

УДК 551.581.1;521.11

КЛИМАТИЧЕСКИЕ КАТАСТРОФЫ НА ЗАРЕ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА И ИХ ОТДАЛЕННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

© 2025 г. Г. А. Аванесов^{a,*}, Б. С. Жуков^a, М. В. Михайлов^b, Б. Г. Шерстюков^c

^aИнститут космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

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

^cВсероссийский НИИ гидрометеорологической информации –

Мировой центр данных, г. Обнинск Калужской обл., Россия

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

Поступила в редакцию 07.05.2024 г.

После доработки 17.06.2024 г.

Принята к публикации 27.09.2024 г.

С помощью астрономической модели инсоляции зон полярного дня и полярной ночи Земли оценено влияние космических факторов на ледовую обстановку в них. Показано, что повышение температуры в Северном полушарии началось около 20 тыс. лет назад из-за происходивших в то время вулканических событий, а также в связи с наличием профицита солнечной энергии в этой области планеты, обусловленного параметрами орбиты Земли: наклонением оси вращения, эксцентриситетом и углом прецессии. Профицит тепловой энергии в Северном полушарии сохраняется с тех пор до нашего времени и продолжится еще на протяжении не менее трех тысяч лет, после чего начнется следующий период оледенения. Аналогичные данные приведены для Южного полушария.

Показано, что таяние северных ледников растянулось на многие тысячелетия благодаря высокой теплоте плавления льда и ярко выраженному фазовому переходу. Во время плавления тепловая энергия расходуется на разрушение кристаллической решетки льда, и температура расплава не растет. При замерзании происходит обратный процесс: энергия, выделяющаяся при кристаллизации льда, препятствует уменьшению температуры. Этот процесс также идет при неизменной температуре. Теплостабилизирующие свойства льда проявили себя в виде “температурных полок” на графиках зависимости среднегодовой температуры от времени, построенных по результатам анализа ледяных кернов, добытых в Южном полушарии на станции Восток и в Северном полушарии в центральной Гренландии. В настоящее время запасы льда в Северном полушарии подходят к концу. Соответственно, уменьшается способность ледников стабилизировать температуру. В результате в мире растет частота и мощность природных катастроф. Актуальной становится проблема сохранения существующего климата. Времени для подготовки и проведения мер противодействия изменениям климата остается все меньше и меньше. Декарбонизация не может противостоять идущему процессу разрушения уникального механизма природной стабилизации климата. Необходимо искать другие пути решения проблемы сохранения современного климата. Среди них, с одной стороны, могут рассматриваться различные способы увеличения альбедо, а с другой стороны – способы снижения пропускной способности атмосферы путем распыления в верхних слоях атмосферы над определенными районами специальных химических веществ с малыми сроками полного разложения.

Ключевые слова: климат, инсоляция, альbedo, прецессия, эксцентриситет орбиты, наклонение оси вращения Земли, теплота плавления, фазовый переход, рекуперация энергии, тепловой аккумулятор

DOI: 10.31857/S0320930X25020013, EDN: KXNBCJ

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия средства массовой информации изобилуют сообщениями о растущей частоте и мощности природных катастроф, что на самом деле не лишено основания. Действительно, на наших глазах уменьшается площадь ледников Северной полярной шапки. Теплые течения ежегодно уносят из ледников Гренландии до 220 км³ льда. Еще больше, 300 км³ льда, теряют в год северные моря. В результате, с одной стороны, облегчается судоходство по северному морскому пути, а с другой, — возникает опасность остановки Гольфстрима. Причиной происходящих событий справедливо считается идущее на Земле потепление климата. Виновным в потеплении климата на нашей планете авторитетные источники (IPCC, 2023) называют антропогенный фактор: сжигание огромного количества нефти и газа в бесчисленных двигателях внутреннего сгорания, отопительных и электрогенерирующих системах привело к значительному увеличению содержания углекислого газа в атмосфере. Для борьбы с потеплением во многих странах разрабатываются и реализуются обширные программы декарбонизации. Однако далеко не все специалисты разделяют сложившееся в обществе мнение о том, что антропогенный фактор является единственной причиной потепления климата. Обзор спектра мнений по этой проблеме представлен в работе (Шерстюков, 2023).

В данной работе предлагается и обосновывается совсем иной взгляд на происходящие события. 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 путем исследования ледяных кернов, добытых в Антарктике и в 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 повысилась на 7°C, а в Гренландии — на целых 15°C.

Повышение температуры сопровождалось сокращением площади полярных льдов. Их место занимали растительность, открытая вода и грунт. Альbedo планеты начало уменьшаться. Но это не привело к быстрому росту температуры

на всех материках планеты, так как их ледники начали действовать, как огромный тепловой аккумулятор, работающий в режиме рекуперации энергии. Однако повышение и перераспределение поля температур по всем материкам стало неизбежным. При этом лед стал расходным материалом, который должен когда-нибудь закончиться.

В наше время природный тепловой аккумулятор продолжает свою работу, но его емкость 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. Все 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 нелегкую 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 Северного полушария. По некоторым прогнозам, через несколько десятков лет она может почти полностью исчезнуть из-за идущего на планете потепления. Что стало причиной этих аномалий: 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 (Михайлов, Константинов, 2021; Аванесов, Михайлов, 2022; Аванесов и др., 2023). В них, вслед за идеями Милутина Миланковича (Миланкович, 1939), исследовался дисбаланс энергии инсоляции зон полярного дня и энергии уходящего излучения зон полярной ночи,

зависящие от наклона земной оси, эксцентриситета земной орбиты, а также от прецессии земной оси по конусу вокруг нормали к плоскости орбиты планеты.

Созданную в рамках этой работы математическую модель можно считать астрономической моделью инсоляции зоны полярных суток. Модель с высокой точностью воспроизводит все параметры углового и линейного движения Земли по отношению к Солнцу. При расчете энергетического баланса модель исходит из предположения, что при постоянном номинальном наклонении и постоянном нулевом эксцентриситете на Земле установились бы стационарные полярные шапки постоянной средней величины. Назовем их средними полярными шапками. При этом дисбаланс инсоляции за время полярных суток, $\Delta E_{\text{пс}}$, примет нулевое значение. Накопленный за время полярной ночи лед за время полярного дня тает без остатка. Значение $\Delta E_{\text{пс}}$, рассчитанное относительно него при других значениях эксцентриситета и наклонений, будем называть условным дисбалансом энергии полярных зон. Соответственно, при положительном балансе при наличии запасов льда идет его расходование. При отсутствии запасов льда начинается потепление. При отрицательном балансе идет накопление льда, и начинается оледенение.

На самом деле, в баланс энергии полярной зоны, помимо рассматриваемых факторов, вносят вклад и другие процессы: отражение солнечного излучения, свойства атмосферы, горизонтальный перенос тепловой энергии и др., которые здесь не учитываются.

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).

Годовой баланс инсоляции области полярного дня и излучения полярной ночи зависит от параметров орбиты Земли: наклонения Δi , эксцентриситета e и угла прецессии λ . Периоды изменения этих параметров измеряются многими тысячелетиями и не кратны друг другу. Положительный годовой энергобаланс приводит к повышению температуры и таянию полярной шапки и уменьшению ее площади. Отрицательный годовой энергобаланс ведет к понижению

температуры и к увеличению ее площади. Осреднение процесса на большом интервале времени приводит к изменению температуры в окрестности соответствующих полярных шапок.

Построенные по результатам расчетов графики приращения энергии инсоляции $\Delta E_{\text{пс}}$, показанные на рис. 1, приведены в условных единицах и отражают зависимость энергобаланса от Δi , e , и $\cos \lambda$. Для перевода в джоули значения, приведенные на графиках, необходимо умножить на условный коэффициент пересчета K_y , пропорциональный годовой инсоляции Земли $E_C = 5.5 \times 10^{24}$ Дж. Предполагается, что K_y будет определен в будущем путем учета реальных наблюдательных данных, позволяющих оценить величину дефицита или профицита энергии при увеличении или уменьшении значительных площадей ледников в северном или южном полушарии. Первая попытка уточнения K_y делается в данной работе в разделе, посвященном оценке современного состояния теплового аккумулятора Арктики.

Как видно из приведенного на рис. 1а графика, положительный годовой баланс в Арктике сложился около 20 тыс. лет тому назад (точка 1). В наше время он достиг своего максимума (точка 2) и начинает уменьшаться. Примерно через 3 тыс. лет он перейдет через ноль, после чего тепловой баланс станет отрицательным. На последующие 15 тыс. лет создадутся условия для оледенения.

В Антарктике, наоборот, 20 тыс. лет тому назад наступил максимум дефицита инсоляции (точка 3). В последующие тысячелетия инсоляцияросла. 10 тыс. лет тому назад годовой баланс стал положительным и достиг своего максимума примерно 5 тыс. лет тому назад. В наше время (точка 4) он уже перешел через ноль и начал уходить в отрицательную область. С этого момента на ближайшие 20 тыс. лет здесь создадутся условия для оледенения.

Правильность астрономической модели инсоляции была подтверждена путем сравнения расчетных графиков дисбаланса энергии с графиками изменения реальных температур на значительных интервалах времени в Антарктике и в Арктике.

На рис. 2 приведены два наложенных друг на друга графика: график температур Антарктики, полученный в результате анализа ледовых кернов, добытых на куполе С, и фрагмент графика энергобаланса Антарктики, приведенного на рис. 1.

Сравнение этих графиков демонстрирует синхронность изменения температуры,

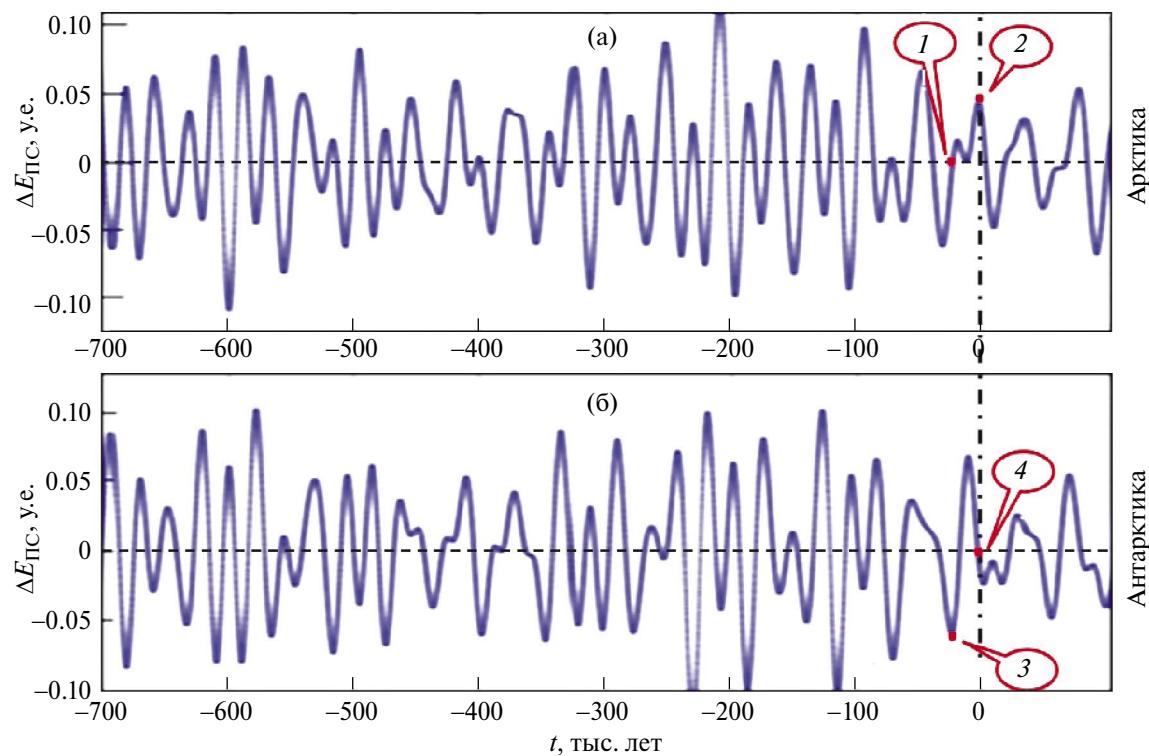


Рис. 1. Графики условного дисбаланса энергии зон полярных суток: (а) – для Арктики; (б) – для Антарктики. ΔE_{NC} – приращение энергии инсоляции за полярные сутки.

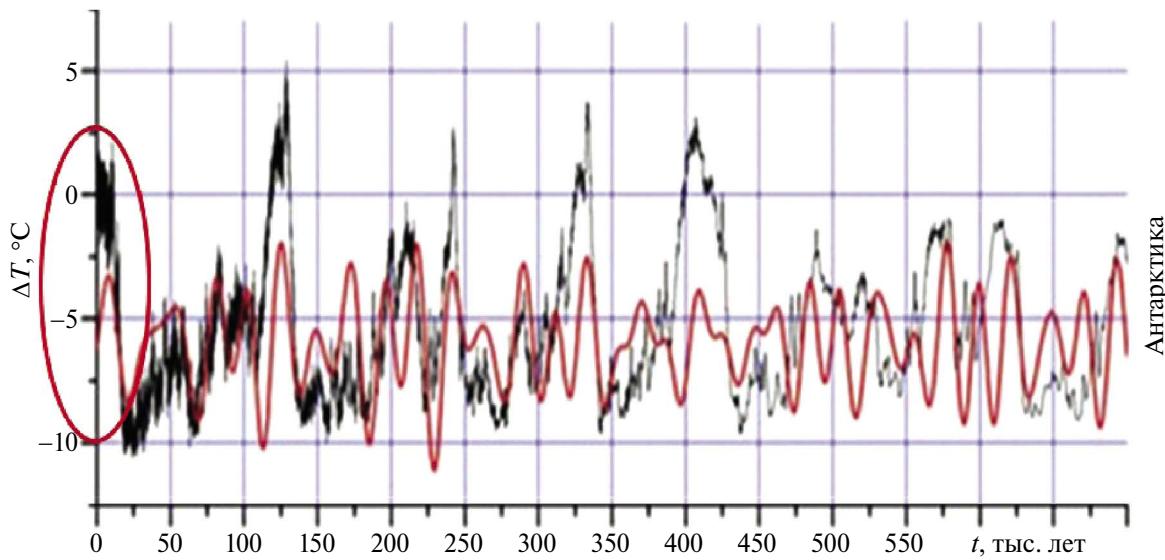


Рис. 2. Вариации температуры в Антарктике (черная кривая), оцененные по анализу ледовых кернов на куполе С, и энергобаланс Антарктики (красная кривая).

оцененной по анализу кернов, и 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. Реальный график температур учитывает не только космические факторы, но и факторы, вносимые на Землю океаном, атмосферой и пр. В этом смысле график температур

является более полным и более точным. Однако синхронность хода температуры в Антарктике с энергобалансом здесь носит очевидный характер.

На отрезке времени от 0 до минус 450 тыс. лет здесь наблюдаются пять крупных температурных всплесков. По времени они совпадают с прогнозными максимумами дисбаланса. Последний из них, обведенный на графике красным овалом, произошел около 15 тыс. лет тому назад.

Приведенные на рис. 3 графики дисбаланса энергии Северной полярной шапки и измеренных в Гренландии температур, построенные для Арктики, не выглядят столь очевидно.

Измеренные по ледяным кернам значения температур в целом лежат в створе прогноза, но часто отрываются от него на значительные величины. На обведенной овалом части графика расчетные значения дисбаланса перестают коррелировать с реальными измерениями. Расхождение прогнозных и измеренных температур заставило задуматься о причинах. Стало понятно, что в эти моменты включаются какие-то более сильные дополнительные регуляторы.

В контексте обсуждаемых в данной работе проблем следует отметить, что величина годового дисбаланса может влиять на температуру и размеры полярных шапок, но существуют и другие регуляторы, например, участие в общем энергобалансе энергии фазовых переходов

вода–лед и обратно. Кроме того, значительную, а иногда и решающую роль в изменении поля температур играют вулканические события.

На рис. 4 и 5 показано, как изменились в прошлом и как поведут себя в будущем основные влияющие на инсоляцию полярных областей факторы: наклон оси вращения Земли и эксцентриситет ее орбиты.

Из графиков следует, что на протяжении практически всего нынешнего цикла прецессии оба параметра уменьшаются. Уменьшение наклона оси вращения ведет к уменьшению угла падения солнечных лучей в полярных и приполярных областях планеты.

Уменьшение эксцентриситета орбиты приводит к уменьшению контраста между экваториальной зимой и экваториальным летом.

В табл. 1 приведены данные, характеризующие влияние обоих параметров на теплопритоки в полярных областях планеты.

Таким образом, в этом разделе показано, что инсоляция полярных шапок на границе земной атмосферы действительно зависит от эксцентриситета орбиты Земли, наклона ее оси вращения к плоскости эклиптики и от прецессии земной оси по конусу вокруг нормали к плоскости орбиты планеты. Параметры инсоляции на границе земной атмосферы хорошо прогнозируются как в прошлое, так и в будущее в пределах нескольких сотен тысяч лет.

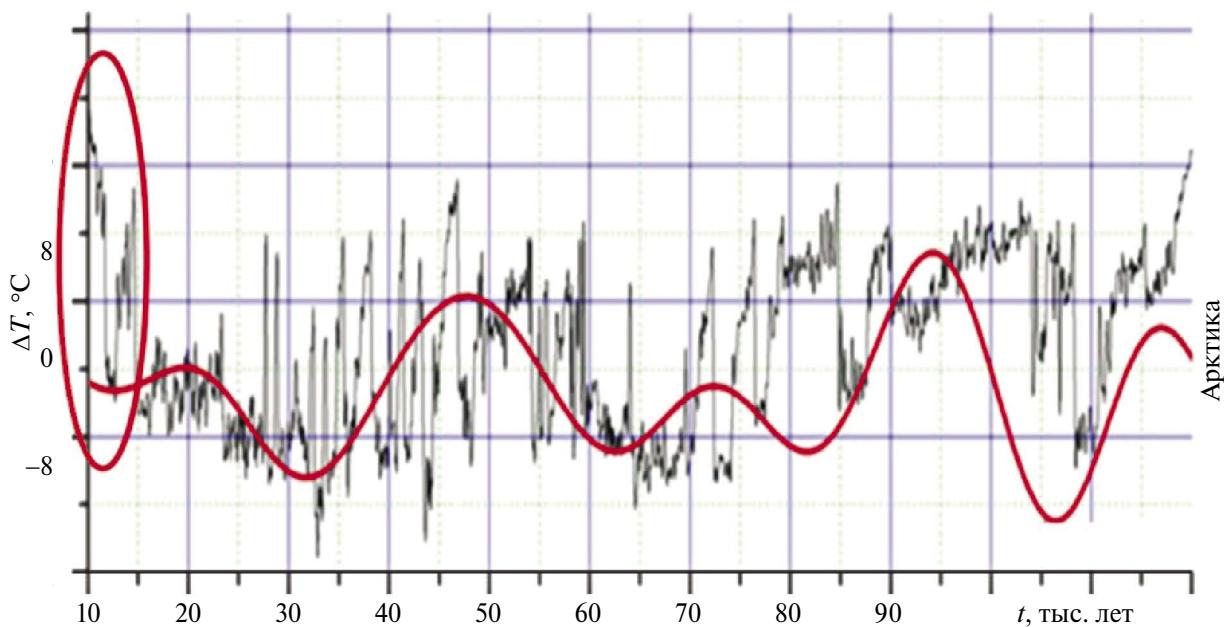


Рис. 3. Вариации температуры в Арктике, оцененные по анализу ледовых кернов, взятых в Гренландии (черная кривая), и энергобаланса Арктики (красная кривая).

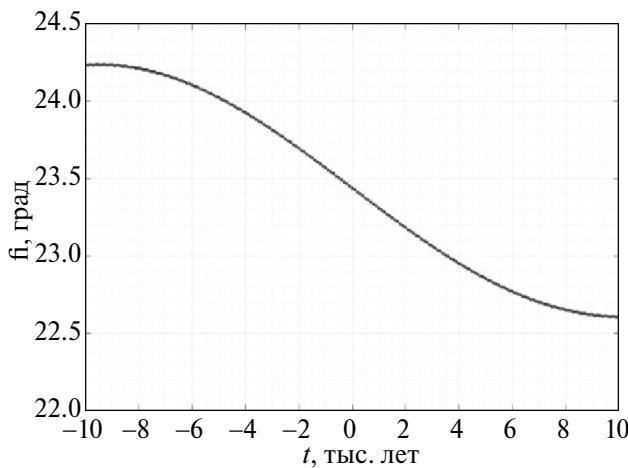


Рис. 4. Наклон оси вращения Земли.

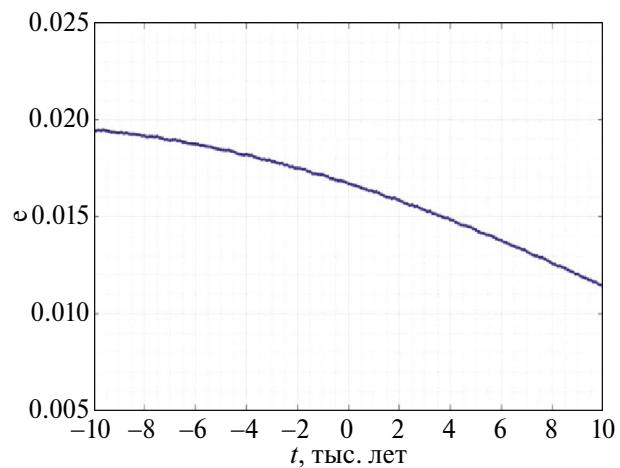


Рис. 5. Эксцентриситет орбиты Земли.

Таблица 1. Особенности орбитального движения Земли в начале, в середине и в конце текущего периода прецессии. Продолжительность периода 22000 лет

Параметры		8980 год до н.э.	2020 год	13020 год
Наклон земной оси (угл. град)		24.25	23.4	22.52
Эксцентриситет орбиты		0.0195	0.017	0.0115
Расстояние от Земли до Солнца	В перигелии (млн км)	147.1	147.5	148.3
	В афелии (млн км)	152.9	152.5	151.7
Секундная инсоляция единицы площади Северного полюса (максимум)	В перигелии (Вт/м ²)	556	534	509
	В афелии (Вт/м ²)	514	499	487
Контраст экваториальной зимы и лета (%)		8.2	7.0	4.5

В целом, приведенные на рис. 1 графики условного дисбаланса показывают, что идущее в наше время быстрое таяние Северной полярной шапки и начало оледенения Южной полярной шапки предопределены астрономическими факторами и не являются результатом увеличения содержания CO₂ в атмосфере. В последующих разделах данной работы этот тезис подтверждается материалами наземных исследований.

ВЫДЕРЖКИ ИЗ ИСТОРИИ КЛИМАТА

История климата Земли с древнейших времен и до наших дней не позволяет ожидать постоянных температурных условий ни в прошлом,

ни в настоящем, ни в будущем. Об этом свидетельствует фундаментальный труд, выполненный международной группой ученых. В результате длительной работы группы специалистов по климату из международного проекта *CENOGRID* (*CENOzoic Global Reference benefic foraminifera carbon and oxygen Isotope Dataset*) появился график изменения среднегодовой температуры Земли за последние 66 млн лет.

Из графика, приведенного на рис. 6, видно, что жаркий и теплые периоды, господствовавшие на Земле более 30 млн лет, сменились холодным периодом, после которого наступил еще более холодный, ледниковый период, продолжавшийся около 3 млн лет. За это время

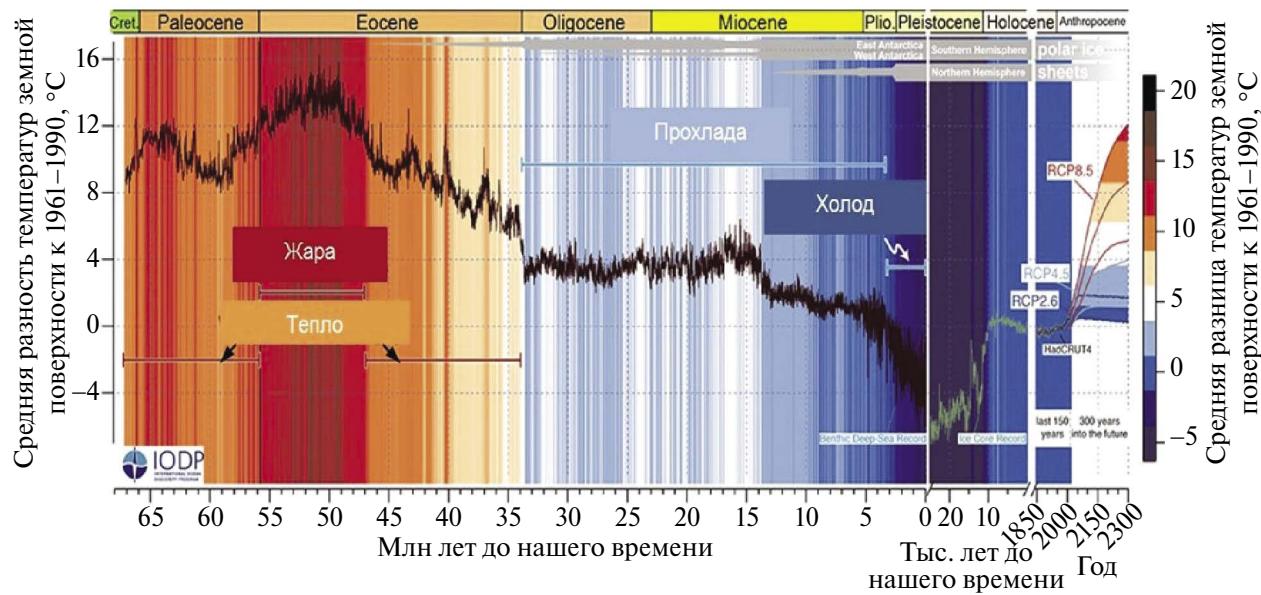


Рис. 6. Климат Земли в последние 66 млн лет.

значительная часть площади Европы, Азии и Северной Америки покрылись толстым слоем льда. Альbedo планеты значительно возросло.

Во время оледенения на Земле установился стабильно холодный климат. При большом альбедо приходящее солнечное излучение почти полностью отражается в космос и не может прервать ледниковый период. Выход из оледенения был возможен только в результате масштабной вулканической деятельности, продолжавшейся на протяжении нескольких десятков тысячелетий и завершившейся около 10 тыс. лет тому назад.

Вулканические события всегда сопровождаются выходом на поверхность эндогенного тепла Земли и вулканического пепла, уменьшающего альбедо Земли после осаждения пепла на поверхность. В результате этого началось таяние ледников, появились участки открытой воды и суши, что постепенно привело к еще более заметному уменьшению альбедо планеты, а также к усилению контраста между севером и югом, между зимой и летом.

Рис. 7 детально описывает изменения температуры в районах полюсов Земли за последние 50 тыс. лет. Графики построены на основе анализа добывшихся в Северном полушарии в Гренландии и в Южном полушарии в Антарктике ледяных кернов. Хорошо видно, что на протяжении первых 40 тыс. лет скачки температуры в Северном полушарии, в Гренландии достигали 10–12°C. При этом скорость нарастания и падения

температуры превышала 10°C за 100 лет. В Антарктике обстановка выглядела гораздо более спокойной. Температурные всплески там не превышали 3°–5°C.

Последняя серия крупных вулканических событий, происходивших почти синхронно в Северном и Южном полушариях на протяжении 4500 лет, завершилась 10200 лет тому назад. Все случившиеся в это время события названы здесь климатической катастрофой, поскольку резкие и глубокие скачки температуры наверняка были губительны для всего живого, включая и первого человека.

Как видно из графика, 10200 лет тому назад температура в Антарктике и в Гренландии повысились на 7°C и 15°C соответственно, и стабилизировались на новых уровнях, сохранившихся до наших дней. Обведенную красным овалом часть графика на рис. 7 назовем “температурной полкой”, или просто полкой. Колебания температуры в эти тысячелетия и в наши дни укладываются в интервал около ±1°C в Антарктике и около ±2°C в Гренландии. Размах колебаний температуры по отношению к предыдущему периоду уменьшился в семь раз.

Подобные полки просматриваются на графике, построенном на основе исследования ледяных кернов, добывшихся в Антарктике на станции Восток. Приведенный на рис. 8 график охватывает период в 420 тыс. лет.

Две полки продолжительностью около 7 тыс. лет каждая образовались примерно 390



Рис. 7. Сравнение приращений температур в Антарктике и в Гренландии по данным, полученным по ледяным кернам на станции Восток (Россия) и в европейском проекте GISP2 (Greenland Ice Sheet Project).

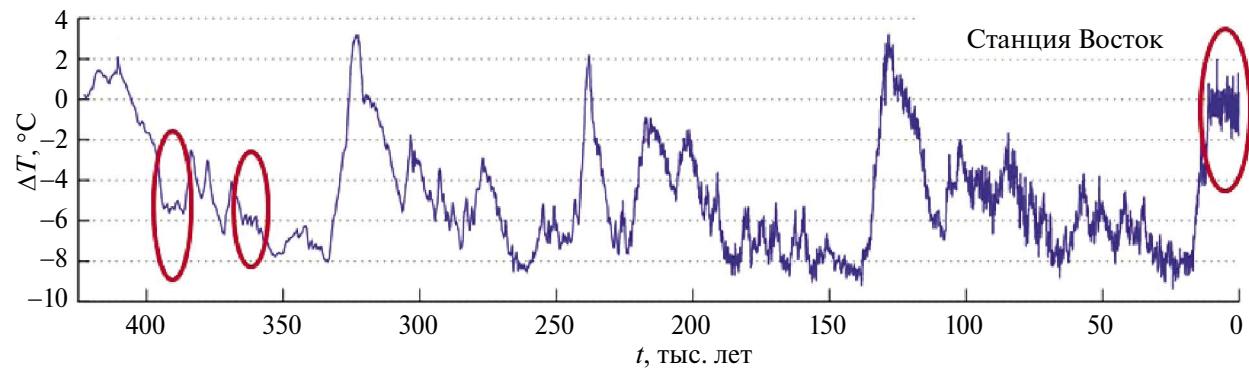


Рис. 8. Аномалии температуры в Антарктике, измеренные по ледяным кернам, добытым на станции Восток.

и 370 тыс. лет назад в Антарктике. Они зафиксировались на уровне $-5.5^\circ C$ и $-6^\circ C$. Первая из них завершилась подъемом температуры, а другая — ее снижением. Обе полки имели уклон. На разрушение полок уходило от 200 до 300 лет. Такой же уклон заметен на третьей полке, справа на графике, во время которой сложилась наша цивилизация.

Первая полка сформировалась 390 тыс. лет тому назад, когда значения эксцентриситета орбиты и угла наклона оси вращения планеты соответствовали современному дню. Но в то время эти параметры увеличивались, а не уменьшались, как это происходит сейчас.

Во всех трех случаях во время существования полок значительно снижалась амплитуда

тепловых всплесков и скорость изменения температуры, что хорошо видно на графике, приведенном на рис. 9. Пиковые значения скорости изменения температуры в Арктике, доходившие ранее до 15°C за 100 лет, снизились до $2^{\circ}\text{--}3^{\circ}\text{C}$ за 100 лет. Практически то же произошло в Антарктике.

Подводя промежуточные итоги по этому разделу, можно констатировать, что образовавшаяся 10200 лет тому назад температурная полка в пределах последних 420 тыс. лет представляет собой уникальное явление. Ее появление связано с определенным набором обстоятельств, среди которых главными являются: цикличность смены переходящих через 0°C температур и наличие достаточного для стабилизации температуры в пределах значительной части земного шара количества льда. Время жизни полок, возможно, связано с температурой, при которой они образовались, и, несомненно, зависит от емкости тепловых аккумуляторов. При этом рассмотренные в предыдущем разделе космические факторы прямого отношения к образованию полок не имеют.

Во время существования полок улучшаются условия жизни всех живых существ, включая современного человека и его предков.

Судя по всему, в наше время приближается окончание срока существования температурной полки, способствовавшей появлению и становлению нашей цивилизации. Но это ни в коем случае нельзя рассматривать как конец света.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАТАСТРОФЫ

Сценарий происходивших на заре человечества событий мог быть не совсем таким, как он описывается в данной работе. Однако, независимо от причин, установившаяся после климатической катастрофы относительная стабильность приповерхностных температур на планете, а также значительное повышение температуры в Северном и Южном полушарии способствовали быстрому развитию переживших ее живых существ, включая и человека. Фактически, именно с этого момента начинается сначала доисторический, а затем и исторический периоды существования человеческой цивилизации.

Вместе с тем, повышение температуры на полюсах планеты сделало неизбежным постепенное таяние ледников и перераспределение поля температур по всей поверхности планеты. Продолжается оно и в наше время. Ход температур в Северном полушарии после катастрофы хорошо иллюстрирует рис. 10. Он построен по тем же данным, что и рис. 7, и детализирует ход температур в последние 11 тыс. лет в Северном полушарии в абсолютных температурах.

В центральной Гренландии установилась и сохранилась до сих пор среднегодовая температура -31°C . Температурные всплески превратились во флукутации температуры, укладывающиеся в $\pm 2^{\circ}\text{C}$. В последние 3000 лет флукутации температуры уменьшились почти в 1.5 раза.



Рис. 9. Скорость изменения температуры ($^{\circ}\text{C}$ за 100 лет) в Центральной Гренландии за последние 50000 лет.

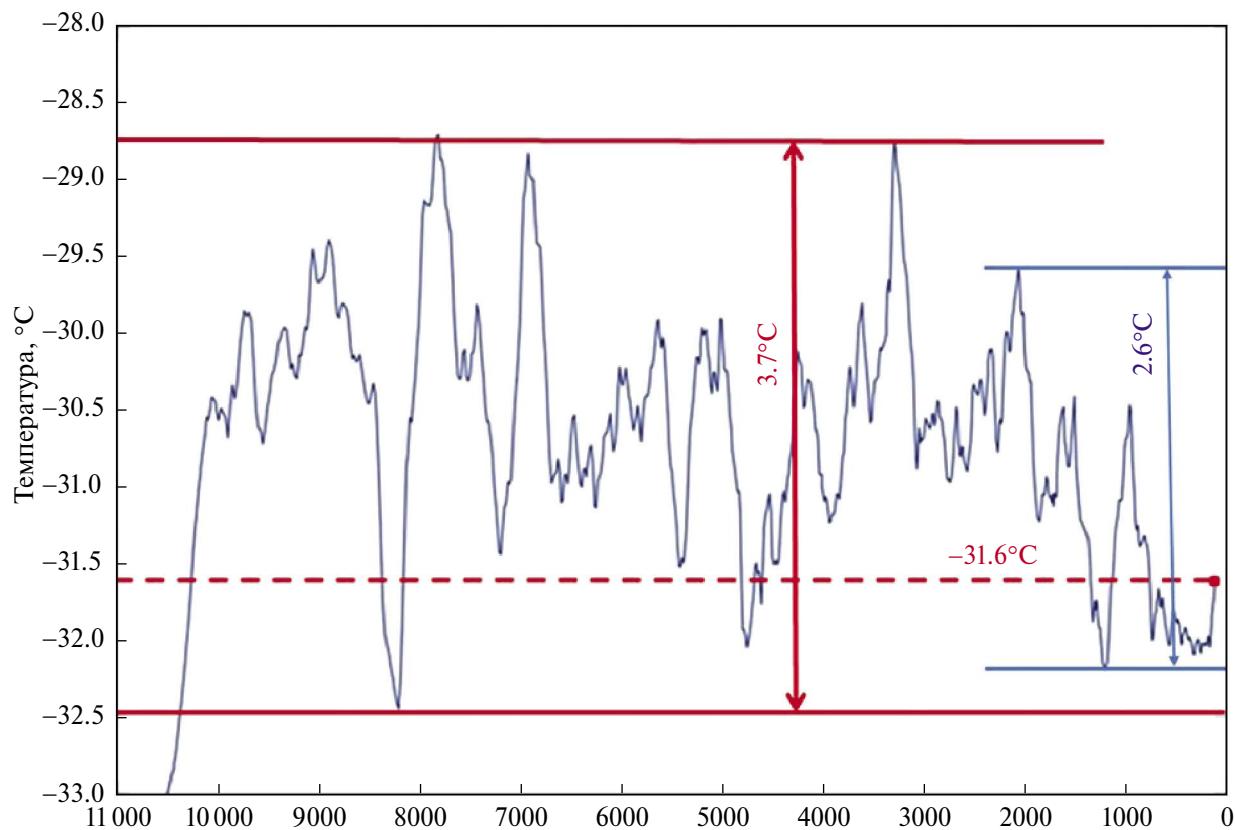


Рис. 10. График среднегодовой температуры в центральной Гренландии за последние 11000 лет, построенный по данным ледового бурения.

Красной пунктирной линией на графике выделена последняя зафиксированная на нем в 1950 г. температура -31.6°C . Эта точка используется в дальнейшем на рис. 13 и 14 для взаимной привязки измерений.

На Северном полюсе в отраженном на графике рис. 10 отрезке времени установилась среднегодовая температура -34°C , но во время полярного дня температура здесь стала подниматься до околонулевых значений. То есть здесь создались условия для таяния льда Северной полярной шапки. Появился “температурный потолок”: тающий лед поглощает тепловую энергию и не допускает повышения температуры в районах таяния выше 0°C более чем на несколько градусов Цельсия. Таким образом, в Северном полушарии сформировалась природная система, сдерживающая как рост, так и снижение температуры, что, в известной степени, равносильно стабилизации теплового режима. Главным элементом системы стал тепловой аккумулятор, состоящий из материковых и морских льдов всего Северного полушария.

В Гренландии и на Южном полюсе, где ледники расположены на некоторой высоте, среднегодовые температуры составили -32.2°C и -55°C . Соответственно, условия для таяния льда во время полярного дня там не сложились. Однако оба эти региона остались надежными свидетелями и летописцами температурных изменений в окружающем мире. Кроме того, они участвуют в стабилизации температуры в этих регионах своим высоким альбедо.

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

Поясним принципы работы идеального теплового аккумулятора (Формозов, 2001; Мозговой и др., 1990) на основе фазовых переходов водяного льда, используя для этого диаграмму, приведенную на рис. 11.

Цифрами на рис. 11 показана реакции работающего тела аккумулятора в зависимости от воздействия циклически изменяющегося теплового

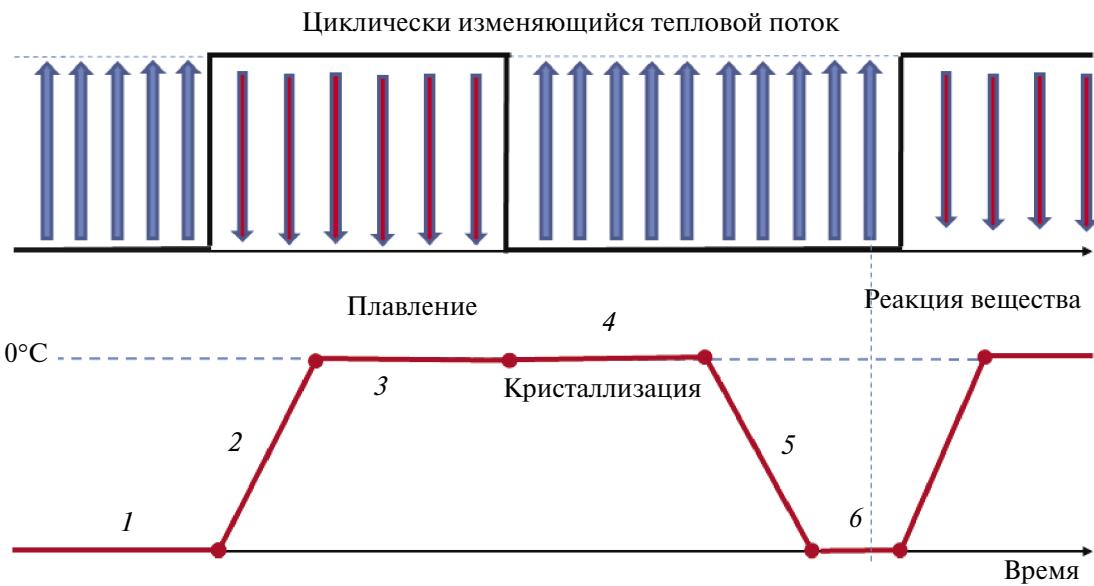


Рис. 11. Диаграмма работы идеального теплового аккумулятора.

потока: 1 – вещество охлаждено; 2 – разогрев вещества; 3 – плавление вещества; 4 – жидкая вода; 5 – кристаллизация вещества; 6 – охлаждение вещества. Далее следует начало следующего цикла. Главной особенностью работы теплового аккумулятора на основе вещества с ярко выраженным фазовым переходом является то, что во время плавления вся приходящая энергия расходуется на разрушение кристаллической структуры вещества. Температура вещества в это время не растет. Когда начинается отток тепловой энергии, температура вещества не уменьшается. В это время отток энергии компенсируется энергией, выделяющейся при восстановлении кристаллической структуры вещества.

Работа реального теплового аккумулятора несколько отличается от идеального тем, что она контролируется датчиками температуры, расположенными вне расплава рабочего тела аккумулятора. На рис. 12 показана работа реального теплового аккумулятора, имеющего герметизированный корпус и установленного внутри термостата, моделирующего внешнюю среду. Нагревание термостата имитирует тепло-притоки. Охлаждение термостата имитирует теплопотери. Активное вещество исследуемого в термостате аккумулятора предназначено для стабилизации температуры вблизи 18°C . Когда температура окружающей среды превышает температуру плавления, аккумулятор начинает формировать температурную полку и делает это до тех пор, пока хватает активного вещества.

При этом тепловая энергия расходуется на разрушение кристаллической решетки вещества. Далее вещество ведет себя как жидкость с определенной теплоемкостью. То же самое происходит, когда идет снижение температуры окружающей среды. В это время полка образуется за счет того, что вещество отдает запасенную им энергию при восстановлении кристаллической решетки. Далее вещество ведет себя как твердое тело с определенной теплопроводностью.

Из рис. 11 и 12 следует, что тепловой аккумулятор может работать 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 ведет себя как обычное жидкое или твердое тело.

Кроме того, из графиков на рис. 12 следует, что точность поддержания температуры зависит не только от самого вещества, но и от свойств корпуса аккумулятора. Реально достижимая в таких устройствах точность стабилизации температуры обычно составляет величину от $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ до $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Такую же точность стабилизации мы наблюдаем в измеренных по ледяным кернам значениях температуры в Арктике и в Антарктике.

Тепловой аккумулятор, рабочее тело которого находится в замкнутом объеме, может работать в режиме рекуперации энергии

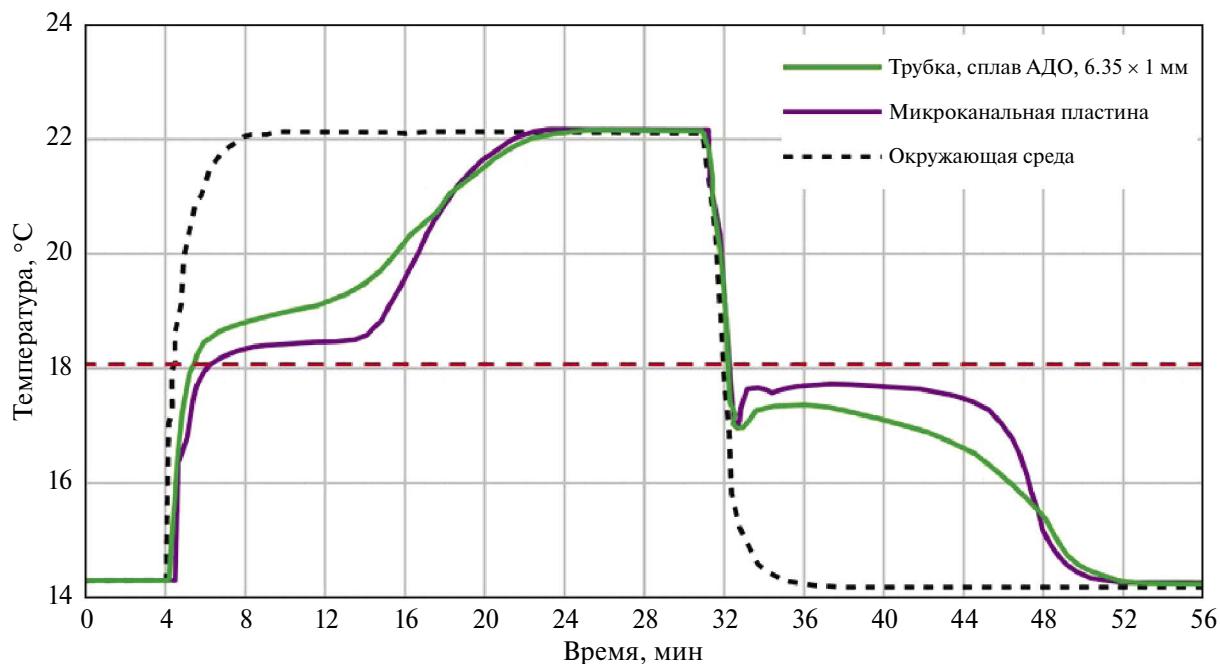


Рис. 12. Диаграмма работы реального теплового аккумулятора.

практически неограниченное время. В природе это вряд ли возможно. Северная полярная шапка проработала в режиме рекуперации энергии 10 тыс. лет. Однако каждый цикл рекуперации шел 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 ее началом объемом 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.

С уменьшением площади Северной полярной шапки ее альbedo также уменьшается. Даже полностью растаяв, полярная шапка превратится в морской лед, и еще долго будет работать в составе теплового аккумулятора. При этом альbedo той площади, которую ранее занимала полярная шапка, снизится. Из этого можно сделать не слишком утешительный вывод: чтобы сохранить льды в пределах северного полярного круга необходимо либо увеличить его альbedo, либо найти способ уменьшить инсоляцию.

По мнению авторов данной работы, таяние льдов долгое время сдерживало рост

температуры в северном полушарии, а возможно, и за его пределами. При этом лед в этой системе сдерживания стал расходным материалом.

В процессе выхода из оледенения площадь материковых и морских льдов постепенно сокращалась, их место занимал открытый грунт, растительность и открытая вода. Подстилающая поверхность в виде льда и снега, имеющая высокий коэффициент отражения и низкий коэффициент поглощения, замещались другими типами подстилающей поверхности с противоположными свойствами. Из-за этого таяние ледников ускорялось. Альbedo Земли уменьшалось.

По мере уменьшения площади ледников их роль в сдерживании роста температуры начинает падать. О снижении сдерживающей роли природной системы стабилизации в явном виде свидетельствуют как рост среднегодовой температуры в Северном полушарии, так и растущие частота и мощность природных катастроф.

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРА АРКТИКИ

Природная система стабилизации теплового режима пока продолжает работать. На рис. 13 показан график отклонения температуры в Гренландии от среднегодового уровня 1960–1990 гг. Красная точка на графике дает привязку

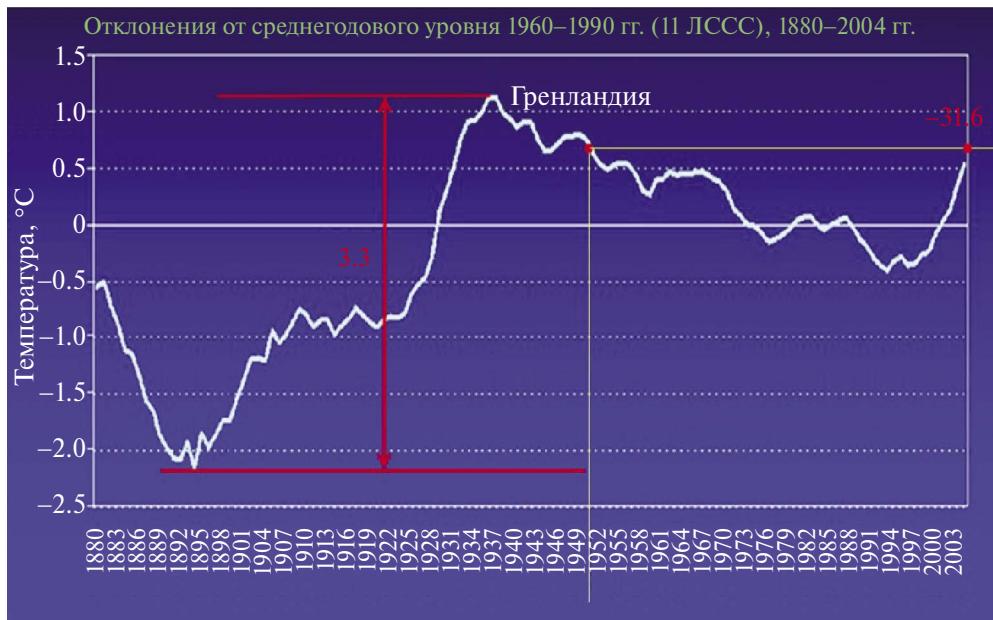


Рис. 13. График отклонения среднегодового уровня температуры Гренландии от среднего за период 1960–1990 гг.

к абсолютным температурам и к графику, приведенному на рис. 10.

В своей высшей точке в 2003 г. температура очень мало отличается от той, что была в 1950 г. Фактически, это говорит о том, что в системе “Гренландия – Северная полярная шапка” температура остается стабильной. Но при этом температура в Северном полушарии и в мире растет, что хорошо видно на графике, представленном на рис. 14.

На график, обозначающий тренд глобального потепления, нанесена точка -31.6°C , обеспечивающая его привязку к рис. 10 и 13. По отношению к показателю 1950 г. глобальная среднегодовая температура выросла на 1.2°C . Это говорит о том, что на сегодняшний день рост глобальной среднегодовой температуры воздуха пока не вышел за пределы $\pm 2^{\circ}\text{C}$, которые обеспечиваются температурной полкой Северного полушария.

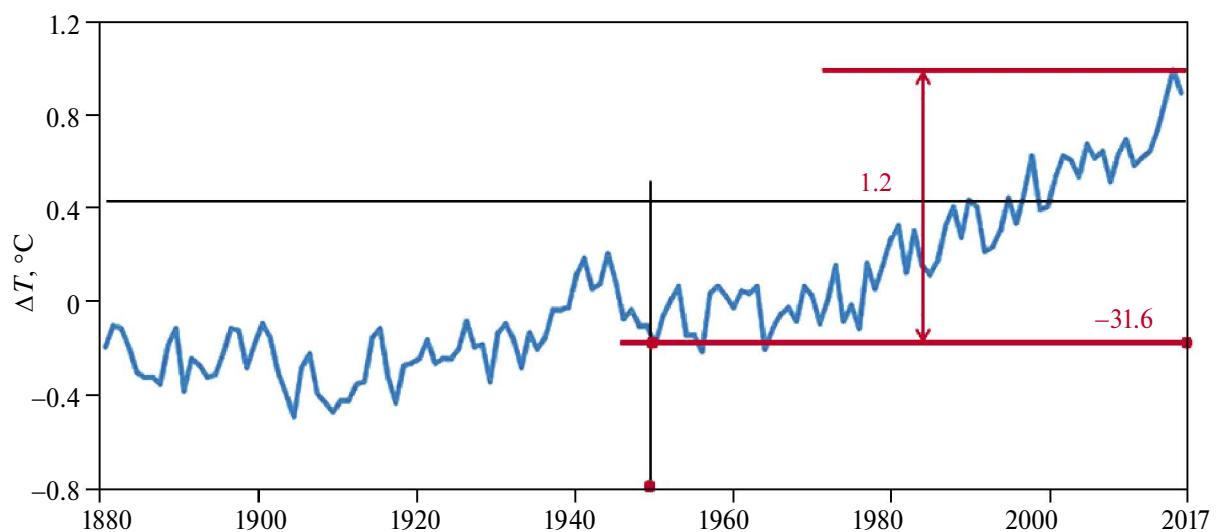


Рис. 14. Изменения глобальной среднегодовой температуры воздуха над сушей и океаном по отношению к средней за период 1951–1980 гг. NASA Goddard Institute for Space Studies.

КАЛИБРОВКА АСТРОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИНСОЛЯЦИИ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

В отчете Yukon University, Канада, посвященном 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 отчете показано, что за годы наблюдений ледового покрова северные моря несли ежегодные невосполнимые потери льда в объеме 300 км³. При этом лед уходит с площади 80000 км². Измерения проводились в сентябре, когда завершается процесс сезонного таяния льда. Прогнозируется, что к 2050 г. в сентябре северные моря будут полностью очищены от льда. В обобщенном виде результаты исследований приведены на графиках на рис. 15.

Приведенные на графиках данные позволяют представить себе масштаб проблемы. Кроме того, они дают возможность определить величину коэффициента пересчета K_y , используемого в астрономической модели инсоляции Земли, рис. 1. Для того чтобы растопить 300 км³ льда, необходимо затратить 8.91×10^{20} Дж (теплота плавления льда 330×10^3 Дж/кг). Примем для оценок, что альbedo покрытого снегом ледяного покрова Арктики и Антарктиды равно 90%. Тогда, получая от Солнца энергию, смесь снега и льда тратит на таяние лишь 10%, а остальные 90% отражаются обратно в космос. Соответственно, полный объем инсоляции, необходимый для плавления 300 км³ льда, составляет 8.91×10^{20} Дж.

В соответствии с графиком, приведенным на рис. 1, на данный момент профицит

инсоляции в северном полушарии составляет $\Delta E_{\text{пс}} = 0.04$ у. е. Годовая инсоляция Земли равна $E_C = 5.5 \times 10^{24}$ Дж. Соответственно,

$$0.04K_y = 8.91 \times 10^{20}; K_y = 2.23 \times 10^{22} = 0.0041E_C.$$

Вычисление значения K_y не превращает астрономическую модель инсоляции в климатическую, но позволяет лучше понять природу происходящих в наше время изменений поля температур.

По рис. 15а можно определить, когда начались невосполнимые потери льда и когда в сентябре северные моря окажутся свободными от льда. Поскольку в приделах ± 100 лет K_y изменяется незначительно, будем считать процесс потери объема льда линейным. Мысленно продолжим среднюю линию графика в прошлое, считая максимальным объем льда в Северном ледовитом океане 26×10^3 км³, и в будущее, до пересечения с осью времени. Получим, что безвозвратные потери льда начались в 50-е годы XX века, а в 50-е годы XXI века в сентябре северные моря будут полностью открыты для мореплавания.

На самом деле при ретроспективных оценках и прогнозах перспектив оледенения необходимо учитывать всю совокупность влияющих факторов (Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б., 2022). На рис. 16 приведен график изменений площади северных морей, начиная с 1870 г., аппроксимированный полиномом 6-й степени. График подтверждает, что тенденция к уменьшению площади льда наметилась в 1950-х годах прошлого века, но замедлилась, начиная с 2020 г.

Наиболее вероятной причиной наблюдаемых на графике колебаний площади льда является нутация земной оси: небольшое дополнительное

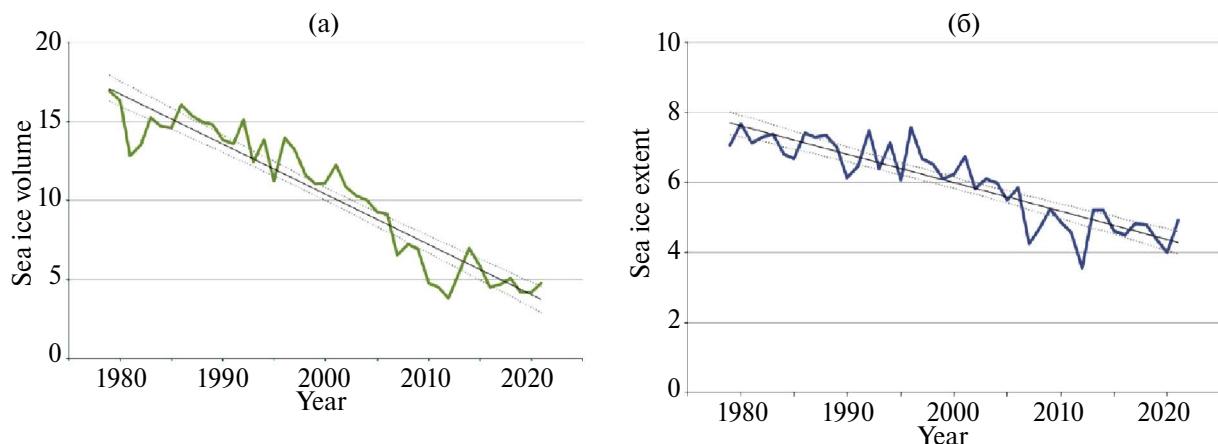


Рис. 15. Таяние льдов в северных морях в сентябре (Yukon University, Canada):

(а) – уменьшение объема; (б) – уменьшение площади.

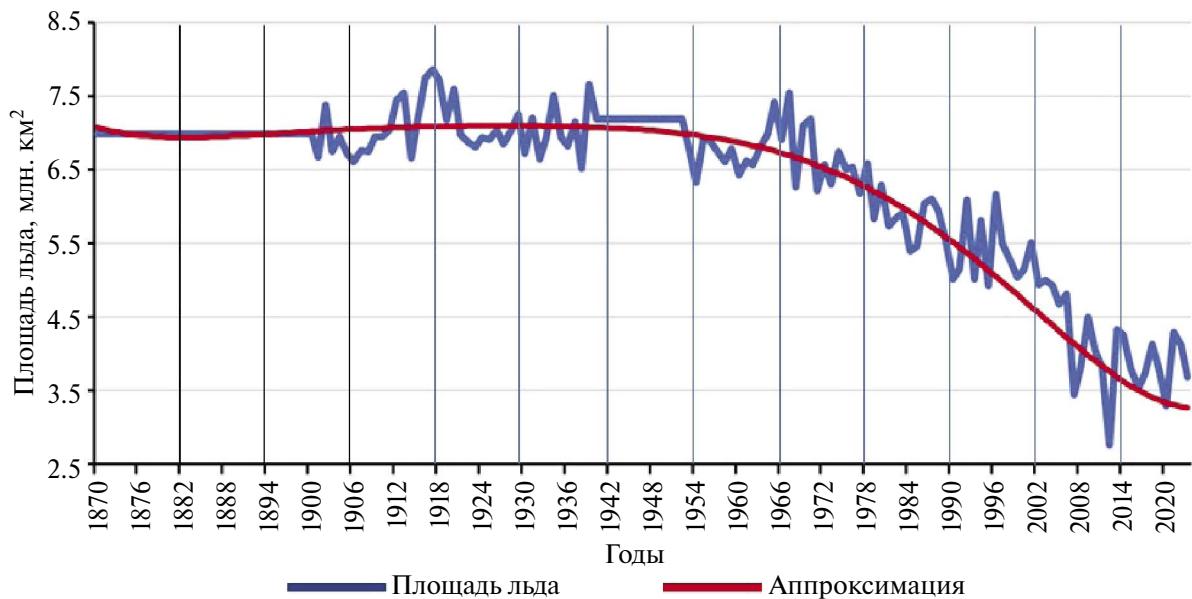


Рис. 16. График изменения площади льда в Северном Ледовитом океане в сентябре (млн км²) и его аппроксимация полиномом 6-й степени.

движение, накладывающееся на прецессию из-за гравитационного воздействия на экваториальную часть земного шара Солнца и Луны (рис. 17). Период нутации 18.61 лет, амплитуда 18.4''. Величины, достаточные для того, чтобы оказывать заметное влияние на таяние льда. Таким образом, фиксируемое на графике рис. 16 замедление таяния льда носит временный характер.

Это лишь небольшая задержка в пути. Причина таяния льдов — профицит энергии в северном полушарии из-за космических факторов — не исчезла. Таяние льдов продолжится, и северные моря в сентябре очистятся ото льда, возможно, на несколько лет позже, чем при линейной интерполяции.

Однако это еще не все. Становится понятной причина, по которой в 1950-х годах прошлого века ускорилось таяние льдов северных морей: кончились накопленные во время ледникового периода запасы льда. Это очень важный, действительно переломный момент в работе природной системы стабилизации температуры Северного полушария. До этого момента тепловой аккумулятор полностью поглощал энергию инсоляции. А после этого момента тепловой аккумулятор может поглощать энергию инсоляции только в объеме льда, намороженного во время предыдущей полярной ночи.

Еще раз напомним, что в соответствии с графиком, приведенным на рис. 1, в Арктике все последние 10 тыс. лет имеет место положительный

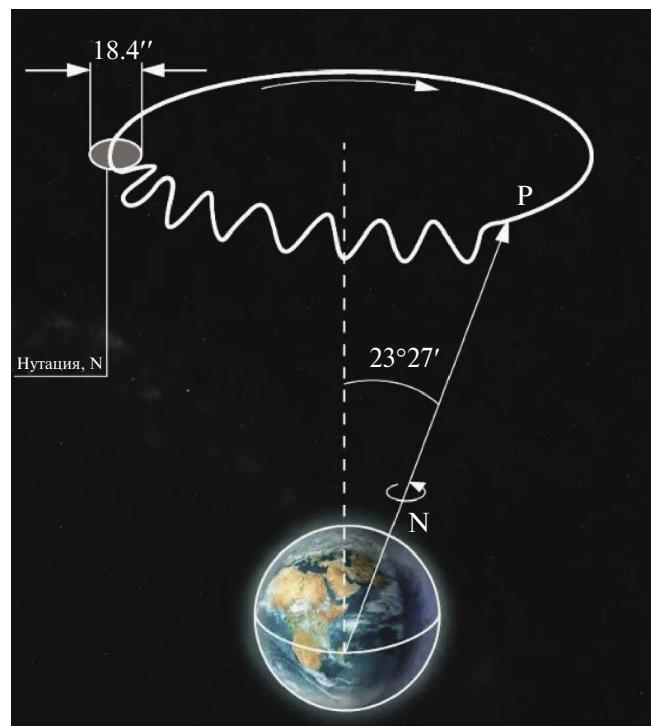


Рис. 17. Схема движения земной оси для внеземного наблюдателя, Р — прецессия, Н — нутация.

энергобаланс. Инсоляция области полярного дня на границе земной атмосферы превышает уходящее во время полярной ночи излучение. Соответственно, за полярную ночь

намораживается меньше льда, чем тает за день. Такая ситуация сложилась 10 тыс. лет назад, и она сохранится в последующие 3 тыс. лет.

Не трудно догадаться также, что 300 км³ льда – это материализованная в нем в наше время ежегодная разница ($\Delta E_{\text{пс}}$) между энергией инсоляции и энергией, излучаемой полярной шапкой в космос в ИК-диапазоне спектра.

Модель показывает, что в последние 10 тыс. лет дисбаланс $\Delta E_{\text{пс}}$ изменялся во времени от 0 до 0.04 у. е. в максимуме, который мы проходим сейчас, т.е. потери льда 300 км³ – это максимум. Будем считать, что в среднем на протяжении 10 тыс. лет, с тех пор, как в Северном полушарии сформировалась температурная полка, ежегодные потери льда составляли ~ 150 км³ в год. Таким образом, в наследство от великого оледенения нашей температурной полке за 10^4 лет досталось не менее 1.5×10^6 км³ льда.

Совсем не обязательно, чтобы это были только морские льды, сплошной ледяной щит или несколько крупных фрагментов щита. Если считать, что льды покрывали всю площадь северного полярного круга 20×10^6 км², то толщина ледяного панциря составляла в то время не менее 75 м. Если льды покрывали только моря Ледовитого океана, с площадью 14.5×10^6 км², то толщина слоя льда составит 103 м. Считается,

что на пике оледенения толщина ледяного щита в Арктике составляла около 700 м (Чумаков, 2015). Таким образом, вполне возможно, что толщина ледяного щита к началу температурной полки могла быть и больше, чем 100 м. Соответственно, скорость таяния ледяного щита можно определить как 0.75–1 м за 100 лет.

По мере уменьшения толщины ледяного покрова во время полярного дня должны были появляться участки открытой воды. Из года в год их площади увеличивались, соответственно, росла уходящая на подогрев воды доля солнечной энергии. При этом из-за большой разницы в коэффициентах отражения льда и открытой воды (90% и 6% соответственно) процесс таяния льда получил дополнительное ускорение.

Приведем еще один график (рис. 18), характеризующий таяние северных морей за последние 120 лет.

Из графиков, приведенных на рис. 18, следует, что в период с 1900 по 1950 гг. площадь таяния льдов практически не менялась и составляла в сентябре $\sim 7.5 \times 10^6$ км². А с 1950 г. площадь таяния стала быстро расти. В 2015 г. площадь таяния льдов в сентябре возросла до 12.5×10^6 км². Соответственно, увеличивалось и время инсоляции открытой воды. Это еще раз говорит о том, что запасы льда кончились примерно

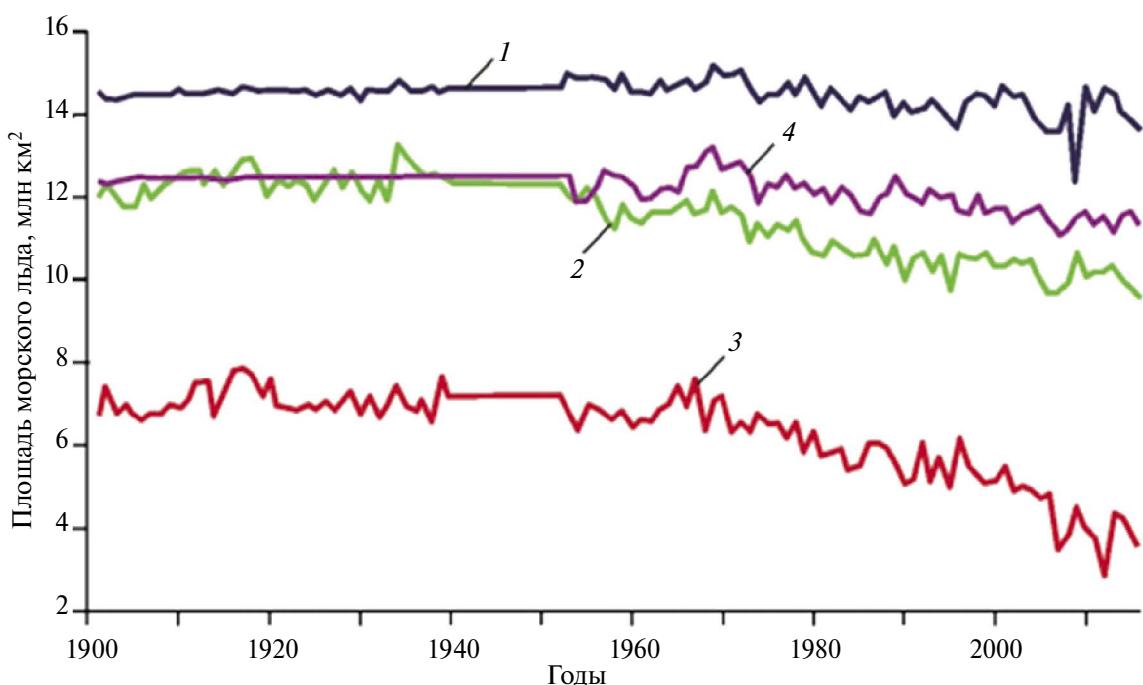


Рис. 18. Площадь морского льда в северном полушарии по данным архива HadISST1 (Hadley Centre sea ice and sea surface temperature) за период с 1870 по 2016 гг.:

1 – март; 2 – июнь; 3 – сентябрь; 4 – декабрь.

в 1950 г., и в расход пошел морской лед. Поэтому ледовитость северных морей начала быстро уменьшаться, и этот процесс будет идти и дальше, в обозримом будущем. При этом меняется структурный состав льда: многолетние льды сменяются однолетними. Соответственно, сохранение объема тающего льда требует увеличения его площади.

Со временем площадь открытой воды во время полярного дня стала приближаться к площади всего Северного Ледовитого океана. Естественно, стали прогреваться и воды всех исходящих из него течений (рис. 19).

Не минуют исходящие из Ледовитого океана течения и Гренландию. Таяние ледников Гренландии было замечено в 1970-х годах прошлого века, но, скорее всего, оно началось лет на двадцать ранее. Сейчас Гренландия теряет в год около 220 км^3 льда, а фиксируемый в этом регионе избыток энергии инсоляции оценивается в 300 км^3 льда. Остальная избыточная энергия расходится, видимо, по другим течениям. Но это только начало. По мере сокращения объема и площади льдов северных морей вся высвобождающаяся энергия инсоляции будет уходить на их подогрев. Значительное ускорение таяния ледников Гренландии становится неизбежным.

Если это так, то места для оптимистического прогноза не остается. Впереди еще 3000 лет, на протяжении которых в Северном полушарии будет сохраняться профицит тепловой энергии. Таяние льдов во время полярного дня ускорится. Наряду с этим увеличатся площади открытой воды и время ее инсоляции. Вытекающие из Ледовитого океана течения будут нести с собой все больше и больше тепла. Увеличение площади открытой воды и ее подогрев ведут и к увеличению эмиссии CO_2 .

Зная величины профицита энергии в Северном полушарии, а также располагая данными о площадях ледового покрова, площадях и времени существования открытой воды, температуру и направления втекающих и вытекающих из Ледовитого океана течений, можно сделать гораздо более точные расчеты.

На рис. 20 совмещены по шкале времени графики, характеризующие площадь морского льда в Северном полушарии (наверху), с графиками, описывающими аномалии глобальной температуры ΔT и количества антропогенных выбросов углекислого газа (CO_2) в атмосферу (внизу). Из графиков видно, что для описываемых ими событий 1950 г. был, в известной степени, переломным.

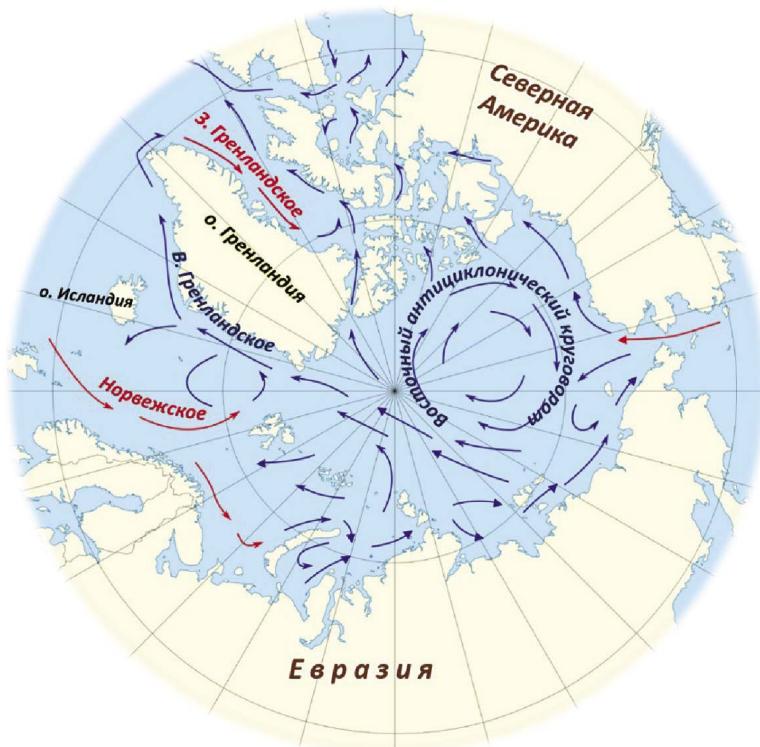


Рис. 19. Течения Северного Ледовитого океана.

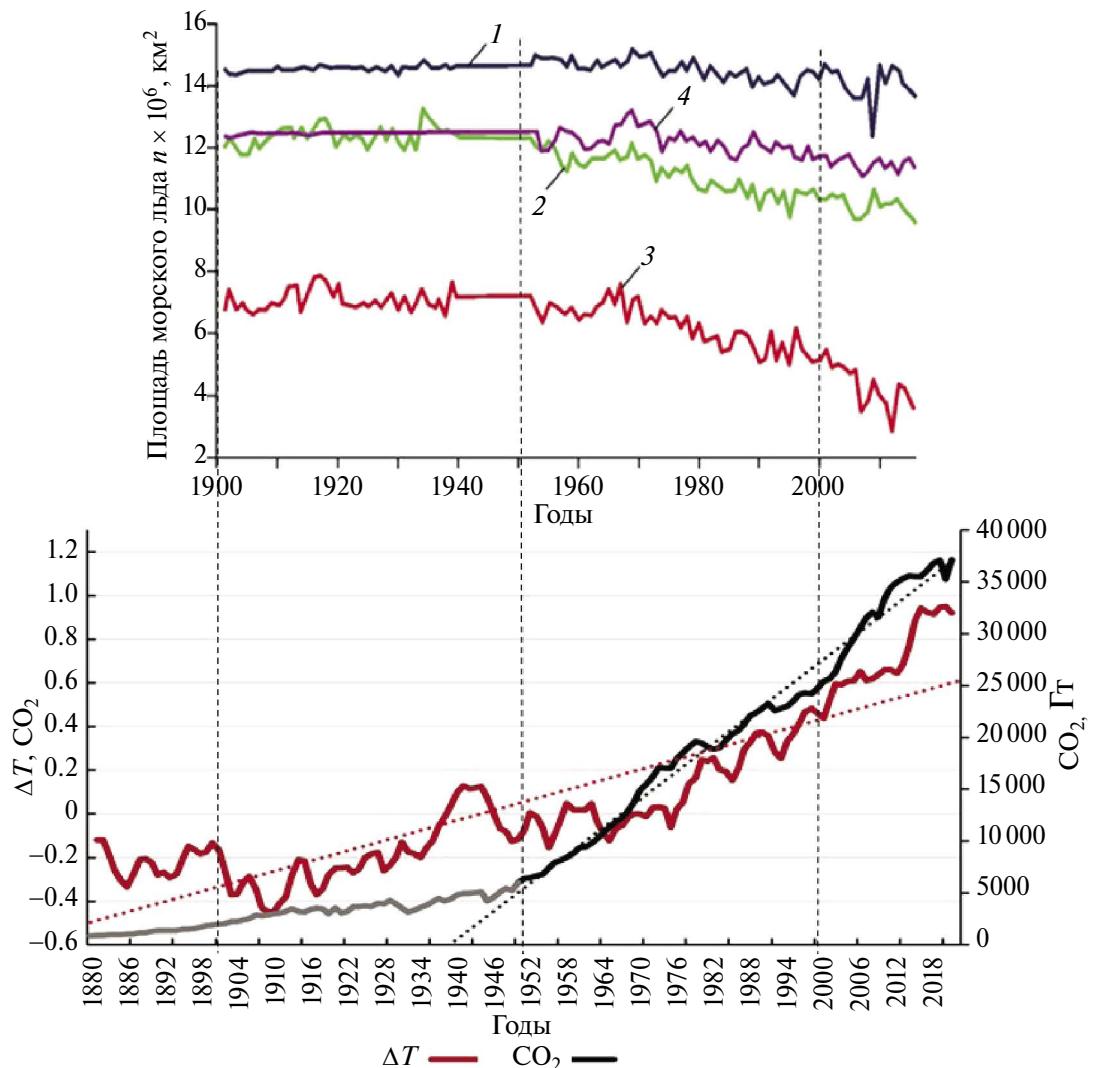


Рис. 20. График, характеризующий площадь морского льда в Северном полушарии (наверху), совмещен по шкале времени с графиками, описывающими аномалии глобальной температуры ΔT и количества антропогенных выбросов углекислого газа (CO_2) в атмосферу (внизу).

Согласно антропогенной гипотезе, потепление климата является следствием усиления парникового эффекта атмосферы за счет выбросов CO_2 человеком при сжигании топлива. Но на рис. 20 видно, что интенсивные выбросы CO_2 начались в 1950-х годах, а повышение глобальной температуры происходит от начала инструментальных наблюдений с конца XIX века и усиливается с середины XX века, когда в него начинает ежегодно вкладываться энергия, обусловленная астрономическими факторами. Следствие (потепление) не может наступить раньше предполагаемой причины (антропогенный CO_2). Таким образом, антропогенная гипотеза таяния льдов северных морей и ледников

Гренландии не подтверждается расчетами и данными наблюдений.

Коэффициент $K_y = 0.0041 E_c$ можно было бы использовать для оценки перспектив развития ледовой обстановки в Антарктике. Но, как видно из рис. 1, в наше время тепловой баланс в этой части планеты только что перешел через ноль. Это значит, что профицит тепловой энергии уже сменился дефицитом. Начинается процесс систематического и постепенно нарастающего увеличения объема образования льда, что пока вряд ли заметно.

В качестве выводов по разделу отметим, что с момента начала потепления 20 тыс. лет тому назад, накопленные за время великого

оледенения льды составляли основу теплового аккумулятора и стабильности глобальной температуры Северного полушария. В середине прошлого века накопленные запасы льда были исчерпаны. Однако тепловой аккумулятор продолжает работать. В каждом следующем полярном дне он поглощает столько энергии, сколько удалось запастися для расхода в полярную ночь. В бюджет потепления идет ΔE_{pc} , а также энергия инсоляции открытой воды. Все это вместе не может не вести к подогреву вод исходящих из Ледовитого океана течений. Не исключено, что значительная часть этой энергии расходуется на таяние льдов Гренландии.

Отметим также, что приведенные в этом разделе данные позволяют приступить к разработке математической модели таяния ледников Северного полушария, начиная от ледяного щита и заканчивая таянием ледников Гренландии.

МОЖЕТ ЛИ ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ ОСТАНОВИТЬ ТЯНИЕ ЛЬДОВ СЕВЕРНЫХ МОРЕЙ?

Полностью подчинив себе планету, человек не показал себя рачительным хозяином. За исторически очень короткое время он успел серьезно засорить множество рек, мировой океан, атмосферу планеты и даже околоземное космическое пространство. На этом фоне поверить в антропогенный фактор как в единственную причину потепления климата было очень легко. Вот так, факт повышения содержания CO_2 в атмосфере стал в глазах общественности считаться официальной причиной потепления климата (Hansen и др., 2010; Lenssen и др., 2019; https://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata_v4/GLB.Ts+dSST.txt; Boden, Andres, 2014).

Таблица 2. Общее содержание атмосферных газов в стандартных моделях атмосферы MODTRAN в атм см (Berk и др., 2003)

Газ	Тропическая атмосфера	Лето средних широт	Зима средних широт	Субарктическое лето	Субарктическая зима	Стандартная атмосфера США
H_2O	5119.4	3635.9	1059.7	2589.4	517.73	1762.3
CO_2	321.97	321.19	322.09	319.44	320.22	320.51
CH_4	1.3243	1.2684	1.2806	1.2556	1.2719	1.3203
N_2O	0.24649	0.23743	0.24037	0.21920	0.23993	0.24593
O_3	0.27727	0.33176	0.34492	0.34492	0.37550	0.34356

Можно согласиться с тем, что действительно, рост температуры на планете коррелирует с увеличением содержания CO_2 . Вопрос лишь в том, что первично: увеличение содержания CO_2 в атмосфере ведет к росту температуры, или, наоборот, повышение температуры приводит к дополнительной эмиссии CO_2 из мирового океана.

Второй вариант представляется более вероятным. В составе земной атмосферы смесь парниковых газов составляет всего 1.1%. Представление о распределении парниковых газов в атмосфере по климатическим зонам дает табл. 2. Из нее видно, что во всех климатических зонах количественно преобладает H_2O , а сезонные и географические вариации этого количества достигают одного порядка. Пространственные и временные вариации содержания CO_2 и CH_4 незначительны из-за сильного перемешивания газов в тропосфере.

На рис. 21 показаны полосы поглощения спектра атмосферными парниковыми газами, которые дополняют более сильные полосы поглощения H_2O . В частности, у углекислого газа есть сильная полоса поглощения на 13–18 мкм, определяющая его основной вклад в парниковый эффект. Однако находится она на краю полосы поглощения водяного пара, а полоса поглощения CO_2 на 4.1–4.5 мкм, находящаяся между полосами поглощения H_2O , слабо влияет на парниковый эффект, так как она приходится на край спектра собственного теплового излучения Земли и ее вклад в поглощение уходящего излучения не велик (рис. 22).

Приводимые ниже результаты расчетов пропускания излучения атмосферой, сделанные с помощью программы MODTRAN-4 (Berk и др., 2003), подтверждают главенствующую роль H_2O в этих процессах. На рис. 23 показаны результаты расчетов интегральной прозрачности земной

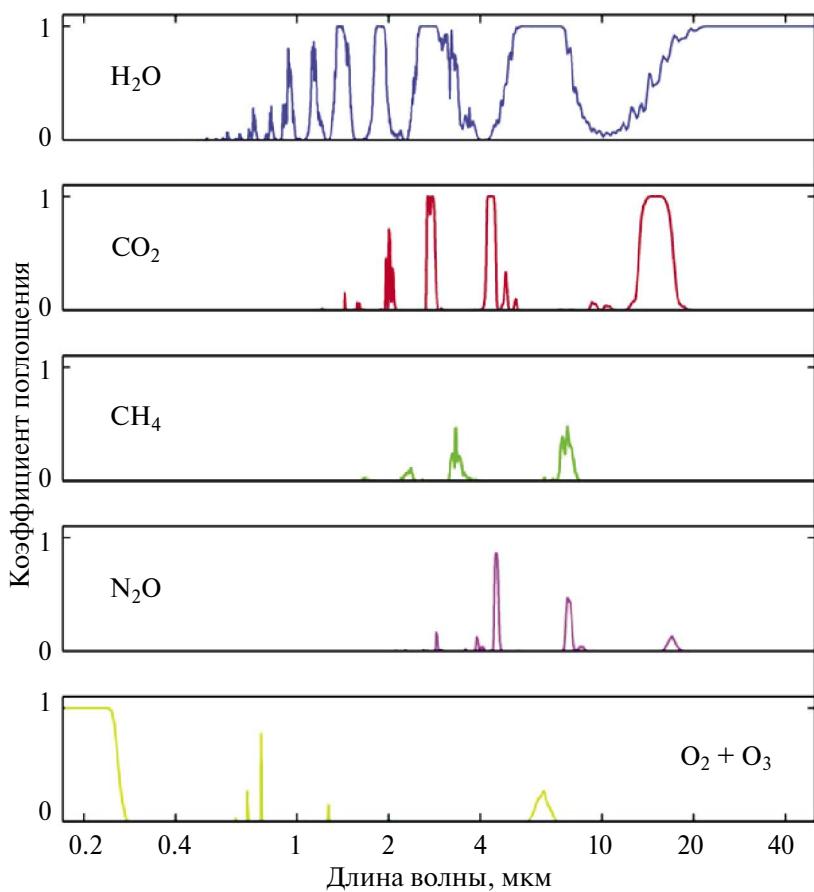


Рис. 21. Окна поглощения отраженного солнечного и собственного теплового излучения Земли атмосферными парниковыми газами.

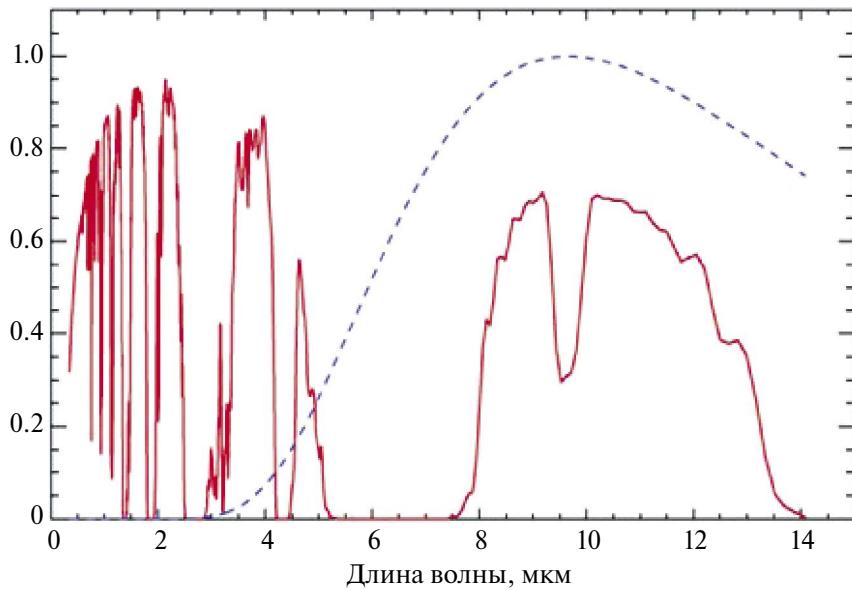


Рис. 22. Спектральная прозрачность атмосферы для базовой модели (красная кривая) и спектр излучения черного тела с температурой 300 К в относительных единицах (синяя кривая).

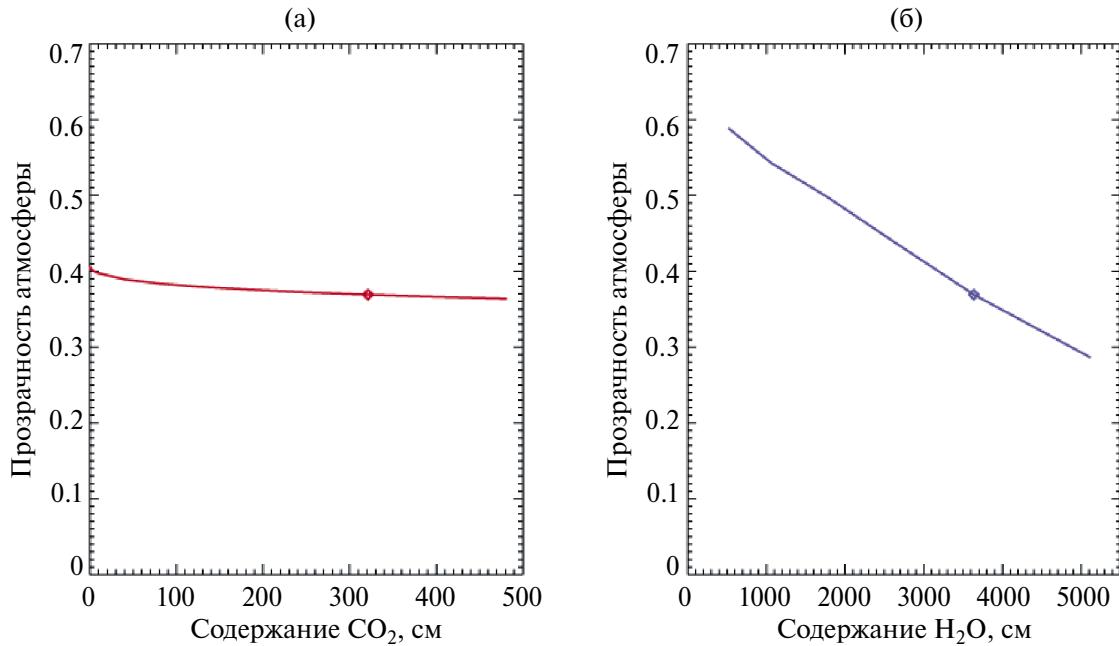


Рис. 23. Интегральная прозрачность атмосферы для собственного излучения Земли в зависимости от содержания в ней CO_2 (а) и H_2O (б).

атмосферы для идущего от Земли ИК-излучения в зависимости от содержания CO_2 и H_2O . Интегральная прозрачность атмосферы рассчитывалась путем интегрирования спектральной прозрачности атмосферы с весом, пропорциональным интенсивности собственного земного излучения. Земля моделировалась излучением черного тела с температурой 300 К. В качестве базовой модели атмосферы принималось “лето средних широт” с “сельским” аэрозолем, с горизонтальной дальностью видимости 23 км и содержанием парниковых газов, приведенным в табл. 2.

Увеличение концентрации CO_2 от 0 до концентрации в настоящее время (400 ppm) при постоянной концентрации H_2O привело к уменьшению интегральной прозрачности атмосферы на 9%. Однако далее поглощение излучения приближается к насыщению, и дальнейший рост концентрации CO_2 на 10% – до 440 ppm приведет к уменьшению прозрачности атмосферы лишь на 0.4%, а гипотетическое увеличение концентрации CO_2 на 50% до 600 ppm – к уменьшению прозрачности атмосферы на 1.5%.

Увеличение содержания CO_2 на 10% по отношению к базовой модели приводит к такому же уменьшению прозрачности атмосферы, как увеличение содержания H_2O на 0.5%, а увеличение содержания CO_2 на 50% эквивалентно увеличению содержания H_2O на 2%.

Для CH_4 увеличение содержания на 10% и 50% эквивалентно увеличению содержания H_2O на 0.08% и 0.4% соответственно.

Для сравнения, сезонные вариации содержания H_2O , соответствующие различию между моделями лета и зимы средних широт, приводят к вариациям поглощения на 47%.

Можно утверждать, что среди природных веществ, участвующих в управлении климатом, главную роль на нашей планете играет именно вода. В зависимости от давления и температуры вода может выступать в роли парникового газа, но может стать облаком, которое, обладая высоким коэффициентом отражения, препятствует нагреванию земной поверхности Солнцем. Вода в виде снега и льда также хорошо отражает солнечное излучение. При этом лед может быть рабочим телом теплового аккумулятора и эффективно действовать в этой роли в режиме рекуперации энергии. В жидком виде вода становится аккумулятором тепла.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что изменения климата происходили и происходят на нашей планете независимо от количества антропогенных выбросов углекислого газа в атмосферу. В целом, эффект от антропогенных выбросов углекислого газа и метана в атмосферу незначителен по сравнению с долговременными, сезонными

и пространственными вариациями водяного пара, а также с ролью воды в природе.

Декарбонизация путем огромных затрат может достичь своей цели: стабилизировать или даже снизить содержание CO₂ в атмосфере. Однако декарбонизация в принципе не может остановить таяние льдов северных морей, причина которого имеет совершенно иную физическую природу.

ЧТО ДЕЛАТЬ?

Изложенные в данной работе предположения о причинах потепления климата на нашей планете в значительной степени отвергают антропогенный фактор, но не снижают остроту проблемы. Значительное потепление, впрочем, как и значительное похолодание, несет реальную угрозу человечеству, если не самому факту его существования, то тому миру вещей, который оно создало. В случае исчезновения температурной полки климат станет другим. Он будет гораздо более контрастным. Окружающий нас мир станет менее дружелюбным и еще более непредсказуемым, чем раньше, причем весьма скоро. Можно ли что-нибудь сделать для сохранения существующего климата, или надо смириться с неминуемым?

Предложенная авторами астрономическая модель инсоляции зон полярных суток объясняет, как изменения положения Земли по отношению к Солнцу приводят к перераспределению энергетических потоков по ее поверхности. Калибровка модели по современным данным позволяет, до известной степени, проникнуть в замыслы природы и интерпретировать результаты наблюдений. При этом модель постепенно вписывается в контекст текущих событий. Она дополняется данными о великом оледенении и ледяном щите, накрывавшем в свое время значительные площади северного полушария, вплоть до 50-х градусов северной широты. Кроме того, астрономическая модель дополняется понятиями о природных тепловых аккумуляторах, образовавшихся почти одновременно в Северном и Южном полушариях. Завершают общую картину современные данные о таянии льдов северных морей, а также сведения о начавшемся таянии ледников Гренландии и их вовлечении в процесс изменения температуры в Северном полушарии. Все это, вместе взятое, не дает оснований для оптимистических прогнозов.

Все изложенное в данной работе можно уточнять, развивать или опровергать, но оно

вносит в проблему конкретику. Указывает примерные сроки событий, поясняет их логику. Дает возможности для расчета ключевых параметров прошлых и грядущих событий, позволяет разработать план действий. Поэтому первое, что надо сделать, это верифицировать предложенную модель. При этом к ней могут добавиться новые данные, созданы новые модели инсоляции экваториальной зоны и средних широт. В конечном счете, должна быть создана модель инсоляции всего земного шара, которая может принести много сюрпризов. Очень важно разработать математическую модель таяния ледников, начиная от ледяного щита в максимуме оледенения и кончая таянием ледников Гренландии.

Надо более подробно разобраться и с тепловыми аккумуляторами Северного и Южного полушария в части географии их размещения. Аккумулятор начинает свою работу, когда температура воздуха циклически переходит через ноль в ту и в другую сторону. Важно выявить географическое положение районов, где это происходит, и оценить состояние льдов в них, а также на прилегающих к ним территориях.

Для решения этих и сопутствующих задач надо привлечь силы науки. Скорее всего, многие из перечисленных задач можно решить достаточно быстро, не выходя из кабинетов.

Исходя из сегодняшнего понимания проблемы, можно предполагать, что температурная полка в южном полушарии сохранится неизменной в ближайшие несколько тысячелетий. После этого она может исчезнуть из-за сильного снижения температуры, которое сейчас начинается. Этого не стоит допускать.

В северном полушарии с середины прошлого века идет сложный переходный процесс. Начинается таяние ледников Гренландии, что влечет за собой множество последствий.

Теперь посмотрим, что может противопоставить силам природы наша цивилизация.

Можем ли мы, например, оградить Гренландию от теплых течений? Ответ однозначный — нет. Нет таких технологий.

Можем ли мы остановить или замедлить таяние льдов северных морей? Вот тут не все так однозначно. В работе (Израэль и др., 2009) приводится сравнительный анализ геоинженерных способов стабилизации климата. Сравнительные характеристики различных методов сохранения современного климата приведены в табл. 3.

Таблица 3. Геоинженерные методы сохранения современного климата

Способ	Возможность реализации до 2015 г.	Компенсация удвоения CO ₂ к 2050 г.	Наличие природных аналогов	Воздействие в пределах природных вариаций	Наличие негативных эффектов	Возможность быстрого прекращения
Отражатели в точке Лагранжа	Нереальная	Реальная	Нет	Нет	Неизвестно	Малореальная
Диспергаторы света в точке Лагранжа	Нереальная	Реальная	Нет	Нет	Неизвестно	Реальная
Отражатели на высоких орбитах	Нереальная	Реальная	Нет	Нет	Неизвестно	Нереальная
Стратосферные аэрозоли из металлов или их оксидов	Реальная	Реальная	Нет	Нет	Неизвестно	Реальная
Неполное сжигание топлива высотной авиацией	Реальная	Не более 30% нужного эффекта	Нет	Нет	Весьма вероятно	Реальная
Стратосферные сульфатные аэрозоли	Реальная	Реальная	Да	Да	Маловероятно	Реальная
Газонаполненные шары в стратосфере	Реальная	Реальная	Нет	Нет	Весьма вероятно	Малореальная
Размещение отражателей на поверхности океанов	Нереальная	Весьма нереальная	Нет	Нет	Неизбежно	Реальная
Создание тумана над океаном	Малореальная	Весьма реальная	Да	Нет	Вероятно	Реальная
Создание облаков над океаном	Малореальная	Весьма реальная	Да	Неизвестно	Весьма вероятно	Реальная
Разведение лесов	Реальная	Весьма нереальная	Да	Да	Нет	Нет
Стимулирование развития фитопланктона	Реальная	Не более 30% нужного эффекта	Да	Нет	Вероятно	Реальная
Химическое поглощение CO ₂ из атмосферы	Нереальная	Весьма нереальная	Нет	Нет	Нет	Да

Большинство из перечисленных в табл. 3 методов признаются в ней неосуществимыми или находятся на грани осуществимости. Другая их часть грозит непредсказуемыми последствиями. Проверенных и гарантированных вариантов мало. Один из реальных вариантов противодействия потеплению связан с разными способами введения в верхние слои атмосферы сульфатных аэрозолей. Еще более интересным представляется предложение NASA о рассеянии в верхних слоях атмосферы кристаллов льда. Рассеиваемые частицы могут препятствовать прохождению солнечного излучения, т.е. позволят уменьшать инсоляцию в определенных географических районах. Авторы работы отмечают, что применение таких методов локально для Арктики может дать значительный эффект при минимальных затратах. Воздействие нужно производить только в весенне-летний период. Через некоторое время аэрозоли и лед разлагаются, перестают действовать и не вносят загрязнений в атмосферу. Уменьшение инсоляции в Арктике может позволить замедлить, а может быть, и остановить таяние ледников Гренландии.

Геоинженерные методы могут помочь не допустить замерзания Антарктики, что представляется более простой задачей, чем борьба с потеплением.

Во всех случаях геоинженерные методы сохранения современного климата заслуживают серьезного внимания.

Однако перейдем к самому главному. Вопросы изменения климата постоянно находятся в центре внимания научных организаций разных стран и мировой общественности. И все они до сих пор уверены в том, что единственной причиной потепления климата является антропогенный фактор и его продукт: увеличение содержания CO_2 в атмосфере. Развернуть представления огромного числа людей в сторону учета космических факторов задача, возможно, более сложная, чем решение климатических проблем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная на суд читателей работа основана на реальных данных о событиях далекого прошлого, на современных данных, собственном опыте и расчетах, а также на не противоречащем им домысливании. Для дальнейших шагов в этом направлении нужны адекватные описанному в данной работе подходу к проблеме математические модели климата. Их еще только предстоит создать. А пока перечислим основные положения и выводы об уже выполненных исследованиях.

1. Потепление климата на нашей планете началось около 20 тыс. лет назад в результате серии мощных вулканических событий. Они вывели планету из длительного оледенения. Повышение температуры на 7°C в районе Южного полюса и на 15°C в районе Северного полюса стало результатом двух последних в этой серии вулканических событий, происходивших в несколько этапов на протяжении 4500 лет и завершившихся 10200 лет тому назад. С тех пор начался и не закончился в наше время процесс перераспределения поля температур по планете в целом. На графиках, отражающих зависимость среднегодовой температуры от времени, в Арктике и в Антарктике образовались температурные полки. При этом установившиеся на полюсах планеты температуры с тех пор поддерживаются с точностью $\pm 2^{\circ}\text{C}$ в Арктике и $\pm 1^{\circ}\text{C}$ в Антарктике.

2. Разработанная авторами астрономическая модель инсоляции зон полярного дня и ночи указывает, а история климата Земли это подтверждает, что в последние 10 тыс. лет в Северном полушарии сложился профицит тепловой энергии, обусловленный космическими факторами. Величина профицита изменялась во времени, начиная от 0 и до максимального значения $8.91 \times 10^{20} \text{ Дж}$ в наше время. Этой энергии достаточно для плавления 300 км^3 водяного льда. Далее, профицит тепловой энергии будет уменьшаться и достигнет 0 примерно через 3 тыс. лет. С этого момента на последующие тысячелетия здесь создадутся условия для оледенения.

3. Несмотря на наличие значительного профицита тепловой энергии, среднегодовая температура в Северном полушарии на протяжении 10 тыс. лет изменялась в пределах $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Стабилизировал температуру тепловой аккумулятор, образованный льдами, накопленными во время большого ледникового периода. Все это время профицит тепловой энергии расходовался на их плавление. В середине XX века запасы льда кончились и профицит тепловой энергии начал расходоваться на повышение температуры в Северном полушарии.

4. В Антарктике 10 тыс. лет тому назад годовой тепловой баланс стал положительным и достиг своего максимума примерно 5 тыс. лет тому назад. После этого профицит начал уменьшаться. В наше время он уже прошел через ноль и начал уходить в отрицательную область. С этого момента на ближайшие 20 тыс. лет здесь создадутся условия для оледенения.

5. Ледники Северного и Южного полушария превратились в огромные тепловые аккумуляторы. За 10 тыс. лет они израсходовали не менее $1.5 \times 10^6 \text{ км}^3$ льда, что соответствует толщине ледяного щита 75–100 м. Отступая, ледники освобождали площади для заменяющих их подстилающих поверхностей с более низкими коэффициентами отражения. Из-за этого таяние ледников ускорялось. Альbedo планеты начало уменьшаться, а лед стал расходным материалом.

6. С увеличением площади открытой воды в Ледовитом океане увеличилось и поглощение ею падающего солнечного излучения. Из-за большой разницы в коэффициентах отражения солнечного света, 90% у льда и 6% у воды, ее прогрев идет быстрее, чем таяние льда. В результате температурная полка Северного полушария в ближайшие десятилетия лет может прекратить свое существование. Прогретые инсоляцией воды исходящих из Ледовитого океана течений уже стали причиной таяния ледников Гренландии. Сейчас она теряет примерно 220 км^3 льда в год, но это только начало. Таяние ледников Гренландии может привести не только к значительному изменению климата, но и к повышению уровня мирового океана.

7. Парниковые газы играют важную роль в тепловом режиме планеты. Однако увеличение содержания CO_2 в атмосфере, скорее всего, является не причиной, а следствием идущего на планете перераспределения поля температур. Декарбонизация в целом вряд ли может служить достаточно мощным и подконтрольным человеку регулятором климата, который сейчас может оказаться остро необходимым.

8. Эффективным инструментом регулирования теплового режима на локальном уровне в Арктике могут стать различные геоинженерные методы, способные уменьшить инсоляцию и тем самым снизить поступление тепловой энергии в северные районы во время полярного дня. Это даст почти незамедлительный и контролируемый результат в местах применения, что само по себе очень важно.

9. Не исключено, что сложившаяся в Северном полушарии природная система стабилизации температуры в свое время создала условия для становления человеческой цивилизации. После сотен тысяч, а возможно, и нескольких миллионов лет первобытного существования вскоре после последней климатической катастрофы началось быстрое развитие человечества. Всего за 10 тыс. лет, т.е. за 500 поколений,

оно прошло огромный путь от доисторического общества до современной промышленной цивилизации.

10. На своем жизненном пути человеческая цивилизация впервые сталкивается и способна это осознать с проблемой планетарного масштаба. Фактически, природа ставит человечество перед выбором: вступить в борьбу с ее, возможно, слепой силой, или же согласиться с не очень радужной перспективой — утратить если не все, то многие свои достижения. Человеческая цивилизация вступила в возраст зрелости и должна сама решать возникающие перед ней проблемы.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ИКИ РАН. никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Михайлова М.В., Шерстюков Б.Г. Космические регуляторы климата Земли // Астрон. вестн. 2023. Т. 57. № 6. С. 521–531. (Avanесов Г.А., Zhukov B.S., Mikhailova M.V., Sharstyukov B.G. Cosmic Regulators of the Earth's Climate // Sol. Syst. Res. 2023. V. 57. № 6. P. 533–543). <https://doi.org/10.31857/S0320930X23060014>
2. Аванесов Г.А., Михайлова М.В. Человек и климат // Современные 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>
3. Израэль Ю.А., Рябошапко А.Г., Петров Н.Н. Сравнительный анализ геоинженерных способов стабилизации климата // Метеорология и гидрология. 2009. № 6. С. 5–24.
4. Миланович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебания климата. М.: ГОНТИ, 1939. 208 с.
5. Михайлова М.В., Константанов И.А. Новое представление вектора состояния и уравнений движения космических аппаратов. Экономичные по времени и памяти высокоточные алгоритмы интегрирования уравнений движения // XXII Научно-технический конф. РКК "Энергия", ноябрь 2021. С. 39–57.
6. Мозговой А.Г., Шпильрайн Э.Э., Дибиров М.А., Бочков М.М., Левина Л.Н., Кенисарин М.М. Теплофизические свойства теплоаккумулирующих материалов. Кристаллогидраты. М.: ИВТАН, 1990. № 2 (82). 105 с.
7. Формозов Б.Н. Введение в криогенную микроэлектронику. СПб: Наука, 2001. 326 с.

8. Чумаков Н.М. Оледенения Земли. История, стратиграфическое значение, роль в биосфере. М.: ГЕОС, 2015. 160 с.
9. Шерстюков Б.Г. Глобальное потепление и его возможные причины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 7–37.
10. Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б. Площадь морского льда в Северном Ледовитом океане: изменения, прогноз // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2022. Вып. 189. С. 137–151.
11. Berk A., Anderson G.P., Acharya P.K., Hoke M.L., Chetwynd J.H., Bernstein L.S., Shettle E.P., Matthew M.W., Adler-Golden S.M. MODTRAN4 Version 3 Revision 1 USER'S MANUAL. 2003. 91 p.
12. Boden T., Andres B. Global CO₂ emissions from fossil-fuel burning, cement manufacture, and gas flaring: 1751–2014. [Электронный ресурс. Режим доступа: https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2014.ems Дата обращения: 31.01.2024].
13. GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP v4) [Электронный ресурс. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata_v4/GLB.Ts+dSST.txt Дата обращения: 31.01.2024].
14. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: Core Writing Team, Lee H., Romero J. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. 184 p. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
15. Hansen J., Ruedy R., Sato M., Lo K. Global surface temperature change // Rev. Geophys. 2010. V. 48. Id. RG4004. P. 1–29. <https://doi.org/10.1029/2010RG000345>
16. Lenssen N., Schmidt G., Hansen J., Menne M., Persin A., Ruedy R., Zyss D. Improvements in the GISTEMP uncertainty model // J. Geophys. Res.: Atmosphere. 2019. V. 124. № 12. P. 6307–6326. <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>