет назад, и объясняет их [1]. Причиной этих изменений являются колебания поступающего на Землю солнечного тепла, т.е. инсоляции Земли.

В результате изучения поверхности Марса автоматическими космическими аппаратами установлены многие свидетельства присутствия воды на Марсе в прошлом. Отсюда следует, что в прошлом температуры на Марсе были такие, что погребенные льды таяли, на Марсе образовывались водоемы, текли реки, по небу плыли водяные облака, шли дожди и даже бушевали грозы. Поэтому ряд исследователей рассчитывали изменение инсоляции Марса. Но результаты эти не однозначны. Поэтому на основе разработанных нами методов несколько лет назад мы приступили к созданию новой Астрономической теории изменения климата Марса. С новыми начальными условиями была решена задача об эволюции орбитального движения Марса. Прежние программа решения задачи о вращательном движении Земли [2]- [3] и программа расчета ее инсоляции [4]- [5] были модифицированы так, чтобы они могли решать эти задачи для любой планеты. Решение задач об орбитальном и вращательном движениях Марса осуществлялось на суперкомпьютерах ЦКП Сибирского Суперкомпьютерного Центра ИВМиМГ СО РАН. Результаты за 1 млн. лет назад (м.л.н.) были обработаны, проанализированы и представлены в настоящей работе.

2. Эволюция инсоляции Марса. На рис. 1 на интервале 1 м.л.н. представлена эволюция инсоляции Марса за летнее Q_s , зимнее Q_w калорические полугодия и за год в целом Q_T на разных широтах Северного и Южного полушарий. Инсоляция выражена в ГДж/м², а широты указаны с правой стороны графиков. На широте 65° летняя инсоляция Q_s , начиная с современной эпохи ($T = 0$), испытывает небольшие колебания с периодом порядка 50 тыс. лет. Они продолжаются около 300 тыс. лет. Затем период колебаний увеличивается примерно до 120 тыс. лет и возрастает амплитуда до 1.3 ГДж/м². Такой характер изменения колебаний обусловлен аналогичным характером колебаний оси орбиты Марса на исследованном нами интервале 100 млн. лет [6]. Эти колебания чередуются двумя порциями малых и больших колебаний.

Колебания зимней инсоляции Q_w на широте 65° имеют аналогичный двух порционный характер. Дополнительно большие колебания модулированы малыми колебаниями. Амплитуда больших колебаний порядка 0.5 ГДж/м². Колебания зимней инсоляции проходят в противофазе колебаниям летней Q_s .

Колебания годовой инсоляции Q_T на широте 65° аналогичны колебаниям Q_s и находятся с ними в одной фазе. На первом интервале до 300 т.л.н. они отличаются тем, что период их колебаний в два раза больше. А на втором интервале колебания Q_T более регулярны, чем колебания Q_s . Амплитуда этих колебаний Q_T равно 0.85 ГДж/м², т.е. меньше амплитуды колебаний летней инсоляции Q_s .

Итак, на широте 65° зимняя инсоляция Q_w колеблется в противофазе летней Q_s и годовой Q_T . Поэтому в холодные периоды зимы будут теплее, а в теплые – холоднее по сравнению с современной эпохой.

На широте 80° структура колебаний на рис. 1 такая же, как на широте 65° за некоторым исключением. Для зимней инсоляции Q_w колебания с периодом 50 тыс. лет имеют большую амплитуду, сопоставимую с амплитудой колебаний с периодом 120 тыс. лет. Амплитуда этих колебаний на широте 80° для летней инсоляции $Q_s = 1.68$ ГДж/м², а для годовой $Q_T = 1.62$ ГДж/м², т.е. существенно больше, чем на широте 65°. Амплитуда колебаний зимней инсоляции на порядок меньше, и в несколько раз меньше колебаний Q_w на широте 65°. Следует отметить, что на графиках величины колебаний представлены примерно одинаково, но цены деления по вертикальной оси – разные.

На широте 45° вид колебаний подобен, но амплитуды существенно отличаются. Так амплитуда колебания годовой инсоляции Q_T равна 0.04 ГДж/м², а летней – 0.98 ГДж/м². То есть, можно сказать, что годовая инсоляция на широте 45° практически не изменяется. А амплитуда колебания зимней инсоляции Q_w равна 0.95 ГДж/м², т.е. почти такая же, как летней Q_s .

Итак, в высоких широтах, чем больше широта, тем больше амплитуда колебания, т.е. основные изменения климата происходят в высоких широтах.

Графики колебаний годовой инсоляции Q_T на широтах 25° и 0° аналогичны графикам колебаний в

высоких широтах, однако их фазы противоположны. То есть в холодные в высоких широтах эпохи в экваториальных широтах будет теплее. Амплитуда колебаний годовой инсоляции равна 0.27 ГДж/м^2 на широте 25° и 0.39 ГДж/м^2 на экваторе. Эти амплитуды значительно меньше, чем в высоких широтах. Но средние значения инсоляции значительно больше по сравнению с высокими широтами, например, больше в два раза по сравнению с широтой 80° .

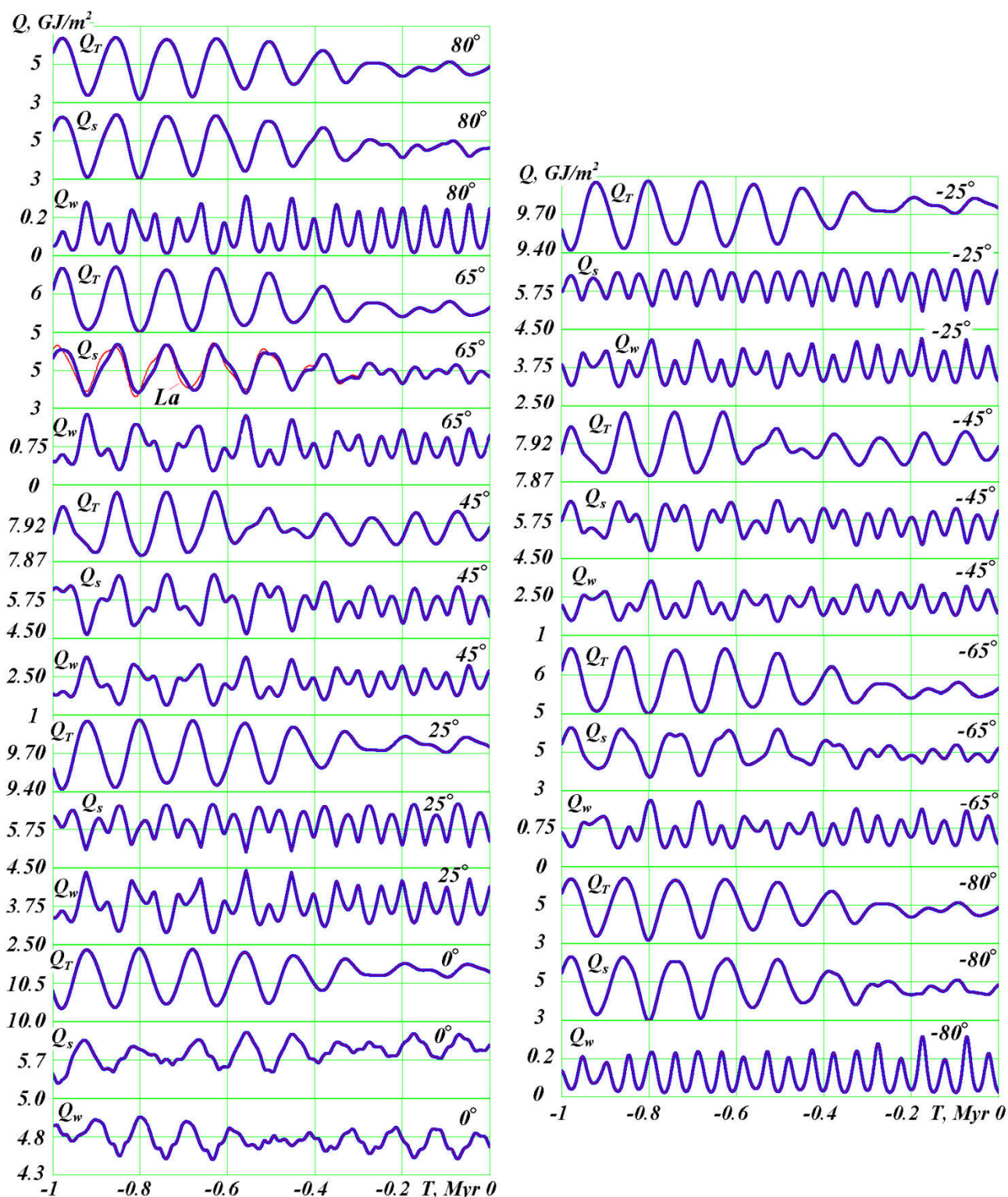


Рис. 1. Эволюция инсоляции Марса в ГДж/м^2 за 1 млн. лет назад на разных широтах Северного и Южного полушарий: Q_s – за летнее калорическое полугодие; Q_w – за зимнее калорическое полугодие; Q_T – за весь год; La – инсоляция Q_s по данным работы [7]. По оси инсоляции Q отсчет начинается с текущего графика. Время T отсчитывается в млн. лет назад с 2000.0 г.

Амплитуда колебаний с периодом 50 тыс. лет вносит значительный вклад в изменение Q_s и Q_w на широте 25° и усложняют картину. Фазы у них противоположны. Колебания Q_T с большим периодом, 120 тыс. лет, находятся в фазе с колебаниями зимней инсоляции Q_w . То есть, в теплые в экваториальных широтах периоды зимы будут теплее.

На экваторе также в ряде случаев инсоляции Q_w находится в фазе с годовой инсоляцией Q_T . Однако в целом колебания Q_w и Q_s – небольшие, и софазность и противофазность за весь интервал изменения нарушаются.

Итак, когда в высоких широтах наступает холодный период, в низких широтах становится теплее. На средней широте 45° количество солнечного тепла за год не изменяется, однако инсоляции за летние и зимние полугодия подвержены существенным и противоположным изменениям.

Эволюция инсоляции в Южном полушарии показана на правых графиках рис. 1. На широте -25° изменения годовой инсоляции Q_T такое же, как и на широте 25° . Летняя инсоляция Q_s изменяется в противофазе с зимней Q_w . Изменение Q_s и Q_w находятся в противофазе их изменениям на широте 25° : они сдвинуты на полпериода. Но полностью они не идентичны. Амплитуды колебаний этих инсоляций, такие же, как и на широте 25° .

На широте -45° годовая инсоляция Q_T такая же, как и на широте 45° . Q_s и Q_w изменяются в противофазе друг другу. По отношению к этим инсоляциям на широте 45° они сдвинуты на полпериода, т.е. на 25 тыс. лет, но не идентичны друг другу.

Аналогичная ситуация на широте -65° . Однако колебание больших периодов, 120 тыс. лет, для Q_s и Q_w совпадают с таковыми на широте 65° , но не идентичны.

На широте -80° годовая инсоляция Q_T совпадает с таковой на широте 80° , но инсоляции не идентичны. Зимняя инсоляция Q_w сдвинута на полпериода, 25 тыс. лет, по сравнению с широтой 80° , но не идентична.

Итак, в Южном полушарии годовая инсоляция такая же, как и Северном полушарии. А полугодовые инсоляции отличаются. В большинстве случаев они сдвинуты на полпериода малых колебаний и находятся в противофазе колебаниям этих инсоляций в Северном полушарии.

Четыре последних максимума инсоляций Q_T и Q_s и три последних минимума практически одинаковы на широтах 65° и 80° , но экстремальными из них являются холодная эпоха при $T = 802$ т.л.н. и самая теплая – при $T = 855$ т.л.н.

3. Изменение инсоляции по широте Марса. На рис. 2 приведены изменения по широте φ инсоляции Марса за год Q_T , за летнее калорическое Q_s и зимнее калорическое Q_w полугодия в современную эпоху $T = 0$. Годовая инсоляция Q_T на графике уменьшена в два раза. Она изменяется от минимального значения 4.75 ГДж/м^2 на полюсах, до максимального значения 10.64 ГДж/м^2 на экваторе.

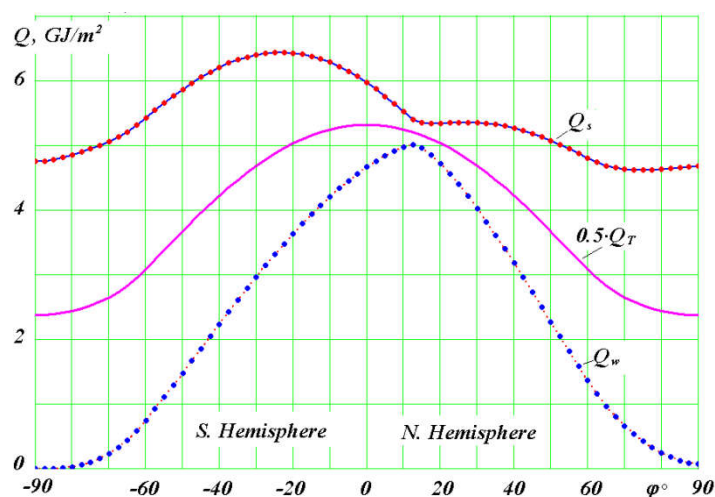


Рис. 2. Распределение по широте Марса удельного солнечного тепла в ГДж/м^2 в современную эпоху $T = 0$ (2000.0 г.): Q_s – за летнее калорическое полугодие; Q_w – за зимнее калорическое полугодие; Q_T – за весь год; на графике величина Q_T уменьшена в два раза; $\varphi > 0$ – северное полушарие; $\varphi < 0$ – южное полушарие.

Летняя инсоляция Q_s также на полюсах имеет наименьшее значение, и с уменьшением широты она увеличивается. На тропиках $\varphi = \varepsilon$, где ε – угол между плоскостями орбиты и экватора Марса, летняя инсоляция имеет максимум, затем она уменьшается и вблизи экватора имеется её минимум [4] - [5]. В современную эпоху инсоляция Q_s по полугодиям значительно отличается. В Южном полушарии её

максимум достигает величины 6.44 ГДж/м^2 , а в Северном полушарии максимум летней инсоляции практически отсутствует. Экваториальный минимум инсоляции также вырожден, и его точка находится на широте 12° .

Зимняя инсоляция Q_w имеет нулевые значения на полюсах и максимальное значение 5.01 ГДж/м^2 в экваториальной зоне, на широте 12° , т.е. в Северном полушарии. Поэтому зимняя инсоляция в Северном полушарии больше, чем в Южном. Итак, в современную эпоху более теплым в Южном полушарии является летнее полугодие, а в Северном полушарии – зимнее. Этот результат подтверждается фактическими данными: летом Южное полушарие Марса более теплое по сравнению с Северным, и снежная полярная шапка почти полностью исчезает [8].

Изменение инсоляции по широте в самую холодную эпоху $T = 802.4$ т.л.н. показано на рис. 3, слева. Годовая инсоляция Q_T изменяется от 2.86 ГДж/м^2 на полюсах до 10.55 ГДж/м^2 на экваторе. То есть, в высоких широтах количества тепла за год почти в два раза меньше по сравнению с современной эпохой (4.75 ГДж/м^2). Это – действительно очень холодный период.

Летняя инсоляция Q_s монотонно увеличивается от минимального значения на полюсе 2.86 ГДж/м^2 до максимального 5.95 ГДж/м^2 на широте 10° . В эту эпоху инсоляция по полугодиям более равномерная по сравнению с современной эпохой. В современную эпоху инсоляция Q_s на полюсах равна 4.7 ГДж/м^2 , т.е. в рассматриваемую эпоху летнее полугодие значительно холоднее.

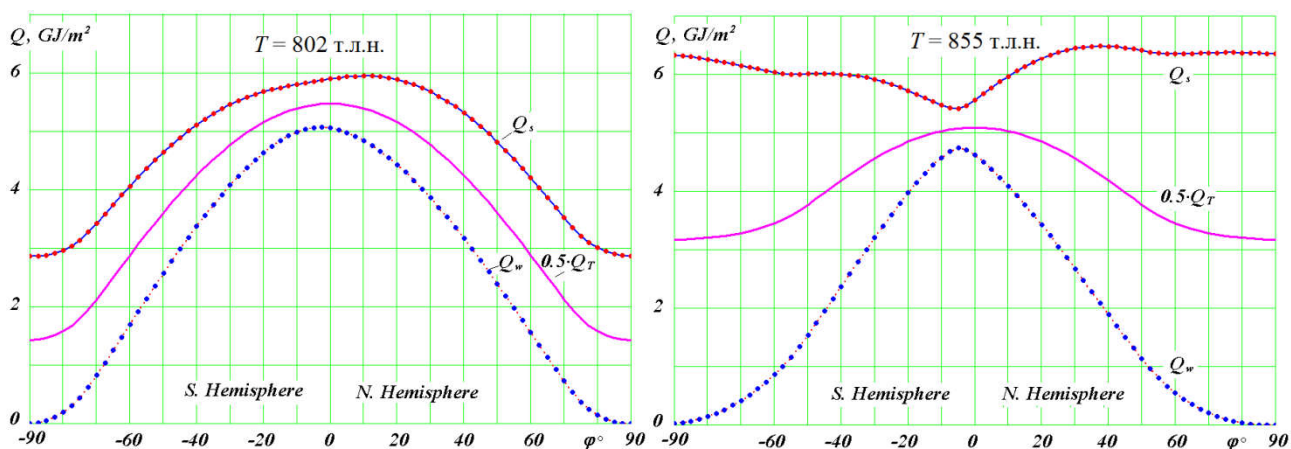


Рис. 3. Распределение по широте Марса удельного солнечного тепла в ГДж/м^2 в самую холодную эпоху $T = 802$ т.л.н. и в самую теплую эпоху $T = 855$ т.л.н. за 1 млн. лет. Обозн. см. на рис. 2.

Зимняя инсоляция Q_w (рис. 3, слева) изменяется от нулевого значения на полюсах до максимального 5.07 ГДж/м^2 на широте $\varphi = -5^\circ$. Обычно максимум Q_w и экваториальный минимум Q_s совпадают по широте [4] - [5]. Однако, в эту эпоху у летней инсоляции Q_s этот минимум является вырожденным. Зимняя инсоляция Q_w по сравнению с современной эпохой практически совпадает с инсоляцией в Северном полушарии в современную эпоху и значительно превышает инсоляцию в Южном полушарии. Это обусловлено тем, что, как уже отмечалось, полугодовые инсоляции Марса в современную эпоху (рис. 2) значительно отличается по полушариям.

Изменение инсоляции по широте в самый теплый период $T = 802.4$ т.л.н. показано на рис. 3, справа. Годовая инсоляция Q_T изменяется от наименьшего значения 6.35 ГДж/м^2 на полюсах до наибольшего 10.18 ГДж/м^2 на экваторе. Таким образом, в высоких широтах в эту эпоху солнечного тепла за год больше в 2.2 раза по сравнению с холодной эпохой.

Летняя инсоляция Q_s в этом случае имеет минимальное значение не на полюсах, а в экваториальной зоне, на широте -5° , равное 5.41 ГДж/м^2 . На полюсах она практически – максимальна и равна $Q_s = 6.3 \text{ ГДж/м}^2$, что больше летней инсоляции в современную эпоху на полюсах в 1.3 раза, а в холодную эпоху – в 2.2 раза.

Эти значения годовой и летней инсоляции в высоких широтах свидетельствуют, что эта эпоха действительно является теплой. Летняя инсоляция Q_s в высоких широтах достигает значений наибольшей инсоляции Q_s в современную эпоху в Южном полушарии (рис. 2). Этот максимум располагается в приэкваториальной зоне, и при нем тает южная полярная шапка. Поэтому в эпоху 855 т.л.н. в летние полугодия в обоих полушариях будут таять полярные шапки еще интенсивней, чем сейчас в Южном полушарии. Это приведет к росту содержания CO_2 в атмосфере, увеличению давления и снижению контрастности температуры дня и ночи [8]. В настоящее время в отдельных местах в эква-

ториальной области летом температура днем достигает 35°C, но ночью опускается ниже -20°C. Поэтому есть основания считать, что в эту эпоху положительные температуры летом будут не только днем, но и ночью.

Зимняя инсоляция Q_w в теплую эпоху (рис. 3, справа) изменяется от нулевого значения на полюсах до максимального 4.74 ГДж/м² на широте $\varphi = -5^\circ$. Её значение в Южном полушарии почти такие же как в современную эпоху, а в Северном – значительно меньше. По сравнению с холодной эпохой (рис. 3, слева) зимняя инсоляция по всей поверхности Марса существенно меньше. Таким образом, в теплую эпоху зимы будут холодными.

4. Сравнение с работами других авторов. В работе [7] таких детальных исследований инсоляции, как у нас, не проводилось. Рассчитывалась только инсоляция в день летнего солнцестояния на Северном полюсе. По данным [7] нами была рассчитана инсоляция на широте 65° за летнее полугодие, которая приведена линией La на рис. 1. До 300 тыс. лет она не отличается от наших результатов, а на остальном интервале отличия небольшие. Совпадение результатов за первые 300 тыс. лет свидетельствует, об идентичности начальных условий и исходных данных, и адекватности методов решения этих задач.

Отличия результатов [7] от наших результатов за время большее 300 тыс. лет обусловлены неточностями решения задач орбитального и вращательного движений авторами работы [7]. Постепенно погрешности нарастают и после 3-х м.л.н. результаты [7] становятся неустойчивыми. Наши решения устойчивые. Их устойчивость надежно доказана по орбитальному движению за 100 млн. лет [6], а по вращательному движению Земли – за 20 млн. лет [2] - [3].

Следует отметить, что в более ранней статье Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой [9] на этом же интервале времени рассчитаны инсоляции Q_s , Q_w и Q_T на широтах 50° и 80°. Они хорошо согласуются с нашими результатами.

Заключение. На интервале 1 м.л.н. инсоляция Марса характеризуется двумя участками ее изменения. На первом участке до 300 т.л.н. периоды колебания порядка 50 тыс. лет и амплитуды небольшие, а далее – периоды 120 тыс. лет и большие амплитуды.

В современную эпоху инсоляция Южного полушария за летнее калорическое полугодие значительно больше, чем Северного. Это приводит почти полному исчезновению южной полярной шапки летом. В целом климат Марса сейчас находится в середине своих долгопериодических колебаний.

Наиболее холодный климат был 802 т.л.н. Количество тепла за год и за летнее полугодие в высоких широтах уменьшалось в 1.66 раза. Это могло приводить к существенному расширению полярных шапок Марса, падению давления и температуры на всей поверхности Марса. В самую теплую эпоху 855 т.л.н. количество тепла за год и за летнее полугодие возрастало в 1.34 раза по сравнению с современной эпохой. Это могло приводить к исчезновению полярных шапок Марса летом, росту атмосферного давления и температуры до положительных значений не только днем, но и ночью. Эти выводы также относятся ко всем последним 3 холодным эпохам и 4 теплым.

Работа выполнена в Институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2026-0025).

Литература

- 1 Смульский И.И. Инсоляционная причина долгопериодических изменений климата // Геофизические процессы и биосфера. 2024. – Т.23. – №2. – С. 25-39. DOI: 10.21455/GPB2024.2-3. https://www.ikz.ru/~smulski/Papers/IPDIK103_1JP.pdf.
- 2 Смульский И.И. Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет // Сложные системы. 2020. – №1 (34). – С. 4-49. <https://thecomplexsystems.ru/archive/>.
- 3 Smulsky J.J. New Understanding in Physics and Astronomy. India, UK: B P International, 2023. – 209 p. DOI: 10.9734/bpi/mono/978-81-967401-5-3. <https://www.bookpi.org/bookstore/product/new-understanding-in-physics-and-astronomy/>.
- 4 Смульский И.И., Кротов О.И. Новый алгоритм расчета инсоляции Земли / Институт криосферы Земли СО РАН, 2013. – 38 с. Деп. в ВИНТИ – № 103-B2013. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/NwAlCII2c.pdf>.
- 5 Smulsky J.J., Krotov O.I. New Computing Algorithm of the Earth's Insolation // Appl. Phys. Res. 2014. – V. 6. – No.4. – P. 56-82. <https://doi.org/10.5539/apr.v6n4p56>.
- 6 Гребеников Е.А., Смульский И.И. Эволюция орбиты Марса на интервале времени в сто миллионов лет / Сообщения по прикладной математике. Российская Академия Наук: ВЦ им. А.А. Дородни-

цына. 2007. 63 с. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/EvMa100m4t2.pdf>.

7 Laskar J., Correia A. C. M., Gastineau M., Joutel F., Levrard B. and Robutel P. Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars // *Icarus*. – 2004. – 170. – Iss. 2. – P. 343-364.

8 Montmessin F. The Orbital Forcing of Climate Changes on Mars // *Space Science Reviews*. – 2006 – 125 (1-4). –P. 457-472.

9 Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. Об астрономической теории колебаний климата Марса // Докл. АН СССР. – 1975. – Т.221. – №1. – С. 64-66.