

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Климат Земли

Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук, 12 апреля 2011 г.

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0182.201201g.0111

12 апреля 2011 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Отделения физических наук РАН "Климат Земли".

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.grad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Нигматулин Р.И.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Океан и климат*.

2. **Бялко А.В.** (Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка, Московская обл.; журнал Президиума РАН "Природа"). *Релаксационная теория климата*.

Статья, написанная на основе доклада 2, публикуется ниже.

PACS numbers: 89.60.-k, 92.60.Ry, 92.70.-j
DOI: 10.3367/UFNr.0182.201201h.0111

Релаксационная теория климата

А.В. Бялко

1. Введение

Анализ климатических данных, полученных из ледниковых кернов Антарктиды, позволяет развить простую теорию, которая поясняет физические процессы прошлого климата и количественно предсказывает климат будущего.

С физической точки зрения нет ни малейшего сомнения в действительности парникового эффекта. Баланс энергий падающего на Землю солнечного излучения и микроволнового излучения, уходящего от неё в космос, показывает, что температура поверхности Земли на 32 К выше той равновесной температуры, которая была в отсутствие парникового эффекта. Теория парникового эффекта также достаточно развита. Хорошо известны спектры поглощения молекул парниковых газов: диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4) и паров воды (H_2O), известно, как уширяются полосы их поглощения при увеличении давления, а теория переноса излучения хотя и сложна, но достаточно разработана для уверенного компьютерного моделирования земной атмосферы [1].

А.В. Бялко. Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка, Московская обл.; журнал "Природа", Москва, РФ. E-mail: alex@byalko.ru; www.byalko.com/alexey/

Нарастающее в последние полтора века сжигание ископаемых топлив — угля, нефти и газа — привело к существенному, 40%-ному, возрастанию содержания главного парникового газа — CO_2 . Вызванное этим глобальное потепление рассчитывается в нескольких мировых климатических центрах. Их результаты — предсказание возрастания температуры к концу XXI в. относительно начала XX в. — лежат в диапазоне от 3 до 5,5 К. Такие расхождения вызывают у общественности некоторые сомнения. Одна из причин такого разброса, наиболее очевидная, — это различие модельных представлений о динамике дальнейшего развития промышленности, а следовательно, и выбросов CO_2 в будущем. Однако есть трудности и в физическом понимании климатических процессов.

Например, при моделировании необходимо задать долю облачности. В среднем облака покрывают примерно половину земной поверхности. Так происходит из-за симметрии конвекции: вертикальные потоки в облачных циклонах и безоблачных антициклонах равны. Но зададим качественный вопрос: во время ледниковых периодов доля облаков была больше современной или меньше? Фактический ответ неизвестен. Текущие измерения, которые соответствуют очень узкому диапазону температур, дают знак тренда в пределах ошибок [2]. Между тем для моделирования климата количественная зависимость необходима: доля облаков влияет на альбедо планеты сильнее, чем воздействие ледникового покрова. Школьные представления о точке росы, к сожалению, неприменимы к описанию облачности в турбулентной атмосфере [3].

Другая, более существенная, трудность компьютерного моделирования климата связана с необходимостью предсказания массо- и теплообмена между поверхностным слоем океана и его глубинами. Средняя температура поверхности океана около 14°C, в глубинах океана существенно холоднее — всего 3°C. Такое распределение температур (казалось бы, противоречащее термодинамике) поддерживается системой глобальных термохалинных течений, называемой Великим конвейером, который был открыт только в 80-х годах XX в. в результате исследований советских и американских океанологов [4, 5]. Конвейер начинается погружением холодных солёных вод вблизи Гренландии, течёт в глубинах Атлантики, огибает Антарктиду, выходит на поверхность вблизи Индии, а также на севере Тихого океана. По времени весь этот путь занимает около 1,5 тыс. лет.

Это означает, что скорость течения Великого конвейера на два порядка меньше скоростей обычных течений, возникающих под действием ветра. Тем не менее из-за большой теплоёмкости воды влияние Великого конвейера на климат весьма существенно.

Оба этих затруднения можно частично обойти, если для прогнозирования использовать данные по истории климата, полученные при изучении ледовых кернов Антарктиды.

2. Анализ климатических данных

Об изменении климата за последние 800 тыс. лет можно судить по временным зависимостям температуры T и n_{CO_2} — концентрации диоксида углерода [6] (рис. 1). Вслед за статьёй [6] в том же выпуске *Nature* опубликованы данные по концентрации метана [7]. Стандартный математический анализ этих зависимостей [8] показал следующее.

1. Автокорреляционные функции зависимостей $T(t)$, $n_{\text{CO}_2}(t)$, $n_{\text{CH}_4}(t)$ подобны друг другу. Автокоррелятор температуры спадает на малых временах медленнее остальных корреляционных функций. Коррелятор метана, напротив, спадает резко, это свидетельствует о том, что он более непредсказуем. Корреляторы переходят к отрицательным значениям, когда временной сдвиг достигает 20 тыс. лет; имеют широкие минимумы в диапазоне 40–60 тыс. лет, затем максимумы около 90 тыс. лет, а парниковые газы — ещё и по одному максимуму вблизи 120 тыс. лет. Минимум в области 40 тыс. лет назад несколько удивляет, поскольку по теории Миланковича здесь должен был бы проявиться максимум. Этот максимум действительно возникал, но на временном отрезке 2,7–1,3 млн лет назад [9]. В интервалах 1,3–0,7 и 3,2–2,7 млн лет присутствуют обе моды колебаний климата.

2. Взаимные корреляции (ковариации) несут информацию о том, какая из функций является опережающей и на какие характерные времена. Зависимости температуры и n_{CO_2} оказались тесно связанными между собой, причём максимум ковариации, равный 0,88, достигается с опережением температуры примерно на 2 тыс. лет относительно $n_{\text{CO}_2}(t)$. Точность вычисления запаздываний и опережений, к сожалению, невелика, около 0,5 тыс. лет. Температура и концентрация метана оказались почти синхронными, но максимум ковариации несколь-

ко ниже, он равен 0,82. Наконец, концентрация CO_2 отстаёт по времени от n_{CH_4} в среднем на 1,5 тыс. лет с максимумом 0,74.

3. Корреляция и ковариации исчерпывающе описывают случайные зависимости, если вариации переменных распределены по нормальному, гауссову, закону. Были построены нормированные ранговые распределения трёх переменных: T , n_{CO_2} и n_{CH_4} — они аппроксимировались полиномами 10-го порядка, которые затем дифференцировались. При этом методе спадающие края распределений оказываются недостоверными, но положения максимумов определяются с достаточной точностью. Статистика концентрации метана оказалась близкой к нормальной: она имеет один максимум при $n_{\text{CH}_4} = 440$ ppb (parts per billion — миллиардные доли). У дифференциального распределения температур два максимума: при $-7,8^\circ\text{C}$ и при $3,3^\circ\text{C}$. У распределения концентрации диоксида углерода выявлены три максимума при концентрациях, равных 202, 236 и 282 ppm (parts per million — миллионные доли).

4. Среднестатистические взаимозависимости, регрессии, не были опубликованы в работе [8], поскольку оставалось неясным, как связать данные за последние 800 тыс. лет истории климата с современным потеплением.

Регрессия $T-n_{\text{CO}_2}$, построенная с учётом обнаруженного отставания концентрации диоксида углерода [10], показана на рис. 2. География планеты за миллион лет почти не изменилась, следовательно, связь климатических переменных, характерная для прошлого, должна проявляться и в наше время. Сегодня концентрация CO_2 достигла уровня 390 ppm — беспрецедентного за последний миллион лет. Если экстраполировать регрессию $T(n_{\text{CO}_2})$ до этой величины, то окажется, что температура должна возрасти на $9-12^\circ\text{C}$. Потепление происходит, но сегодня оно не превышает 1°C по сравнению с температурой доиндустриальной эпохи, когда концентрация CO_2 равнялась 280 ppm. Объяснение этого расхождения является основной целью настоящей статьи.

Общепринятый подход к пониманию вариаций климата не позволяет понять причину этого дисбаланса. Международный комитет по изменению климата (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) использует понятие "climate forcing" (воздействие на климат), что можно перевести как "климатическое усиление (обостре-

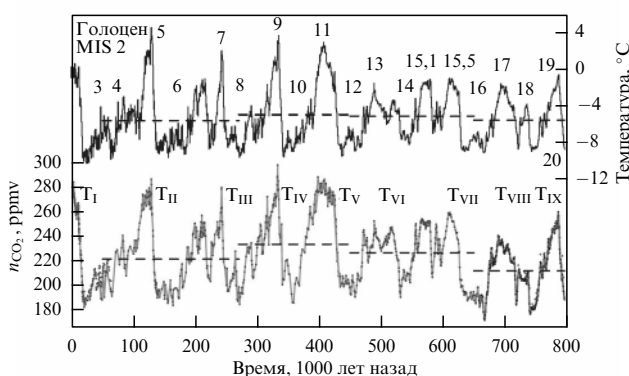


Рис. 1. Вариации температуры (верхняя кривая) и концентрации CO_2 (нижняя кривая) за последние 800 тыс. лет, полученные в результате анализа ледовых кернов Антарктиды (из [6]). Числами указаны морские изотопные стадии (MIS), T_1-T_{IX} — терминаторы ледниковых периодов (ppmv — parts per million by volume).

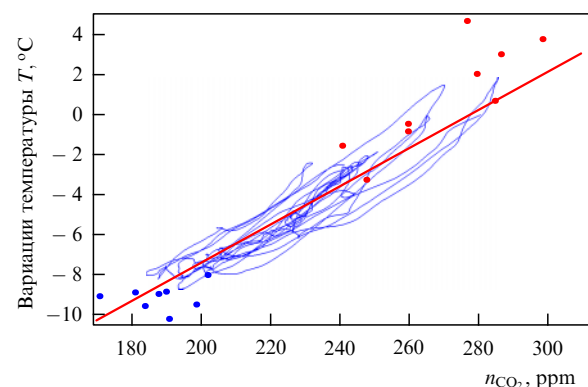


Рис. 2. Зависимость температуры палеоцена от концентрации CO_2 , смещённой на 3 тыс. лет, и линия регрессии. Зависимости от времени сглажены скользящим усреднением с окном 10 тыс. лет. Кружками отмечены экстремумы температуры исходных данных.

ние)". К сожалению, это понятие не имеет достаточного физического обоснования. Его применимость допустима, скажем, для описания доли облаков, которая изменяется очень медленно. Но "форсинг", применённый к парниковым газам, не учитывает динамику их концентраций, эта характеристика для описания современного климата бесполезна. Ниже будет предложена иная концепция, учитывающая тепловую инерцию — теплоёмкость океана, в частности его верхнего тёплого слоя.

3. Кривая климатического равновесия

Область изменения климата в переменных (T, n_{CO_2}) оказалась сильно вытянутой. Поэтому можно предполагать, что существует некоторая кривая равновесия $T_{\text{eq}}(n_{\text{CO}_2})$. Данные антарктического бурения позволяют найти её линейное приближение. Это и есть линия регрессии:

$$T_{\text{eq}} = (0,098n_{\text{CO}_2} - 27,1) [^\circ\text{C}].$$

Здесь равновесная концентрация CO_2 выражена в ppm. Скользящее усреднение исходных данных практически не сказывается на наклоне прямой. Вычисление квадратичных поправок к ней было бы, по-видимому, превышением точности. Дисперсия температуры составляет $0,98^\circ\text{C}$, но ошибка экстраполяции в область современных концентраций, как показывает сравнение с квадратичным приближением, может достигать нескольких градусов. Концентрации CO_2 в доиндустриальную эпоху (280 ppm) соответствует температура T_{eq} , равная $0,3^\circ\text{C}$.

Климатическое равновесие определяется не только диоксидом углерода и метаном, но и иными факторами, в частности солнечной активностью. Влияние этих факторов "размывает" кривую равновесия в некоторую область; ширина этой области мала, откуда следует, что их суммарное воздействие относительно невелико. Влияние водяных паров не мало, но в зависимости $T_{\text{eq}}(n_{\text{CO}_2})$ оно учитывается автоматически, поскольку содержание водяных паров в атмосфере само зависит от температуры. Кривая равновесия, в принципе, может быть найдена методами теории атмосферы, но пока проще пользоваться хотя бы её линейным приближением из "климатического" эксперимента, поставленного самой природой за последний миллион лет.

Рассмотрим применимость этого приближения кривой равновесия в предельных случаях. Проведём мысленный эксперимент: лишим атмосферу Земли всего диоксида углерода. При $n_{\text{CO}_2} = 0$ получим $T_{\text{eq}} = -27^\circ\text{C}$, иначе говоря, средняя температура земной поверхности опустится до -13°C (возможная ошибка экстраполяции — несколько градусов). Даже если весь океан покроется льдом, то слабый парниковый эффект будет поддерживаться остаточными парами воды, что и даст некоторое превышение над равновесной радиационной температурой Земли, равной 255 К (-18°C). С учётом ошибок экстраполяции можно считать, что мысленный эксперимент закончился удовлетворительно.

Напротив, посмотрим, годится ли предложенное равновесие для периода, в который на планете было на $(10-15)^\circ\text{C}$ теплее, чем сегодня. Концентрация CO_2 в эоцене (50 млн лет назад) оценивается не очень надёжно: её верхний предел высок, но минимальная величина, около 600 ppm, с натяжкой попадает в область возможных ошибок [11]. Кроме того, нельзя исключить, что при

высоких температурах доля облаков заметно возросла, увеличивая альбедо. При этом кривая равновесия $T_{\text{eq}}(n_{\text{CO}_2})$ должна проходить заметно ниже её линейной аппроксимации.

4. Уравнения релаксации

Допустим, климатическое равновесие существует. Тогда малые отклонения от него должны приближаться к равновесному состоянию с некоторым временем τ , характерным для описываемой системы:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{\text{eq}}(n_{\text{CO}_2}) - T}{\tau} + w(t).$$

Здесь $w(t)$ — функция, отвечающая возмущениям климатической системы. Линейное дифференциальное уравнение легко интегрируется:

$$T(t) = T(t_0) + \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \int_{t_0}^t \left[w(t') + \frac{T_{\text{eq}}(n_{\text{CO}_2}(t'))}{\tau} \right] \exp\left(\frac{t'}{\tau}\right) dt'.$$

Обратимся к физической интерпретации этих уравнений. Основная характеристика климата — средняя температура земной поверхности — почти совпадает со средней температурой поверхности океана. Это вызвано не только обширностью океана по сравнению с сушей, но и тем, что теплоёмкость воды значительно выше теплоёмкости горных пород и почвы. Распределение температуры по земной поверхности отличается от нормального при больших отклонениях [12], но в области единственного максимума оно к нему достаточно близко. Если пониженные температуры горных районов суши адиабатически привести к температурам уровня моря, то температурный контраст суша — океан окажется незначительным. Поверхностный слой океана теплее глубинных слоёв и атмосферы по той причине, что именно он поглощает наибольшую часть солнечной энергии. Конвекция воздуха отводит поглощённый поток вверх, до границ тропосферы. Там он излучается в космос в микроволновой области спектра, а высота излучения определяется малыми концентрациями парниковых газов.

На климат Земли влияют как атмосфера, так и глубины океана. Поток энергии в атмосфере, т.е. мощность инсоляции, как будет показано в разделе 6, на три порядка больше, чем теплообмен Великого конвейера, тем не менее влияние последнего на климат не мало. Причина этого заключается в том, что инсоляция быстро компенсируется тепловым излучением планеты, а временной масштаб теплообмена с океанскими глубинами (время релаксации) намного больше атмосферного. Нетрудно показать, что теплоёмкость поверхностного 100-метрового слоя океана в 30 раз больше теплоёмкости всей земной атмосферы — так же соотносятся и их времена релаксации. Медленное течение, поддерживающее холод глубин, обеспечивает положительный баланс поверхностной температуры. Напротив, ослабление Великого конвейера ведёт к постепенному охлаждению климата.

5. Тепловой баланс климата плейстоцена

Возвращаясь к уравнению релаксации, заметим, что воздействие парниковых газов на температуру учтено в нём равновесной функцией $T_{\text{eq}}(n_{\text{CO}_2})$. Влияние Великого

конвейера описывается членом $w(t)$. Для вычисления теплового потока между поверхностью океана и его глубинами умножим этот поток на теплоёмкость слоя океана выше термоклина

$$C = 0,71c_{H_2O}4\pi R^2h = 1,5 \times 10^{23} \text{ Дж К}^{-1}.$$

Здесь коэффициент 0,71 — это доля океанской поверхности, R — радиус Земли, c_{H_2O} — удельная теплоёмкость воды, $h \sim 100$ м — оценка глубины термоклина. Теплоёмкость поверхностного слоя океана в 30 раз больше теплоёмкости атмосферы, но в 40 раз меньше теплоёмкости всего океана. Примерно таким же должно быть соотношение и их периодов релаксации.

Применим уравнение температурной релаксации к данным, полученным из кернов антарктического льда. За последние 780 тыс. лет температура и концентрация CO_2 совершили восемь стотысячелетних циклов и в голоцене вышли примерно на начальный уровень. Следовательно, за эти восемь циклов тепловой баланс поверхности океана в среднем был нулевым. С помощью уравнения температурной релаксации вычислим мощность теплообмена поверхностных и глубинных вод:

$$B(t) = Cw(t) = C \left[\frac{T - T_{eq}(n_{CO_2})}{\tau} - \frac{dT}{dt} \right].$$

Время релаксации τ , скорее всего, порядка периода оборота Великого конвейера 10^3 лет. Для большей уверенности будем проводить расчёты для трёх разных времён релаксации: 0,6, 1,2 и 2,4 тыс. лет. В исходных данных зависимость температуры от времени представляет собой недифференцируемую кривую. Поэтому для вычисления производной будем использовать данные, к которым применялось скользящее сглаживание с окном в 10 тыс. лет. Эта процедура устраняет колебания с высокими частотами и случайные ошибки измерений, но не влияет на информацию о более медленных процессах.

На рисунке 3 представлен результат вычислений мощности теплообмена $B(t)$ вместе со сглаженными зависимостями температуры и концентрации CO_2 . Экстремумам температуры соответствуют наибольшие экстремумы потока тепла. При этом энергетический баланс проявляет цикличность с характерным периодом около 40 тыс. лет, которой не было в исходных данных T и n_{CO_2} — в них наблюдалась только 100-тысячелетняя периодичность.

Этот неожиданный результат более чётко проявляется при спектральном анализе. Стандартными методами были найдены корреляционные функции $K(t)$ всех зависимостей, а затем их спектры колебаний:

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty K(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau$$

— фурье-преобразования корреляционных функций (рис. 4). Их анализ приводит к нескольким физическим следствиям.

1. В спектрах температуры и n_{CO_2} обнаруживается частота, соответствующая периоду 60 тыс. лет. Её следует воспринимать не как разность периодов 100 и 40 тыс. лет (вычитаются или складываются частоты процессов, но не их периоды), но как резонанс между частотами, обратными периодам 120 и 40 тыс. лет: $60 = (120 \times 40)/(120 - 40)$. Периоды 120 и 90 тыс. лет присутствуют в спектре эксцентриситета Земли.

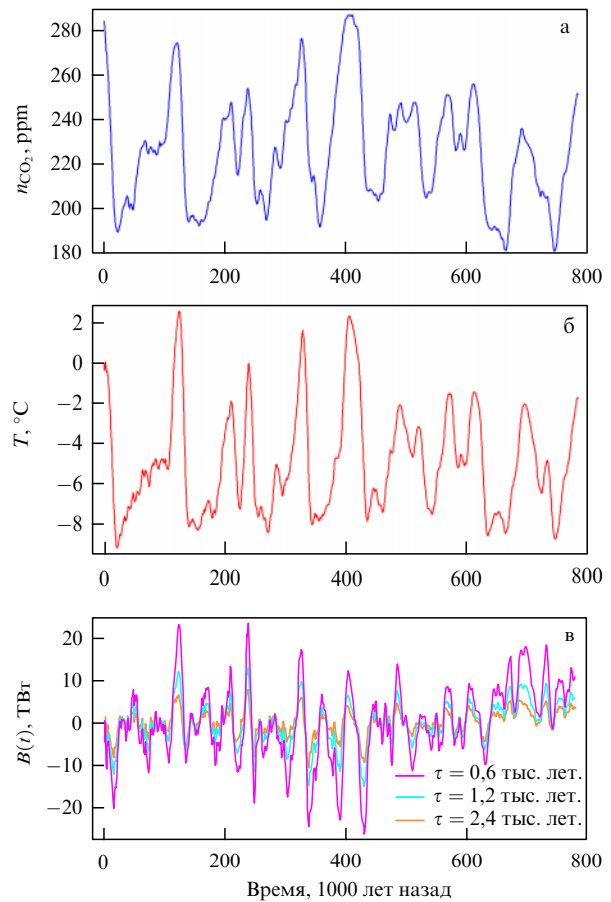


Рис. 3. Климатические зависимости палеоцена: сглаженные вариации концентрации CO_2 (а), температуры (б) и мощность теплообмена $B(t)$ (в), рассчитанная для трёх времён релаксации.

2. У спектра мощности, вычисленного при времени релаксации 2,4 тыс. лет, максимум на частоте $2\pi/97$ оказался неоправданно низким. По-видимому, возможные времена релаксации ограничены диапазоном 0,5–1,5 тыс. лет.

3. Максимумы двух других спектров мощности соответствуют периодам в 39,3 и 106–108 тыс. лет, что достаточно близко к периодам Миланковича: 40–41 и 90–120 тыс. лет. Различие малых периодов, возможно, является следствием рассогласования ледовой шкалы времени с астрономической.

4. Во всех спектрах мощности теплообмена резонансная частота $2\pi/60$ вообще отсутствует. Позвольте интерпретировать этот факт так: теплообмен Великого конвейера представляет собой первичное физическое явление, непосредственно реагирующее на вариации астрономических параметров, — зависимости температуры и концентраций парниковых газов вторичны.

Вернёмся к энергетическому балансу климата плейстоцена. Средняя величина колебаний мощности за 780 тыс. лет близка к нулю; так и должно быть, поскольку за это время прошло целое число климатических циклов. Среднеквадратичные отклонения, т.е. характерные амплитуды энергетического баланса, равны 8,9 ТВт при $\tau = 0,6$ тыс. лет и 4,5 ТВт при $\tau = 1,2$ тыс. лет; приближённо они обратно пропорциональны временам релаксации. Эта мощность сопоставима с полным потоком тепла океанских недр, 4 ТВт, который соответствует плотности потока $0,1 \text{ Вт м}^{-2}$ [13]. Тепловой баланс

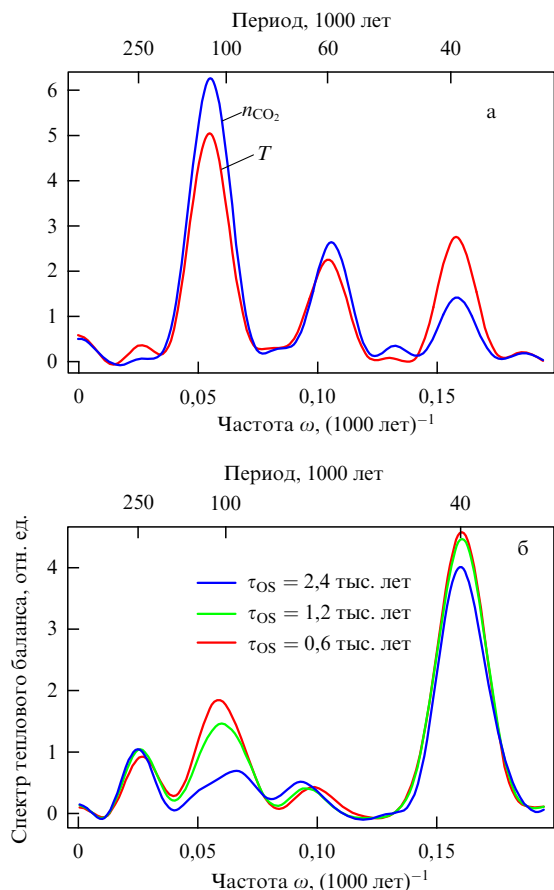


Рис. 4. Спектры климатических переменных: (а) температуры и концентрации CO_2 ; (б) мощности теплообмена между поверхностным слоем океана и его глубинами при разных временах релаксации.

Великого конвейера пока не измерен. Судя по тому, что в последние шесть тысяч лет климат был почти постоянным, современная мощность Великого конвейера должна компенсировать тепловой поток от дна океана. Отметим ещё одно обстоятельство, существенное для понимания климата плейстоцена: время отклика всего океана на конкуренцию Великого конвейера и теплового потока недр примерно в 40 раз больше τ ; таким образом, это время близко к малому периоду Миланковича.

Качественный вывод проведённого анализа спектров и амплитуд теплообмена можно сформулировать так: физическая причина климатических циклов состоит в квазипериодических колебаниях охлаждающей мощности Великого конвейера, конкурирующего с постоянным потоком тепла земных недр. Периодичность этих колебаний совпадает с малыми циклами Миланковича. Миланкович полагал, что оледенение наступает при долгих холодных зимах Северного полушария, а причина его — в существенном росте альбедо планеты. Но понижение интенсивности Великого конвейера в течение ледниковых периодов [14] при таких положениях земной оси относительно перигелия тоже вполне логично. Многолетние плавучие льды не успевают растаять за короткое лето, а в течение долгой зимы их толщина обеспечивает теплоизоляцию принесённых Гольфстримом солёных вод, ограничивая их охлаждение и последующее погружение. Исследования возраста глубинных вод, образовавшихся в Северной Атлантике во времена голоцена [15], качественно подтверждают это заключение. Изучение палеотемператур глубинных вод океана [9] показы-

вает, что за последние 900 тыс. лет их потепление опережало терминции ледниковых периодов на (11 ± 5) тыс. лет. Такое потепление глубинных вод поддерживает идею, впервые высказанную, по-видимому, Н.М. Чумаковым [16], о том, что именно разложение метангидратов являлось инициатором терминций. Данные ледовых кернов также свидетельствуют, что выделение метана лидирует при окончании ледниковых периодов, в сравнении с возрастанием температуры и концентрации диоксида углерода [8]. Дальнейшее развитие этих представлений должно разрешить наболевшую климатическую проблему о физическом механизме терминаций.

6. Современное потепление

Уравнение релаксации температуры описывает теплообмен вод через термоклин, нижнюю границу поверхностного слоя океана. Попробуем использовать аналог этого уравнения — уравнение газовой релаксации

$$\frac{dn_{\text{CO}_2}}{dt} = \frac{n_{\text{CO}_2}^{\text{eq}}(T) - n_{\text{CO}_2}}{\tau_{\text{atm}}} + P(t)$$

для описания газообмена через границу между океаном и атмосферой. Здесь τ_{atm} — пока неизвестное время газовой релаксации атмосферы, $P(t)$ — глобальный источник CO_2 размерностью ppm год^{-1} .

С достаточной точностью известно, сколько угля, нефти и газа мировая энергетика ежегодно добывала и потребляла с начала XX в. Эти данные нетрудно перевести (см. таблицу) в потенциальное приращение (т.е. то, которое было бы в отсутствие поглощения) концентрации диоксида углерода $P(t)$. Это приращение показано сплошными ломаными на рис. 5а для периода 1960–2009 гг. Атмосферная концентрация CO_2 начиная с 1958 г.

Таблица. Выбросы CO_2 при сгорании ископаемых топлив

Топливо	Доля углерода, %	Теплота сгорания, МДж кг ⁻¹	Выброс CO_2 в атмосферу, ppm (год ТВт) ⁻¹
Уголь	89	27	0,74
Нефть	81	46	0,39
Газ	75	55	0,30

измеряется на гавайском острове Мауна Лоа и ежемесячно публикуется в Интернете [17].

Вариации средней температуры T за это время тоже известны [18], но они пока незначительны и в задаче газовой релаксации особой роли не играют. В качестве равновесной концентрации можно взять её доиндустриальное значение 280 ppm или равновесную величину при современной температуре $n_{\text{CO}_2}^{\text{eq}}(1^\circ\text{C}) = 286$ ppm. Их разница характеризует ошибку дальнейших вычислений. Таким образом, данные ледовых кернов Антарктиды фактически вообще не используются при определении современного отклика атмосферы на антропогенные выбросы.

В уравнении газовой релаксации известны все функции времени. Осталось подобрать единственный численный параметр — время релаксации атмосферы τ_{atm} по отношению к времени растворения газа океаном. Оптимальные значения τ_{atm} оказались принадлежащими диапазону 25,1–27,5 лет. Как видно из рис. 5б, решение хорошо согласуется с наблюдениями до конца 2010 г.

Этот факт позволяет сделать попытку экстраполяции климатических тенденций в будущее. Конечно, возмож-

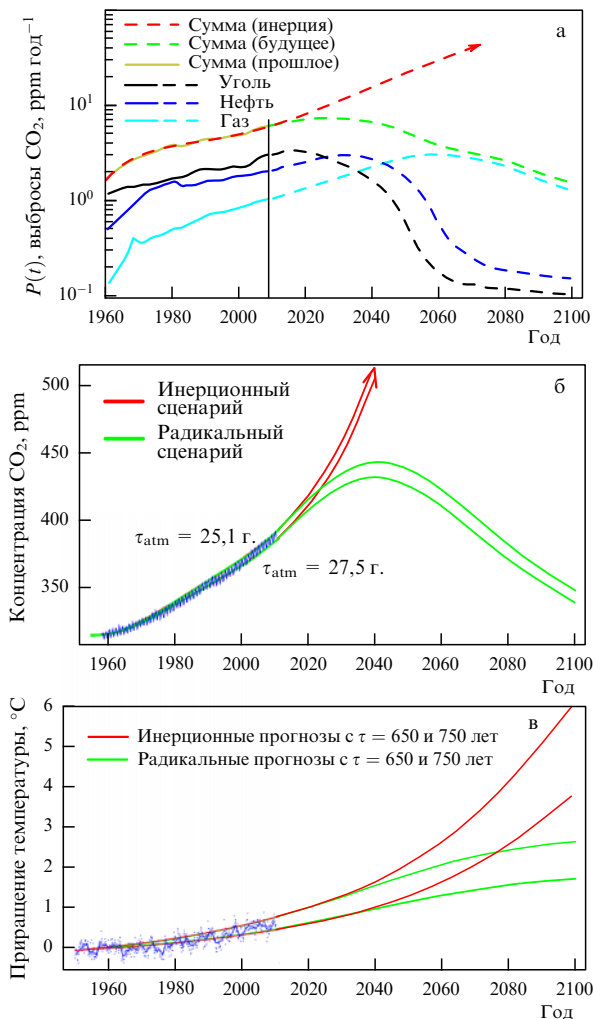


Рис. 5. Сравнение результатов теории и фактических данных современного парникового эффекта. (а) Потенциальный ежегодный прирост концентрации CO₂ как суммарный результат сжигания угля, нефти и газа вместе. (б) Ежемесячные вариации n_{CO_2} вместе с результатами интегрирования уравнения газовой релаксации. (в) Изменения глобальной средней температуры по метеорологическим данным вместе с результатами интегрирования уравнения температурной релаксации; ломаной линией показаны средние ежегодные температуры, точками — средние ежемесячные температуры. Прогнозы теории даны для двух сценариев развития топливной индустрии: инерционного и радикального.

ные ошибки при этом будут нарастать. Концентрация CO₂ сегодня уже на 40 % выше равновесной, её дальнейшее возрастание неизбежно выведет уравнение газовой релаксации из линейной области. Поэтому предлагается рассмотреть два предельных сценария, выбранных таким образом, чтобы истинный сценарий оказался между ними. Первый, инерционный, сценарий предполагает равномерное увеличение добычи всех ископаемых топлив, причём суммарные выбросы CO₂ возрастают так же, как в последнее десятилетие, примерно на 3 % в год. Второй, радикальный, сценарий исходит из постепенного отказа от использования ископаемых топлив. Предполагается сокращение добычи угля (самого вредного для атмосферы) начиная с 2015 г., вплоть до полного запрета к 2050 г. Далее, к 2060 г., снижается добыча, а главное, использование нефти и её продуктов для отопления и транспорта. Добыча газа пока только возрастает, но затем, возможно, придётся сокращать и её. Рост энергетики в целом может быть компенсирован ускоренным

развитием ядерной отрасли, производством биотоплива и электроэнергии на солнечных батареях.

Полученные решения газового уравнения в двух сценариях используем при решении уравнения температурной релаксации. Вариации климата, за исключением таковых в последние десятилетия, были малы, поэтому будем считать, что в современную эпоху теплообмен Великого конвейера с глубинами океана являлся сбалансированным и останется таковым в текущем столетии: $w(t) = 0$.

Время релаксации будем варьировать так, чтобы решения уравнения температурной релаксации охватывали разброс наблюдений средней температуры поверхности [18] за период 1960–2010 гг. (рис. 5в). Полученная оптимизация диапазона $\tau = 0,65–0,75$ тыс. лет согласуется с оценкой, сделанной ранее по климату плейстоцена.

Практические следствия прогнозов энергетики и соответствующих решений релаксационных уравнений весьма существенны. Главный вывод таков: все действия по "исправлению" атмосферы начинают сказываться на средней температуре планеты с заметным запозданием. Так, при радикальном сценарии максимум выбросов CO₂ придётся на 2030 г., но максимум его концентрации — только на 2042 г., а температура выйдет на некоторый предел (возможно, максимум) только к концу XXI столетия.

Ещё одно неприятное следствие, к которому ведёт потепление, состоит в том, что возмущения климата возрастают пропорционально производной температуры по времени [19]. Отсюда следует качественный вывод: погодные аномалии станут максимальными примерно к середине XXI в., когда концентрация CO₂ пройдёт свой максимум. Это утверждение относится к радикальному сценарию, тогда как инерционный сценарий полностью катастрофичен как по температуре, так и по возрастанию погодных аномалий. Гуманитарные последствия глобального потепления невозможно оценить в рамках физического подхода к климатическим проблемам.

Список литературы

1. Pierrehumbert R T *Phys. Today* **64** (1) 33 (2011)
2. Dressler A E *Science* **330** 1523 (2010)
3. Stevens B J. *Fluid Mech.* **660** 1 (2010)
4. Лаппо С С *Природа* (2) 100 (1995)
5. Broecker W S *Oceanography* **4** (2) 79 (1991)
6. Lüthi D et al. *Nature* **453** 379 (2008)
7. Loulergue L et al. *Nature* **453** 383 (2008)
8. Бялко А В *Природа* (12) 18 (2009)
9. Sosdian S, Rosenthal Y *Science* **325** 306 (2009)
10. Бялко А В *Природа* (5) 3 (2011)
11. Biji P K et al. *Science* **330** 819 (2010)
12. Бялко А В, Гамбургцев А Г *Природа* (12) 6 (2000)
13. Hofmeister A M, Criss R E *Tectonophysics* **395** 159 (2005)
14. Иванова Е В *Глобальная термохалинная палеоциркуляция* (М.: Научный мир, 2006)
15. Thornalley D J R et al. *Science* **331** 202 (2011)
16. Чумаков Н М *Стратиграфия. Геологическая корреляция* **13** (3) 3 (2005) [Chumakov N M *Stratigr. Geol. Correlat.* **13** 221 (2005)]
17. Use of NOAA ESRL Data, ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_mm_mlo.txt
18. Global Land-Ocean Temp. Index in 0.01 degrees Celsius, base period: 1951–1980, <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata/GLB.Ts+dSST.txt>
19. Бялко А В, Ваганова Н И, Руманов Э Н *Докл. РАН* **431** 617 (2010) [Byalko A V, Vaganova N I, Rumanov É N *Dokl. Phys.* **55** 168 (2010)]