

УДК 911.52 (575.2) (04)

ИЗМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

О.А. Подрезов – докт. геогр. наук

Дается обзор современных научных представлений об изменениях климата в прошлые и современную эпохи, а также возможностях его моделирования и предсказуемости. Статья рассчитана на студентов-метеорологов, аспирантов и специалистов, интересующихся проблемами климатических изменений.

1. О климатах далекого прошлого

Рассмотрение проблем современного климата невозможно без обращения к истории прошлых климатов Земли. Научные методы современной климатологии позволяют с различной степенью достоверности оценить климатологические условия различных эпох последнего миллиарда лет. Чем ближе мы к современному времени, тем надежнее результат такого анализа.

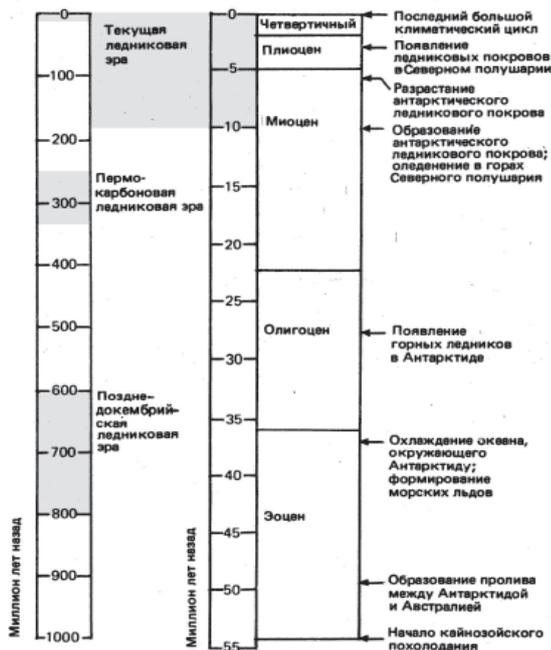


Рис. 1. Климатическая история последнего миллиарда лет. Слева показаны ледниковые периоды-интервалы, во время которых в полярных областях Земли формировались ледниковые покровы. Справа обозначены наиболее существенные события кайнозойской эры (55 млн. лет), характеризующие похолодание климата в течение этой новой эры [1].

Несомненно, что самыми впечатляющими явлениями в климатической истории Земли были периоды ее покровных оледенений в полярных и умеренных широтах, о которых остались вполне достоверные свидетельства. В схематическом временном плане они показаны на рис. 1 для последнего миллиарда лет [1].

Как видно, в прошлом происходили столь существенные колебания климата, что, по крайней мере, трижды возникали ледниковые эры: самая ранняя Докембрийская эра (600–800 млн. лет назад), затем Пермокарбонвая (250–330 млн. лет назад) и, наконец, современная Кайнозойская ледниковая эра, начало которой соответствует примерно 10 млн. лет назад и продолжается в настоящее время. Разумеется, внутри каждой из этих ледниковых эр наблюдались многократные периоды похолоданий с наступлением ледников в умеренные широты и потеплений, когда ледники отступали к полюсам и частично разрушались, сохраняясь только в своих полярных очагах. Согласно [2], в истории последнего миллиарда лет можно выделить следующие переодичности катастрофических изменений климата:

- сверхдлинная, длинная и средняя периодичность климатических и биотических перестроек в 150, 30–35 и 3–4 млн. лет;
- периодичность оледенений в плейстоцене (последние 1,8 млн. лет) в 100 и 20 тыс. лет;
- периодичность изменений в голоцене (последние 10 тыс. лет) в 2000, 500–600 и 20–22 года.

К сожалению, пока не существует теории климата, способной объяснить такую многоуровневую периодичность [1–12]. Однако это не означает, что отсутствуют достаточно убедительные обоснования этих событий [1, 5, 6, 10, 13–16].

Проще всего было бы объяснить изменения климата колебаниями в приходящей солнечной

радиации, когда более высоким ее поступлениям соответствовал бы и более теплый климат. Однако современные многократные измерения солнечной постоянной дают средние значение $1367 \text{ Вт/м}^2 \pm 20 \text{ Вт/м}^2$, без каких-либо существенных регулярных изменений, кроме очень слабой ($\pm 0,1\%$) 11-летней периодичности, связанной с солнечной активностью. Согласно законов эволюции Солнца как звезды, его светимость должна была увеличиться за 10 млрд. лет примерно на 25%. Поэтому даже в пределах десятков млн. лет этот фактор не может являться существенным, тем более, что он имеет трендовый, а не колебательный характер.

Есть все основания полагать, что наблюдавшиеся в далеком прошлом ледниковые эры были обусловлены движениями литосферных плит [1]. Оледенения наблюдались тогда, когда в полярных районах сосредоточивались значительные по площади участки суши, и увеличивалось альbedo Земли. Так, сейчас установлено, что при Пермокарбонном оледенении вся земная суша была объединена в суперконтинент Пангея, который располагался вдоль экватора, но одна из его окраин достигала южного полюса. Это современные Бразилия, Аргентина, Южная Африка и Австралия. Именно они лежали в высоких широтах южного полушария и несут следы этого древнего оледенения.

Затем в течение 200 млн. лет Земля была полностью свободна ото льда, климат был устойчивым и более теплым, чем современный. Скорее всего, причиной было то, что Пангея сместилась на север, юг ее вышел из полярных широт, и ледники растаяли.

Около 55 млн. лет назад вновь начался ледниковый период похолодания глобального климата, продолжающийся и поныне. Это кайнозойское похолодание можно объяснить расколом Пангеи на отдельные континенты, которые существуют в настоящее время. Антарктида отделилась от Австралии и постепенно сместилась в район южного полюса, а Североамериканский и Евразийский континенты – к северу. За счет увеличения альbedo Антарктиды увеличивалась общая отражательная способность земной поверхности и глобальный климат становился все холоднее. В результате 10 млн. лет назад возник мощный антарктический ледовый щит, который после этого ни разу не исчезал. Около 5 млн. лет назад он испытал повторное еще более мощное разрастание, по размерам, видимо, превосходившее современное.

Около 10 млн. лет назад в высокоширотных горных районах северного полушария (Аляска и др.) появились горные ледники, которые стали постоянно увеличиваться. Примерно 3 млн. лет назад появились ледниковые щиты на участках суши, обрамляющих северную Атлантику. Последний период длительностью около 2 млн. лет называют Плейстоценом, для которого характерно многократное наступание и отступление ледников с сильными колебаниями климатических условий в полярных и умеренных широтах. Средняя планетарная температура Земли за последние 100 млн. лет по сравнению с ее современными значениями за 1961–1990 гг. существенно изменилась (рис. 2), особенно колебательный характер изменения ΔT , отражающий временные потепления и похолодания. Все же на фоне этих колебаний четко видна основная тенденция – развивающееся похолодание, ΔT которого примерно 18 млн. лет назад достигло 7°C . В самые последние 2 млн. лет ΔT приняло резко колебательный характер с амплитудой около 3°C . Это и есть плейстоцен с развитием покровных оледенений, когда холодные фазы разрастания ледниковых щитов сменялись более короткими теплыми межледниковьями. Отдельным положительным всплеском в крайней правой части графика отмечено возможное потепление климата к 2100 г. за счет антропогенного фактора. На рисунке жирными кружками показано 7 периодов массового вымирания организмов. Одной из климатических катастроф около 70 млн. лет назад было вымирание динозавров, что образно отмечено на рис. 2. Возможной причиной могло быть столкновение Земли с крупным астероидом, вызвавшим большой выброс аэрозолей и резкое снижение прозрачности атмосферы, глобальные пожары, кислотные дожди, гибель растительности, огромные волны цунами и др.

2. Спектр колебания климата в плейстоцене и его объяснение астрономической теорией

По результатам анализа колонок грунтов океанского дна ледниковые периоды в последние 500000 лет (наступление, а затем отступление или межледниковье) имели среднюю длительность около 100000 лет [1, 5, 10, 11]. При этом ни одно из межледниковий плейстоцена не продолжалось более 12000 лет, а в среднем составляло 10000 лет. Современное межледниковье или голоцен началось около 10000 лет назад, когда последнее оледенение, достигшее максимума 18000 лет назад, быстро деградировало.

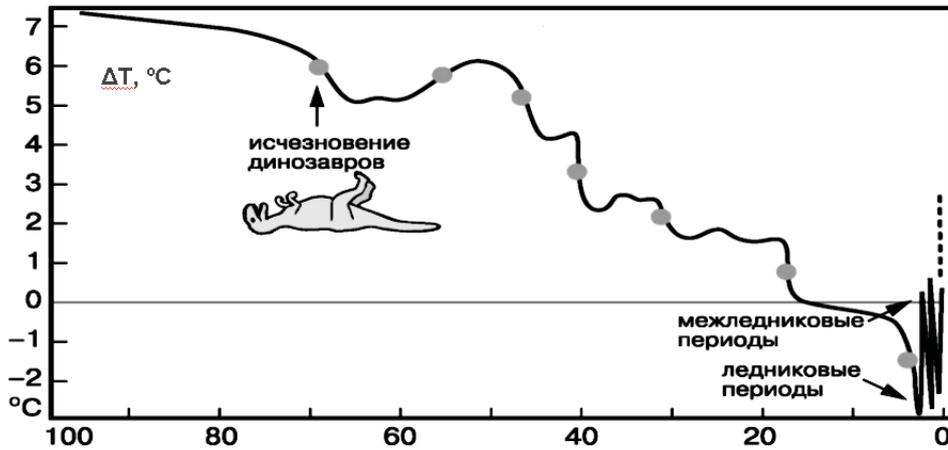


Рис. 2. Изменение глобальной температуры в последние 100 млн. лет относительно средней за 1961–1990 гг. (Информационные материалы. ЮНЕП/ОИК, Женева, 1997 г.).

Итак, если следовать только этой статистике, то мы живем в конце теплого межледникового, за которым должен начаться новый ледниковый период.

На спектре колебаний климата в плейстоцене, полученном по данным донных океанических колонок за последние 500000 лет [1], хорошо видны пики периодичностей климата в 100000, около 40000 и около 20000 лет (рис. 3). При этом главная периодичность – пульс климата Земли – составляла 100000 лет (рис. 4). Именно эти периодичности плейстоцена были предсказаны астрономической теорией климата, разработанной к 1940 г. М. Миланковичем [10]. Обратите внимание, что на рис. 4 изменения температуры не являются следствием колебаний концентрации CO_2 , а наоборот – колебания CO_2 следуют за колебаниями температуры как реакция снижения и увеличения поглотительных свойств океана в отношении CO_2 соответственно при повышении и понижении его поверхностной температуры.

Суть теории состоит в том, что движение Земли вокруг Солнца происходит по слабо эллиптической орбите и возмущается Луной и другими планетами солнечной системы, постоянно меняющими свое взаимное расположение. Хотя в целом годовое количество тепла, поступающего к Земле, от этого не меняется, но зато меняется количество тепла, приходящее в разные сезоны года к различным широтным зонам. Этот, казалось бы, в общем-то слабый тепловой импульс очевидно играет роль “спускового крючка”, т.е. обуславливает цепь климатических изменений, приводящих к сильным колебаниям климата с возникновением ледниковых эпох.

Сами эти климатические механизмы пока остаются неизвестными. Убедительность теории М. Миланковича основывается на предсказанном им удивительно хорошем соответствии уже названных периодов колебаний климата примерно в 100, 40 и 20 тыс. лет и действительно выявленных наукой в последние 500 тыс. лет истории Земли (рис. 3, 4).

Приведем самые необходимые сведения о меняющихся параметрах Земли и ее орбиты, лежащих в основе астрономической теории. Та-

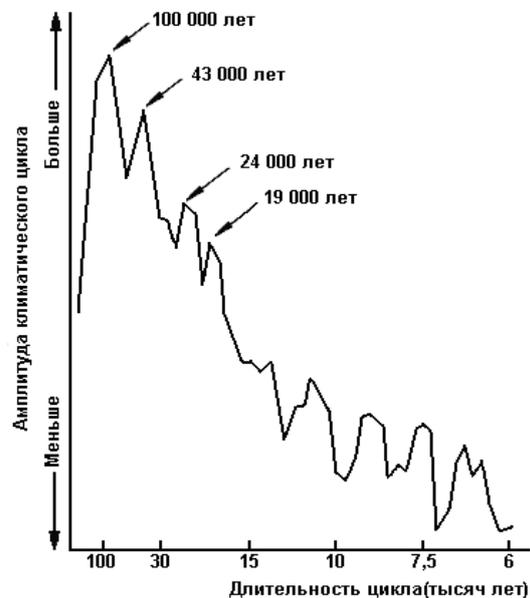


Рис. 3. Спектр климатических изменений за последние полмиллиона лет [1].

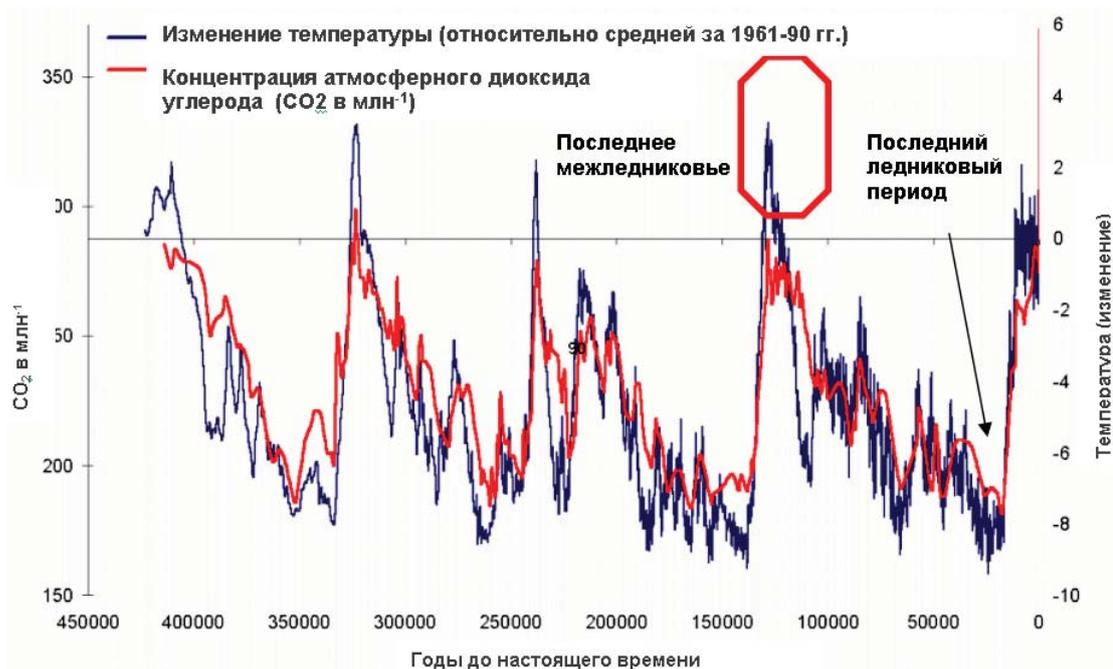


Рис. 4. Изменение температуры (ΔT , °C) и концентрации CO_2 (млн^{-1}) по палеоклиматическим данным в последние 450 тыс. лет. Хорошо видна основная периодичность этих характеристик длительностью в 100000 лет, как это следует из астрономической теории М. Миланковича [16].

ких параметров три: 1) угол наклона земной оси α , под которым будем понимать угол между ее осью и нормалью к плоскости экватора, равный в настоящую эпоху около $23,5^\circ$; 2) прецессия или предварение равноденствий; 3) эксцентриситет орбиты ϵ .

Однако на самом деле угол наклона земной оси α очень медленно, но постоянно меняется. За последние 30 млн. лет он колебался в пределах $22,07\text{--}24,57^\circ$ с основным периодом в 41 тыс. лет (рис. 5). Когда угол наклона уменьшался, полярные области получали в году тепла меньше, а когда увеличивался — больше. Если бы угол достиг 0° , то полюсы не получили бы тепла совсем. Если бы угол α составил 54° , то все точки земной поверхности получили бы одинаковое количество тепла (рис. 6).

Земная ось не только медленно меняет свой наклон по отношению к плоскости орбиты, но и описывает очень медленно конус в пространстве с угловым радиусом около $23,5^\circ$. Это вызывается гравитационным притяжением Солнца и Луны экваториальной выпуклости Земли, которая представляет собой неправильный шар и имеет форму сфероида. В результате Земля движется

наподобие детского “волчка”, ось которого описывает “воронку” в пространстве. Один оборот оси происходит за 26 тыс. лет. Явление получило название прецессии (рис. 7). Кроме того, сама эллиптическая орбита Земли медленно вращается в той же плоскости, но в противоположном направлении. Вследствие сложения этих движений все 4 замечательные точки земной орбиты (20.03; 21.06; 22.09 и 21.12) медленно вращаются по ней против направления движения Земли. Например, если сейчас 21 декабря Земля занимает “зимнее” положение для северного полушария с расстоянием до Солнца 147,3 млн. км, то 5500 лет назад 21 декабря приходилось на современное “весеннее” положение, а 11000 лет назад — на современное “летнее” положение с расстоянием 152,1 млн. км (рис. 8). Таким образом, расстояние от Земли до Солнца в разные сезоны года за счет прецессии не остается постоянным, а меняется в пределах 147,3–152,1 млн. км.

Наконец, сама эллиптическая орбита Земли имеет в современную эпоху эксцентриситет $\epsilon = 0,017$ (при $\epsilon = 0$ орбита была бы круговой). За прошлые 30 млн. лет он колебался в пределах $0,0007\text{--}0,0658$, с основным периодом около

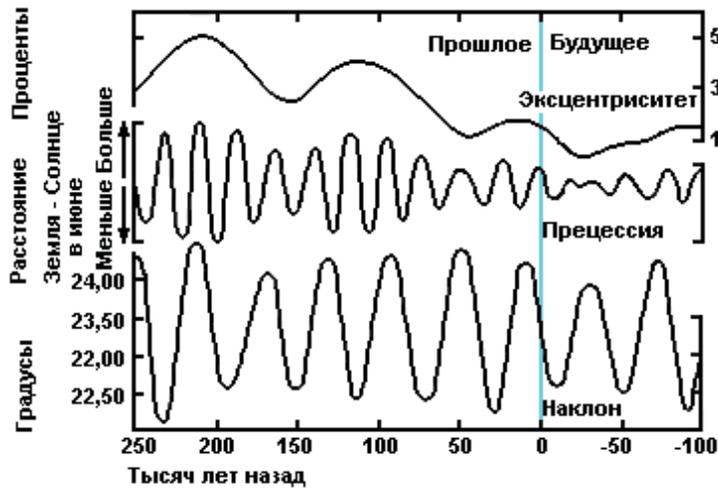


Рис. 5. Колебания эксцентриситета орбиты, наклона земной оси и прецессии. Движение планет служит причиной изменений гравитационного поля, которые в свою очередь вызывают изменения в геометрии земной орбиты. Эти изменения могут быть рассчитаны как для прошлого, так и для будущего [1].

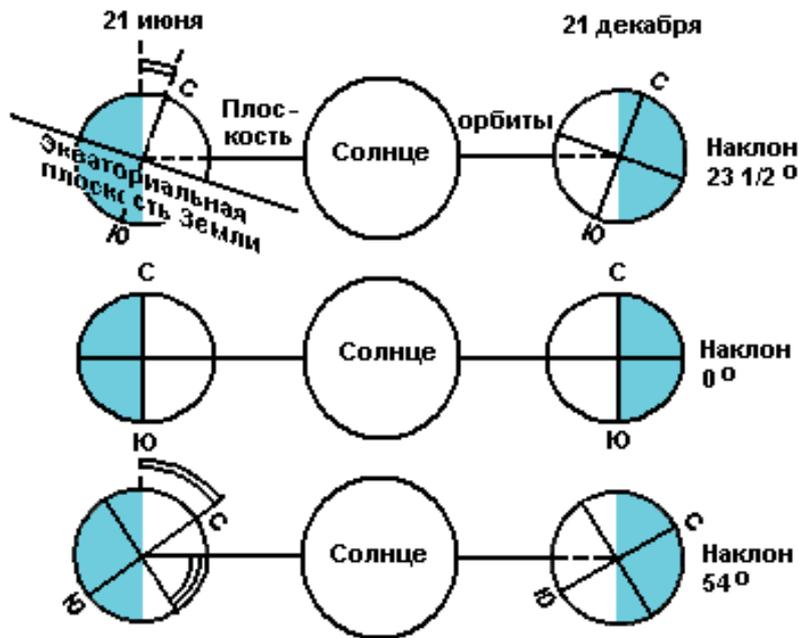


Рис. 6. Влияние наклона земной оси на распределение инсоляции. В настоящее время этот наклон составляет $23\ 1/2^\circ$.



Рис. 7. Осевая прецессия Земли.

90000 лет. На рис. 5 показан график колебаний эксцентриситета за предыдущие 250 тыс. лет и в последующие 100 тыс. лет. С изменением эксцентриситета меняется расстояние от Земли до Солнца, так как орбита то вытягивается, то приближается к круговой, что вызывает различия в поступающей солнечной радиации в различные сезоны года.

М. Миланкович рассчитал, как в прошлом изменялось количество тепла, поступающее от Солнца к различным широтам Земли, с учетом меняющихся значений эксцентриситета, угла наклона земной оси и прецессии. Эти трудоемкие расчеты были сделаны им вручную, так как какие-либо эффективные вычислительные средства в 1920–1938 гг. отсутствовали. По существу был совершен научный подвиг длиной в целую жизнь.

Теория имела и триумфальные взлеты, и полное забвение. Хотя она объясняла возможность возникновения последних оледенений и удовлетворительно согласовывалась с палеогеографическими данными, но все же ей не доставало “количества” в расчетных колебаниях поступления солнечного тепла. Вариации радиации по причине колебаний эксцентриситета, наклона оси и прецессии невелики, ввиду чего возникало обоснованное сомнение, что столь малые ее изменения могут вызвать столь большие изменения климата. Уверенность в правоте астрономической теории могло дать открытие циклов колебаний климата в плейстоцене, близких к предсказанным теорией: 100000-летнему, 40000-летнему и 20000-летнему. Если бы это

оказалось так, то случайные совпадения просто невероятны. К началу 70-х гг. XX в. достоверность 100000-летнего периода стала совершенно очевидной. Развитие средств математического анализа в совокупности с новыми палеоклиматическими данными позволили надежно установить этот факт, с которого и был, по существу, начат настоящий раздел статьи. На графике рис. 3 пик 100000-летнего цикла отвечает изменениям эксцентриситета земной орбиты, 43000-летней соответствует изменениям в угле наклона оси вращения, а 24 и 19000-летние определяются изменениями прецессии. Причем, главным климатическим циклом является 100000-летний (рис. 3, 4). Совпадение с астрономической теорией, как видно, достигнуто с точностью до 5%. При этом конкретные механизмы преобразования слабых астрономических сигналов в глубокие изменения климата с развитием оледенений по-прежнему остаются неизвестными. Неизвестны и причины, по которым 100000-летний цикл изменений эксцентриситета земной орбиты оказался главным в истории колебаний климата за последние 500000 лет, когда длительные похолодания с развитием оледенений прерывались короткими межледниковыми потеплениями длительностями в 8–12 тыс. (рис. 4).

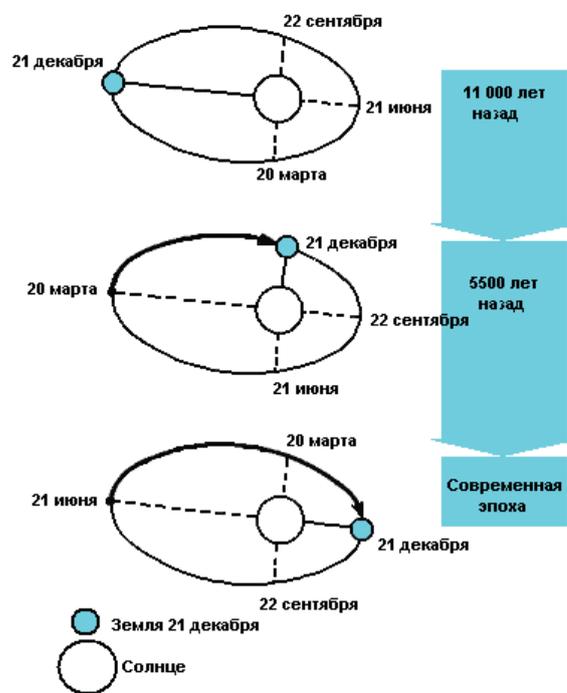


Рис. 8. Предварение равноденствий.

Прямое сопоставление наиболее детальных расчетов по теории М. Миланковича, выполненные советскими астрономами Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой на 30 млн. лет в прошлое, дали удовлетворительное согласие с геологическими данными о последовательности и длительности ледниковых эпох плейстоцена. Аналогичные расчеты сделаны и на 1 млн. лет в будущее. Их можно рассматривать как предсказание климатов будущего с оледенениями эпохи типа Гюнца через 170, 215, 260 и 335 тыс. лет, а затем сильного оледенения через 550 тыс. лет; эпохи типа Рисса через 620, 665 и 715 тыс. лет и эпохи с одним сильным и двумя слабыми оледенениями через 830, 870 и 910 тыс. лет [10].

3. Климат голоцена и влияющие на него антропогенные факторы

Последнее оледенение северного полушария, которое чаще всего называется Вюрмским (синонимы: Валдайское, Висленское, Висконсинское) началось примерно 70 тыс. лет назад, имело три стадии и достигло максимального развития около 18 тыс. лет назад. Затем ледниковые щиты начали быстро разрушаться, отступая к очагам своего формирования. Этот процесс в разных районах шел неравномерно (рис. 9).

Последние 8–10 тыс. лет – наступившее современное межледниковье – называют голоценом. Температура в этот период по сравнению с ее современными значениями (1961–1990 гг.) существенно менялась (рис. 10). Примерно 10 тыс. лет назад (если считать от 2000 г.) наблюдалось резкое потепление климата, который к 9-тысячелетию достиг современных значений температуры. Далее климат принял относительно стабильный характер, вплоть до конца 20 столетия. Колебания температуры происходили, но они были в пределах $\pm 1-1,5^{\circ}\text{C}$. Выделяется так называемый климатический оптимум – период 5–6 тыс. лет назад, когда температура была выше современной в пределах $0,5-1^{\circ}\text{C}$. Стрелками на рисунке показан теплый средневековый период на рубеже первого-второго тысячелетия нашей эры, во время которого викинги освоили Гренландию. Начавшееся затем похолодание уничтожило их колонию. Это похолодание известно как малый ледниковый период. Оно проявилось в росте альпийских и других горных ледников, увеличении ледовитости северных морей и достигло пика примерно к 1700 годам. Содержание CO_2 в атмосфере было низким и упало до концентрации 280 млн^{-1} . Все же отчетливо видно, что пример-

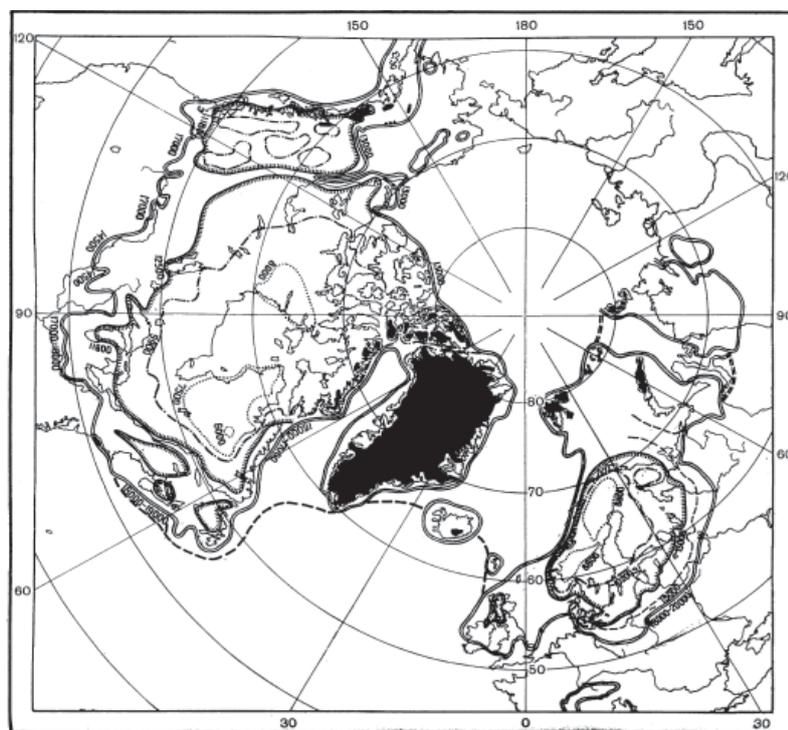


Рис. 9. Распространение ледникового покрова в позднем Вюрме и этапы его деградации. По данным различных авторов (надписи соответствуют тыс. лет назад) [10].

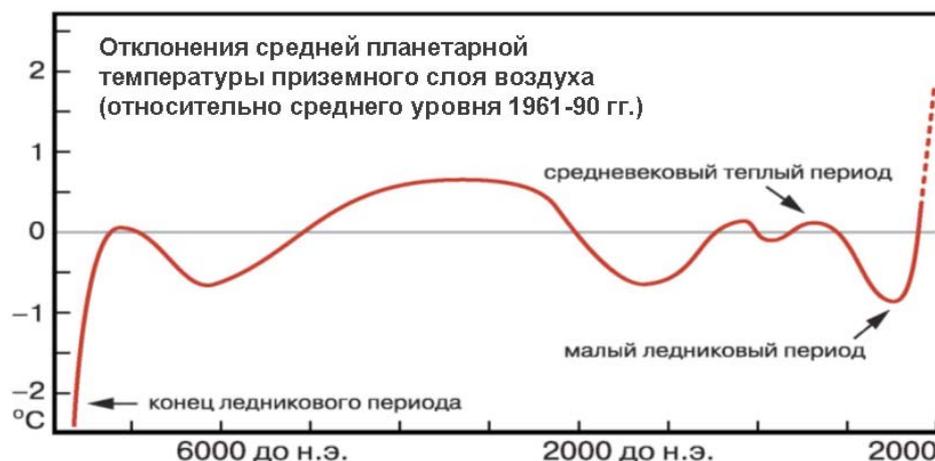


Рис. 10. Изменение глобальной температуры в голоцене (Информационные материалы. ЮНЕП/ОИК, Женева, 1997 г.).

но 6 тыс. лет назад началось общее похолодание климата, прерываемое более короткими эпизодами потеплений. Суммарный эффект этого похолодания составляет около 2°C. Самым очевидным свидетельством его реальности [1] «могут служить изменения географических границ распространения животных и растений. Так, например, если 7000 лет назад в Скандинавии процветали дубовые леса и съедобные моллюски-мидии, то теперь их там нет. В других районах Европы растительные зоны на равнинах неуклонно смещаются к югу, а в горах на все более низкие уровни. Если эта тенденция сохранится и далее, то глобальные температуры достигнут своих значений, характерных для ледниковых эпох (на 6°C ниже современных) через 18000 лет». Таким образом, подчеркнем еще раз, от климатического оптимума нас отделяют всего около 2°C (температуры были выше), а от минимума последнего Вюрмского оледенения (18000 лет назад) всего 6–7°C, когда температуры были ниже.

После 1700–1750 гг. начался последний эпизод потепления климата сначала, несомненно, за счет естественных причин, на которые в самые последние десятилетия наложился антропогенные факторы.

В 1988 г. под эгидой ВМО/ЮНЕП создана специальная Межведомственная группа экспертов (МГЭИК) для научного анализа и систематического отслеживания состояния науки и результатов исследований по изменению климата. За это время МГЭИК представлено 4 оценочных доклада: 1990, 1995, 2001 и 2007 гг. Последовательность тональности основных выводов науч-

ных докладов этого наиболее представительного форума ученых по проблеме изменений климата следующая [16]:

- 1990 г. – Выполнен широкий обзор состояния науки об изменении климата, обсуждены возникающие неопределенности и отмечено наличие свидетельств потепления.
- 1995 г. – Баланс имеющихся данных предполагает наличие различного влияния человека на глобальный климат.
- 2001 г. – Большая часть потепления последних 50 лет с вероятностью более 66% может быть отнесена к деятельности человека.
- 2007 г. – Потепление не вызывает сомнений и большая часть потепления последних 50 лет с вероятностью более 90% является следствием роста концентрации парниковых газов.

По данным третьего [14] и последнего четвертого доклада МГЭИК (2007 г.) [13, 16] в среднем наша планета стала на 0,75°C теплее, чем в 1860 г. (пик Малого ледникового периода). При этом одиннадцать из последних 12 лет являются самыми теплыми в среднем по земному шару, начиная с 1850 г. Факт потепления не вызывает сомнений. За это время изменилась глобальная температура приземного воздуха, происходил подъем уровня Мирового океана (за счет расширения верхнего слоя воды от нагревания и таяния горных ледников суши) и сокращение снежного покрова в северном полушарии (рис. 11). Отмечалась некоторая неоднородность потепления в северном и южном полушариях. Так, в северном полушарии в последние 100 лет по-

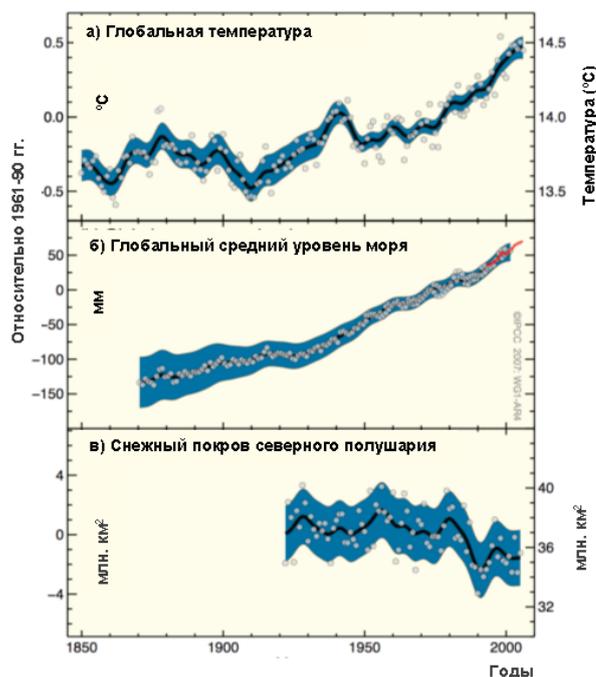


Рис. 11. Изменение температуры:
а – уровня моря; б – и снежного покрова; в – в северном полушарии
(относительно 1961–1990 гг.) [16].

тепление отмечалось в два периода с 1910 по 1945 г. и после 1976 г., а в промежутке, с 1946 по 1975 г., наблюдалось небольшое похолодание ($-0,1^{\circ}\text{C}$). В южном полушарии потепление шло непрерывно, оно было более интенсивным в 1910–1945 гг. и после 1976 г., а в период с 1946 по 1975 г. – слабым (на $+0,1^{\circ}\text{C}$). Объяснение этому, видимо, можно найти в большей океаничности южного полушария по сравнению с северным и выравнивающим влиянием океана.

Уровень океана в XX в. по спутниковым данным повысился на 17 см, но пока не за счет таяния гринландского и антарктического щитов, а в основном за счет теплового расширения воды.

Основную причину потепления надо видеть в повышении концентрации парниковых газов, три из которых – двуокись углерода (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (N_2O) являются основными. Изменение их концентрации за последние 10000 лет по палеоклиматическим данным и в последние 250 лет, в том числе и по инструментальным наблюдениям, показаны на рис. 12. Их современные концентрации и скорости роста в последние 50 лет беспрецедентны. Концентрация CO_2 сейчас уже близка к 400 млн^{-1} , метана – к 2000 млрд^{-1} , а закиси азота – к 330 млрд^{-1} .

Углекислый газ. Концентрация CO_2 в атмосфере с 1750 по 2005 г. (рис.12) увеличилась на 35% примерно с 280 до 379 млн^{-1} . Такого высокого уровня она не достигала за последние 650 тыс. лет ($180\text{--}300 \text{ млн}^{-1}$), а возможно, и в последние 20 млн. лет. Примерно 0,75 антропогенной эмиссии в атмосферу в течение последнего 20-летия XX века обусловлено сжиганием органического топлива, а остальная часть связана с землепользованием и сокращением площади лесов (уменьшением фотосинтеза). Океан и континенты (растительность и др.) поглощают половину антропогенной эмиссии CO_2 , остальная часть накапливается в атмосфере. Скорость увеличения его концентрации в течение 1980–2000 гг. была $1,5 \text{ млн}^{-1}$ ($0,4\%$) в год, в 1990 годах она увеличивалась на $0,9\text{--}2,8 \text{ млн}^{-1}$ ($0,2\text{--}0,8\%$) в год. Этот рост продолжается и в XXI столетии.

Метан. Концентрация метана с 1750 по 2000 г. увеличилась на 1060 млрд^{-1} или 151%, достигла 1750 млрд^{-1} и продолжает расти в настоящее время. Как и для CO_2 , такой высокой концентрации CH_4 не было за последние 650 тыс. лет. Более половины прироста концентрации имеет антропогенное происхождение: органиче-

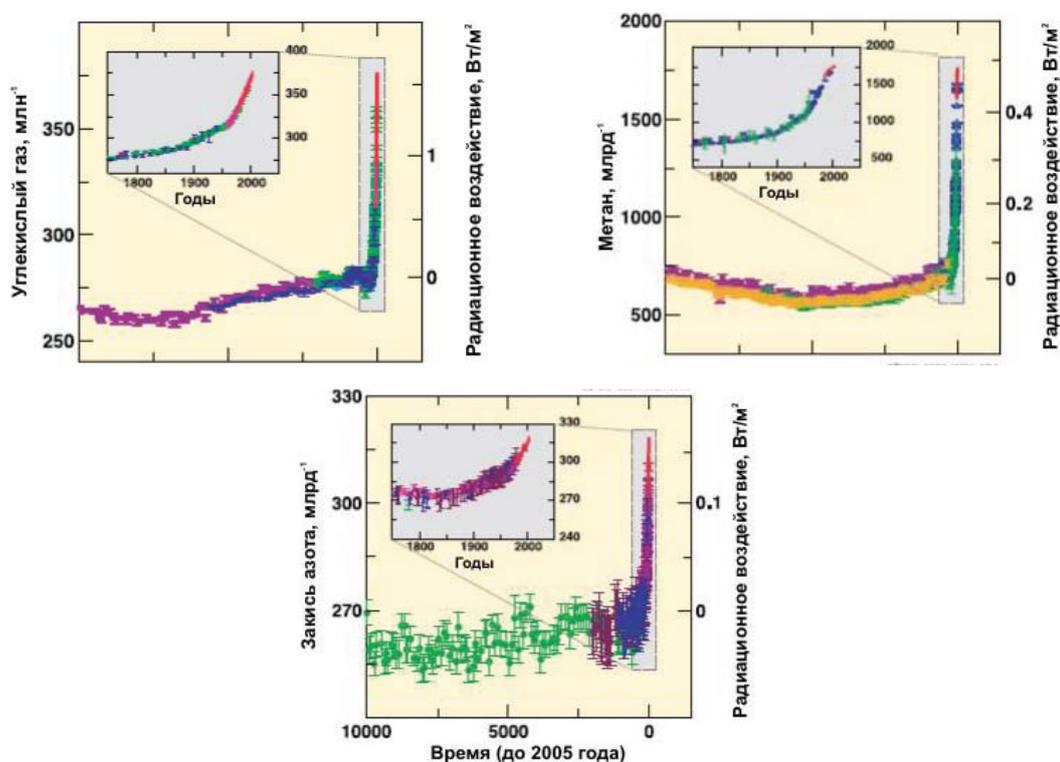


Рис. 12. Изменения концентрации основных парниковых газов в голоцене [16].

ское топливо, развитие животноводства, выращивание риса, утилизация мусора.

Закись азота. С 1750 по 2000 г. концентрация азота увеличилась на 46 млрд.⁻¹ (17%), достигла 315 млрд.⁻¹ и продолжает расти. Это наивысшая концентрация за последнее тридцатилетие. Треть концентрации N₂O имеет антропогенное происхождение – использование азотных удобрений, химическая промышленность.

В настоящее время, если вклад CO₂ принять за 1, то вклад CH₄ в 3 раза меньше вклада CO₂, а вклад N₂O – в 10 раз меньше.

Хотя наблюдается рост концентрации и других малых примесей, обладающих парниковым эффектом (хлористые агенты, двуокись серы), они пока не вносят заметного вклада в усиление парникового эффекта из-за своих очень малых количеств. Но это положение может измениться в будущем.

Антропогенный аэрозоль. Антропогенный аэрозоль дает антипарниковый эффект. Это недолгоживущий компонент атмосферы, осаждающийся под действием силы тяжести. Однако его постоянное поступление в атмосферу приводит к аналогично постоянной концентрации в приземном слое.

Влияние антропогенных и естественных причин на современное потепление выражено в радиационных единицах, Вт/м² (рис. 13), т.е. в единицах поступающей солнечной радиации [13, 16]. В последнем столбце справа дано качество оценки научных знаний по каждому фактору, условно соответствующее трем категориям: высокая, средняя, низкая. К естественным факторам отнесено только небольшое увеличение притока солнечной радиации в среднем на 0,12 Вт/м² (при разбросе оценок 0,06–0,30 Вт/м²), которое произошло, начиная с 1750 г., в основном в первую половину XX столетия. Научное “качество” этой оценки низкое, поскольку, как уже отмечалось, спутниковые и другие данные, полученные с 1970 г., убедительно говорят о том, что имеют место только очень малые колебания солнечной радиации, связанные с 11-летним циклом, и нет ни теоретических ни опытных данных о наличии какого-либо тренда в притоке радиации от Солнца. Другие естественные причины, односторонне влияющие на климат во временном интервале “десятки-сотни” лет, или отсутствуют или недостаточно выявлены и изучены (см. конец статьи).

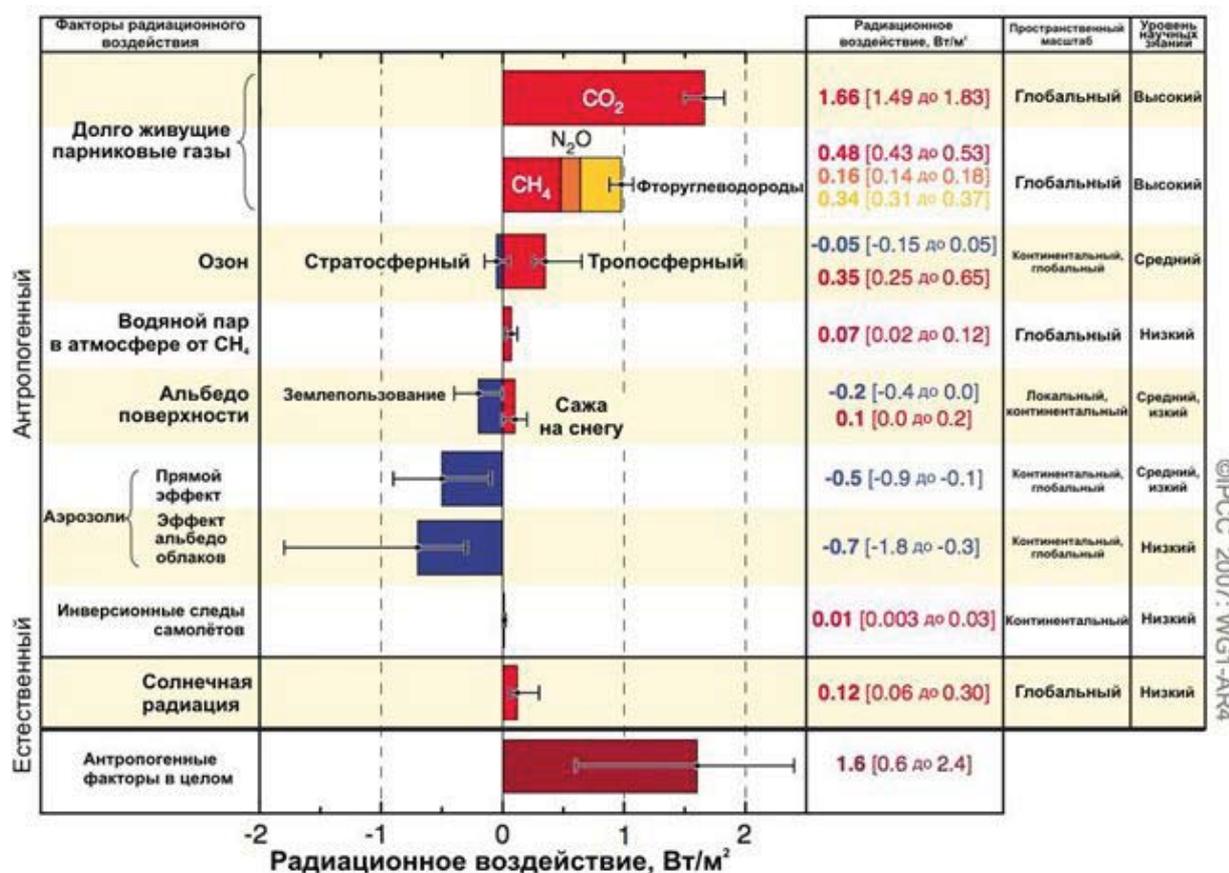


Рис. 13. Антропогенные и естественные причины изменения климата [16].

Остальные факторы антропогенные. Прежде всего это три основных парниковых газа CO₂, CH₄ и N₂O, а также галогенокарбонаты (хлорфторметаны), имеющие очень малую концентрацию, но обладающие сильным парниковым эффектом. В сумме все эти газы дают эффект +2,64 Вт/м², оцениваются как имеющие глобальное влияние и высокую степень качества оценки. Тропосферный и стратосферный озон (-0,05+0,35 Вт/м²) приводит к суммарному эффекту +0,3 Вт/м² со средней степенью качества оценки.

Аэрозоль в целом и, прежде всего, облака за счет прямого эффекта и альbedo дают в сумме существенный антипарниковый эффект (-1,2 Вт/м²). Однако эта оценка имеет качество от низкого до среднего.

В итоге общий радиационный эффект положителен и составляет 1,6 Вт/м² (разброс оценок от 0,6 до 2,4 Вт/м²). Видно, что двуокись углерода обуславливает основную часть положительного воздействия – 1,66 Вт/м². В среднем этот газ сохраняется в атмосфере более столетия

и поэтому воздействует на климат в больших временных масштабах. Даже если бы рост его концентрации остановился на сегодняшней отметке, то накопленное количество CO₂ в атмосфере дало бы по современным оценкам глобальное потепление не менее чем на 0,6 °C к концу XXI века.

4. Моделирование и предсказуемость будущего климата

Все сказанное выше убедительно свидетельствует о том, что изменения климата происходили всегда, неизбежны в настоящее время и в будущем. Однако, если говорить о временных масштабах от нескольких десятков до нескольких сотен лет, то для их объяснения и прогноза наряду с “быстродействующими” малыми естественными факторами следует обязательно рассматривать направленные более сильные антропогенные воздействия – значительные повышения концентрации парниковых газов. При этом следует отметить, что фундаментальная проблема чувствительности климатической системы к

малым внешним воздействиям остается, к сожалению, пока не решенной [2, 4, 6, 8–10, 16, 17].

Самым обнадеживающим методом оценки будущего климата является быстро развивающиеся методы его математического моделирования. Однако, несмотря на впечатляющие успехи, достигнутые в этом направлении [13, 16, 18, 19], получаемые модельные оценки несут большую степень неопределенности, так что вместо естественного термина “климатический прогноз” пришлось ввести более условный – “климатический сценарий”. К настоящему времени разработано более 20 сложных объединенных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), достаточно адекватно отражающих современные знания о физических механизмах естественных и антропогенных воздействий на климатическую систему Земли. Основные неопределенности возникают вследствие того, что как только встает вопрос об учете антропогенных факторов необходимо: 1) сделать прогноз развития мировой экономики, технологий и населения; 2) сделать на его основе прогноз потребления различных видов топлива и других источников парниковых газов; 3) с учетом полученных сценариев выбросов парниковых газов рассчитать по МОЦАО изменение температуры и других характеристик климата.

На самом деле естественные и антропогенные факторы учитываются совместно. МГЭИК разработано на перспективу до 2100 г. 40 сценариев выбросов парниковых газов от оптимистических до пессимистических. Эти 40 сценариев объединены в 6 сюжетных линий, основанных на разных гипотезах будущего мирового развития [20].

По мнению МГЭИК [20] выбросы CO_2 за счет сжигания нефти, газа и угля будут определять рост концентрации CO_2 в атмосфере в течение всего 21 столетия. К 2100 г. концентрация CO_2 в атмосфере может достичь 540–970 млн⁻¹ или на 90–250% выше, чем в доиндустриальный период (до 1750 г.). Если учесть неопределенности в поглощательных свойствах океана и суши, то границы оценок концентрации CO_2 станут еще шире – от 490 до 1260 млн⁻¹. При этом вклад от сокращения лесов в этот процесс не представляется значимым.

К 2100 г. концентрация CH_4 может измениться от 190 до 1970 млрд⁻¹, N_2O – от 38 до 144 млрд⁻¹, а тропосферного озона – от 12 до 16% по отношению к их концентрациям в 2000 г. [14].

Утешительным является лишь то, что набор климатических сценариев, полученный по различным сценариям выбросов, может дать правдоподобный спектр возможных климатов будущего.

Согласно четвертому докладу МГЭИК (2007 г.), в основу сценариев климата XXI века положены три сценария выбросов парниковых газов, которые условно можно назвать “жестким”, “умеренным” и “мягким”. Результаты расчета глобального потепления по этим сценариям в XXI веке показаны на рис. 14.

Как видно, в ближайшие два десятилетия, независимо от сценария, глобальное потепление будет продолжаться со скоростью около 0,2°C за 10 лет. Даже при фиксировании концентраций на уровне 2000–2005 гг. оно продолжалось бы за счет накопленных в атмосфере газов со скоростью 0,1°C за 10 лет, обеспечив повышение тем-

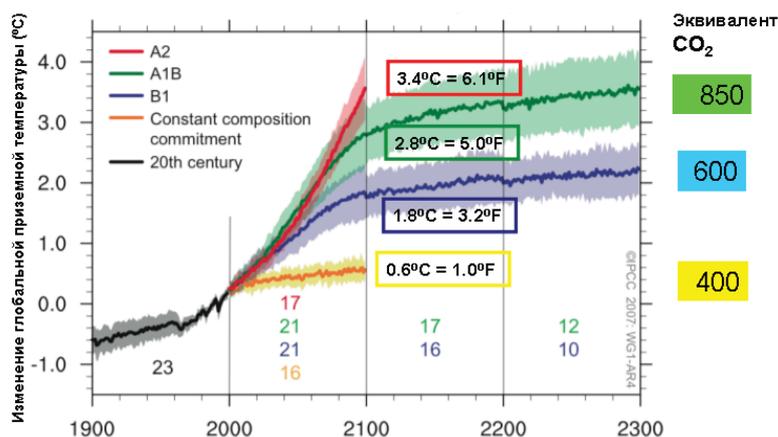


Рис. 14. Изменение глобальной приземной температуры по различным сценариям [16].

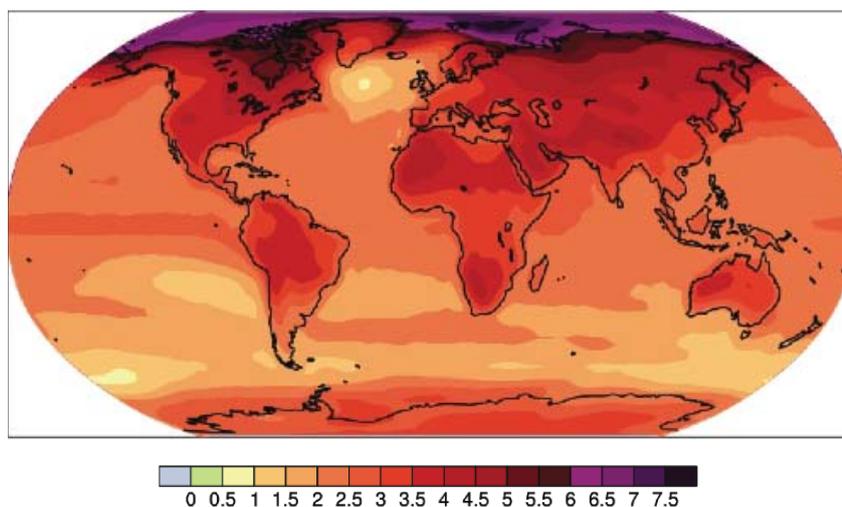


Рис.15. Расчет по ансамблю моделей типичного сценария потепления климата для “умеренного” сценария выбросов [16] (A1B – с повышением концентрации в эквиваленте CO_2 к 2100 г. до 850 млн⁻¹).

пературы к конце текущего столетия не менее, чем на 0,6°C (нижняя кривая на рис. 14). Если же скорости выбросов сохранятся, то это вызовет более сильное потепление.

Глобальное потепление по отношению к последнему двадцатилетию XX века, рассчитанное по ансамблю моделей, составит 1,8°C (с вероятными пределами от 1,4 до 2,2°C) для “мягкого” сценария выбросов, 2,8 °C (с вероятным разбросом от 2,4 до 3,2°C) для “умеренного” и 3,4°C (с вероятными пределами от 2,9 до 4,1°C) для “жесткого” сценария выбросов (рис. 14).

При этом примерно 80% дополнительного тепла атмосферы поглотит океан, что вызовет повышение его уровня от 18 до 59 см при наблюдаемом прогреве до глубины 3000 м.

В результате повышения температуры поверхности океана вероятны увеличение повторяемости и интенсивность тропических циклонов (тайфунов, ураганов), а в умеренных широтах произойдет смещение траекторий внетропических циклонов к полюсам. Ожидается существенное сокращение площади морских льдов в полярных и субполярных районах, а к концу XXI века возможно полное освобождение Северного Ледовитого океана ото льдов к концу летних сезонов. Увлечение продолжительности летней навигации приведет к расширению морского судоходства, перевозки грузов и туризма. Однако все это будет происходить на фоне возросшей скорости дрейфа ледяных полей, высокой степени изменчивости ледовой и метеорологической

обстановки, приводя к усилению риска многих операций [13].

Значительно повысится температура в слоях вечной мерзлоты и начнется ее таяние. Например, площадь многолетнемерзлых грунтов России составляет 70% ее территории. При потеплении климата будет происходить их деградация и увеличение глубины сезонного протаивания. Это неизбежно будет приводить к деформации и разрушению транспортных сетей, трубопроводов, строений и др.

В результате возникнут как новые возможности хозяйственной деятельности, так и новые проблемы по более точному учету погодных условий в условиях потепления и повышения степени экстремальности климата.

Расчет [16] по ансамблю моделей типичного сценария потепления климата приведен для “умеренного” сценария выбросов (A1B – с повышением концентрации в эквиваленте CO_2 к 2100 г. до 850 млн⁻¹), который можно интерпретировать как “все будет идти как обычно” без существенной корректировки как в сторону снижения, так и повышения эмиссии выбросов (рис. 15).

Как видно, среднее глобальное потепление к концу 2100 г. в этом случае составит 2,8°C с вероятными пределами от 2,4 до 3,2°C. При этом большая часть суши потеплеет на 3,5 °C. В целом потепление будет весьма неоднородным для различных районов Земли. Общей размах колебаний изменения средней годовой температуры

Projected Patterns of Precipitation Changes

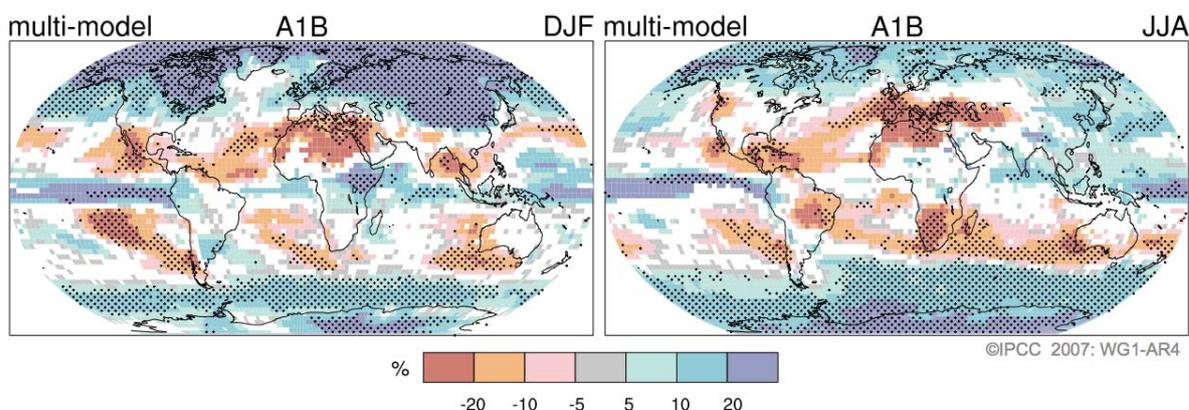


Рис. 16. Расчет по ансамблю моделей [20] изменения осадков для зимы (слева) и лета (справа).

составит от 0 (потепления нет) до 7,5 °С. Сильнее всего потеплеет Арктика, до 7°С, а менее всего районы Атлантики южнее Гренландии и обширные области южного океана севернее Антарктиды (потепление близко к нулю).

В целом потепление над океанами в умеренных и тропических широтах будет меньше, чем над континентами, и потепление над континентами более неоднородно, чем над океаном.

Потепление в Центральной Азии в году составит 3–5°С, т.е. будет несколько выше глобального. Обращает на себя внимание тот факт, что по модели Had3CM3 [21, 22] летние температуры даже при сценарии выбросов “все как обычно” здесь повысятся очень существенно, на 5–10°С. В этом плане Центральная Азия входит в число наиболее неблагоприятных районов мира, так как летние пиковые температуры могут в этом случае достигать 50°С, что требует особых условий организации жизни не только человека, но и животных.

Годовое количество осадков для Земли (рис. 16) в целом увеличится мало, примерно на 30–40 мм. Так как сейчас их годовая сумма составляет 1130 мм (суша 800 мм, океан – 1270 мм), то в процентном отношении это всего 3–4%. Существенно новым результатом является усиление засушливости в большей части субтропиков и более высокие осадки в высоких широтах, что приведет здесь к возрастанию угрозы наводнений и паводков.

В Центральной Азии количество осадков за год изменится мало [21, 23]. При этом летом они практически останутся без изменений, что

на фоне большого роста летних температур существенно повысит аридность климата. Так как заметных изменений осадков не ожидается не только летом, но и ни в одни из сезонов, то питание ледников останется на прежнем уровне, а их летнее таяние заметно возрастет. Это приведет к дальнейшей деградации горного оледенения. Одновременно существенно повысится аридность территории.

В заключение отметим, что в ряде последних работ экспоненциальное потепление климата в последние десятилетия объясняется ослаблением взаимодействия океана и атмосферы и эффектом наблюдаемой неравномерности скорости собственного вращения Земли [17, 24]. Так, в [24] дается вывод, что до 70-х гг. взаимодействие океана и атмосферы было более интенсивным, и результат парникового эффекта атмосферы в большей степени аккумулировался океаном. Затем произошло (по неизвестным пока причинам) ослабление взаимодействия и парниковый эффект проявился в наибольшей степени, приводя после 1980 г. к пугающим повышению температуры. Так как аккумулятивные свойства океана огромны, то дальнейшая судьба климата будет зависеть не только от антропогенных факторов, но и от меняющейся интенсивности взаимодействия океана и атмосферы, спусковой механизм которого пока остается неясным.

Земля делает один оборот вокруг своей оси в среднем за 86400 с. Однако на самом деле наблюдаются, хотя и очень малые, колебания в угловой скорости вращения Земли с квазипятидесятилетней периодичностью в пределах

-4... 4 мс. За счет возникающих по этой причине изменений момента импульса атмосферы происходит направленное возмущение барического поля, атмосферной циркуляции и радиационного баланса климатической системы, большее в северном континентальном и меньшее в южном океаническом полушарии. Ротационный эффект при ускорении вращения Земли приводит к повышению температуры за 35 лет примерно на 0,25°C в северном полушарии, на 0,12°C в южном и на 0,16 °C глобально для Земли в целом. Так, в первой половине XX века (1910–1945 гг.) наблюдалось ускорение вращения и он действовал однонаправлено с парниковым, что привело к заметному глобальному повышению температуры. С 1945 по 1975 г. произошло замедление вращения и ротационный эффект компенсировал парниковый, что привело к незначительному повышению температуры в южном полушарии и незначительному похолоданию в северном. Начиная с середины 70-х гг. вращение Земли ускорилося, что дало в последнее тридцатилетие беспрецедентный рост температуры за счет усиливающегося парникового эффекта в сочетании с ротационным, что будет продолжаться до 2010 г. В будущем, с 2010 по 2045 г., ротационный фактор за счет замедления вращения Земли будет частично компенсировать парниковое повышение температуры, а в течение последующих 35 лет (2045–2080 гг.) оба эффекта станут снова однонаправленными. Авторы предлагают учитывать последствия ротационного эффекта в качестве поправок к расчетам МОЦАО.

Литература

1. Джон Имбри, Кетрин Палмер Имбри. Тайны ледниковых эпох. Полтора века в поисках разгадки. – М.: Прогресс, 1988. – 263 с.
2. Глобальные изменения природной среды. – Новосибирск: Изд-во СОРАН, 2001. – 137 с.
3. Антропогенные изменения климата /Под ред. М.И. Будыко, Ю.А. Израэля. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 404 с.
4. Борисенков Е.П. Многокомпонентная природа парникового эффекта и некоторые сопутствующие явления // Глобальные и региональные изменения климата и их природные и социально-экономические последствия. – М.: ГЕОС, 2000. – С. 24–39.
5. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 351 с.
6. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. – 2004. – №4. – С. 50–57.
7. Гудкович З.М., Карклин В.П., Фролов И.Е. Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова Евразийских арктических морей и их возможные причины // Метеорология и гидрология. – 2005 – №6 – С. 5–13.
8. Дымников В.П., Володин Е.М., Галин В.Я., Гладунов А.В., Грищун А.С., Дианский Н.А., Лыкосов В.Н. Чувствительность климатической системы к малым внешним воздействиям // Метеорология и гидрология. – 2004. – №4. – С. 77–92.
9. Кондратьев К.Я. Неопределенности данных наблюдений и численного моделирования климата // Метеорология и гидрология. – 2004. – №4. – С. 93–119.
10. Монин А.С., Шишков Ю.А. История климата. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 407 с.
11. Переведенцев Ю.П. Теория климата: Учебное пособие. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2004. – 320 с.
12. Сун В., Балюнас С., Демирчан К.С., Кондратьев К.Я., Идсо Ш.Б., Постметьер Э.С. Влияние антропогенных выбросов CO₂ на климат: нерешенные проблемы // Изв. РГО. – Вып. 2. – 2001. – С. 1–19.
13. Израэль Ю.А., Семенов С.М. и др. Четвертый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата: вклад рабочей группы 2 // Метеорология и гидрология. – 2007. – №9. – С. 5–13.
14. Израэль Ю.А., Груза Г.В., Катцов В.М., Мелешко В.П. Изменения глобального климата. Роль антропогенных воздействий // Метеорология и гидрология. – 2001. – №5. – С. 5–21.
15. Наш будущий климат // ВМО. – Женева, 2003. – №952. – 37 с.
16. Оценка физического аспекта науки об изменении климата. МГЭИК, Рабочая группа 1 (2007). Из материалов, представленных Сюзан Солломон, со-председателем РГ1. <http://ipcc-wg1.ucar.edu> (на русск. яз.).
17. Дзюба А.В., Панин Г.Н. Механизм формирования многолетних направленных изменений климата в прошедшем и в текущих столетиях // Метеорология и гидрология. – 2007. – №5. – С. 5–27.
18. IPCC Third Assessment Report. vol.1. Climate Change. 2001. The Scientific Basis. – Cambridge. Cambridge University Press, 2001. – 881 p.
19. Mitchell J.M. Jr. Note on solar variability and volcanic activity as potential sources of climatic variability. /In: The Physical Basis of Climate and

- Climate Modeling. – GARP Bull. Series, 1975. – №16. – P. 127–131.
20. Сценарии выбросов. Резюме для лиц, определяющих политику // Специальный доклад Рабочей группы 3 МГЭИК, ВМО/ЮНЕП, 2000. – 20 с.
21. *Аламанов С.К., Лелевкин В.М., Подрезов О.А., Подрезов А.О.* Изменение климата и водные проблемы в Центральной Азии / ЮНЕП и WWWRоссии. – М.; Бишкек, 2006. – 188 с.
22. *Подрезов О.А.* Оценка региональных изменений климата в XXI веке в странах Центральной Азии // Метеорология и гидрология в Кыргызстане. – 2008. – Вып. 7 – С. 66–76.
23. *Анисимов О.А., Борзенкова И.И., Валденберге Дж., Жильцова Е.Л., Лобанов В.А., Сапелко Т.В.* Быстрое потепление климата на границе позднеледниковья – голоцена как возможный аналог изменения климата и окружающей среды в первой четверти XXI века // Метеорология и гидрология. – 2004. – №12. – С. 31–41.
24. *Шерстюков Б.Г.* Тепловая энергия океана и парниковый эффект в современных изменениях климата // Метеорология и гидрология. – 2006. – №7. – С. 66–71.