

Исследование причин и последствий таяния льдов Арктики

Г. А. Аванесов¹, Б. С. Жуков¹, М. В. Михайлов²

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: genrikh-avanesov@yandex.ru*

² *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, 141070, Россия*

Причина таяния льдов Арктики кроется в группе переменных астрономических факторов: эксцентриситете орбиты Земли, наклоне её оси вращения и прецессии вокруг перпендикуляра к плоскости эклиптики. Они проявляют себя в виде профицита и дефицита инсоляции земной поверхности, циклически возникающих в полярных областях планеты с периодом прецессии. В соответствии с представленной в данной работе астрономической моделью инсоляции зон полярных суток Земли энергетический дисбаланс может изменяться в пределах $\pm 10\%$ от той годовой доли солнечного излучения, которая соответствует площади и географическому положению этих областей планеты. Из-за крайне низких, исчисляемых многими тысячелетиями темпов изменений дисбаланс энергии на сегодняшний день не поддаётся измерениям ни наземными, ни космическими средствами. Его можно увидеть и оценить количественно только в математической модели. При этом все приводящие к дисбалансу и перечисленные здесь космические факторы давно и хорошо известны из астрономии и постоянно используются во всех без исключения навигационных системах. В работе показано, что таяние льдов Арктики началось уже около 10 тыс. лет тому назад. Из-за профицита инсоляции ежегодно за время полярного дня таяло больше льда, чем намораживалось за время полярной ночи. К середине прошлого века запасы льда подошли к концу, и начался подогрев вод Ледовитого океана. Началось и ускоряется таяние льдов Гренландии, что грозит катастрофическими последствиями. В Антарктике в наше время профицит инсоляции сменяется дефицитом. Предложенная авторами астрономическая модель инсоляции требует развития. Необходимо создать аналогичную по смыслу астрономическую модель для выявления профицита и дефицита инсоляции по всей площади земного шара. Кроме того, в новой модели должны учитываться нутационные колебания земной оси, а также имеющие место отклонения реального расстояния от Земли до Солнца относительно среднего эллипса земной орбиты. В заключении к работе указано, что положение с таянием льдов Арктики следует признать катастрофическим, в связи с чем необходимо своевременное принятие важных, научно обоснованных управленческих решений.

Ключевые слова: Земля, Луна, Арктика, Антарктика, орбита, эксцентриситет, эклиптика, наклон земной оси, прецессия, нутация, инсоляция, дисбаланс энергии, дефицит, профицит

Одобрена к печати: 01.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-9-29

Введение

В поисках причин ускоряющегося таяния льдов Арктики авторы данной работы разработали астрономическую модель инсоляции зон полярных суток Земли и сопоставили её с данными из истории климата и результатами современных исследований динамики таяния льдов Северного Ледовитого океана, что позволило предложить следующую картину происходивших событий. Очень значительное потепление климата на нашей планете произошло около 20 тыс. лет тому назад после 3 млн лет Большого ледникового периода в результате серии мощных вулканических событий. Об этом свидетельствуют данные, полученные при исследовании ледяных кернов, добытых в Антарктике и Гренландии. Выход из оледенения сопровождался катастрофическими для всего живого климатическими изменениями. Последнее в этом ряду событие, завершившееся около 10 тыс. лет тому назад, привело к повышению среднегодовой температуры в районах полюсов Земли. В Антарктике она увеличилась на 7°C , а в Гренландии — на целых 15°C . Льды, доходившие до 50°с.ш. , начали постепенно

уступать место растительности, открытой воде и грунту. Альbedo планеты стало уменьшаться. Но это не привело к быстрому росту температуры на всех материках планеты, так как в районах полюсов Земли сложились условия для таяния льдов во время полярного дня. В результате льды начали действовать как огромные тепловые аккумуляторы, работающие в режиме рекуперации энергии. Однако повышение и перераспределение поля температуры по всем материкам стало неизбежным.

В наше время природный тепловой аккумулятор в окрестностях Северного полюса продолжает свою работу, но его ёмкость уже значительно сократилась. Соответственно уменьшились и его возможности по сдерживанию процесса потепления, что проявляет себя как в росте среднегодовой температуры в Северном полушарии и в мире, так и в растущей частоте и мощности природных катастроф. При этом следует учитывать, что за последние 500 млн лет стабильными на больших отрезках времени были только жаркие и холодные периоды. Всё остальное время представляет собой непрерывную цепочку переходных процессов. Фрагмент последнего из них, продолжительностью в 10 тыс. лет, выдался особенно удачным. Человек сумел воспользоваться им, чтобы шагнуть из первобытного состояния в современное индустриальное общество. Теперь человечеству предстоит вступить в борьбу с потеплением, сочетая эту нелёгкую работу с поиском возможностей приспособления к изменяющимся условиям существования.

Астрономическая модель инсоляции зон полярных суток Земли

Одной из наиболее очевидных и заметных климатических аномалий становится быстрое уменьшение площади северной полярной шапки, что свидетельствует о наличии значительного профицита тепловой энергии в годовом балансе в этой части планеты. По некоторым прогнозам через несколько десятков лет полярная шапка может почти полностью исчезнуть из-за идущего на планете потепления. Что стало причиной этой аномалии: внешнее воздействие со стороны космоса, антропогенный фактор, проявления внутренних сил нашей планеты или сочетание тех и других факторов?

Частично ответ на этот вопрос содержится в работах (Аванесов, Михайлов, 2022; Аванесов и др., 2023; Михайлов, Константинов, 2021). В них, следуя за идеями Милутина Миланковича (*серб.* Милутин Миланковић) (1939), исследовался дисбаланс энергии инсоляции зон полярного дня и энергии уходящего излучения зон полярной ночи, зависящие от наклона земной оси, эксцентриситета орбиты Земли, а также от прецессии земной оси по конусу вокруг нормали к плоскости орбиты планеты.

На Земле есть области, в которых смена дня и ночи происходит не с частотой в сутки, а значительно медленнее. Эти области — зоны полярной ночи и полярного дня — в наше время лежат выше $66,5^\circ$ северной и южной широты. Длительность полярного дня и полярной ночи увеличивается от одних суток у полярного круга до примерно полугода на полюсах (с отклонениями в несколько суток по причине разной скорости движения Земли по орбите во время лета и зимы в северном и южном полушарии, а также из-за рефракции в атмосфере). Соответственно, в течение года изменяется и площадь зон полярного дня и полярной ночи.

Годовой баланс инсоляции полярного дня и излучения полярной ночи зависит от параметров орбиты Земли.

Определим зависимость полугодовой инсоляции зоны полярного дня, например Северного полушария, от параметров орбиты Земли. На *рис. 1* (см. с. 11) приведена эллиптическая орбита Земли вокруг Солнца и углы, описывающие движение планеты. На нём показаны перигелий и апогелий орбиты, а также положение Земли на орбите в текущий момент времени. Угловое расстояние Земли относительно перигелия Θ называется истинной аномалией. На *рис. 1* также показана точка зимнего солнцестояния. Когда Земля находится в этой точке, проекция оси вращения Земли на плоскость орбиты совпадает с направлением Солнце — Земля. Обозначим угол между перигелием и точкой зимнего солнцестояния через λ , а орбитальный угол между Землёй и точкой зимнего солнцестояния — через φ .

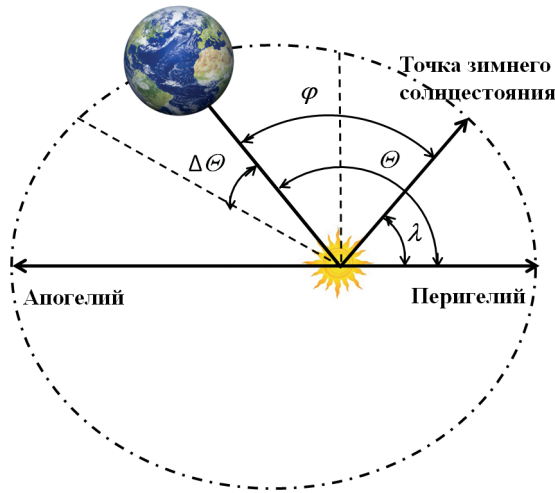


Рис. 1. Связь между истинной аномалией Θ , углом φ от точки зимнего солнцестояния и углом прецессии оси вращения Земли λ

Очевидно равенство:

$$\varphi = \Theta - \lambda. \quad (1)$$

Площадь зоны полярного дня зависит от радиуса Земли R , наклона земной орбиты i и орбитального угла φ и определяется по формуле:

$$S_{\text{ПД}} = \pi R^2 \sin^2 i \cdot \cos^2 \varphi. \quad (2)$$

Пусть j_0 — секундная инсоляция единичной поверхности, нормальной к направлению на Солнце на расстоянии a от Солнца ($j_0 \approx 1,3 \text{ кВт/м}^2$), где a — большая полуось орбиты Земли.

Секундная инсоляция на наклонную единичную поверхность на расстоянии r от Солнца будет равна

$$j_{\text{Н}} = j_0 \frac{a^2}{r^2} \cos \alpha, \quad (3)$$

где α — угол между нормалью к поверхности и направлением на Солнце.

Связь между углом α и углами i и φ определяется уравнением:

$$\cos \alpha = -\sin i \cdot \cos \varphi. \quad (4)$$

Из соотношений (2)–(4) получим секундную инсоляцию зоны полярного дня:

$$E_{\text{ПД}} = -j_0 \pi R^2 \frac{a^2}{r^2} \sin^3 i \cdot \cos^3 \varphi. \quad (5)$$

Полярный день Северного полушария соответствует углам

$$\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{3\pi}{2}. \quad (6)$$

Инсоляция зоны полярного дня будет равна

$$E_{\text{ПД}} = - \int_{\pi/2}^{3\pi/2} j_0 \pi R^2 \frac{a^2}{r^2} \sin^3 i \cdot \cos^3 \varphi dt. \quad (7)$$

Выразив угол φ через истинную аномалию Θ с помощью равенства (1), получим:

$$E_{\text{ПД}} = - \int_{(\pi/2)+\lambda}^{(3\pi/2)+\lambda} j_0 \pi R^2 \frac{a^2}{r^2} \sin^3 i \cdot \cos^3 (\Theta - \lambda) dt. \quad (8)$$

Угол Θ во времени меняется в соответствии с законом площадей:

$$r^2 \dot{\Theta} = a^2 \omega_0 \sqrt{1-e^2}, \quad (9)$$

где ω_0 — средняя орбитальная угловая скорость, $\omega_0 = 2\pi/P$, где P — период земной орбиты; e — эксцентриситет орбиты Земли.

Из равенства (9) определим:

$$dt = \frac{r \, d\Theta}{a^2 \omega_0 \sqrt{1-e^2}}. \quad (10)$$

Подставив значение dt в выражение (8), получим:

$$E_{\text{ПД}} = \frac{-j_0 \pi R^2 \sin^3 i}{\omega_0 \sqrt{1-e^2}} \int_{(\pi/2)+\lambda}^{(3\pi/2)+\lambda} \cos^3(\Theta - \lambda) \, d\Theta. \quad (11)$$

Вычислив интеграл (11) и пренебрегая малым параметром e^2 , найдём:

$$E_{\text{ПД}} = \frac{4j_0 \pi R^2 \sin^3 i}{3\omega_0}. \quad (12)$$

Учитывая, что $2\pi/\omega_0 = P$, а $j_0 \pi R^2 P$ равно годовой инсоляции Земли E_c , получим:

$$E_{\text{ПД}} = \frac{2E_c}{3\pi} \sin^3 i. \quad (13)$$

Для среднего значения наклона $i_{\text{cp}} = 23,43^\circ$ вычислим годовую инсоляцию зоны полярного дня, равную

$$E_{\text{ПД}} = \frac{2 \sin^3 i_{\text{cp}} E_c}{3\pi} (1 + 3 \text{ctg} i_{\text{cp}} \Delta i), \quad (14)$$

где $\Delta i = i - i_{\text{cp}}$.

Определим энергию излучения зоны полярной ночи. Площадь зоны полярной ночи находится по формуле (2). Обозначим секундное излучение единицы площади полярной ночи через $j_{\text{ПН}}$. Оценить величину можно по формуле Стефана – Больцмана:

$$j_{\text{ПН}} = \sigma T_0^4, \quad (15)$$

где σ — постоянная Стефана – Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$; T_0 — некоторая средняя установившаяся температура на поверхности зоны полярной ночи по шкале Кельвина. Эффективная средняя температура Земли, как чёрного тела, равна 249 К или -24°C . Температура T_0 имеет такой же порядок. Тогда секундное излучение зоны полярной ночи с учётом формулы (2) будет равно

$$E_{\text{ПН}} = j_{\text{ПН}} \pi R^2 \sin^2 i \cdot \cos^2 \varphi. \quad (16)$$

Полугодовое излучение за время полярной ночи:

$$E_{\text{ПН}} = j_{\text{ПН}} \pi R^2 \sin^2 i \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2 \varphi \, dt. \quad (17)$$

В подынтегральном выражении (17) dt может быть выражен через $d\varphi$ в соответствии с равенством (10). Тогда

$$E_{\text{ПН}} = j_{\text{ПН}} \pi R^2 \sin^2 i \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2(\varphi) \frac{r^2 d\varphi}{a^2 \omega_0 \sqrt{1-e^2}}. \quad (18)$$

В подынтегральное выражение (17) входит радиус орбиты r , который является функцией истинной аномалии и эксцентриситета:

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos \Theta} = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos(\varphi + \lambda)}. \quad (19)$$

Подставив значение r в выражение (18), после ряда преобразований, пренебрегая e во второй степени и выше, получим:

$$E_{\text{ПН}} = \frac{j_{\text{ПН}} \pi R^2 \sin^2 i}{\omega_0} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2 \varphi \cdot (1 - 2e \cos(\varphi + \lambda)) d\varphi. \quad (20)$$

Вычислив интеграл в равенстве (20) для постоянного в течение года угла λ , после ряда преобразований получим значение энергии излучения зоны полярной ночи за зимний период в виде:

$$E_{\text{ПН}} = \frac{j_{\text{ПН}} T \pi R^2}{4} \cos^2 i_{\text{cp}} \left[1 + 2 \text{ctg} i_{\text{cp}} \Delta i - \frac{16}{3\pi} e \cos \lambda \right]. \quad (21)$$

Уравнение (21) определяет энергию излучения зоны полярной ночи за полгода. Разность энергии инсоляции за время полярного дня ($E_{\text{ПД}}$), устанавливаемой по выражению (14), и энергии излучения за время полярной ночи ($E_{\text{ПН}}$), рассчитываемой с помощью равенства (21), назовём приращением энергии инсоляции за полярные сутки — $\Delta E_{\text{ПС}}$.

$$\Delta E_{\text{ПС}} = \frac{2}{3\pi} E_c \sin^3 i_{\text{cp}} (1 + 3 \text{ctg} i_{\text{cp}} \Delta i) - \frac{j_{\text{ПН}} \pi R^2 \sin^2 i}{4} \sin^2 i_{\text{cp}} \left[1 + 2 \text{ctg} i_{\text{cp}} \Delta i - \frac{16}{3\pi} e \cos \lambda \right]. \quad (22)$$

Средний годовой баланс для i_{cp} и нулевого эксцентриситета будет равен

$$\Delta E_{\text{ПС}_{\text{cp}}} = \frac{2}{3\pi} E_c \sin^3 i_{\text{cp}} - \frac{j_{\text{ПН}} \pi R^2 \sin^2 i}{4} \sin^2 i_{\text{cp}}. \quad (23)$$

Разумно предположить, что при постоянном номинальном наклонении и постоянном нулевом эксцентриситете на Земле установились бы стационарные полярные шапки постоянной средней величины. Будем называть их средними полярными шапками. При этом приращение энергии инсоляции за время полярных суток, $\Delta E_{\text{ПС}}$, примет нулевое значение. Величину $\Delta E_{\text{ПС}}$, рассчитанную относительно его значения при нулевом эксцентриситете и номинальном наклонении, будем условно называть дисбалансом энергии полярных зон. Условно, потому что в баланс энергии полярной зоны помимо включённых в модель факторов вносят вклад и другие процессы (отражение солнечного излучения, горизонтальный перенос тепловой энергии и др.), которые в ней не учитываются.

Очевидно, что если средние полярные шапки неизменны во времени, значит и годовой энергобаланс, определяющий изменение размеров шапки, равен нулю. То есть выражение (23) равно 0. Тогда

$$\frac{j_{\text{ПН}} \pi R^2}{4} \sin^2 i_{\text{cp}} = \frac{2}{3\pi} E_c \sin^3 i_{\text{cp}}. \quad (24)$$

При изменениях наклонения, эксцентриситета и угла прецессии отклонение от нуля годового энергобаланса северной полярной шапки определим из выражений (23) и (24):

$$\Delta E_{\text{ПС}} = 0,1334 E_c (0,04 \Delta i_{\text{cp}} + 1,7 e \cos \lambda), \quad (25)$$

где $E_c = 5,5 \cdot 10^{24}$ Дж; Δi_{cp} — отклонение текущего наклонения от среднего (в град).

Для Южного полушария полярная ночь происходит при углах между Землёй и точкой зимнего солнцестояния в диапазоне $\pi/2 \leq \varphi \leq 3\pi/2$. Поэтому интегрирование выражения (18) необходимо провести для соответствующего диапазона значений угла φ . Тогда для Южного полушария отклонения годового энергобаланса полярной шапки от нуля будет равно

$$\Delta E_{\text{ПС}} = 0,1334 E_c (0,04 \Delta i_{\text{cp}} - 1,7 e \cos \lambda). \quad (26)$$

Формулы (25) и (26) определяют дисбаланс зон полярных дней и ночей соответственно Северного и Южного полушарий в зависимости от текущего наклона, эксцентриситета и угла прецессии. Сегодня значения этих параметров орбиты Земли хорошо известны, по крайней мере, на интервале ± 1 млн лет (Аванесов, Михайлов, 2022; Михайлов, Константинов, 2021; Laskar et al., 2004).

С учётом этих параметров, а также в соответствии с алгоритмами (25) и (26) построены графики дисбаланса энергии зон полярных дней и ночей для Арктики и Антарктики (рис. 2). Графики охватывают период от минус 700 тыс. лет в прошлом до плюс 100 тыс. лет в будущем, приведены в условных единицах (у.е.) и отражают зависимость энергобаланса от Δi , e и $\cos \lambda$. Для перевода в джоули значения, приведённые на графиках, необходимо умножить на коэффициент $0,01334E_c$.

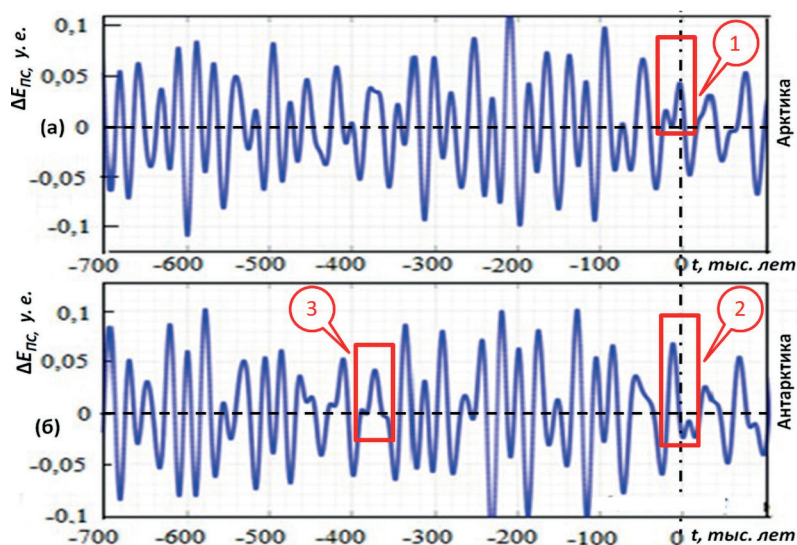


Рис. 2. Условный дисбаланс энергии зон полярных суток для Арктики (а) и Антарктики (б)

Представленные результаты расчёта энергетического дисбаланса полярных шапок Земли получены в рамках принятой выше модели, в которой годовой баланс инсоляции полярного дня и излучения полярной ночи оцениваются в зависимости от параметров орбиты Земли.

Положительный годовой энергобаланс приводит к повышению температуры и таянию шапки, отрицательный — к понижению температуры и росту шапки. Осреднение процесса на большом интервале времени вызывает изменение температуры в окрестности соответствующих полярных шапок.

Несколько слов о выделенных на рис. 2 фрагментах модели. Фрагмент модели под номером 1 на рис. 2а охватывает историю климатических событий, происходивших в Северном полушарии, начиная с доисторического периода, в наше время и в обозримом будущем. Видно, что 10 тыс. лет назад здесь должен был начаться и продолжаться ещё 3 тыс. лет рост температуры, но этого, как мы знаем, тогда не произошло. Повышение среднегодовой температуры началось только сейчас.

Под номером 2 на рис. 2б показан фрагмент модели, описывающий события в Южном полушарии. Видно, что здесь пик инсоляции имел место около 5 тыс. лет тому назад. Здесь также не произошло ожидаемого повышения температуры. В наше время тепловой баланс в Южном полушарии уже уходит в отрицательную область. На несколько тысячелетий здесь наступит время дефицита инсоляции. Однако дефицит не будет острым.

Под номером 3 на рис. 2б показан фрагмент модели, который описывает климатические события в Южном полушарии на отрезке времени от минус 370 до минус 390 тыс. лет.

По замыслу авторов, модель не принимает во внимание факторы земного происхождения. Поэтому она не может претендовать на точные количественные оценки. Правильность

предложенной модели должна подтверждаться сопоставлением приведённых на *рис. 2* графиков с данными из истории климата, с результатами современных исследований, а также с реально идущими на Земле процессами и явлениями. С их использованием модель может абсолютизироваться.

Сопоставление модели с данными из истории климата

На *рис. 3а* показан график условного дисбаланса энергии антарктической зоны полярных суток Земли. Приведённые к единому масштабу времени графики, характеризующие вариацию температуры в Антарктике и период изменения эксцентриситета орбиты Земли, представлены на *рис. 3б* и *в* соответственно.

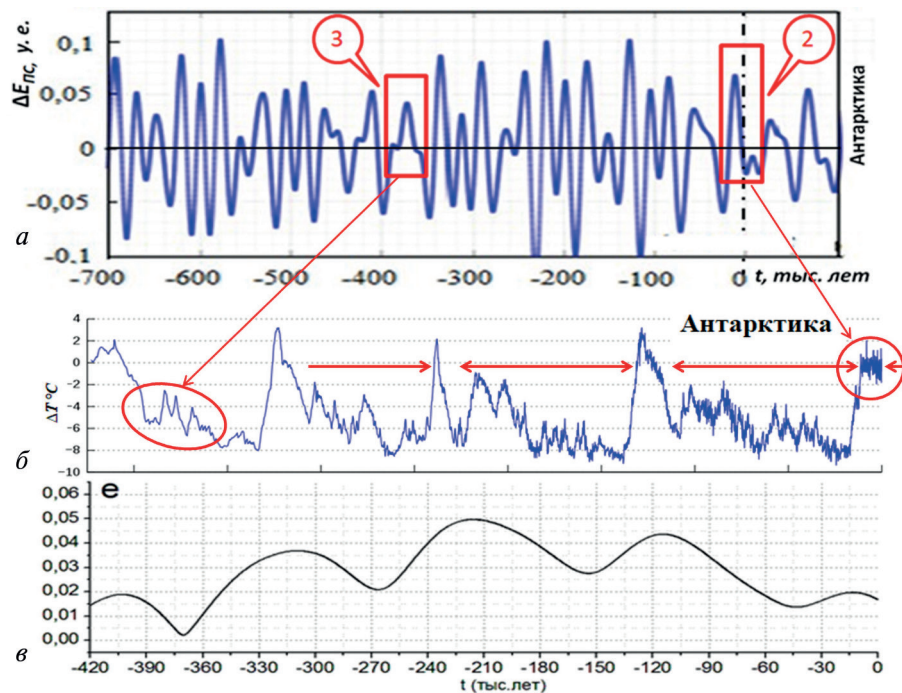


Рис. 3. Условный дисбаланс энергии зон полярных суток для Антарктики (*а*), вариации температуры в Антарктике (*б*) и изменений эксцентриситета орбиты Земли (*в*)

Хорошо видно, что вершины пяти самых крупных температурных всплесков, обозначающих межледниковые периоды, совпадают по времени с максимальными значениями эксцентриситета орбиты. При этом вершина последнего всплеска по форме значительно отличается от предшественников. В ней просматриваются признаки колебательного процесса, свойственного системам автоматического регулирования. При этом видно, что амплитуда колебаний не превышает ± 2 °C.

Из истории известно, что климат на Земле никогда не отличался постоянством. На протяжении миллионов лет среднегодовая температура на нашей планете изменялась в весьма широких пределах. Последний пик жары произошёл около 60 млн лет тому назад, после чего среднегодовая температура начала медленно снижаться. Около 3 млн лет тому назад температура ушла в отрицательную область. Приполярные регионы планеты покрылись толстым слоем льда. В Северном полушарии льды доходили до 50° с. ш. На пике оледенения толщина ледяного панциря могла достигать 700 м (Чумаков, 2015).

Земля начала выходить из оледенения благодаря серии мощных вулканических событий, начавшихся около 50 тыс. лет тому назад. Такие события всегда сопровождаются выходом на поверхность эндогенного тепла и вулканического пепла, уменьшающего альбедо Земли.

Достаточно подробное описание происходивших в то время событий дают графики, приведённые на *рис. 4*. Они построены на основе анализа содержимого ледяных кернов, добытых в Северном полушарии в Гренландии и в Южном полушарии в Антарктике. На графиках хорошо видно, что в Гренландии на протяжении 40 тыс. лет ледяные керны фиксируют непрерывную череду температурных всплесков. Их амплитуда достигала 10–15 °С, скорость нарастания и падения температуры превышала 10 °С за 100 лет. В Антарктике обстановка выглядела гораздо более спокойной. Температурные всплески там не превышали 3–5 °С.



Рис. 4. Сравнение приращения температуры в Антарктике и Гренландии по данным, полученным по ледяным кернам

Последняя серия особенно крупных вулканических событий, происходивших почти синхронно в Северном и Южном полушарии на протяжении 4,5 тыс. лет, завершилась около 10 тыс. лет тому назад. Как видно из графиков, температура в Антарктике и в Арктике почти одновременно повысилась на 7 и 15 °С соответственно и стабилизировалась на новых уровнях, сохранившихся до наших дней. Фактически на этом завершилась эпоха климатических катастроф и началась эпоха относительной климатической стабильности. Колебания среднегодовой температуры в районе полюсов Земли в эти тысячелетия и в наши дни составляют ± 1 °С в Антарктике и ± 2 °С в Арктике. Фиксируемый по ледяным кернам размах колебаний температуры по отношению к предыдущему периоду уменьшился в семь раз. При этом в районе Северного полюса во время полярного дня температура стала принимать плюсовые значения, т.е. здесь сложились условия для таяния льда. Появился «температурный потолок»: возникающий во время таяния льда фазовый переход поглощает тепловую энергию и не допускает повышения температуры в районах таяния льда выше 0 °С более чем на несколько градусов Цельсия. Таким образом, в Северном полушарии сформировалась природная система, сдерживающая как рост, так и снижение температуры, что привело к стабилизации среднегодовой температуры в этом регионе. Обведённая красным овалом часть графика, приведённого на *рис. 4*, в увеличенном виде показана на *рис. 5* (см. с. 17). Она выглядит как температурная полка.

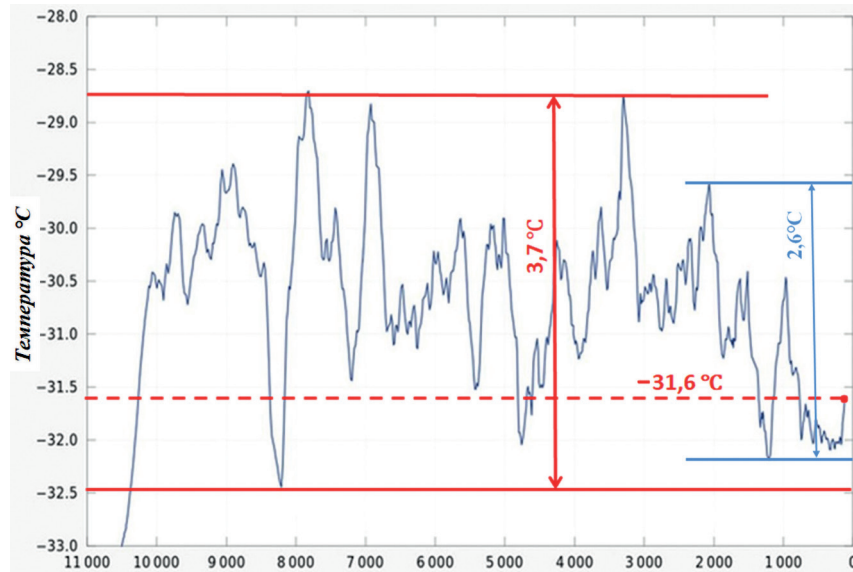


Рис. 5. Среднегодовая температура в центральной Гренландии за последние 11 000 лет по данным ледового бурения

Становится понятно, что главным элементом природной системы стабилизации температуры стал тепловой аккумулятор, состоящий из материковых и морских льдов всей Арктики.

График на рис. 5 построен по тем же данным, что и на рис. 4. Он детализирует ход температуры за последние 11 тыс. лет в Северном полушарии в абсолютных значениях температуры. Из него следует, что в Центральной Гренландии уже тогда установилась и сохраняется до сих пор среднегодовая температура минус 31 °С.

Естественно, тепловой аккумулятор Арктики стал участником конвективного теплообмена с другими частями света. Температура попадающих в зону его действия воздушные масс стабилизируется. Амплитуда тепловых всплесков при этом уменьшается примерно в семь раз. При этом ледяные керны фиксируют результирующую температуру воздуха в точке добычи. Как видно из графика, её флуктуации на протяжении 7 тыс. лет укладываются ± 2 °С. В последние 3 тыс. лет флуктуации температуры уменьшились до $\pm 1,3$ °С.

В Южном полушарии стабильность температуры стала обеспечиваться собственным тепловым аккумулятором, образованным морскими и материковыми льдами, лежащими в основном на уровне моря. Во время полярного дня они частично тают.

Таким образом, в районах полюсов Земли сформировались зоны стабильной среднегодовой температуры — уникальное природное явление, не имеющее аналогов в обозримом прошлом.

Поясним принципы работы идеального теплового аккумулятора (Формозов, 2001; Мозговой и др., 1990) на основе фазовых переходов водяного льда, используя для этого диаграмму, приведённую на рис. 6 (см. с. 18).

Цифрами на рис. 6 показана реакция рабочего тела аккумулятора в зависимости от воздействия циклически изменяющегося теплового потока: 1 — вещество охлаждено; 2 — разогрев вещества; 3 — плавление вещества; 4 — жидкая вода; 5 — кристаллизация вещества; 6 — охлаждение вещества. Далее следует начало следующего цикла.

Главная особенность работы теплового аккумулятора на основе вещества с ярко выраженным фазовым переходом состоит в том, что во время плавления вся приходящая энергия расходуется на разрушение кристаллической структуры вещества. Температура вещества в это время не растёт. Когда начинается отток тепловой энергии, температура вещества также не уменьшается. В это время отток энергии компенсируется энергией, выделяющейся при восстановлении кристаллической структуры вещества. Накопленная во время полярного дня энергия расходуется с наступлением полярной ночи. Таким образом, формируется режим рекуперации энергии.



Рис. 6. Диаграмма работы идеального теплового аккумулятора

Следует отметить, что тепловой аккумулятор может работать в режиме рекуперации энергии только в том случае, если температура окружающей среды изменяется циклически вокруг температуры фазового перехода. При этом аккумулятор в равной мере препятствует как повышению, так и понижению температуры. Если температура окружающей среды всегда выше или всегда ниже температуры фазового перехода, то вещество ведёт себя как обычное жидкое или твёрдое тело.

Тепловые аккумуляторы на основе веществ с ярко выраженным фазовым переходом достаточно широко используются для стабилизации теплового режима в наземных системах, в космосе и авиации. Они способны на определённое количество вещества время исключить возможность разового перегрева или переохлаждения стабилизируемого объекта. Либо, когда возможен циклический перегрев и переохлаждение объекта, тепловой аккумулятор включается в режим рекуперации энергии.

Особую привлекательность тепловым аккумуляторам придаёт то, что, будучи запрограммированными на молекулярном уровне, они не требуют ни включения, ни выключения. При достижении определённой температуры вещество обязательно проявит свои свойства без дополнительных усилий со стороны человека.

Об эффективности теплового аккумулятора на основе водяного льда можно судить хотя бы потому, что для нагревания 1 кг льда на 1 °C необходимо затратить $2,1 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$. А чтобы преодолеть фазовый переход при таянии такого же количества льда потребуется потратить 332 кДж, т.е. в 158 раз больше. При этом количество энергии, выделяемое жидкой водой при замерзании, численно равно количеству энергии, необходимой для таяния такого же количества льда. Это значит, что тепловые аккумуляторы обеспечивают рекуперацию энергии: накопленная в жидкой воде энергия с наступлением полярной ночи препятствует замерзанию, что продлевает её существование в жидком виде на значительное время.

Тепловой аккумулятор, рабочее тело которого находится в замкнутом объёме, может работать в режиме рекуперации энергии практически неограниченное время. В природе это вряд ли возможно. Северная полярная шапка проработала в режиме рекуперации энергии 10 тыс. лет. Однако из-за профицита тепловой энергии в Северном полушарии, на что указывает модель, каждый цикл рекуперации шёл с расходом льда по двум причинам. При положительном тепловом балансе за время полярной ночи намораживается меньше льда, чем тает во время полярного дня. Соответственно, время жизни температурной полки определяется накопленным перед её началом объёмом льда. Кроме того, в реальных условиях потери льда могут возникать из-за стоков талой воды.

В нашем случае формированию температурной полки предшествовал период длительного оледенения. Тогда накопилось большое количество льда, запасы которого сейчас подходят к концу.

Результаты современных исследований льдов Арктики

Авторитетные источники сходятся во мнении по вопросам таяния льдов Арктики.

Национальное управление океанических и атмосферных исследований (США) (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration — NOAA) прогнозирует практически полное исчезновение морских льдов в Арктике в августе, сентябре и октябре к 2085 г. (рис. 7).

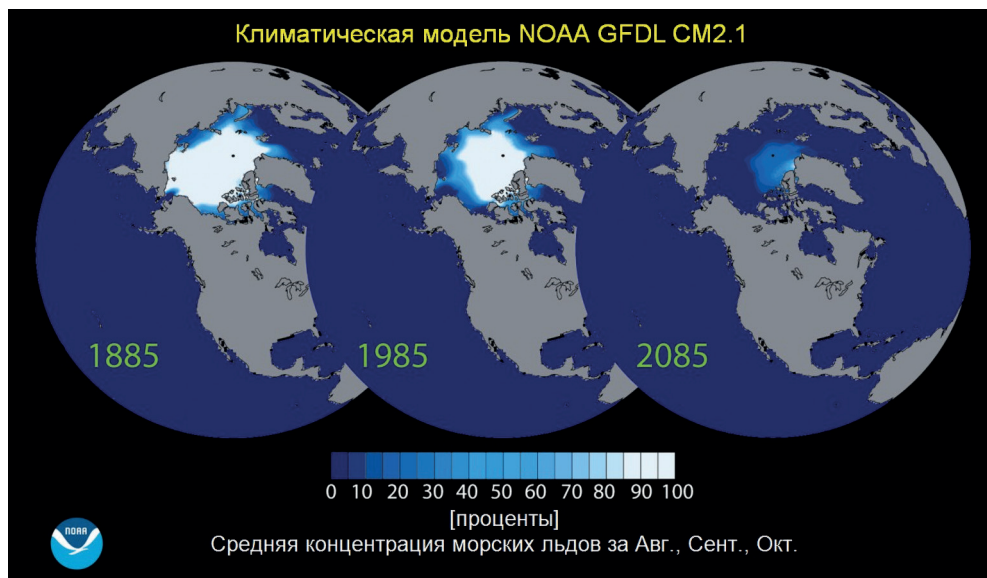


Рис. 7. Прогноз NOAA о состоянии морских льдов Арктики

В Центре Хэдли (Великобритания) HadISST (англ. Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set) приводятся составленные по архивным данным графики, характеризующие таяние морских льдов Арктики в период с 1900 по 2016 г. (рис. 8).

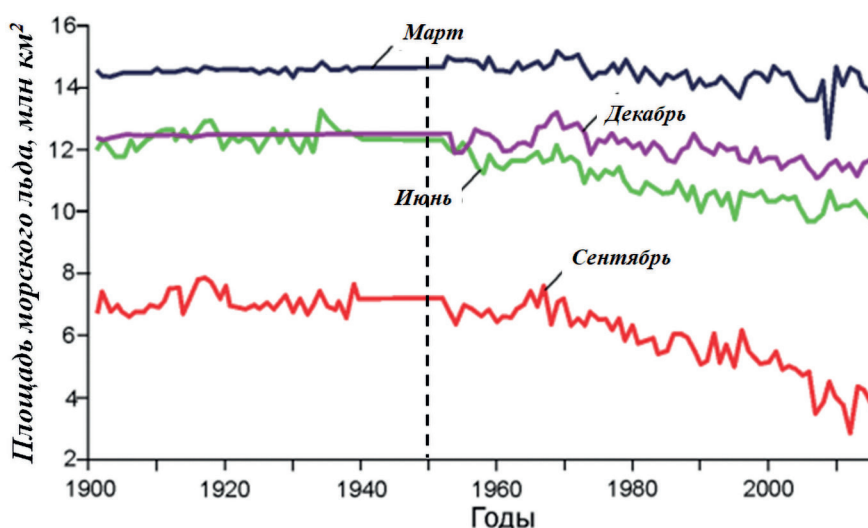


Рис. 8. Таяние морских льдов Арктики по архивным данным HadISST

Представленные на рис. 8 графики указывают на то, что начиная с 50-х гг. прошлого века площадь морского льда в Северном Ледовитом океане в сентябре месяце к 2010 г. уменьшилась с 7,5 до 3 млн км².

Данные, которыми располагает Национальный центр данных по исследованию снега и льда (США) (*англ.* National Snow and Ice Data Center — NSIDC), начинаются с 80-х гг. прошлого века. В сентябре 2024 г. NSIDC с помощью интерактивной мультисенсорной системы картирования снега и льда (*англ.* Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System — IMS) Национального ледового центра США (*англ.* United States National Ice Center — USNIC) зафиксирована минимальная площадь арктического льда 4,42 млн км². Посетителям принадлежащего центру NSIDC сайта предоставляется возможность в интерактивном режиме воспользоваться его данными по площади льдов Арктики. На *рис. 9* показано семейство графиков, характеризующих площадь льдов Арктики по месяцам с 1979 по 2024 г. Хорошо видно, что за 40 лет площадь льдов в сентябре сократилась за это время не менее чем в два раза. Соответственно увеличилась площадь и время существования открытой воды. Если в последующие 25 лет не произойдёт что-то экстраординарное, то в середине XXI в. с августа по сентябрь Северный Ледовитый океан будет свободен ото льдов. При этом толщина образующихся во время полярной ночи однолетних льдов не превысит 0,45–1 м, что означает возможность круглогодичной навигации по Северному морскому пути.

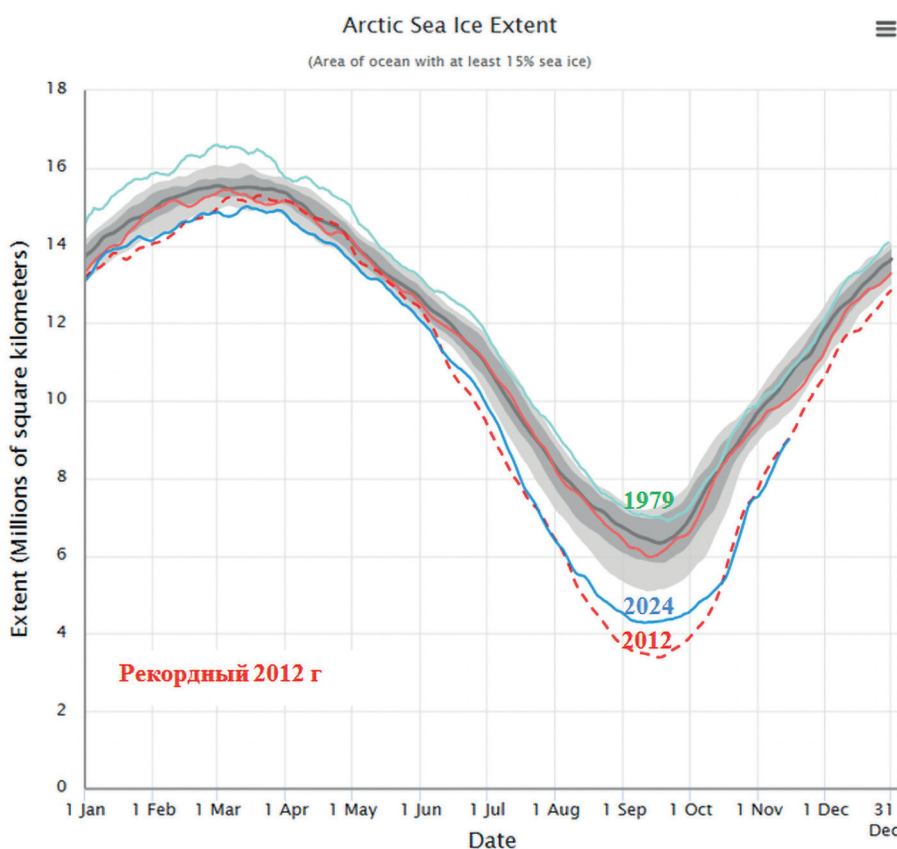


Рис. 9. Площадь арктических льдов (в млн км²) по годам и месяцам по данным NSIDC, США

В отчёте Университета Юкона (Канада) (*англ.* Yukon University), посвящённом индикаторам, характеризующим потепление климата, приведены данные о таянии льдов северных морей за последние 40 лет (<https://changingclimate.ca/site/assets/uploads/sites/2/2019/01/Figure-2.2-2.png>). В отчёте показано, что за годы наблюдений ледового покрова северные моря несли ежегодные невосполнимые потери льда в объёме 300 км³. При этом лёд уходит с площади 80 000 км². Измерения проводились в сентябре, когда завершается процесс сезонного таяния льда. Прогнозируется, что к 2050 г. в сентябре северные моря будут полностью очищены ото льда. В обобщённом виде результаты исследований приведены на графиках на *рис. 10* (см. с. 21).

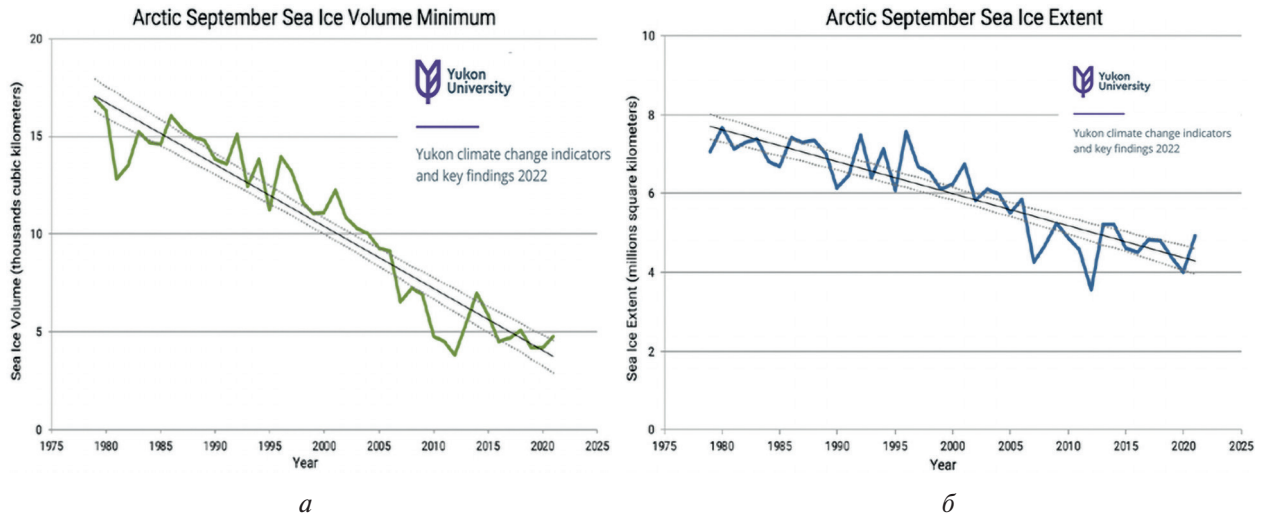


Рис. 10. Уменьшение объёма (в тыс. км³) (а) и площади (в млн км²) (б) льдов в северных морях в сентябре (Университет Юкона, Канада)

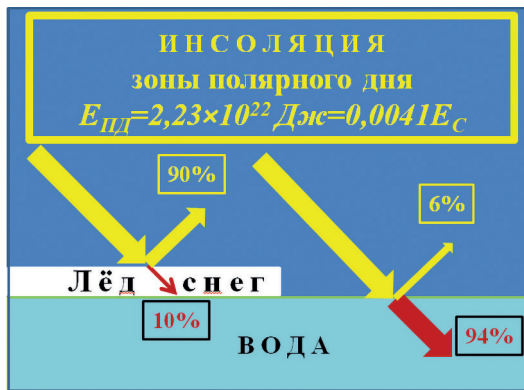


Рис. 11. Коэффициенты отражения и поглощения солнечной энергии льдом со снегом и открытой водой

Для того чтобы растопить указанные в отчёте 300 км³ льда необходимо затратить $8,91 \cdot 10^{19}$ Дж (теплота плавления льда $330 \cdot 10^3$ Дж/кг). Однако здесь стоит вспомнить о коэффициенте отражения снега, льда и открытой воды (рис. 11). Получая от Солнца энергию, смесь снега и льда тратит на таяние лишь 10 %, а остальные 90 % отражаются обратно в космос. Вода, наоборот, расходует на подогрев 94 % энергии и лишь 6 % уходят в космическое пространство. Соответственно, полный объём инсоляции необходимый для плавления 300 км³ льда составляет $8,91 \cdot 10^{20}$ Дж. На такую величину в наше время энергия инсоляции ежегодно превышает потери тепла, которые несёт зона полярных суток $\Delta E_{ПС} = 8,91 \cdot 10^{20}$ в ночное время. Такого объёма энергии достаточно для нагрева $2 \cdot 10^5$ км³ океанской воды на 1,0 °С.

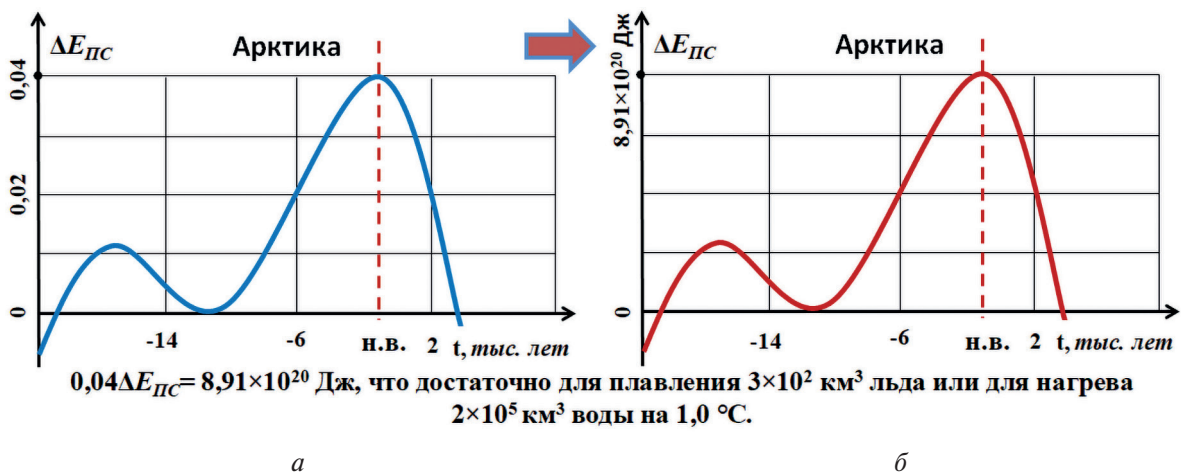


Рис. 12. Фрагмент модели инсоляции зоны полярных суток Арктики, приведённый в условных единицах (а) и в абсолютных единицах (б)

Таким образом, на основании приведённых данных мы вправе абсолютизировать представленный на *рис. 2а* график в точке, обозначающей наше время, в Северном полушарии. Увеличенный фрагмент модели инсоляции показан на *рис. 12* (см. с. 21).

Судя по *рис. 12б*, на отрезке времени от минус 10 тыс. лет и до нашего времени профицит энергии в зоне полярных суток непрерывно возрастал от 0 до $8,91 \cdot 10^{20}$ Дж, что в среднем приводило к таянию $\sim 150 \text{ км}^3$ льда в год. Разумно предположить, что также как в наше время, в прошлом профицит энергии расходовался на таяние льдов, накопленных за время большого ледникового периода. Исходя из этого предположения, получается, что запас льда был не менее $150 \text{ км}^3 \times 10^4 \text{ лет} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ км}^3$.

Таким образом, все четыре источника сходятся во мнении о том, что к середине XXI в. в Северном Ледовитом океане останутся только однолетние льды.

По приведённым в анализируемых источниках данным составлена итоговая *табл. 1*, характеризующая объём и площади льда и открытой воды (выделено полужирным начертанием) в Северном Ледовитом океане в сентябре месяце в период с 1900 по 2050 г.

Таблица 1. Объём и площади льда и открытой воды в Северном Ледовитом океане в сентябре в период с 1900 по 2050 г.

Год	1900*	1950*	1980	2020	2050*
Объём льдов в марте, тыс. км ³	41,50	28,00	17,5	4,50	4,50
Площадь льдов в марте, млн км	14,50	14,50	14,5	14,50	14,50
Толщина льда в марте, м	2,86	1,93	1,2	0,45	0,45
Площадь льдов в сентябре, млн км ²	7,50	7,50	6,0	4,50	2,00**
Площадь открытой воды в сентябре, млн км²	7,00	7,00	8,5	10,00	14,50

* Предположения авторов.

** Разрозненные остатки однолетних льдов.

По данным *табл. 1* можно сделать некоторые выводы. В период с 1900 по 1950 г. объём льдов в Северном Ледовитом океане монотонно сокращался со скоростью $\sim 300 \text{ км}^3$ в год. После 1950 г. начинает заметно расти площадь таяния льдов. Соответственно, начинается рост площади и времени существования открытой воды. Годы с 1945-го по 1955-й стали переломными. Кончились запасы многолетних льдов, накопленных в период великого оледенения, и начала меняться структура льдов океана. Многолетние льды стали постепенно заменяться однолетними. К 2050 г. этот процесс завершится. В Ледовитом океане останутся только однолетние льды.

Далее будем исходить из того, что средняя толщина однолетних льдов, как это следует из *табл. 1*, не превысит 0,5 м. Тогда за время полярной ночи на площади в 14,5 млн км² будет намораживаться 7250 км³ льда, которые начнут таять уже в апреле. В это время лёд и вода уже будут соседствовать друг с другом. Из-за высокой отражательной способности льда он плохо нагревается солнечными лучами. В то же время открытая вода прогревается быстро. От неё тает лёд. Его площадь сокращается, а площадь открытой воды увеличивается. Таким образом, усиливается способность океана усваивать тепло от Солнца. Процесс таяния льда ускоряется.

Для того чтобы растопить 7250 км³ льда, потребуется $E_{\text{пд}} = 2,23 \cdot 10^{22}$ Дж. Этой энергии достаточно для подогрева $5 \cdot 10^6 \text{ км}^3$ воды на 1 °С! При этом вклад профицита ($8,91 \cdot 10^{20}$ Дж) в этот процесс составит всего 4 % от общей величины инсоляции. Всё это говорит о том, что доля энергии, затрачиваемой на плавление льда, будет год от года уменьшаться, а доля энергии, расходуемой на подогрев воды, будет расти.

Обобщим в форме диаграммы (*рис. 13*, см. с. 23) показания модели с данными из истории климата и с результатами современных исследований льдов Арктики на трёх временных интервалах:

- в прошлом: от минус 10 тыс. лет до нашего времени — 2000 г.;
- в наше время: 2000 г. \pm 50 лет;
- в будущем: до плюс 3 тыс. лет.

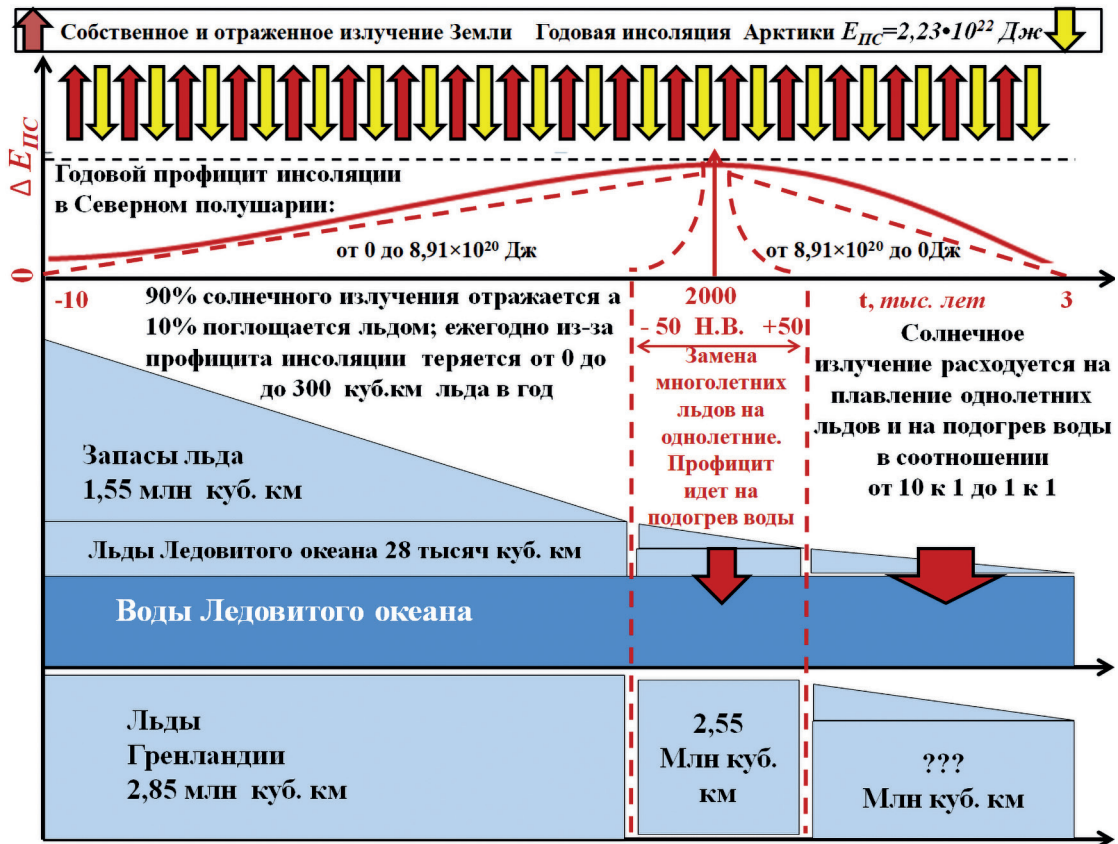


Рис. 13. Обобщённое представление о динамике таяния льдов Арктики на отрезке времени от минус 10 тыс. лет до нашего времени и на 3 тыс. лет в будущем

В верхней части диаграммы жёлтыми и красными стрелками обозначена ежегодная смена полярных дней и ночей. Ниже сплошной красной линией воспроизведён фрагмент астрономической модели инсоляции северной зоны полярных суток, обозначенный на рис. 2а номером 1. Ежегодное чередование полярных дней и ночей сопровождалось безвозвратными потерями льда пропорциональными росту профицита инсоляции: от 0 вначале до 300 км³ льда в наше время. Далее профицит инсоляции начинает постепенно убывать и через 3 тыс. лет должен снова вернуться к 0.

Данные о величине профицита инсоляции в наше время взяты из отчёта Университета Юкона. Таким образом, за прошедшие с начала появления профицита инсоляции 10 тыс. лет должно было быть израсходовано около $\sim 1,55 \cdot 10^6$ км³ льда. Без такого количества льда работа теплового аккумулятора была бы невозможна.

Судя по архивным данным Центра Хэдли (см. рис. 8), к нашему времени запасы льда закончились и началось таяние многолетних льдов Ледовитого океана. При этом из-за недостатка льда профицит инсоляции начал уходить в океанские воды. Можно предположить, что расходуемая на подогрев воды энергия инсоляции вырастет с 4 % в 1950 г. до 10 % в 2050 г. Ускорится уже идущее таяние льдов Гренландии. Вскоре после этого доли энергии, идущие на таяние льдов и на подогрев воды, уравниются и составят примерно $1,125 \cdot 10^{22}$ Дж каждая.

Авторы данной работы не располагают данными о механизме таяния льдов Гренландии под напором подогретой воды, но, судя по объёму расходуемой на эти цели энергии, оно может приобрести катастрофический характер.

В целом таяние льдов Арктики и Гренландии грозят миру очень серьёзными последствиями:

- Среднегодовая температура в северной зоне полярных суток перестанет быть стабильной.
- Начнётся таяние вечной мерзлоты, что приведёт к эмиссии больших объёмов парниковых газов.
- Скорость таяния ледников Гренландии может оказаться высокой или очень высокой, до 3–5 тыс. км³ в год.
- Начнётся подъём уровня мирового океана со скоростью до 1 м за 100 лет, что приведёт к потере 5–7 % суши.

При этом, судя по модели, Антарктика таять не будет. Наоборот, там в это время наступит дефицит инсоляции. Площадь оледенения начнёт расти.

Обсуждение результатов проведённых исследований

Сопоставление астрономической модели инсоляции арктической зоны полярных суток Земли с данными из истории климата, а также с результатами современных исследований динамики таяния льдов позволили выявить их глубинные причины, связанные с определёнными сочетаниями астрономических факторов. Аналогичные причины в наше время подводят антарктические льды к замерзанию, которое затем продлится около 10 тыс. лет. Модель выявила процесс медленного, идущего на протяжении тысячелетий, роста и падения уровня годового объёма инсоляции зон полярных суток Земли. Процесс перераспределения энергии инсоляции не может наблюдаться современными средствами измерений из-за крайне низкой скорости роста и убывания энергии инсоляции. Все три влияющих на процесс перераспределения фактора: эксцентриситет орбиты Земли, наклон оси суточного вращения и её прецессия по конусу вокруг перпендикуляра к плоскости эклиптики — приведены в *табл. 2*.

Таблица 2. Основные переменные факторы влияния на климат

	Период, лет	Предельные значения
Эксцентриситет орбиты, e	100 000	0,077–0,003
Наклонение земной оси, i	41 000	22,1–24,5°
Прецессия, p	25 920	0–360°

Выбранный в модели шаг отсчётов в 400 лет представляется адекватным периодам изменения анализируемых факторов. Возможно, в дальнейшем стоит уменьшить шаг измерений в три или четыре раза, чтобы подробнее описать переходные процессы, возникающие в результате появления комбинационных периодов.

Следует особо отметить, что все перечисленные в *табл. 2* параметры известны на сегодня с очень высокой точностью, что является результатом регулярных астрономических наблюдений. Для этого существуют постоянно действующие службы координатно-временного обеспечения и специальные формулы, связывающие координаты и время. Все они используются в виде поправок во всех без исключения астронавигационных системах как рутинная операция.

Перечисленные в *табл. 2* космические факторы в неизвестных на данный момент пропорциях должны вести к изменениям во всех климатических зонах планеты. Можно предположить, что в экваториальной зоне главную роль в климатических изменениях будет играть эксцентриситет орбиты Земли. Он очевидным образом влияет на контраст экваториальной зимы и лета. При максимальном значении эксцентриситета 0,077 этот контраст достигает 27 %. В наше время при эксцентриситете 0,017 он составляет 7 %. К концу нынешнего цикла прецессии эксцентриситет уменьшится до 0,0115, а контраст до 4,5 %.

На основании изложенного представляется актуальным и чрезвычайно важным создание астрономической модели, пригодной для оценки дисбаланса энергии в пределах всего земного шара, в зависимости от вариаций ключевых космических факторов: эксцентриситета орбиты Земли, наклона земной оси и её прецессии.

Опираясь на уже полученные в рамках этой работы данные о причинах таяния льдов Арктики и тяжести их последствий, следует подумать о применении геоинженерных методов сохранения климата. При этом надо рассматривать две задачи: борьбу с профицитом инсоляции в Арктике буквально сейчас и борьбу с её дефицитом, который начнётся в Антарктике в ближайшие столетия.

В последние два десятилетия было предложено множество геоинженерных методов для борьбы с ростом содержания CO_2 в атмосфере Земли. Подробный обзор и анализ 15 из них приведён в статье, подготовленной очень квалифицированной группой авторов (Израэль и др., 2009). Все они были предложены как средства для оздоровления атмосферы всей планеты. Большинство из представленных методов было забраковано авторами обзора либо как неосуществимые в принципе, либо как грозящие непредсказуемыми последствиями, либо как превышающие реальные технико-экономические возможности человечества. Однако некоторые из них могут рассматриваться для локального применения в пределах, например, Ледовитого океана, площадь которого не превышает 3 % от площади земного шара.

В середине XX в., когда ещё не все запасы льда были израсходованы, чтобы остановить грядущее потепление, было достаточно нейтрализовать профицит тепловой энергии в пределах территории Северного Ледовитого океана. Для этого было необходимо во время каждого полярного дня снижать пропускание земной атмосферы над океаном на ~4 % для соответствующего уменьшения годовой инсоляции.

Сегодня, когда уже начался прогрев вод Ледовитого океана, для того чтобы остановить процесс потепления потребуется снизить пропускание атмосферы на 7–10 %.

К 2050 г. эти цифры вырастут ещё больше, до 20–25 %. Далее уже вряд ли что-то можно будет сделать.

Снизить пропускание атмосферы на ограниченное время можно с помощью авиации путём распыления капелек воды в верхних слоях атмосферы. С учётом того, что площадь Северного Ледовитого океана не столь велика, это вполне посильная для современной техники задача, но очень недешёвая. Тем более что эту процедуру придётся повторять ежегодно на протяжении 3 тыс. лет...

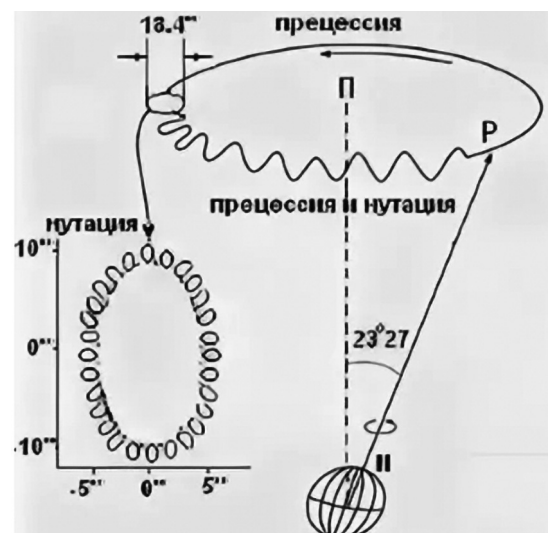
В то же время в случае подъёма уровня Мирового океана переселение сотен миллионов жителей крупных и мелких городов и целых стран будет много дороже.

Обсуждая вопросы использования астрономических данных для анализа климатических процессов нельзя не упомянуть о нутационных колебаниях оси суточного вращения Земли и об отклонениях реального расстояния от Земли до Солнца относительно среднего эллипса орбиты.

Рисунок 14 иллюстрирует влияние нутационных колебаний земной оси. На относительно коротких отрезках времени они оказывают значительное влияние на прецессию и на наклон земной оси.

Гармоника, имеющая период 18,6 лет, обладает максимальной амплитудой и называется драконическим периодом.

Рис. 14. Влияние нутационных колебаний земной оси. Система координат (слева) и схема движения оси вращения Земли в пространстве с точки зрения земного наблюдателя (справа). П — полюс эклиптики, Р — полюс мира



За это время Луна делает круг, проходящий через Северный и Южный лунные узлы. Узлы — это точки пересечения её орбиты с плоскостью эклиптики. Нутационные колебания имеют и более высокочастотные гармоники с периодами от одного года до четырёх суток.

Кроме того, каждый пролёт Земли вокруг Солнца также очень незначительно, но отличается от предыдущего и от последующего. На *рис. 15* показан график отклонения реального расстояния от Земли до Солнца r относительно среднего эллипса орбиты $r_{\text{ном}}$ за период с 2000 до 2040 г.

Эти по космическим меркам незначительные отклонения расстояния от Земли до Солнца, несомненно, влияют на инсоляцию земной поверхности и вместе с нутационными колебаниями воздействуют на ход метеорологических и климатических событий на относительно коротких интервалах времени: от нескольких месяцев до десятков лет.

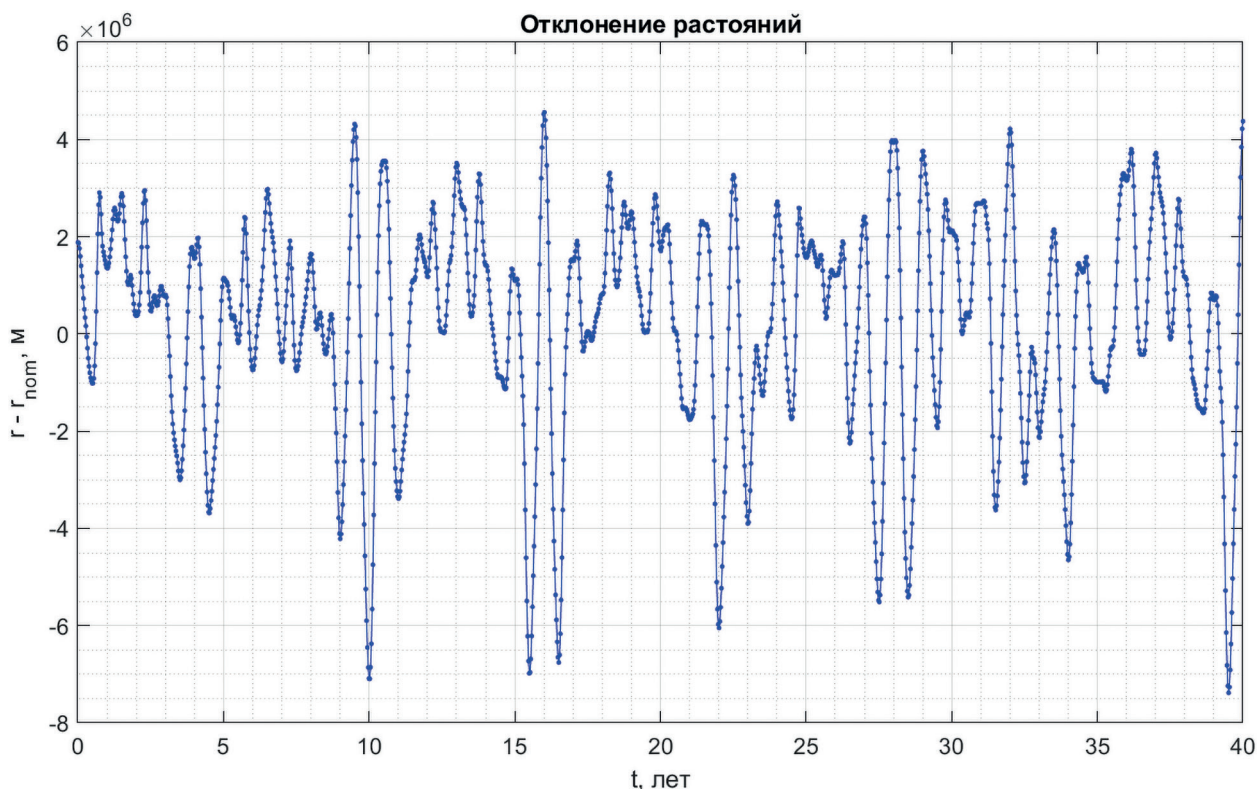


Рис. 15. Отклонение реального расстояния от Земли до Солнца r относительно среднего эллипса орбиты $r_{\text{ном}}$ за период с 2000 до 2040 г.

Действуя одновременно, но асинхронно, периоды нутационных колебаний и отклонений реального расстояния от Земли до Солнца вместе способны усиливать или ослаблять своё воздействие. Свой вклад в этот процесс могут вносить и вариации солнечной постоянной. Не исключено, что рекордное таяние льдов Арктики 2012 г., показанное на *рис. 9*, стало результатом совместного действия всех или части короткопериодических космических факторов.

Все астрономические факторы являются результатом гравитационного взаимодействия Земли с Луной, Солнцем, другими планетами и малыми телами Солнечной системы. Они хорошо прогнозируются как в прошлое, так и в будущее, по крайней мере в пределах ± 1 млн лет. Не исключено, что разработка климатических моделей с учётом всей совокупности астрономических факторов сможет в не столь отдалённом будущем дать ключ к управлению климатом.

Представленная в данной работе модель инсоляции зон полярных суток Земли является развитием предложенной около ста лет тому назад Миланковичем астрономической

теории колебаний климата (1939). Она была тепло встречена современниками и не устарела в наше время. Регулярно в печати появляются серьёзные аналитические работы, развивающие и уточняющие отдельные положения теории с учётом современных знаний (Федоров, 2021; Смутьский, 2014). Но, к великому сожалению, выдвинутая Миланковичем астрономическая теория климата не была своевременно развита до уровня практического применения. В настоящей работе авторы попытались хотя бы отчасти ликвидировать этот пробел.

Проблему таяния льдов Арктики часто связывают с другой весьма важной проблемой современности: ростом содержания CO_2 в атмосфере Земли. По мнению авторов, это большая ошибка. Эти проблемы имеют разную физическую природу. Их роднит лишь одно: обе они были обнаружены в одно время, в середине прошлого века.

Заключение

- Сопоставление астрономической модели инсоляции арктической зоны полярных суток Земли с данными из истории климата и с результатами современных исследований динамики таяния льдов Арктики позволили выявить их глубинные причины, связанные с определёнными сочетаниями астрономических факторов. Аналогичные причины в наше время подводят антарктические льды к замерзанию, которое затем продлится около 10 тыс. лет.
- Астрономическая модель инсоляции зон полярных суток Земли требует дальнейшего развития. Следует разработать аналогичные модели для других климатических зон планеты. В первую очередь для экваториальной зоны, где идёт снижение контраста между зимой и летом, связанное с уменьшением эксцентриситета орбиты Земли. В конечном счёте модели должны быть объединены в одну общую, включающую в себя все значимые космические факторы. Можно ожидать, что такая модель даст ключ к управлению климатом Земли.
- Проблему таяния ледников Арктики следует отделить от проблемы роста содержания CO_2 в атмосфере Земли, поскольку они имеют разную физическую природу.
- Положение с таянием льдов Арктики следует признать катастрофическим, в связи с чем необходимо своевременное принятие важных, научно обоснованных организационных и управленческих решений.

Работа выполнена в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. Аванесов Г.А., Михайлов М.В. Человек и климат // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 9–20. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-9-20.
2. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Михайлов М.В., Шерстюков Б.Г. Космические регуляторы климата Земли // Астрон. вестн. Исслед. Солнечной системы. 2023. Т. 57. № 6. С. 521–531. DOI: 10.31857/S0320930X23060014.
3. Израэль Ю.А., Рябошапка А.Г., Петров Н.Н. Сравнительный анализ геоинженерных способов стабилизации климата // Метеорология и гидрология. 2009. № 6. С. 5–24.
4. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебания климата / пер. с нем. А.Х. Хргиана; под ред. С.Л. Бастматова. М.; Л.: ГОНТИ, 1939. 207 с.
5. Михайлов М.В., Константанов И.А. Новое представление вектора состояния и уравнений движения космических аппаратов: Экономичные по времени и памяти высокоточные алгоритмы интегрирования уравнений движения // 22-я Научно-техн. конф. ученых и специалистов «РКК Энергия», посвященная 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-косм. отрасли и основанию ПАО «РКК Энергия». 9–11 нояб. 2021. Королёв, 2021.
6. Мозговой А.Г., Шпильрайн Э.Э., Дибиров М.А., Бочков М.М., Левина Л.Н., Кенисарин М.М. Теплофизические свойства теплоаккумулирующих материалов: Кристаллогидраты // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 2(82). М.: ИВТАН АН СССР, 1990. 105 с.

7. Смутьский И. И. Основные положения и новые результаты астрономической теории изменения климата / Ин-т криосферы Земли СО РАН. Тюмень, 2014. 30 с. Деп. в ВИНТИ РАН 30.09.2014, № 258-В2014.
8. Федоров В. М. Астрономическая теория климата: вопросы модернизации и развития // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 435–465. DOI: 10.33933/2713-3001-64-435-465.
9. Формозов Б. Н. Введение в криогенную микроэлектронику. СПб.: Наука, 2001. 326 с.
10. Чумаков Н. М. Оледенения Земли: История, стратиграфическое значение и роль в биосфере. М.: ГЕОС, 2015. 160 с.
11. Laskar J., Robutel P., Joutel F. et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // *Astronomy and Astrophysics*. 2004. V. 428. No. 1. P. 261–285. DOI: 10.1051/0004-6361:20041335.

Investigation of the causes and consequences of melting Arctic ice

G. A. Avanesov¹, B. S. Zhukov¹, M. V. Mikhailov²

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: genrikh-avanesov@yandex.ru

² *S. P. Korolev Rocket and Space Corporation "Energia", Korolev 141070, Russia*

The reason for the melting of the Arctic ice is hidden in a group of variable astronomical factors: the eccentricity of the Earth's orbit, the tilt of its rotation axis, and precession around the perpendicular to the plane of the ecliptic. They manifest themselves in the form of a surplus and deficit of insolation of the Earth's surface, cyclically occurring in the polar regions of the planet with a precession period. In accordance with the astronomical model of insolation of the Earth's polar day zones presented in this work, the energy imbalance can vary within $\pm 10\%$ of the annual share of solar radiation that corresponds to the area and geographical position of these areas of the planet. Due to the extremely low rates of change, calculated over many millennia, the energy imbalance cannot be measured today by either ground-based or space means. It can be seen and quantitatively assessed only in a mathematical model. At the same time, all the cosmic factors leading to the imbalance and listed here have long been well known from astronomy and are constantly used in all navigation systems without exception. The paper shows that the melting of the Arctic ice began about 10 thousand years ago. Due to the surplus of insolation, more ice melted annually during the polar day than froze during the polar night. By the middle of the last century, ice reserves came to an end, and the waters of the Arctic Ocean began to warm up. The melting of the Greenland ice began and is accelerating, which threatens catastrophic consequences. In Antarctica the surplus of insolation is currently being replaced by a deficit. The astronomical model of insolation proposed by the authors requires development. It is necessary to create an astronomical model similar in meaning to identify the surplus and deficit of insolation over the entire area of the globe. In addition, the new model should take into account the nutational oscillations of the Earth's axis, as well as the deviations of the actual distance from the Earth to the Sun relative to the average ellipse of the Earth's orbit. The conclusion to the work states that the situation with the melting of Arctic ice should be recognized as catastrophic, in connection with which it is necessary to make timely, scientifically sound management decisions.

Keywords: Earth, Moon, Arctic, Antarctica, orbit, eccentricity, ecliptic, tilt of the Earth's axis, precession, nutation, insolation, energy imbalance, deficit, surplus

Accepted: 01.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-9-29

References

1. Avanesov G. A., Mikhailov M. V., Human and climate, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 9–20 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-9-20.
2. Avanesov G. A., Zhukov B. S., Mikhailov M. V., Sherstyukov B. G., Cosmic regulators of the Earth's climate, *Solar System Research*, 2023, Vol. 57, No. 6, pp. 533–543, DOI: 10.31857/S0320930X23060011.

3. Izrael Yu. A., Ryaboshapko A. G., Petrov N. N., Comparative analysis of geo-engineering approaches to climate stabilization, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, Vol. 34, No. 6, pp. 335–347, DOI: 10.3103/S1068373909060016.
4. Milanković M., *Mathematische Klimalehre und astronomische theorie der klimaschwankungen*, Köppen W., Geiger R. (eds.), Berlin: Borntraeger, 1930, 176 p. (in German).
5. Mikhailov M. V., Konstantinov I. A., New representation of the state vector and equations of motion of space vehicles: Time- and memory-efficient high-precision algorithms for integrating equations of motion, *22-ya Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya RKK "Energiya" (22nd Scientific and Technical Conf. RSC "Energiya")*, 9–11 Nov. 2021, Korolev, 2021 (in Russian).
6. Mozgovoï A. G., Shpil'rain E. E., Dibrov M. A., Bochkov M. M., Levina L. N., Kenisarin M. M., Thermophysical properties of heat storage materials: Crystallohydrates, In: *Obzory po teplofizicheskim svoistvam veshchestv* (Reviews on thermophysical properties of substances), No. 2 (82), Moscow: IVTAN AN SSSR, 1990, 105 p. (in Russian).
7. Smulsky J. J. *Osnovnye položeniya i novye rezul'taty astronomicheskoi teorii izmeneniya klimata* (Fundamentals and new results of the astronomical theory of climate change), Tyumen, 2014, Available from VINITI RAS, No. 258-V2014 (in Russian).
8. Fedorov V. M., Astronomical climate theory: modernization and development issues, *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2021, No. 64, pp. 435–465 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-435-465.
9. Formozov B. N., *Vvedenie v kriogennuyu mikroelektroniku* (Introduction to cryogenic microelectronics), Saint Petersburg: Nauka, 2001, 326 p. (in Russian).
10. Chumakov N. M., *Oledeneniya Zemli: Istoriya, stratigraficheskoe znachenie i rol' v biosfere* (Glaciations of the Earth: History, stratigraphic and biospheric significance), Moscow: GEOS, 2015, 160 p. (in Russian).
11. Laskar J., Robutel P., Joutel F. et al., A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth, *Astronomy and Astrophysics*, 2004, Vol. 428, No. 1, pp. 261–285, DOI: 10.1051/0004-6361:20041335.