

УДК 551.581.1;521.11

КОСМИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ КЛИМАТА ЗЕМЛИ

© 2023 г. Г. А. Аванесов^{a, *}, Б. С. Жуков^a, **М. В. Михайлов^b**, Б. Г. Шерстюков^c

^aИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^bРакетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королева, Королев, Россия

^cВсероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных,
Обнинск, Калужской обл., Россия

*e-mail: genrikh-avanesov@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 15.05.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

Рассмотрено влияние дисбаланса энергии инсоляции зон полярного дня и энергии излучения зон полярной ночи на вековые изменения климата Земли. Определена зависимость этого дисбаланса от параметров орбиты Земли. Проведено сравнение полученных графиков дисбаланса энергии с известными графиками температур полярных областей, оцененных по результатам анализа ледовых кернов, взятых в Антарктиде и Гренландии. На построенных графиках хорошо различаются между собой вклады космических и земных факторов в формирование температурных профилей исследуемых областей, а также видна их синхронность. Получены алгоритмы расчета величин колебаний размеров полярных шапок Земли относительно их средних значений. Полученные в пределах принятых в работе допущений результаты позволяют прогнозировать развитие текущего глобального потепления, а также изменения размеров полярных шапок Арктики и Антарктики. Высказано предположение, что в предстоящие три тысячелетия изменения параметров орбиты Земли будут способствовать медленному таянию северной полярной шапки. Затем снова проявит себя тенденция для нового роста северной полярной шапки. В Южном полушарии уже сформировалась тенденция усиления оледенения. Под влиянием космического фактора она будет усиливаться в течение последующих 20 тыс. лет.

Ключевые слова: климат, глобальное потепление, параметры орбиты, инсоляция, ледниковый период, парниковый эффект, циклы Миланковича, орбитальная теория палеоклимата

DOI: 10.31857/S0320930X23060014, **EDN:** DBABWW

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия в мире наблюдается значительный рост количества и мощности погодных аномалий.

Одной из наиболее очевидных климатических аномалий становится быстрое уменьшение площади северной полярной “шапки”. По некоторым прогнозам северная полярная “шапка” через несколько десятков лет может почти полностью исчезнуть из-за идущего на планете потепления. Его причиной считается антропогенный фактор.

Климат планеты формируется целым рядом факторов, которые можно разделить на внешние космические и внутренние, земные. К космическим факторам формирования климата относится количество солнечной энергии, приходящей к Земле, которая затем распределяется по ее поверхности (инсоляция). Изменения инсоляции определяются параметрами движения Земли вокруг Солнца и наклоном ее оси вращения. Одним из первых, кто попытался математически связать

изменения климата Земли с параметрами движения Земли, был сербский ученый М. Миланкович, работавший в первой половине XX века (Миланкович, 1939; Berger, 1988). Однако Миланкович в своей работе рассматривал исключительно инсоляцию, не учитывая, какая часть этой поступающей энергии излучается затем Землей обратно в космос. Без учета уходящего излучения энергии Землей невозможно правильно рассчитать космический энергетический баланс. В результате, полученные Миланковичем изменения параметров орбиты Земли не очень-то согласуются с существующими сведениями о вариациях климата за предыдущие тысячелетия.

ОБЪЕКТИВНЫЕ ДАННЫЕ О ВАРИАЦИЯХ КЛИМАТА ЗЕМЛИ ПО АНАЛИЗУ ЛЕДОВЫХ КЕРНОВ ИЗ АНТАРКТИДЫ И ГРЕНЛАНДИИ

Данные о вариациях климата в далеком прошлом наука получает путем анализа содержания

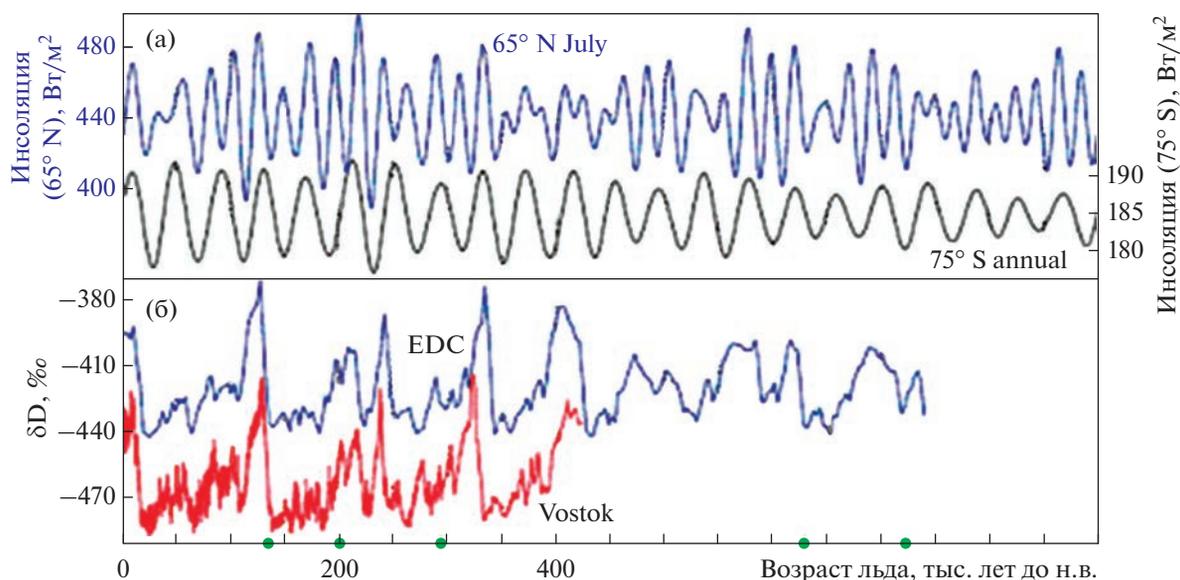


Рис. 1. Данные по инсоляции и концентрации δD в Северном и Южном полушариях: (а) графики температур в июле на 65-параллели Северного полушария и Среднегодовая инсоляция на 75-й параллели Южного полушария; (б) концентрация δD в кернах, полученных на куполе С около станции Конкордия в Антарктиде (кривая EDC), и концентрация δD на станции Восток в Антарктиде (кривая Vostok).

дейтерия (δD) и углекислого газа ($\delta^{13}C$) в ледовых кернах, взятых в Антарктиде и Гренландии, а также по содержанию тяжелого изотопа кислорода ($\delta^{18}O$) в донных отложениях Южного океана.

На рис. 1а (EPICA community members, 2004) на нижнем графике (кривая 75° S годовая) показаны изменения среднегодовой инсоляции для 75-й параллели Южного полушария по Миланковичу на интервале от настоящего времени до 800 тыс. лет до нашего времени. А на рис. 1б показаны изменения концентрации дейтерия (δD) в кернах, полученных на куполе С (около станции Конкордия в Антарктиде — кривая EDC) в рамках европейского проекта бурения антарктического льда EPICA, а также показаны изменения концентрации дейтерия (δD), полученного в рамках российского проекта бурения на станции Восток в Антарктиде (кривая Восток).

По Миланковичу среднегодовая инсоляция на широте 75° S должна характеризовать колебания средней температуры на этой широте. График изменения концентрации δD в кернах также характеризует изменения среднегодовой температуры в окрестности районов бурения.

Дополнительно, на рис. 2 для интервала от настоящего времени до 800 тыс. лет назад (возраст льда до 800 тыс. лет) приведены графики колебаний концентрации $\delta^{13}C$ в пузырьках воздуха, содержащихся в кернах, и приведен график колебаний температуры, оцененной по концентрации δD в этих кернах (Luthi и др., 2008).

Графики на рис. 1 и рис. 2, полученные в разное время разными коллективами, демонстрируют практически полную синхронность изменения концентрации δD , $\delta^{13}C$ и температуры в Антарктике. При этом график изменения инсоляции в Южном полушарии по Миланковичу не соответствует графикам изменения температуры, оцененной по концентрации δD и $\delta^{13}C$ в кернах. То есть изменения температуры не согласуются с изменениями расчетной приходящей солнечной энергии (инсоляции) на верхней границе атмосферы. Рассмотрим возможности устранения указанных противоречий за счет учета дисбаланса приходящей и уходящей солнечной энергии на полюсах планеты.

ИНСОЛЯЦИЯ

Базовые взаимосвязанные факторы, определяющие внешнее влияние на климат иллюстрирует рис. 3. Их вариации во времени не могут не сказываться на климате Земли.

Главным источником поступающей на Землю энергии является Солнце. Количество поступающей энергии зависит от расстояния Солнце—Земля, от наклона оси вращения Земли, от географической широты места и от скорости осевого вращения Земли.

Среднее расстояние до Солнца определяет среднюю величину приходящего к Земле на верхнюю границу атмосферы Земли энергопотока. При большем расстоянии, как, например, у Марса, климат на Земле был бы недопустимо холодным,

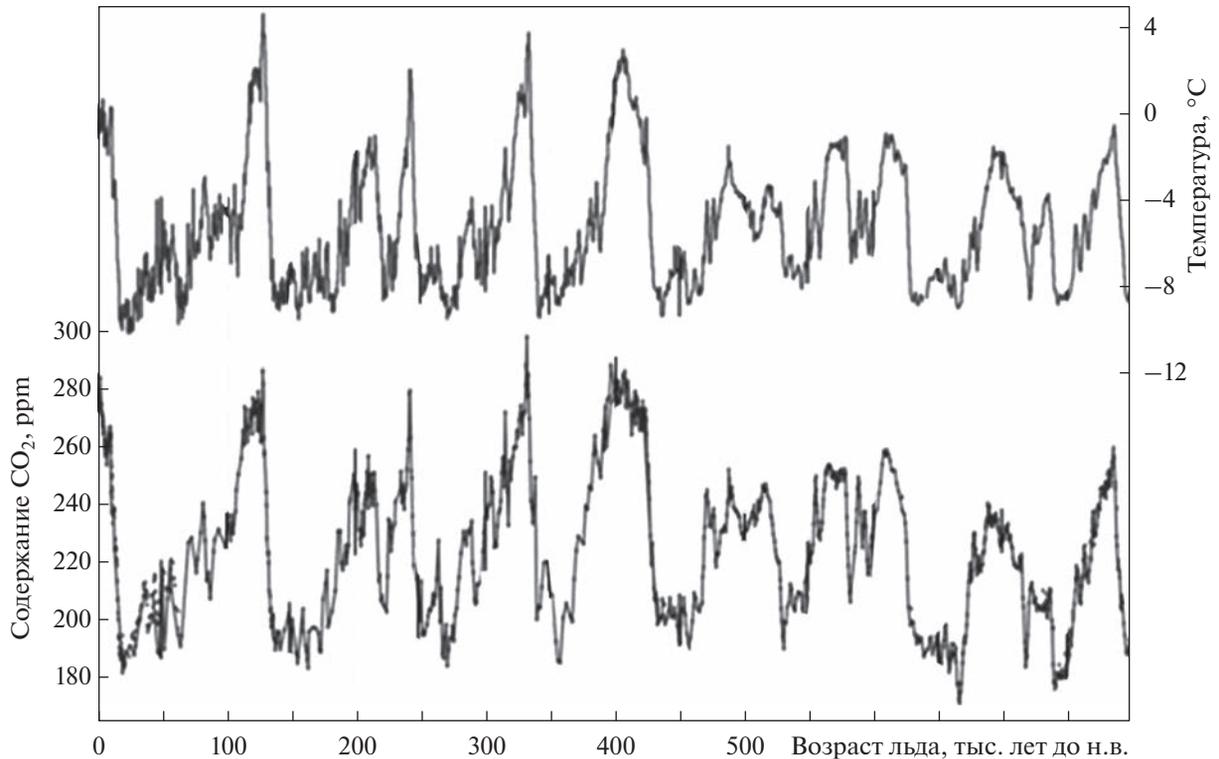


Рис. 2. Графики изменения концентрации CO_2 (δCO_2) и температуры в Антарктике, полученные по результатам анализа ледовых кернов.

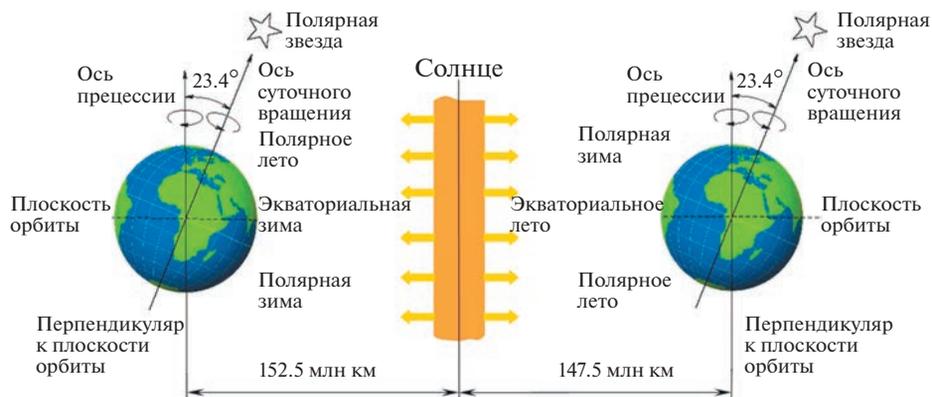


Рис. 3. Основные переменные факторы внешнего влияния на климат Земли: эксцентриситет орбиты, наклон оси вращения планеты к плоскости эклиптики, прецессия.

а при меньшем, как, у Венеры – недопустимо жарким. При существующем среднем расстоянии 150 млн км средняя температура у поверхности Земли составляет $+14^\circ\text{C}$, что наиболее благоприятно для развития жизни на нашей планете.

Угловая скорость вращения Земли определяет смену дня и ночи и обеспечивает распределение поступающей от Солнца энергии между дневной и ночной сторонами планеты.

Существующий наклон оси вращения Земли и движение Земли по орбите являются причинами смены времен года. Если бы наклон был равен 0° , то времена года отсутствовали бы, но увеличился бы температурный контраст между экватором и полюсом. Увеличение наклона оси по отношению к существующему привело бы к увеличению контраста между летом и зимой. Угол наклона земной оси изменяется во времени в пределах от 22.1° до 24.5° . В наше время он равен 23.44° . Из-

менения угла наклона земной оси приводят к изменению распределения инсоляции по поверхности Земли и, в частности, к изменению инсоляции полярных шапок.

Дополнительный вклад в изменение инсоляции вносит изменение расстояния Солнце—Земля при движении Земли по орбите, так как орбита Земли имеет форму эллипса. В январе планета находится в окрестности перигелия, расстояние до Солнца уменьшается, а приток солнечной энергии к Земле увеличивается. В июле, наоборот, Земля находится в окрестности апогелия, расстояние до Солнца при этом увеличивается, и инсоляция уменьшается. Разница в расстоянии от Земли до Солнца в перигелии и в апогелии приводит к разнице в притоке солнечной энергии. В наше время, при эксцентриситете орбиты Земли 0.017, эта разница составляет 7%. Увеличение эксцентриситета орбиты до максимального значения 0.06, которое было в прошлом и обязательно повторится в будущем, увеличит эту разницу почти в три с половиной раза, т.е. до 27%. Кроме того, в соответствии с законом площадей, различаются скорости прохождения апогелия и перигелия.

Свой вклад в распределение солнечной энергии по поверхности Земли вносит прецессия. Земля находится в гравитационном поле Солнца, Луны и других планет, из-за воздействия которого возникают моменты сил, обуславливающие прецессию вектора кинетического момента, а вместе с ним и оси вращения Земли по конусу с углом при вершине около 46.8° вокруг оси, нормальной к плоскости орбиты Земли (эклиптики).

По отношению к инерциальной системе координат период прецессии составляет 25920 лет, его древние греки называли Великим или Платоновым годом. Но при обсуждении вопросов о климате Земли необходимо учитывать еще и прецессию эллипса орбиты в плоскости эклиптики с периодом около 140 тыс. лет, идущую навстречу прецессии вращения Земли. Биения этих двух видов прецессий приводят к тому, что по отношению к Солнцу Земля имеет переменный период прецессии, лежащий в пределах от 10 до 32 тыс. лет. Нынешний период прецессии составляет 22 тыс. лет. Предыдущий — 24 тыс. лет. Следующий — 14 тыс. лет.

На рис. 4 показано, как на протяжении последних 420 тыс. лет изменялась во времени температура Земли, измеренная на станции Восток, и как в этот же период изменялся эксцентриситет ее орбиты, наклонение оси вращения к плоскости эклиптики и прецессия. Все перечисленные здесь основные параметры орбитального движения Земли имеют не кратные друг другу периоды. На рис. 4 просматривается сложная взаимосвязь этих параметров и синхронизация периодов роста температур с периодами изменения эксцентриситета орбиты Земли. При этом соотношения зна-

чений эксцентриситета орбиты и наклонения земной оси за это время ни разу не повторились. В наше время одновременно идет уменьшение эксцентриситета орбиты и угла наклона оси вращения Земли. Аналогичные сегодняшнему дню значения эксцентриситета орбиты и угла наклона оси вращения были у нашей планеты 390 000 лет тому назад. Но наклон оси вращения Земли в то время увеличивался, а не уменьшался, как это происходит сейчас.

Далее, мы рассмотрим дисбаланс энергии инсоляции зон полярного дня и энергии уходящего излучения зон полярной ночи, зависящий от наклона земной оси, от эксцентриситета земной орбиты, а также от прецессии земной оси по конусу вокруг нормали к плоскости орбиты планеты.

ВАРИАЦИЯ ЭНЕРГОПОТОКА ЗОН ПОЛЯРНОГО ДНЯ И ПОЛЯРНОЙ НОЧИ

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° северной и южной широты. Длительность полярного дня и полярной ночи увеличивается от 1 суток у полярного круга до примерно полугода на полюсах (с отклонениями в несколько суток из-за разной скорости движения Земли по орбите во время лета и зимы в северном и южном полушариях, 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. 5 приведена эллиптическая орбита Земли вокруг Солнца и углы, описывающие движение Земли. На рисунке 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. 5 также показана точка зимнего солнцестояния. Когда Земля находится в точке зимнего солнцестояния, проекция оси вращения Земли на плоскость орбиты совпадает с направлением Солнце—Земля. Обозначим угол между перигелием и точкой зимнего солнцестояния через λ . Орбитальный угол между Землей и точкой зимнего солнцестояния обозначим через φ .

Очевидно равенство:

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

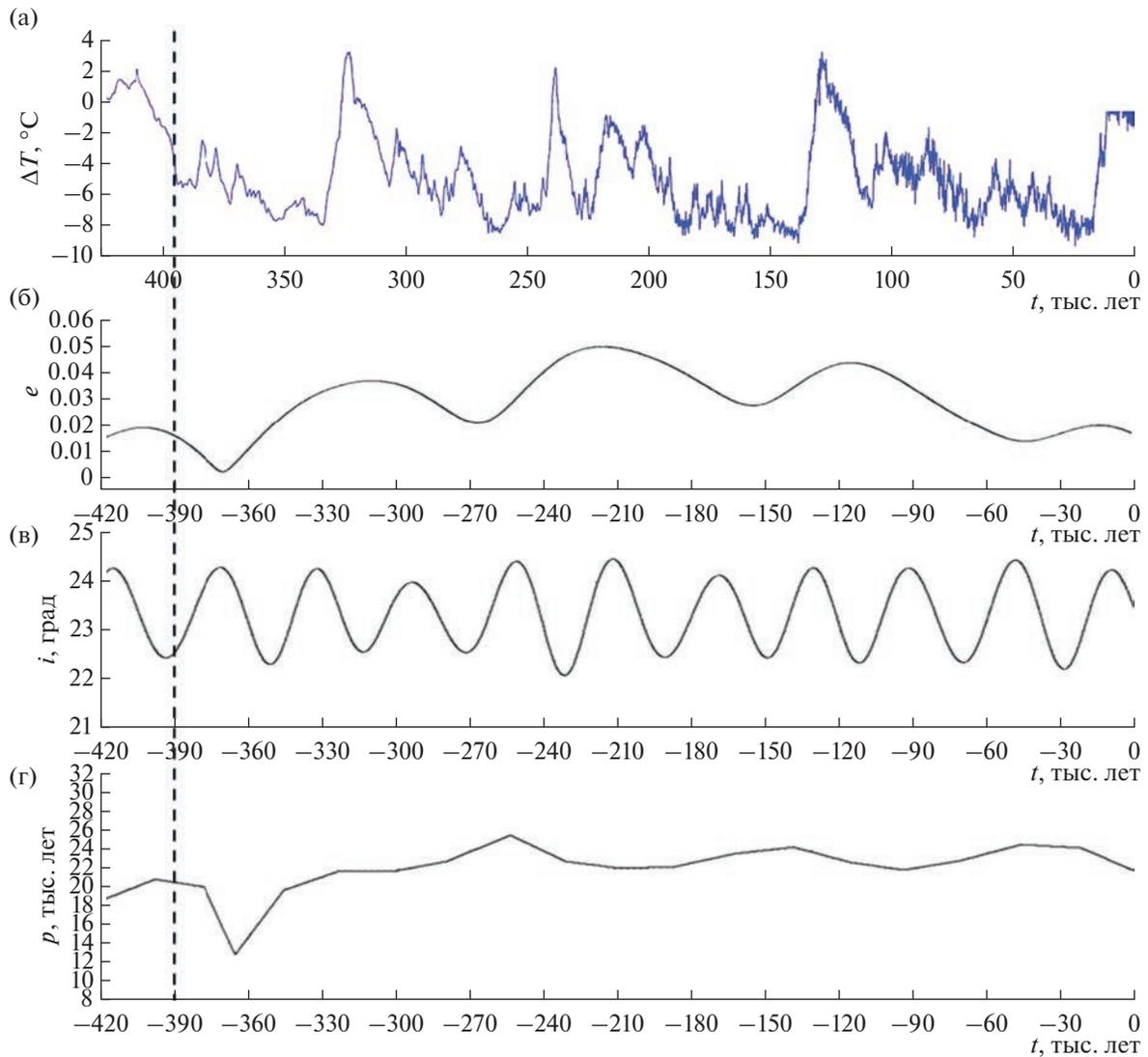


Рис. 4. К единому масштабу времени приведены данные о вариациях температур на Земле за 420 тыс. лет и параметры ее орбитального движения: (а) ход температур, измеренный на станции Восток (Антарктида); (б) эксцентриситет орбиты планеты e ; (в) наклон оси ее вращения к плоскости эклиптики i ; (г) периоды прецессии p .

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

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

Пусть j_0 – секундная инсоляция единичной поверхности, нормальной направлению на Солнце на расстоянии a от Солнца ($j_0 \approx 1.3$ кВт/м²), 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 соотношением:

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

Из соотношений (2), (3), (4) получим секундную инсоляцию зоны полярного дня:

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

Полярный день Северного полушария соответствует углам:

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

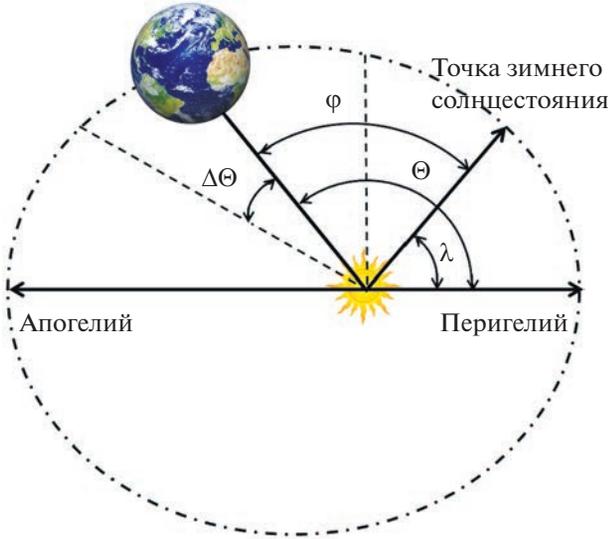


Рис. 5. Связь между истинной аномалией Θ , углом φ от точки зимнего солнцестояния и углом прецессии оси вращения Земли λ .

Инсоляция зоны полярного дня будет равна:

$$E_{\text{ПД}} = - \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} j_0 \pi R^2 \frac{a^2}{r_0^2} \sin^3 i \cos^3 \varphi dt. \quad (7)$$

Выразив угол φ через истинную аномалию Θ через равенство (1), получим:

$$E_{\text{ПД}} = - \int_{\frac{\pi}{2} + \lambda}^{\frac{3\pi}{2} + \lambda} j_0 \pi R^2 \frac{a^2}{r_0^2} \sin^3 i \cos^3 (\Theta - \lambda) dt. \quad (8)$$

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 r – текущий радиус орбиты; a – большая полуось орбиты; $\omega_0 = 2\pi/P$ – средняя орбитальная угловая скорость, где P – период орбиты; e – эксцентриситет.

Из равенства (9) получим:

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

Подставив значение dt в равенство (8), получим:

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

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

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

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 $i_{\text{ср}} = 23.43^\circ$ получим годовую инсоляцию зоны полярного дня, равную:

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

где $\Delta i = i - i_{\text{ср}}$.

Определим энергию излучения зоны полярной ночи. Площадь зоны полярной ночи определяется 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 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ – постоянная Стефана–Больцмана; T_0 – некоторая средняя установившаяся температура на поверхности зоны полярной ночи в шкале Кельвина. Эффективная средняя температура Земли, как черного тела, равна 249 К или -24°C . Температура T_0 имеет такой же порядок. Тогда секундное излучение зоны полярной ночи с учетом формулы (2) будет равно:

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

Полугодовое излучение за время полярной ночи равно:

$$E_{\text{ПН}} = j_{\text{ПН}} \pi R^2 \sin^2 i \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \cos^2 \varphi dt. \quad (17)$$

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

$$E_{\text{ПН}} = j_{\text{ПН}} \pi R^2 \sin^2 i \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \cos^2 (\varphi) \frac{r^2 d\varphi}{a^2 \omega_0 \sqrt{1 - e^2}}. \quad (18)$$

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 в степени 2 и выше, получим:

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

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:

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

Равенство (21) определяет энергию излучения зоны полярной ночи за полгода. Разность энергии инсоляции за время полярного дня ($E_{\text{ПД}}$), определяемой равенством (14), и энергии излучения за время полярной ночи ($E_{\text{ПН}}$), определяемой равенством (21), назовем приращением энергии инсоляции за полярные сутки — $\Delta E_{\text{ПС}}$. 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. Значение $\Delta E_{\text{ПС}}$ рассчитанное относительно его значения при нулевом эксцентриситете и номинальном наклонении, будем условно называть дисбалансом энергии полярных зон. В баланс энергии полярной зоны помимо рассматриваемых, вносят вклад и другие процессы (отражение солнечного излучения, горизонтальный перенос тепловой энергии и др.), которые здесь не учитываются.

Для Южного полушария полярная ночь происходит при углах между Землей и точкой зимнего солнцестояния в диапазоне $\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{3\pi}{2}$. Поэтому интегрирование выражения (18) необходимо провести для соответствующего диапазона значений угла φ .

Формулы (14) и (21) определяют дисбаланс зон полярных дней и ночей соответственно Северного и Южного полушарий в зависимости от текущего наклонения, эксцентриситета и угла прецессии. Сегодня значения этих параметров орбиты Земли хорошо известны, по крайней мере на интервале ± 1 млн лет (Михайлов, Константинов, 2021; Аванесов, Михайлов, 2022; Laskar и др., 2004).

С учетом этих параметров, а также в соответствии с алгоритмами (14) и (21) построены графики дисбаланса энергии зон полярных дней и ночей для Арктики и Антарктики, приведенные на рис. 6. Графики охватывают период от -700 тыс. лет в прошлом до $+100$ тыс. лет в будущем.

Графики приведены в условных единицах и отражают зависимость энергобаланса от Δi и $e \cos \lambda$. Для перевода в джоули значения, приведенные на графиках, необходимо умножить на коэффициент $0.01334 E_C$, где $E_C = 5.5 \times 10^{24}$ Дж — годовая инсоляция Земли.

Представленные результаты расчета 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 годовой баланс — к понижению температуры и росту “шапки”. Осреднение процесса на большом интервале времени приводит к изменению температуры в окрестности соответствующих полярных шапок. Поэтому правильность рассмотренной модели может подтверждаться путем сравнения приведенных на рис. 6 графиков дисбаланса энергии с графиками изменения реальных температур на том же интервале времени в Антарктике и в Арктике. Результаты такого сравнения приведены на рис. 7 и рис. 8.

На рис. 7 приведены два наложенных друг на друга графика — график температур Антарктики, полученный в результате анализа ледовых кернов на куполе С, и график энергобаланса Антарктики (см. рис. 6).

Сравнение этих графиков демонстрирует синхронность изменения графика температуры, оцененной по анализу кернов, и графика дисбаланса энергии южной полярной шапки, полученного в соответствии с предлагаемой моделью. Разумеется, здесь не может быть полного совпадения, так как график дисбаланса энергии основан на влиянии на него только космических факторов. График температур учитывает не только космические факторы, но и факторы, вносимые на Земле океаном, атмосферой и пр. В этом смысле график температур является более полным и более точным. С другой стороны, в результаты обработки кернов вносятся методические ошибки измерений и моделей оценивания температуры. Однако синхронность обоих графиков показывает явную зависимость температуры Антарктики от космического энергопотока зон полярного дня и ночи, так как он первичен.

На рис. 8 для интервала времени от 120 тыс. лет в прошлом до 10 тыс. лет в прошлом (на горизонтальной оси возраст льда от 10 до 120 тыс. лет)

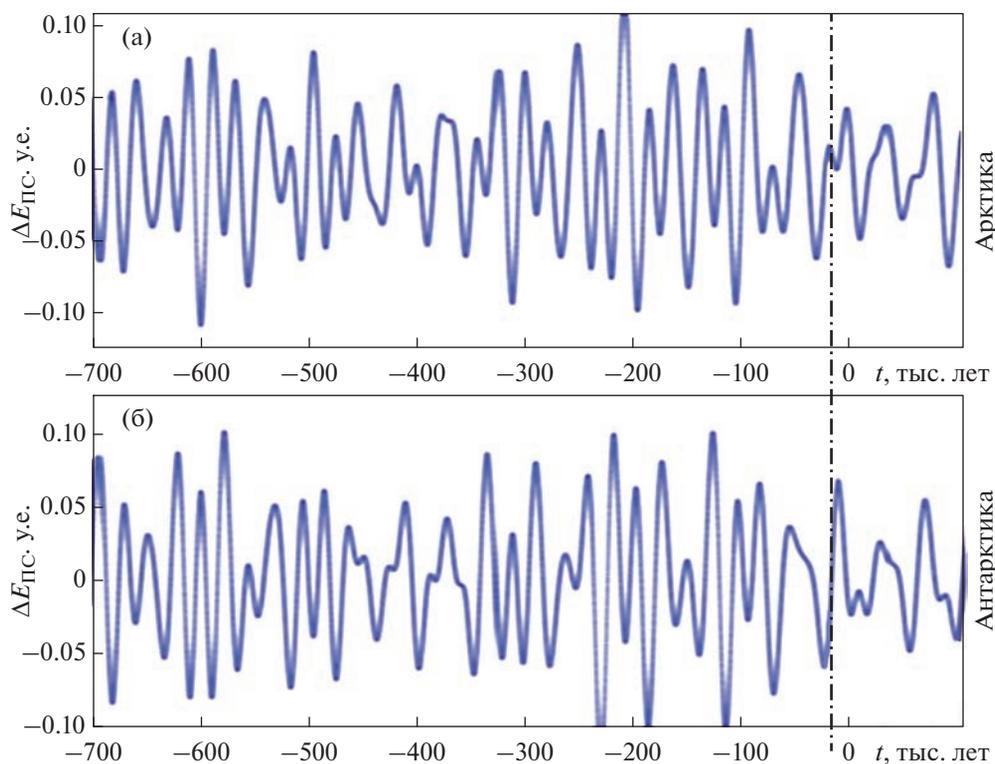


Рис. 6. Графики дисбаланса энергии зон полярных суток для Арктики (а) и Антарктики (б).

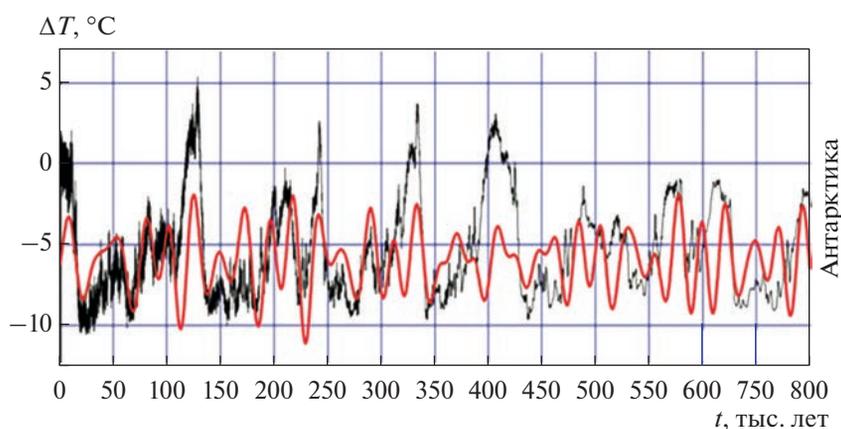


Рис. 7. Вариации температуры в Антарктике (черная кривая), оцененные по анализу ледовых кернов на куполе С, и энергодисбаланс Антарктики (красная кривая).

приведены два аналогичных наложенных друг на друга графика для Арктики:

- фрагмент графика дисбаланса энергии северной шапки (рис. 6);
- график температуры полярной зоны Северного полушария, полученный по результатам анализа кернов из Гренландии.

Из-за большого числа всплесков на графике температур, его синхронность с графиком дисбаланса энергии полярной шапки не столь очевид-

на, как для графиков южной шапки (см. рис. 7). Высокая, по сравнению с Южным полушарием, частота температурных всплесков в Северном полушарии является, видимо, следствием более сильного влияния в Северном полушарии земных энергетических регуляторов (неоднородность подстилающей поверхности из-за большей площади материков в Северном полушарии по сравнению с Южным полушарием). На графике изменения температуры в Арктике (рис. 8) выделяют-

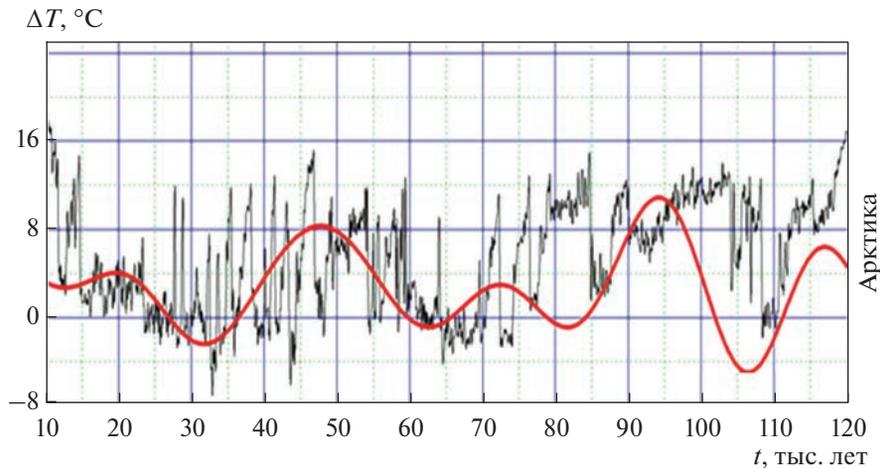


Рис. 8. Вариации температуры в Арктике, оцененные по анализу ледовых кернов, взятых в Гренландии (черная кривая), и энергобаланса Арктики (красная кривая). Горизонтальная ось — это возраст льда, соответствующий интервалу времени от 120 до 10 тыс. лет до нашего времени.

ся всплески амплитудой до 8–10°C. Такие же и даже бóльшие температурные всплески наблюдались и в Антарктике (см. рис. 7), однако там их частота была значительно ниже, чем в Арктике.

ИЗМЕНЕНИЕ РАЗМЕРОВ ПОЛЯРНЫХ ШАПОК

Дисбаланс энергии зон полярных ночей, в зависимости от изменения угла наклона Δi , эксцентриситета e и угла прецессии λ в соответствии с алгоритмами (14) и (21), должен приводить или к понижению температуры и бóльшему оледенению в соответствующей полярной области и к росту полярной шапки. Или, наоборот, — к потеплению в полярной области и уменьшению соответствующей полярной шапки относительно ее средней величины. Увеличение или уменьшение объемов льда пропорционально интегралу от дисбаланса энергии.

Значения интеграла дисбаланса энергии зон полярных дней и ночей являются оценками космической составляющей регулирования изменения размеров полярных шапок. А изменения интеграла дисбаланса энергии косвенно характеризуют изменения размеров полярных шапок. На эту составляющую изменения размеров полярных шапок могут накладываться и другие внутренние факторы изменений в климатической системе, например, изменения в общей циркуляции атмосферы или изменения в теплообмене океан–атмосфера, влияющие на тепловой баланс в области полярных шапок. На рис. 9 и 10 для Северного и Южного полушарий приведены графики изменения космических составляющих размеров полярных шапок — $S_{\text{ПШ}}$ (в сопоставимых условных единицах) относительно их среднего

значения, на которые наложены известные графики концентрации пыли во льду Гренландии (рис. 9) и на куполе С в Антарктиде (рис. 10). На рис. 9 и 10 по горизонтальной оси положительные значения — это возраст льда в тысячелетиях в кернах, по которым получены сведения о пыли, т.е. время в тысячелетиях в прошлом. А отрицательные значения на горизонтальной оси — это будущее время в тысячелетиях.

По данным (Ruth и др., 2003) по количеству пыли во льду в те или иные годы можно судить об интервалах времени усиления или ослабления оледенений в высоких широтах. Пыль откладывается, в основном, в период оледенений (Ruth и др., 2003), поэтому увеличение концентрации пыли будем рассматривать в качестве косвенного показателя оледенения и роста полярных шапок в соответствующем полушарии.

На рис. 9 видно, что высокая концентрация пыли действительно имела место в периоды усиления дисбаланса энергии 20–30 тыс. лет назад и 60–70 тыс. лет назад, т.е. в периоды усиления космической составляющей роста полярных шапок. Это означает, что предложенный показатель космической составляющей усиления или ослабления оледенения в области полярных шапок действительно работает. Однако были случаи, когда, в соответствии с космической составляющей, должно было идти усиление оледенения, но концентрация пыли в этот период оказалась близка к нулю, значит, усиления оледенения в этот период времени не было. Так, например, на интервале 95–110 тыс. лет назад (рис. 9) космический фактор создавал благоприятные условия для усиления оледенения, но концентрация пыли была близка к нулю — усиления оледенения не было. Объяснение этого противоречия заключается в

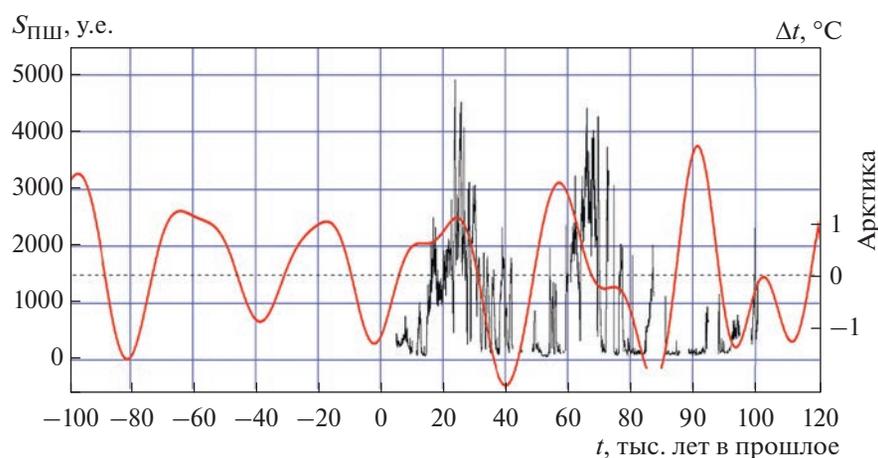


Рис. 9. График космической составляющей размеров северной полярной шапки (в условных единицах) относительно ее среднего значения (красная кривая) и график концентрации пыли во льду Гренландии (черная кривая).

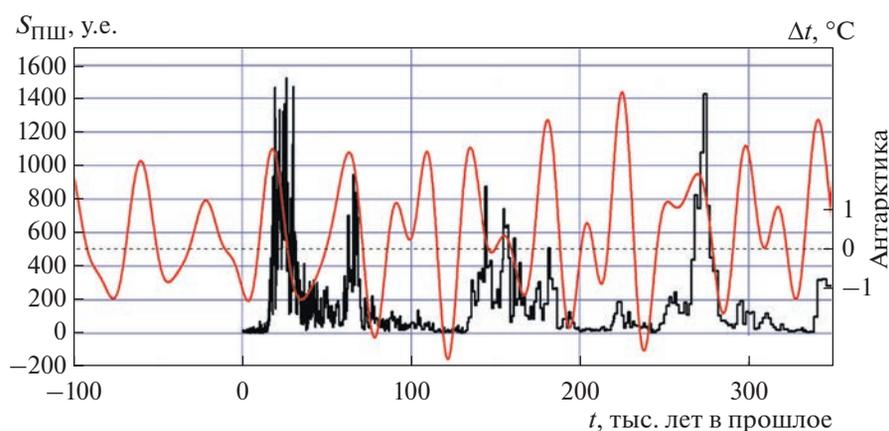


Рис. 10. График космической составляющей размеров южной полярной шапки (в условных единицах) относительно ее среднего значения (красная кривая) и график концентрации пыли во льду Антарктики (черная кривая).

том, что кроме космической составляющей существуют еще земные регуляторы изменений полярных шапок. По данным анализа кернов, взятых в Гренландии, в период 95–110 тыс. лет назад, вопреки уменьшению инсоляции, наблюдалось повышение температуры в Арктике, не связанное с космическими факторами. В отмеченный интервал времени внутренние факторы изменений в климатической системе, видимо, были сильнее.

Аналогично, в Южном полушарии (рис. 10) в течение многих тысячелетий космическая составляющая состояния южной полярной шапки указывала на периоды усиления оледенений и их ослабления в соответствии с изменениями другого независимого показателя оледенения — концентрации пыли во льду Антарктики. Но 95–110 тыс. лет назад космический фактор оледенения оказался не главным из-за повышения температуры, вызванного внутренними перераспределениями тепла в климатической системе.

Таким образом, можно сделать вывод, что реальное изменение оледенения определяется как космическим фактором, так и земными. При отсутствии сильных повышений температуры, обусловленных земными регуляторами, степень оледенения полярных шапок, в основном, определяется космическим фактором регулирования. Однако другие, чисто внутренние процессы в климатической системе, приводящие к повышению температуры, могут замедлить или вовсе остановить рост оледенения.

Дополнительной проверкой правильности получения результатов может быть их сравнение с известным состоянием оледенения в ближайшем прошлом и в настоящее время. Известно, например, что максимум последнего оледенения в Северном полушарии приходился на период 20–30 тыс. лет назад. А затем, до настоящего времени шло уменьшение северной полярной шапки. Это медленное уменьшение продолжается до

сих пор и полностью согласуется с изменением космической составляющей регулятора оледенений (см. рис. 9). На рис. 9 также показаны ожидаемые под влиянием космического фактора изменения оледенений на предстоящие тысячелетия. Соответственно, можно предположить, что таяние северной полярной шапки будет продолжаться еще ~3 тыс. лет, а затем начнется новое оледенение, если в этот процесс не вмешается какой-либо дополнительный фактор.

Площадь южной полярной шапки в настоящее время меньше среднего значения. В соответствии с изменением космического фактора (рис. 9–10), можно ожидать, что далее оледенение в Южном полушарии будет усиливаться в течение последующих около 20 тыс. лет, если в процесс не вмешается потепление, обусловленное другими факторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В качестве одного из космических регуляторов климата Земли рассмотрен дисбаланс энергии инсоляции зон полярного дня и энергии излучения зон полярной ночи, влияющий на вековое изменение размеров полярных шапок. Определена зависимость энергетического дисбаланса зон полярных дней и ночей от параметров орбиты Земли: наклона, эксцентриситета, угла прецессии.

2. Проведено сравнение полученных графиков дисбаланса энергии зон полярных дней и ночей для Южного и Северного полушарий с известными графиками температур полярных областей, оцененных по результатам анализа ледовых кернов, взятых в Антарктиде и Гренландии. Отмечена синхронность графиков температуры Антарктики и Арктики, оцененной по анализу ледовых кернов с полученными графиками энергобаланса полярных зон Антарктики и Арктики.

3. Получены алгоритмы определения многовековых колебаний размеров полярных шапок Земли относительно их средних значений, обусловленных дисбалансом энергопотока зон полярных дней и ночей, в зависимости от наклона, эксцентриситета и угла прецессии.

4. Предложенный метод определения влияния космических факторов на климат, проверенный по объективным данным прошлого, позволяет

осуществлять прогноз многовековых будущих климатических изменений.

5. Сделано предположение, что в обозримом будущем изменения параметров орбиты Земли и наклона оси ее вращения по отношению к плоскости эклиптики, а также прецессии, на протяжении ближайших трех тысячелетий будут способствовать медленному таянию северной полярной шапки. Затем снова появится тенденция для нового роста северной полярной шапки. Предполагается также, что в Южном полушарии уже сформировалась тенденция усиления оледенения. Под влиянием космического фактора она будет усиливаться в течение последующих 20 тыс. лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аванесов Г.А., Михайлов М.В.* Человек и климат // Со-
времен. проблемы дистанционного зондирования
Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 9–20.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-9-20>
- Миланкович М.* Математическая климатология и ас-
трономическая теория колебания климата. М.:
ГОНТИ, 1939. 194 с.
- Михайлов М.В., Константинов И.А.* Новое представле-
ние вектора состояния и уравнений движения кос-
мических аппаратов. Экономические по времени и
памяти высокоточные алгоритмы интегрирования
уравнений движения // XXII Научно-техническая
конференция РКК “Энергия”, сборник докладов,
ноябрь 2021. Королев Московской области.
- Berger A.* Milankovitch Theory and Climate, Article // *Rev.*
Geophys. 1988. V. 26. № 4. P. 624–657.
- EPICA community members.* Eight glacial cycles from an
Antarctic ice core // *Nature.* 2004. V. 429. P. 623–628.
<https://doi.org/10.1038/nature02599>
- Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M.,
Levrard B.* A long term numerical solution for the inso-
lation quantities of the Earth // *Astron. and Astrophys.*
2004. V. 428. № 1. P. 261–285.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335>
- Luthi D., Le Floch M., Bereiter B., Blunier T., Barnola J.-M.,
Siegenthaler U., Raynaud D., Jouzel J., Fischer H.,
Kawamura K., Stocker T.F.* High-resolution carbon di-
oxide concentration record 650000–800000 years be-
fore present // *Nature.* 2008. V. 453. P. 379–382.
<https://doi.org/10.1038/nature06949>
- Ruth U., Wagenbach D., Steffensen J.P., Bigler M.* Continu-
ous record of microparticle concentration and size dis-
tribution in the central Greenland NGRIP ice core
during the last glacial period // *J. Geophys. Res.: At-
mosphere.* 2003. V. 108. № D3. id. 4098.
<https://doi.org/10.1029/2002JD002376>