

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



Представлено к печати  
зам. директора ИКИ РАН  
Е.А. Лупяном

Пр-2150

*К.В. Федулов, Н.М. Астафьева*

**СТРУКТУРА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ  
(ПО ПАЛЕОДАНЫМ И ДАННЫМ  
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ЭПОХИ)**

Москва, 2008

*K.V. Fedulov, N.M. Astafieva*

**THE STRUCTURE OF CLIMATE VARIATIONS BY:  
PALEO DATA AND TOOLS EPOCH'S DATA**

В связи с актуальной проблемой изменчивости климата Земли важной становится задача изучения и слежения за изменениями низкочастотных колебаний термодинамических процессов в геосферах, являющихся составляющими климатической системы (а также внешних низкочастотных воздействий). Сложность обусловлена тем, что между низкочастотными процессами и высокочастотными короткопериодными погодообразующими процессами существуют нелинейные связи и в данных метеонаблюдений низкочастотные колебания отражаются в быстроосциллирующих короткопериодных, но достаточно энергоемких процессах. Долгопериодные процессы обладают большой энергоемкостью, но медленнопротекающие реализуют свои энергопереходы за длительные времена и часто маскируются быстрыми энергопереходами высокочастотных процессов. В работе представлены результаты изучения эволюции климатической системы на основе анализа глобальных циклов углового момента, зональной скорости, крупномасштабных атмосферных осцилляций, Эль-Ниньо и других долговременных процессов. Используются методы локализованного спектрального анализа, основанного на математическом аппарате вейвлет-преобразования, предоставляющем частотно-временную развертку одномерной реализации и позволяющем сохранять хорошее разрешение на разных (высоких и низких) частотах.

## Введение

22 столетия назад древний грек из Никеи по имени Гиппарх (190–120 гг., II в. до н.э.) ввел термин **климат** в его изначальном смысле — *наклон* — для обозначения природных условий на планете. Гиппарх первым ввел географические координаты — *широту* и *долготу*. И он же выделил основной фактор, определяющий характер природных условий, — наклон солнечных лучей к поверхности Земли. По мнению Гиппарха на нашей планете должно было существовать пять зон, природные условия в которых определяются лишь наклоном солнечных лучей к поверхности Земли: две зоны в средних широтах с благоприятными для жизни условиями и три зоны непригодные для жизни — экваториальная из-за жары и полярные из-за холода. Сейчас климатических зон больше, они подробно структурированы и отношение к их пригодности для жизни иное, однако, в первом приближении, — это все та же картина климатических зон Гиппарха [Монин, Шишков, 1979; Семенченко, 2002].

Долгое время считалось, что климат на Земле определяется только состоянием атмосферы. Почти через 20 столетий после Гиппарха было признано, что на климат оказывают влияние Мировой океан и свойства подстилающей поверхности (суши) — впервые это опубликовано в труде Гумбольдта (1769–1859) «Космос». Во второй половине прошлого века была окончательно осознана роль Мирового океана в формировании климата, организованы научные экспедиции и комитеты по исследованию Мирового океана, Арктики и Антарктики. Появились корабли погоды, буйковые станции, множество метеостанций, данные наблюдений активно накапливались и изучались. Все это отразилось в итогах совещания метеорологов в Стокгольме в 1974 г., где были выработаны определения погоды и климата.

В атмосфере постоянно происходят различные процессы, которые влияют на её состояние. **Погода** — это мгновенное состояние атмосферы в определенном месте, в определенное время или за недлительные промежутки времени, такие как день, неделя или месяц. Погода характеризуется следующими **метеорологическими параметрами**: давление, температура, влажность воздуха, сила и направление ветра, облачность, атмосферные осадки, дальность видимости, наличие туманов, метелей, гроз и т. д. Определение погоды изменяется, в связи с нашим знанием и расширением производственной деятельности. Так, с развитием авиации добавилось понятие о погоде в свободной атмосфере; возросло значение такого элемента погоды как атмосферная видимость. Атмосферные процессы на разных высотах связаны между собой, поэтому для более полного и детального понимания погоды необходимо изучать и более высокие слои атмосферы.

Практически в любой точке планеты погода постоянно меняется, однако, при всех отличиях погоды на разных коротковременных масштабах, можно выделить более долговременный процесс — климат. **Климат** — это статистический ансамбль состояний, проходимых системой атмосфера–океан–суша в определенной географической местности за периоды времени, сравнимые с жизнью человека. Климатические характеристики представляют собой статистические выводы из многолетних данных наблюдений за погодой — прежде всего за изменениями таких метеорологических элементов, как атмосферное давление, скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, облачность и атмосферные осадки. Многолетние средние значения метеорологических элементов (годовые, сезонные, месячные, суточные и т. д.), их суммы, периодичности и прочие параметры носят название климатических норм. Соответствующие величины для отдельных дней, месяцев, лет и пр. рассматриваются как отклонение от этих норм. Для характеристики климата применяются также комплексные показатели — функции нескольких метеорологических элементов: различные коэффициенты, факторы и индексы (например, засушливости, увлажнения, индексы атмосферных колебаний и др.).

Одним из важнейших результатов исследований последней четверти прошлого века является тот факт, что климат формируется в **открытой системе взаимосвязанных геосфер планеты**. Климатическая система Земли формируется при активном участии всех геосфер планеты: атмосфера, океаносфера, криосфера, поверхность континентов (их гидросфера и биосфера), литосфера, антропосфера и процессы обмена теплом, моментом и веществом (влажностью особенно) между ними. Система открытая, следовательно, на формирование климатической системы влияют внешние силы: радиационные, приливные, гравитационные, электромагнитные и другие воздействия окружающего пространства — Солнечной системы с её планетами (особенно большими), Луной, Солнцем и межпланетной плазмой.

Изучение климатических процессов представляет собой сложную проблему. Термодинамические процессы в системе океан–атмосфера, обмен завихренностью, угловым моментом, массой и теплом осуществляются на фоне и под управлением внутренних и внешних энергетических источников и большого числа процессов, в разных геосферах планеты. Энергетические потоки и массоперенос, происходящие в широком спектре интенсивностей и пространственных и временных масштабов, связывают между собой функционирующие структуры всех геосфер планеты. Эти связи, а в результате и сами геофизические процессы, оказываются сложными, нелинейными и многопараметрическими.

При исследовании климатических изменений необходимы параметры, которые являлись бы индикаторами климатической изменчивости. Эти параметры должны удовлетворять некоторым необходимым требованиям: быть измеряемыми; являться долговременными, т. е. иметь данные за предыдущие временные промежутки; быть достаточно чувствительными к незначительным мелкомасштабным изменениям и, в то же время, отражать крупномасштабные закономерности и события. Параметров, полностью удовлетворяющих всем перечисленным требованиям, на данный момент не существует. Однако наиболее подходящими индикаторами климатической изменчивости признаны температура (приповерхностная температура воздуха и температура поверхности океана), уровень моря и распространение морского льда.

Важным фактором изменчивости климата являются крупномасштабные термодинамические взаимодействия в системе океан – атмосфера, эволюционирующие в широком диапазоне временных и пространственных масштабов. Природные процессы, оказывающие существенное воздействие на транспортные и диссипативные свойства атмосферы и влияющие на формирование климата, имеют большую пространственную протяженность, достаточно длительны и характеризуются сложной пространственно-временной структурой. Для выявления общих закономерностей таких процессов и понимания физических механизмов, ими управляющих, необходимо, в частности, анализ данных наблюдений, предельно полно характеризующих их энергетику и динамику.

Работа состоит из введения, двух глав и заключения. В первой главе описаны основные составляющие климатической системы и основные факторы изменчивости климата. Во второй главе приведены результаты анализа гео- и гелиофизических параметров на разных временных масштабах (палеоданные и данные инструментальной эпохи), характеризующих климатическую систему или принимающих заметное участие в ее формировании. В заключении представлено обсуждение полученных результатов и некоторые выводы.

Климатическая система планеты — наша среда обитания. Интерес к изменениям погоды и к изменчивости климата имеет длительную историю, сравнимую со временем жизни человечества. С развитием науки и техники этот интерес не ослабевает, а наоборот усиливается, поскольку появляются новые возможности для теоретического и экспериментального изучения физических процессов, участвующих в формировании климатической системы и влияющих на изменчивость климата.

Важной становится задача изучения и слежения за изменениями низкочастотных колебаний термодинамических процессов в геосферах, являющихся составляющими климатической системы (а также внешних низкочастотных воздействий). Сложность обусловлена тем, что между низкочастотными процессами и высокочастотными короткопериодными погодообразующими процессами существуют нелинейные связи и в данных метеонаблюдений низкочастотные колебания отражаются в быстроосциллирующих короткопериодных, но достаточно энергоемких процессах. Долгопериодные процессы обладают большой энергоемкостью, но медленно текущие реализуют свои энергопереходы за длительные времена и часто маскируются быстрыми энергопереходами высокочастотных процессов. Адекватным методом изучения эволюции климатической системы на основе анализа глобальных циклов углового момента, зональной скорости, крупномасштабных атмосферных осцилляций, Эль-Ниньо и др. Используются методы локализованного спектрального анализа, основанного на математическом аппарате вейвлет-преобразования: полученная частотно-временная развертка одномерной реализации имеет хорошее разрешение и на высоких и на низких частотах.

Целью настоящей работы является:

- провести анализ временной структуры гелио- и геофизических процессов методами локализованного спектрального анализа;
- определить наиболее характерные масштабы климатических изменений;
- выявить возможные взаимовлияния гелио- и геофизических процессов, являющихся составляющими климатической системы;
- изучить региональные особенности изменчивости климата.

Проведен анализ некоторых данных наблюдений за изменениями гелио- и геофизических параметров, характеризующих изменения климатической системы Земли на разных временных масштабах. Используются данные, полученные в результате наблюдений в **инструментальную эпоху** (за последние 130–170 лет), и палеоданные разной физической природы.

## 1. НЕКОТОРЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗЕМЛИ И ФАКТОРЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ КЛИМАТА

В главе представлены необходимые сведения о Солнце (п. 1.1), изменении его активности (п. 1.2) и движении Земли по орбите (п. 1.3). В п. 1.4 приведены и описаны некоторые физические факторы, приводящие к климатическим изменениям, и некоторые механизмы этих изменений.

### 1.1. Солнце — единственный источник приходящей на Землю радиации

Солнце — ближайшая к Земле звезда и центральное тело нашей планетной системы. Это единственная звезда, поверхность которой можно наблюдать с Земли. Астрономы относят Солнце к желтым карликам пятой величины. Физические процессы, протекающие в Солнце, в значительной степени определяют физику планет Солнечной системы — тем в более значительной степени, чем планета ближе к Солнцу. Жизнь на Земле, энергетика процессов, происходящих в ее атмосфере, полностью определяются поступлением на нашу планету солнечного излучения. [Миланкович, 1939; Сидоренков, 2002a; Космическая физика, 1966; Семенченко, 2002; Кондратьев, 2004; Сорохтин, 2006].

Солнце — плазменный шар, находящийся на среднем расстоянии от Земли около 149 600 000 км (свет проходит это расстояние за 8 мин). Вследствие эллиптичности орбиты Земли расстояние до Солнца меняется от  $147 \cdot 10^6$  км в начале января до  $152 \cdot 10^6$  км в начале июля. В первом приближении Солнце шарообразно, его диаметр 1 390 600 км, что в 109 раз больше диаметра Земли, объем в 1 300 000 раз больше объема Земли, а масса равна  $1,989 \cdot 10^{33}$  г, что больше массы Земли в 333 000 раз. В Солнце сосредоточено 99,866 % массы Солнечной системы и лишь оставшиеся 0,134 % приходятся на планеты, их спутники, а также на множество комет, астероидов и космической пыли. Средняя плотность солнечного вещества  $1,41 \text{ г/см}^3$ , что составляет 0,256 средней плотности Земли, т.е. почти четвертую часть. Солнечное вещество содержит по массе более 70 % водорода, более 20 % гелия и около 2 % других элементов.

Скорость обращения Солнца вокруг центра Галактики — около 250 км/с; по отношению к ближайшим звездам Солнце движется со скоростью порядка 20 км/с. На структуру и состояние гелиосферы влияет также обстановка на траектории движения Солнца. Солнце поднимается над плоскостью Млечного пути и опускается под нее с периодом порядка 66 млн лет [Бакулин и др., 1977]. При своем движении Солнце проходит участки межзвездного пространства различной плотности. Состояние гелиосферы определяется, с одной стороны, деятельностью Солнца, а другой — условиями в околосолнечной межзвездной среде. Активность Солнца изменяется в широком диапазоне временных масштабов — от нескольких минут до

десятков и сотен лет, условия в межзвездной среде меняются значительно медленнее. Состояние и структура гелиосферы являются факторами, существенно влияющими на состояние магнитосферы и атмосферы Земли.

Средний период вращения Солнца вокруг оси, интегрированный по всем широтам, составляет 25,38 сут. Солнце обращается вокруг своей оси с угловой скоростью, убывающей по мере удаления от экватора к полюсам. Результат такого **дифференциального вращения** Солнца можно наблюдать на его поверхности: экваториальная зона вращается несколько быстрее ( $14,4^\circ$  за сутки), чем высокоширотные зоны ( $\sim 10^\circ$  за сутки у полюсов). Скорость на экваторе составляет около 2 км/с, при этом энергия вращения (определённая по вращению поверхности) составляет  $2,4 \cdot 10^{42}$  эрг.

Земная орбита наклонена к плоскости солнечного экватора под углом  $7^\circ$ . Видимый диаметр Солнца составляет  $32'$ , телесный угол при среднем расстоянии от Земли до Солнца равен  $6,8 \cdot 10^{-5}$  ср. Солнце имеет 9 спутников — это планеты, суммарная масса которых, как уже говорилось, составляет приблизительно **0,13 % массы Солнца**, но на них приходится около **98 % момента количества движения (углового момента) Солнечной системы**.

Как и любая развивающаяся звезда на определенном этапе своего жизненного цикла, Солнце под действием гравитационных сил стремится к сжатию, однако этому противодействует градиент давления, возникающий из-за высокой температуры и плотности внутренних слоев Солнца. Теоретические оценки показывают, что давление в центре Солнца превышает давление у поверхности Земли примерно в 10 млрд раз, а температура достигает 16 млн градусов. Параметр, характеризующий полное количество энергии, излучаемое звездой в единицу времени, называемый эффективной температурой поверхности, для Солнца равен  $T_{эф} = 5780$  К.

Огромное давление, необходимая температура в недрах Солнца, а также наличие водорода при определенной плотности создают условия для протекания самоподдерживающихся термоядерных реакций. При каждом превращении ядер водорода в ядра гелия высвобождается порядка 26,7 МэВ. Высвобождающаяся в процессе ядерной реакции энергия распространяется из недр Солнца на поверхность через вышележащие слои, в основном, в виде излучения. При переходе через область убывающей температуры спектральный состав излученной энергии непрерывно меняется. Это происходит вследствие многократного поглощения энергии атомами внутренних слоев Солнца и повторного излучения. По мере перемещения к вышележащим слоям происходит смещение спектров излучения в более длинноволновую область.

Фотону требуется миллион лет, чтобы добраться от ядра Солнца до его поверхности: примерно 70 % этого пути энергия передается излучением, затем начинает работать конвекция. За **конвективной зоной** следует слой атмосферы Солнца — **фотосфера** — это поверхность Солнца, которую мы наблюдаем с Земли; толщина фотосферы  $\sim 350$  км ( $\sim 1/200$  радиуса Солнца). Над фотосферой располагается светящаяся, почти прозрачная атмосфера Солнца, состоящая из сильно разреженных газов. Нижний слой солнечной атмосферы высотой  $\sim 500$  км называется **обращающим слоем**, верхний — до высот 12–14 тыс. км — **хромосферой**. Над хромосферой до высоты в несколько радиусов Солнца располагается внешняя оболочка Солнца, или **солнечная корона**.

Располагающиеся над фотосферой хромосфера и корона практически свободно пропускают непрерывное излучение фотосферы. В первом приближении можно считать, что фотосфера испускает непрерывное тепловое излучение как абсолютно черное тело с температурой 6000 К. Практически вся энергия излучения Солнца заключена в излучении фотосферы, приходящемся на интервал длин волн от 1500 Å до 0,5 см. В видимой области спектра излучение Солнца почти не зависит от солнечной активности (наличия на фотосфере пятен и т. д.). Количество энергии, приносимой солнечными лучами за 1 мин на площадку в 1 см<sup>2</sup>, расположенную вне земной атмосферы на среднем расстоянии от Земли до Солнца, — **солнечная постоянная**; ее значение равно 1,4·10<sup>3</sup> Вт/м<sup>2</sup>. Отсюда можно посчитать, что светимость Солнца равна 3,86·10<sup>26</sup> Вт или 4·10<sup>33</sup> эрг/с (1 Вт = 1 Дж/с = 10<sup>7</sup> эрг/с). Изменения солнечной постоянной могут составлять доли процента в зависимости от солнечной активности.

Как уже отмечалось, энергия, выделяемая при термоядерных реакциях в недрах Солнца, передается на поверхность. Перенос энергии происходит не только путем излучения, но и путем теплопроводности и конвекции. И если теплопроводность не играет существенной роли в энергетических процессах Солнца, то конвекция, как и упомянутое излучение, оказывает существенное влияние. Следствием турбулентной конвекции раскаленного газа и является то, что на поверхности Солнца и в его атмосфере постоянно происходят бурные движения. Это, в свою очередь, влияет на структуру видимой поверхности Солнца, которая представляется состоящей из отдельных зерен — **гранул**, окруженных более темными областями.

Кроме гранул на поверхности Солнца почти всегда наблюдаются **пятна** (активные области). Пятна, в отличие от гранул на поверхности, никак не связаны с конвекцией, а являются областями выхода в фотосферу сильных магнитных полей. Согласно теории Л. Бирмана, столь сильные поля, как в пятнах, в состоянии уменьшить или даже подавить конвективный перенос энергии в подфотосферных слоях. Таким образом, в них создается некоторый дефицит выходящей лучистой энергии. Считается, что именно магнитное поле является причиной пониженной температуры солнечных пятен, поскольку оно не позволяет переносить энергию из более низких слоев в более высокие. Пятно имеет темную часть — ядро и окружающую его полутьму — яркость ядра в 3–4 раза меньше яркости полутени. Пятно кажется темным, потому что температура в нем ниже (4500 К) окружающей его фотосферы (6000 К), поскольку в месте выхода сильного магнитного поля (1500–3500 Э) поперечное движение плазмы затруднено, а ослабление конвекции приводит к меньшему поступлению энергии в область пятен. Размеры пятен различны — от 800 до 90 000 км. Пятна часто объединяются в группы и сопровождаются обширными яркими областями — **факелами**. Продолжительность существования отдельных пятен и их групп меняется от нескольких часов до нескольких месяцев.

По наблюдаемому на Солнце пятнам, флоккулам, факелам, протуберанцам, вспышкам и изменениям солнечной короны, которые можно назвать комплексом явлений, вызванных генерацией сильных магнитных полей, судят о **солнечной активности**. В периоды наибольшей солнечной активности возрастает ультрафиолетовое, рентгеновское и корпускулярное излучение Солнца. Эти виды излучения Солнца влияют на состояние **магнитосферы и ионосферы Земли**, изменяя **межпланетную среду**. В периоды наибольшей солнечной активности на Земле наблюдаются магнитные бури, полярные сияния, возникают радиопомехи.



До изобретения радио и запуска космических телескопов, которые позволили освоить всю шкалу электромагнитных волн — от жесткого гамма-излучения, рентгена и ультрафиолета до метровых радиоволн — единственным свидетельством переменности солнечной активности было изменение количества пятен на фотосфере. Так, например, наблюдения выявили 11-летнюю цикличность числа пятен и показали, что между 1640 и 1700 г. на Солнце практически вообще не было пятен (рис. 1.1). В конце XVII – начале XVIII в., когда пятен практически не было, в Европе стояла необычайно холодная погода. Как выяснилось позже, это далеко не случайное совпадение.

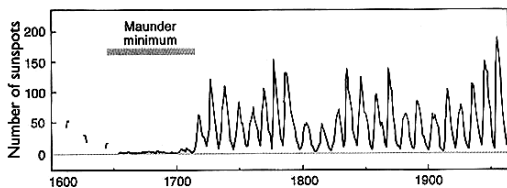
**Числа Вольфа** (относительное цюрихское число солнечных пятен) — один из самых распространенных среди многочисленных индексов солнечной активности. Числа Вольфа определяют количество солнечных пятен в видимой полусфере Солнца. Наблюдения за изменениями числа солнечных пятен продолжают уже более 300 лет. Значения индекса, получившего наименование «числа Вольфа» в честь создателя этого индекса, определяются по формуле  $W = k(10n + f)$ , где  $k$  — множитель, зависящий от способа и условий наблюдения,  $n$  — число наблюдаемых групп и отдельных пятен,  $f$  — общее число отдельных пятен и всех пятен в группах.

Современные методы и технологии позволяют более адекватно и точно рассчитывать солнечную активность различными способами. Например, солнечные обсерватории ведут регулярные наблюдения за Солнцем, используя в качестве меры активности оценку **площадей солнечных пятен** в миллионных долях площади видимой солнечной полусферы. Этот индекс в какой-то мере отражает величину магнитного потока, сосредоточенного в пятнах, через поверхность Солнца.

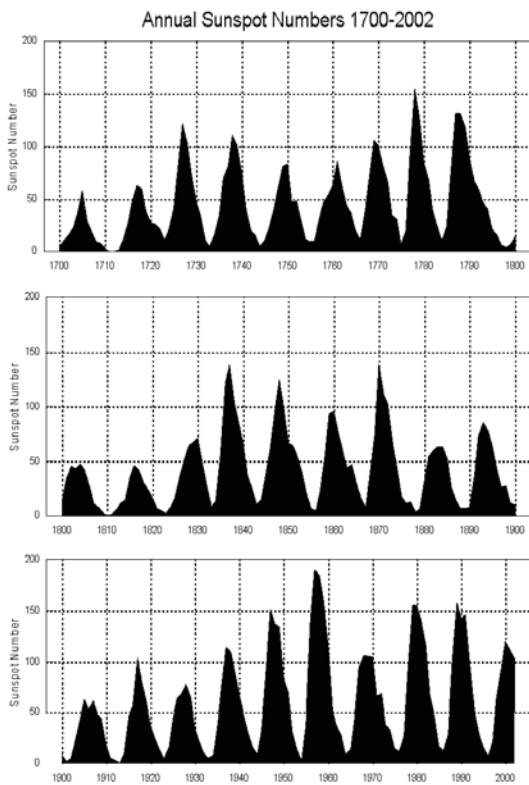
Помимо этих индексов для оценки солнечной активности, связанной со вспышками, применяются специальные индексы, напрямую связанные с реальными потоками электромагнитного излучения на разных частотах. По величине потока радиоизлучения на волне 10,7 см (частота 2800 МГц) в 1963 г. введен индекс F10.7. Он измеряется в солнечных единицах потока (с.е.п.) — 1 с.е.п. =  $10^{-22}$  Вт/(м<sup>2</sup>Гц). Индекс F10.7 хорошо соответствует изменениям суммарной площади солнечных пятен и количеству вспышек во всех активных областях. Для статистических исследований в основном используются среднемесячные значения. В последнее время в качестве индекса, характеризующего степень вспышечной активности Солнца, используется количество солнечных вспышек за месяц. Данные по этому индексу существуют с 1964 г., когда была введена применяющаяся сейчас система определения балльности солнечной вспышки в оптическом диапазоне.

Изменение солнечной активности в числах Вольфа и, как выяснилось, в других индексах, имеет циклический характер со средней продолжительностью цикла в 11,2 года (цикл Швабе). На рис. 1.2 представлена картина изменения среднегодового количества солнечных пятен в течение последних трехсот лет.

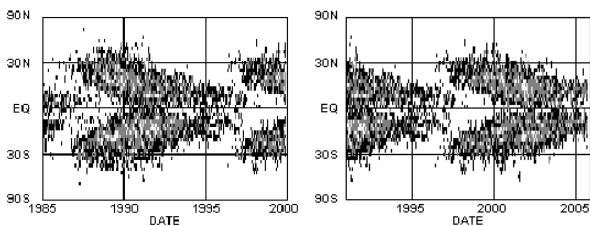
На самом деле полный магнитный цикл Солнца составляет не 11 лет, а 22 года (с учетом чередования магнитной полярности пятен). В начале XX в. Д. Хейл обнаружил, что магнитные полярности первых (ведущих) пятен и хвостовых пятен в северном и южном полушариях Солнца противоположны и меняются полюсами в каждом новом цикле. Поэтому полный цикл солнечной активности происходит в течение 22 лет (цикл Хейла). За 22 года происходит полная переполюсовка магнитного поля Солнца, и пятна, которые представляют собой области выхода магнитного поля



**Рис. 1.1.** Наблюдения показали, что между 1640 и 1700 г. на Солнце практически не было пятен (минимум Маундера)



**Рис. 1.2.** Изменение среднегодового количества солнечных пятен в течение последних трехсот лет



**Рис. 1.3.** Места расположения пятен в течение 11-летнего цикла образуют «диаграмму бабочки» («бабочку Маундера»)

из-под фотосферы, возвращаются на свои места. То есть пятна на Солнце появляются не где попало, а там, где диктует магнитное поле (теория «солнечного динамо»). На рис. 1.3 показаны места расположения солнечных пятен в течение последней четверти прошлого века (в этот промежуток времени полностью пошел предыдущий 11-летний цикл с максимумом активности Солнца около 1990 г.) и в текущем солнечной цикле.

При минимуме активности в течение некоторого времени пятен на Солнце, как правило, нет. Затем они начинают появляться далеко от экватора на широтах  $\pm 40^\circ$ . Одновременно с возрастанием числа солнечных пятен сами пятна мигрируют в более низкие широты. Места расположения пятен в течение цикла образуют «диаграмму бабочки», см. рис. 1.3, — в начале 11-летнего цикла пятна появляются на средних широтах, а затем, расширяя свой «ареал», дрейфуют в направлении солнечного экватора.

## 1.2. Долго- и коротковременные изменения солнечной активности

Солнечная активность — это результат сложного взаимодействия солнечной атмосферы, присутствующих в ней магнитных полей, конвективных движений и дифференциального вращения Солнца. Экспериментальные измерения полного потока энергии Солнца относятся к очень малому, по сравнению со всей историей Земли, промежутку времени, но основные фактические данные статистики звезд и объясняющие их теоретические представления современной астрофизики приводят к выводу о стабильности светимости Солнца для длительных промежутков времени порядка миллиардов лет [Шкловский, 1978]. Это находит подтверждение в палеоклиматических исследованиях.

Тем не менее, физические характеристики Солнца меняются, и эти изменения имеют весьма сложный характер. За время существования Солнца на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга–Рессела его радиус увеличился на 4 %, а светимость — на 60 % [Монин, Шишков, 1979]. Это целесообразно учитывать в рассуждениях и моделировании долговременной эволюции климата. Являясь основным источником энергии, Солнце своей деятельностью задает временные масштабы большинства процессов в системе Солнце – Земля.

В течение столетий восточные астрономы наблюдали пятна на Солнце, а в 1611 г. их увидели в телескоп Галилей и другие европейские ученые [Эдди, 1978]. В 1843 г. немецкий астроном-любитель Г. Швабе обнаружил, что на графиках среднего числа солнечных пятен, видимых за год, четко проявляется цикличность продолжительностью около 10 лет. На основании старых данных швейцарский астроном Р. Вольф установил, что цикличность числа пятен заметна по крайней мере с 1700 г. и уточнил ее продолжительность (~11,2 лет). Более старые данные не показались Вольфу достоверными.

В 1893 г. директор королевской Гринвичской обсерватории Э.У. Маундер по этим старым данным обнаружил, что существовал 70-летний период, окончившийся в 1715 г., когда на Солнце практически полностью отсутствовали пятна и другие проявления солнечной активности. Было несколько десятилетий, когда никому не удалось обнаружить ни одного солнечного пятна. Не может ли быть, что Маундер принял отсутствие доказательств существования пятен за доказательство их отсутствия? Заметим, однако, что 70-летний период, названный позднее минимумом

Маундера, начался через 35 лет после того, как Галилей создал свой первый маленький телескоп, и этот промежуток времени был ознаменован быстрым расцветом оптики и астрономии.

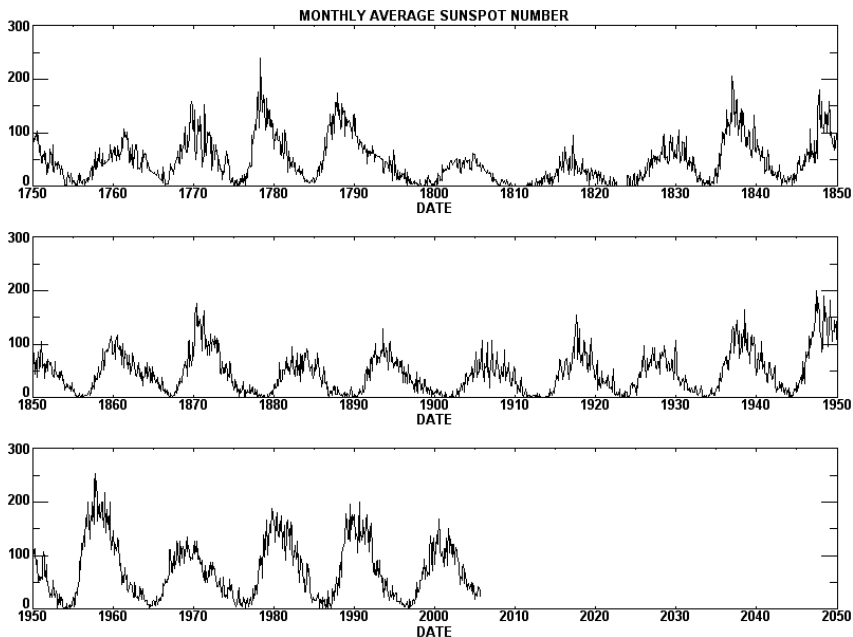
Солнце не вращается, как твердое тело: чем выше широта, тем медленнее вращение, в результате чего экватор Солнца делает оборот за 27 дней, а полярные области за 31 день. Согласно современной теории, наблюдаемое дифференциальное вращение Солнца приводит к цикличности солнечных пятен в результате действия солнечного динамо. Дж. Эдди сравнил ежедневные рисунки Солнца, сделанные Шайнером в период 1625–1627 гг., с рисунками Гевелиуса, выполненными за период 1642–1644 г., т. е. до момента исчезновения последнего пятна перед наступлением длительного минимума Маундера. Оказалось, что, согласно рисункам Шайнера, вращение Солнца мало отличается от современного: вращение замедляется с широтой на ту же величину. На рисунках же Гевелиуса вращение солнечного экватора ускорилось на целые сутки по сравнению с 1625 г. При этом скорость вращения на экваторе по сравнению с вращением удаленных от него областей увеличилась в три раза. Таким образом, изменение дифференциального вращения Солнца и наступление минимума Маундера тесно связаны [Эдди, 1978].

Полное число пятен, зафиксированное за период 1645–1715 гг., было меньше количества пятен, видимых за любой один год в наши дни. Маундер отметил, что если обычные максимумы и минимумы 11-летнего цикла можно связать с изменениями магнитного поля Земли или, может быть, с изменениями погоды, то продолжительные изменения в поведении Солнца могут сопровождаться и более существенными климатическими эффектами на Земле. И на самом деле, минимум Маундера совпал с **малым ледниковым периодом** — общим похолоданием на Земле, когда в Европе реки, которые никогда не замерзали, покрылись льдом, а снег лежал круглый год на всех широтах.

Нумерация 11-летних солнечных циклов отсчитывается с момента начала регулярных ежедневных наблюдений числа пятен — с середины XVIII в. Временной промежуток, когда количество активных областей бывает наибольшим, называется максимумом солнечного цикла, а когда их число на порядок ниже средних — минимумом. За последние 80 лет течение цикла несколько ускорилось и средняя продолжительность циклов уменьшилась примерно до 10,5 лет. За последние 250 лет самый короткий период был равен 9 годам, а самый длинный — 13,5 годам. На рис. 1.4 представлена картина изменения среднемесячного количества солнечных пятен с момента начала регулярных ежедневных наблюдений. В настоящее время мы находимся в конце 23-го нечетного цикла, максимум которого пришелся на 2000 г.

11-летняя цикличность солнечной активности регулярна лишь в среднем. Несмотря на различную длительность отдельных циклов, им свойственны общие закономерности. Так, чем интенсивнее цикл, тем короче ветвь роста и тем длиннее ветвь спада, но для циклов малой интенсивности как раз наоборот — длина ветви роста превышает длину ветви спада. Цикл активности солнечных пятен имеет прямое отношение к земному климату. У некоторых деревьев толщина колец имеет 11-летний цикл.

Также предполагается существование 44- и 55-летних циклов изменения активности. Установлено что величина максимума циклов меняется с периодом 80–90 лет (близкий к столетнему цикл Глейсберга). Эти периоды проявляются не-



**Рис. 1.4.** Изменение среднемесячного количества солнечных пятен с момента начала регулярных ежедневных наблюдений

посредственно на графике изменения активности Солнца. Возможно, существуют и более долговременные циклы, подтвердить которые инструментальными данными не представляется возможным из-за недостаточного времени наблюдений.

**Солнечная постоянная** ( $1367 \text{ Вт/м}^2$ , или  $1,959 \text{ кал}$ ) не является неизменной во времени — на её величину влияет солнечная активность. Это влияние обусловлено, в основном, изменением потока излучения при изменении числа и суммарной площади солнечных пятен. Период прямых измерений солнечной постоянной относительно невелик. Её изменение на протяжении 11-летнего цикла солнечной активности (цикла Швабе), по-видимому, не превышает  $\sim 10^{-3}$ , доля изменчивости в оптическом диапазоне, обусловленная вкладом солнечных пятен, оценивается  $\sim 10^{-4}$ . Для оценки вариаций солнечной постоянной в течение более длительных солнечных циклов (циклы Хейла, Глейсберга и пр.) данные прямых измерений отсутствуют.

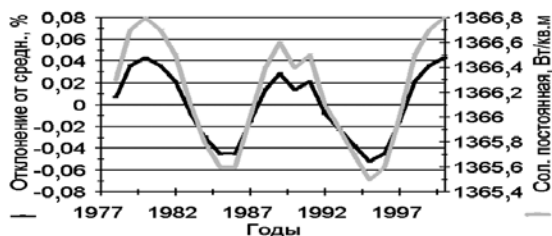
Первые измерения солнечной постоянной относятся к 1837 г.; до недавнего времени эти измерения выполнялись только на уровне земной поверхности и отличались сложной методикой и невысокой точностью. За последние 20–25 лет с использованием новых измерительных приборов и выноса измерительной техники за пределы атмосферы достигнут большой прогресс. Теперь измерения солнечной постоянной выполняются с высокой точностью и весьма регулярно. Солнечная постоянная очень слабо — в пределах  $\pm 2,5\%$  — зависит от среднего числа солнечных

пятен [Frohlich, Lean, 1998; Willson, Mordvinov, 1999]. На рис. 1.5 показан временной ход солнечной постоянной за время инструментальных изменений.

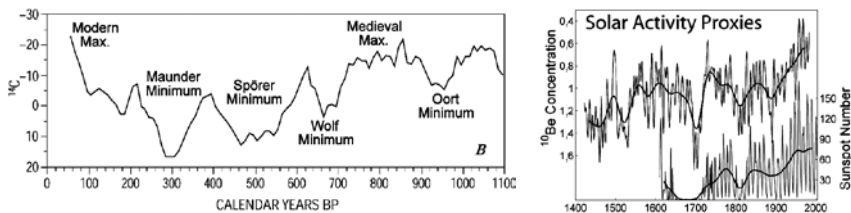
Таким образом, цикличность солнечной активности хорошо изучена на большом экспериментальном материале; в настоящее время известны 11-летний, 22-летний и 80–90-летний солнечные циклы. Известны циклы большой длительности — порядка 6 столетий; хорошо изучены вариации солнечной деятельности в пределах 11-летнего цикла. Кроме того, известны природные процессы, имеющие четкий сезонный ход, 27-суточную повторяемость и суточный ход (27-дневная повторяемость обусловлена вращением Солнца с синодическим периодом, равным 27 дням). Все выше сказанное объясняет значимость **многолетних однородных рядов наблюдений**, невозможность решения многих климатических проблем за 10–20–30 и даже несколько десятков лет и необходимость изучения системы Солнце – Земля как целого. Следует отметить, что долговременные изменения состояния системы Солнце – Земля возможно зафиксировать и проанализировать только на интервалах времени, значительно превышающих длительность солнечного цикла.

Долговременные вариации солнечной активности и солнечной постоянной имеют большое значение для климатологии и геофизики. Несмотря на несовершенство климатических моделей, расчётные данные показывают, что изменение солнечной постоянной на  $10^{-2}$  должно привести к изменению температуры Земли на 1–2 К.

Хорошим индикатором изменений солнечной активности (инсоляции) считаются содержание углерода-14 в годовых кольцах деревьев (за последние 1100 лет) и изотопов бериллия (за последние ~600 лет). Приведенные на рис. 1.6 графики показывают хорошее согласие хода этих (опосредованных) характеристик солнечной



**Рис. 1.5.** Временной ход солнечной постоянной (кривая с меньшими экстремумами — относительное отклонение в %)

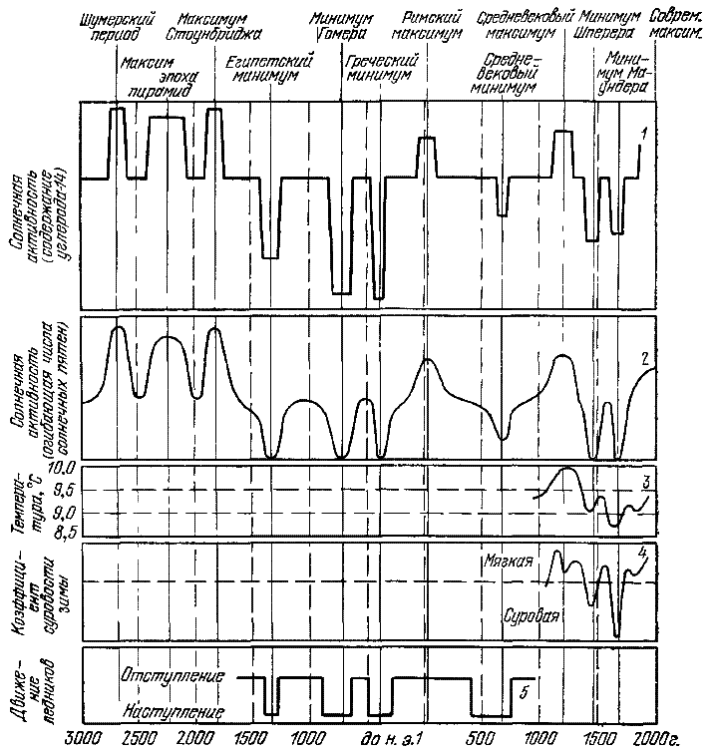


**Рис. 1.6.** Долговременные изменения активности Солнца: по процентному содержанию углерода-14 в годичных кольцах стволов реликтовых сосен (слева) и изотопов бериллия (справа); справа внизу — данные наблюдений количества солнечных пятен

активности с данными наблюдений числа солнечных пятен (за последние ~400 лет, когда велись наблюдения).

Можно видеть, что минимумы солнечной активности, подобные минимуму Маундера, случались неоднократно и в более ранние времена и длились от 50 до 100 лет. Кроме того, видно, что за последнее тысячелетие нам досталось необычайно активное Солнце — «современная» эпоха, которая длится уже около 300 лет, характеризуется неуклонным ростом солнечной активности (за исключением неглубокого минимума в начале и еще менее глубокого — в конце XIX в.).

В качестве очень интересного примера влияния долговременных изменений солнечной активности на климат Европы приведем рисунок из статьи Дж. Эдди (1978). На рис. 1.7 представлено изменение солнечной активности, начиная с Бронзового века, определенное по процентному содержанию углерода-14 в годовых кольцах стволов реликтовых сосен (кривая 1); под ней изображена построенная Дж. Эдди (1978) сглаженная историческая кривая солнечной активности, кото-



**Рис. 1.7.** Изменение солнечной активности, начиная с Бронзового века, определенное по процентному содержанию углерода-14 в годовых кольцах стволов реликтовых сосен, и некоторые характеристики климата Европы

рую можно интерпретировать как огибающую амплитуд возможного солнечного цикла (кривая 2). Из сравнения обеих кривых ясно, что за последние 5000 лет было, по крайней мере, 12 резких изменений солнечной активности, столь же четких, как и минимум Маундера (названия для отклонений в древности даны в соответствии с историческими эпохами).

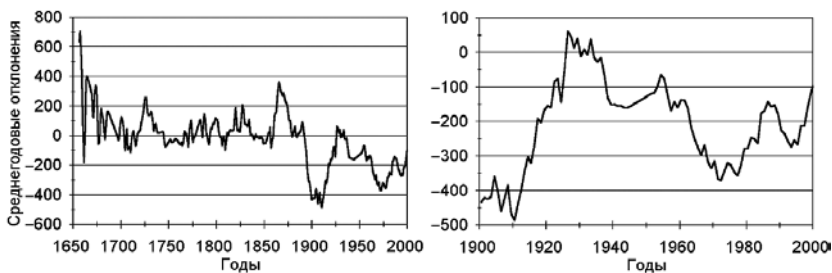
Кривой 3 изображена определенная в Англии средняя годовая температура, начиная примерно с 1000 г. н. э.; кривой 4 — суровость зимы в Париже и Лондоне; ступенчатой нижней кривой 5 показаны отрезки времени, соответствующие наступлению и отступлению альпийских ледников. Можно видеть, что за приведенные 5000 лет рост и падение всех климатологических кривых происходит в соответствии с длительными изменениями солнечной активности.

### 1.3. Земля — движение по орбите

Земля — третья от Солнца планета Солнечной системы. По форме Земля близка к эллипсоиду, несколько сплюсненному у полюсов и растянутому в экваториальной зоне: средний радиус 6371,032 км, полярный — 6356,777 км, экваториальный — 6378,160 км (сжатие планеты 1,298). Масса Земли составляет  $5,976 \cdot 10^{24}$  кг, атмосферы —  $5,15 \cdot 10^{18}$  кг, следы атмосферы прослеживаются до высот порядка 1800 км. Орбита Земли эллиптическая, эксцентриситет 0,0167. Скорость движения по орбите 29,765 км/с. Ось вращения Земли наклонена к плоскости эклиптики под углом  $66^\circ 33' 22''$ .

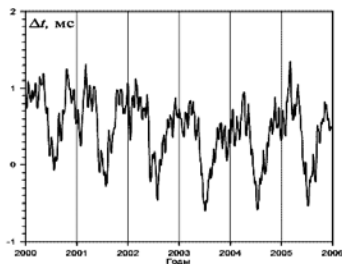
**Вращение Земли постоянно замедляется** — недавние многочисленные лазерные наблюдения за Луной дают величину 2,25 мс за столетие. К тому же вращение Земли происходит довольно неравномерно: меняется скорость вращения, перемещаются географические полюса, ось вращения колеблется в пространстве. Являясь совокупным отражением различных процессов, нестабильность вращения несет ценную информацию об этих процессах. На рис. 1.8 показаны среднегодовые величины отклонения угловой скорости вращения Земли.

Основной причиной замедления вращения Земли является приливное торможение: приливные валы на поверхности Земли, образуемые притяжением Луны и Солнца, перемещаются вслед за движением этих небесных тел с востока на запад — в направлении, обратном суточному вращению Земли. Замедление вращения Земли в основном связано с морскими приливами (97 %): когда они «набегают» на берега



**Рис. 1.8.** Среднегодовые величины отклонений угловой скорости вращения Земли





**Рис. 1.9.** Изменение длительности суток в период 2000–2006 гг. (отклонение от 86 400 с в миллисекундах)

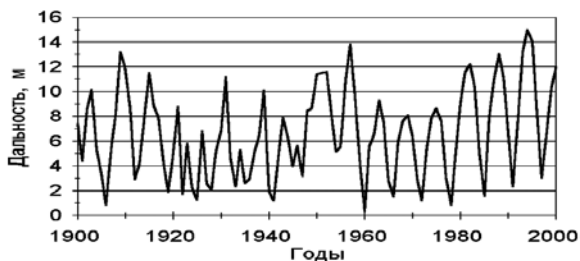
материков, на приливную волну, согласно третьему закону Ньютона, действует противоположно направленная сила, которая «тормозит» их (Луна создает приложенный к Земле момент силы, который замедляет её вращение). В меньшей степени замедление вращения Земли связано с приливами в литосфере (не более 3 %).

Атмосферная циркуляция является главной причиной сезонной неравномерности вращения Земли. На рис. 1.9 показано изменение длительности суток в период 2000–2006 гг. Хорошо видна сезонная неравномерность.

В целом атмосфера движется относительно земной поверхности в низких широтах с востока на запад, а в умеренных и высоких — с запада на восток (см. гл. 2). Момент импульса преобладающих восточных ветров отрицателен, а западных — положителен (расчёты показывают, что он в несколько раз больше момента импульса восточных ветров). Разница момента импульса перераспределяется между атмосферой и Землей. Когда момент импульса атмосферы увеличивается (усиливаются западные ветры или ослабевают восточные), момент импульса Земли уменьшается, то есть замедляется её вращение. Когда же момент импульса атмосферы уменьшается (ослабевают западные или усиливаются восточные ветры), вращение Земли ускоряется. Суммарный момент импульса планеты и атмосферы остается неизменным.

**Движение географических полюсов Земли** вызвано сезонными перемещениями масс воздуха и воды, а также влиянием упругих и вязких свойств литосферы [Бакулин и др., 1977]. Обстоятельный анализ взаимодействия между атмосферой и океаном, выполненный на материалах наблюдений явления Эль-Ниньо – Южное Колебание [Сидоренков, 2002а, б], привел к заключению, что Земля, океан и атмосфера совершают согласованные колебания, влияя друг на друга. Видимыми проявлениями этих колебаний являются не только Южное колебание и квазидвухлетняя цикличность в атмосфере и океане, но и движения полюсов Земли. Наблюдения на станциях Международной службы движения полюсов Земли и измерения с помощью приборов на специальных геодезических спутниках показывают, что тело планеты отклоняется от оси ее вращения со скоростью около 10 см/год. На рис. 1.10 приведены временные вариации расстояния географического полюса от условного международного начала координат в течение прошлого столетия.

**Дрейф материков.** В 1912 г. немецкий геофизик А. Вегенер предположил, что древние массивы суши раскалывались на части и дрейфовали, словно айсберги, по более пластичной океанической коре. Гипотеза не нашла поддержки среди большинства современных Вегенеру геологов, а сам ученый был высмеян. Позднее, однако, в 1950–1970 гг. в результате исследований глубоководных бассейнов были



**Рис. 1.10.** Вариации расстояния географического полюса от условного международного начала координат за 1900–2000 гг.

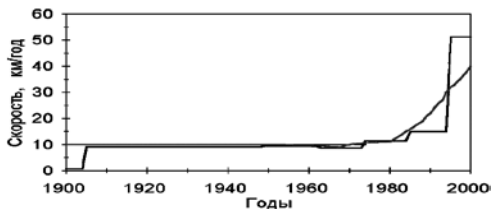
получены неопровержимые доказательства в пользу гипотезы Вегенера. В настоящее время теория тектоники плит составляет основу представлений об эволюции Земли. Установлено, что Европа и Северная Америка удаляются друг от друга со скоростью 2,1 см/год, а Австралия и Южная Америка сближаются ежегодно на 8 см, в то время как расстояние между Африкой и Южной Америкой увеличивается на 2 см.

**Магнитное поле Земли изменяется** сложным образом во времени и в пространстве и является важным элементом в системе Солнце – Земля. Состояние земного магнитного поля, временные вариации его напряженности контролируют и определяют протекание ряда процессов в системе Солнце – Земля. Магнитное поле Земли в промежутках времени, малых по сравнению с историческими эпохами, можно рассматривать как постоянное (основное) с наложением на него переменного поля, напряженность которого на несколько порядков меньше напряженности основного поля [Паркинсон, 1986]. Наблюдаемые на поверхности Земли вариации магнитного поля вызываются изменениями процессов, внешних по отношению к Земле, а также процессов, развивающихся в земной коре и протекающих в ядре.

Основное поле удовлетворительно описывается полем диполя, ось которого наклонена к оси вращения Земли на  $11,5^\circ$ , а центр смещен относительно центра Земли в Восточное полушарие. Расчеты величины магнитного момента и координат диполя выполняются систематически с 1829 г. Установлено, что величина смещения диполя от центра Земли изменилась от 252 км в 1829 г. до 451 км в 1965 г., а магнитный момент непрерывно уменьшается [Акасофу, Чепмен, 1974; Паркинсон, 1986]. Дипольный магнитный момент Земли на 1970 г. составлял  $7,87 \cdot 10^{25}$  Гс·см<sup>3</sup> (или  $8,3 \cdot 10^{22}$  А·м<sup>2</sup>), уменьшаясь за десятилетие на  $0,04 \cdot 10^{25}$  Гс/см<sup>3</sup>.

При исследованиях постоянного магнитного поля необходимо учитывать отклонения от поля диполя, имеющие на поверхности Земли характерный размер порядка 10 тыс. км — так называемые мировые магнитные аномалии (например, Сибирская, Бразильская, Канадская аномалии). Кроме мировых аномалии наблюдаются местные аномалии, связанные с намагниченностью горных пород земной коры (например, Курская магнитная аномалия).

Важной особенностью постоянного магнитного поля Земли является систематический дрейф магнитных полюсов. Начиная с 1831 г., положение северного магнитного полюса определялось по результатам прямых измерений неоднократно. С 1904 г. он переместился на расстояние более 1100 км. Установлено, что северный магнитный полюс движется через Ледовитый океан по направлению к Восточной Сибири. Скорость его движения до 1970 г. составляла около 9 км/год, далее она



**Рис. 1.11.** Изменение скорости движения северного магнитного полюса за 1900–2000 гг. (ступенчатая кривая — по фактическим данным, гладкая — по моделям)

возрастала и теперь имеет значение более 50 км/год [Newitt et al., 2002]. На рис. 1.11 показано изменение скорости движения северного магнитного полюса в течение прошлого столетия.

Общеизвестно, что в истории Земли происходили резкие смены климата, так называемые ледниковые периоды, сменяемые таким же резким потеплением климата. Многие учёные полагают, что резкая смена климата в прошлом напрямую соответствует резким перемещениям магнитных полюсов планеты — инверсиям (полной смене южного полюса на северный) и экскурсам (кратковременным мощным флуктуациям, не ведущим к длительной смене полюсов) [Монин, Шишков, 2000]. Инверсии наблюдаются с периодизацией в 250–500 тыс. лет, экскурсии — гораздо чаще, последний раз был во время ледникового периода, когда вымерли мамонты, и сменился потеплением, приведшим к описываемому в Библии потопу.

**Гравитационные воздействия в системе Земля–Луна.** Естественный спутник Земли — Луна движется вокруг Земли на среднем от нее расстоянии 384 400 км. Поперечник Луны примерно в 4 раза меньше поперечника Земли, а масса меньше массы Земли в 81 раз. По своей относительной массе Луна является самым большим спутником в Солнечной системе. Пару Земля–Луна иногда называют двойной планетой [Сидоренков, 2002б].

Луна движется вокруг Земли со средней скоростью 1,02 км/с по приблизительно эллиптической орбите. Период обращения Луны вокруг Земли составляет ~27,3 сут (он непостоянен и колеблется вблизи указанного значения). Движение Луны вокруг Земли очень сложно и эллиптичность орбиты — довольно грубое приближение. На самом деле движение Луны, как и Земли, следует рассматривать в открытой системе, на которую влияют возмущения, накладываемые притяжением Солнца и других планет Солнечной системы, а также сплюснутостью Земли (формой геоида).

За период одного оборота Земли вокруг Солнца Луна делает около 13,5 оборота, двигаясь почти в плоскости орбиты движения Земли вокруг Солнца. Таким образом, Луна может опережать Землю (последняя четверть), отставать от нее (первая четверть), а также находиться между Землей и Солнцем (новолуние) и с противоположной от Солнца стороны Земли (полнолуние). Следствием такого движения является непрерывное изменение сил притяжения, действующих на Землю со стороны Луны и Солнца, и в результате — усложнение движения Земли по орбите и вращения вокруг оси.

Через центр Солнца  $S$ , центр масс системы Земля–Луна (барицентр)  $T$  и вектор скорости  $\mathbf{V}$  движения этого центра вокруг Солнца можно провести плоскость. Это будет мгновенная плоскость орбиты центра масс системы Земля–Луна. Из-за притяжения

Земли и Луны (а, следовательно, и барицентра) планетами эта плоскость не сохраняет неизменное положение в пространстве (относительно звезд), а вращается около центра Солнца  $S$ .

Движение плоскости орбиты центра масс системы Земля – Луна, обусловленное возмущением планет, может быть разделено на два движения: медленное смещение плоскости с малой скоростью и ряд очень мелких периодических колебаний.

Плоскость, проходящая через центр Солнца и обладающая только вековым движением мгновенной плоскости орбиты центра тяжести системы Земля – Луна, называется гелиоцентрической плоскостью эклиптики, а параллельная ей плоскость, проходящая через центр Земли, — геоцентрической плоскостью эклиптики. Сечение небесной сферы геоцентрической плоскостью эклиптики называется **эклиптикой**. Эклиптика — это большой круг небесной сферы, по которому происходит видимое годичное движение Солнца.

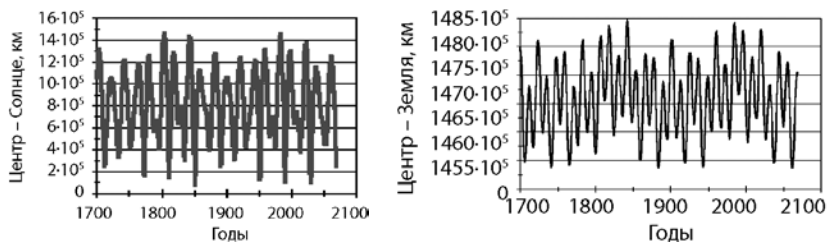
Согласно закону всемирного тяготения, два тела с массами  $M$  и  $m$ , соответственно, взаимно притягиваются с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния  $R$  между ними  $F = G(Mm)/R^2$  (здесь  $G = 6673 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$  — коэффициент пропорциональности, называемый гравитационной постоянной). Произведение  $GM$ , постоянной  $G$  и массы Земли  $M$ , составляет примерно  $39,9 \cdot 10^{13} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2}$ .

Земля совершает целый ряд движений, как периодических, так и векового характера. Она вращается вокруг своей оси, делая оборот за 23 ч 56 мин 4 с (86 164,09 с), и обращается вокруг Солнца с периодом 365,2422 сут. Одновременно с движением вокруг Солнца центр тяжести Земли вращается относительно центра масс системы Земля – Луна с периодом 27,3217 сут. Ось вращения Земли совершает долгопериодическое движение (методически разлагаемое на прецессию и нутацию), являясь образующей почти кругового конуса с периодом 25 784 лет. Тело Земли, в свою очередь, совершает колебания относительно оси вращения, вследствие чего географические полюса Земли смещаются по ее поверхности, описывая сложные спиралеобразные кривые.

**Гравитационные воздействия в системе Земля – Солнце.** Тела солнечной системы оказывают гравитационное воздействие на планету Земля, меняя наклон экватора к эклиптике, изменяя скорость прецессии, оказывая влияние на орбиту и т.п. [Монин, Шишков, 1979; Монин, 2000]. Высказывались также соображения о влиянии дисимметрии солнечной системы на процессы на Земле. Были также неоднократные указания на то, что тела солнечной системы могут оказывать совокупное динамическое воздействие на протекание солнечного цикла.

Расстояния от центра масс Солнечной системы (барицентра) до Земли и до Солнца и их моменты количества движения относительно центра масс постоянно меняются. На рис. 1.12 представлены графики изменения расстояния от центра масс Солнечной системы (барицентра) до Солнца и до Земли. За последние триста лет Земля удалилась от Солнца на 22 тыс. км: в 1700 г. это расстояние составляло 147 080 000 км, в 2000 г. — 147 102 000 км.

Все тела Солнечной системы, как и Земля, движутся вокруг Солнца по своим орбитам. Среднее расстояние между Землей и Солнцем составляет 149 600 000 км. Эта величина названа **астрономической единицей** (а.е.) и используется в качестве стандарта для всех астрономических и астрономо-геодезических вычислений.

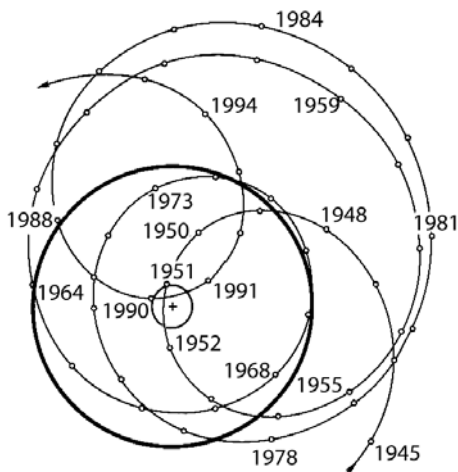


**Рис. 1.12.** Изменение расстояния от центра масс Солнечной системы до Солнца (слева) и до Земли (справа), км

Орбита Земли имеет эллиптическую форму, следствием чего является непрерывное изменение расстояния между Землей и Солнцем. Помимо изменения расстояния скорость движения Земли по орбите также непостоянна и пропорциональна изменяющемуся расстоянию. В самой удаленной точке орбиты (афелий) скорость Земли  $V_{min} = 29,27$  км/с; в ближайшей точке (перигелий)  $V_{max} = 30,27$  км/с.

Солнце, вращаясь вокруг своей оси, также обращается около **центра масс всей Солнечной системы**. Положение этого центра масс непостоянно, и в каждый момент времени зависит от взаимного расположения планет (особенно больших — Юпитера и Сатурна). На рис. 1.13 показано движение Солнца вокруг центра масс Солнечной системы; положение центра массы Солнца по годам обозначено маленькими кружками [Landscheidt, 2003].

Орбита Солнца в основном складывается из двух почти круговых движений радиусом около  $0,003$  а.е., периоды которых близки к периодам обращения Юпитера и Сатурна. Как и многие звезды, Солнце имеет собственное движение



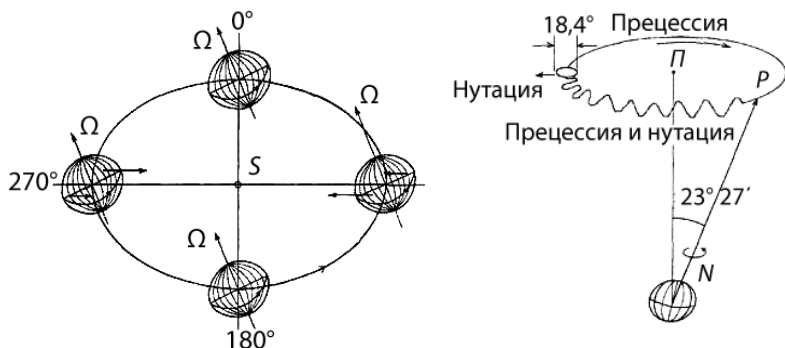
**Рис. 1.13.** Движение Солнца вокруг центра масс Солнечной системы (лимб Солнца помечен толстым кругом); движение центра масс Солнца по годам (1945–1995) обозначено кривыми с маленькими кружками

и смещается в направлении созвездия Геркулес со скоростью 19,5 км/с, что составляет  $6 \cdot 10^8$  км/год. И, наконец, Солнечная система движется вокруг центра Галактики со скоростью 250 км/с, совершая полный оборот за 200 млн лет. Земля, являясь спутником Солнца, участвует во всех этих движениях, что напрямую сказывается на характере её собственного движения.

Земля вращается вокруг своей оси со скоростью  $7,29 \cdot 10^{-5}$  рад/с и движется по эллиптической орбите вокруг Солнца  $S$  (рис. 1.14). Угол наклона оси вращения Земли  $\Omega$  к плоскости эклиптики составляет  $66^\circ 33'$ . Момент инерции Земли равен  $8,04 \cdot 10^{37}$  кг·м<sup>2</sup>. Фигура Земли близка к эллипсоиду: вдоль экватора имеется утолщение, а на полюсах она чуть приплюснута. Правильно считать Землю геоидом (правда, последние спутниковые данные свидетельствуют о том, что форма Земли похожа, скорее, на грушу). На рис. 1.14 (слева) схематически показано действие силы притяжения Солнца на Землю в различных точках земной орбиты. Картина движения Земли по эллиптическим орбитам оказывается сложной из-за того, в частности, что Юпитер и Сатурн, влияя на положение Солнца в Солнечной системе, влияют и на орбиту обращения Земли вокруг Солнца.

За время одного оборота (за год) Земля удаляется от Солнца или приближается к нему, находящемуся в одном из фокусов орбиты. Изменения расстояния Земли от Солнца в течение одного оборота могут меняться от 1,47 до 1,52 млн км [Монин, Сонечкин, 2005]. Инсоляция обратно пропорциональна квадрату расстояния до Солнца, что приводит к колебаниям солнечной постоянной от 1,43 до  $1,32 \cdot 10^6$  эрг/см<sup>2</sup>, которые соответствуют средним значениям приземной температуры воздуха 285,5 и 290,2 К — или ее колебаниям 4,7 °С (это колебания в течение года — сезонные).

Долгота Солнца в моменты весеннего и осеннего равноденствия равна 0 или 180°. Сила притяжения Земли Солнцем при этом лежит на прямой пересечения плоскостей экватора и эклиптики, т.е. в плоскости симметрии экваториального утолщения Земли. Следовательно, она проходит через центр Земли и возмущает только поступательное движение Земли вокруг Солнца, но никакого смещения оси вращения Земли не вызывает.



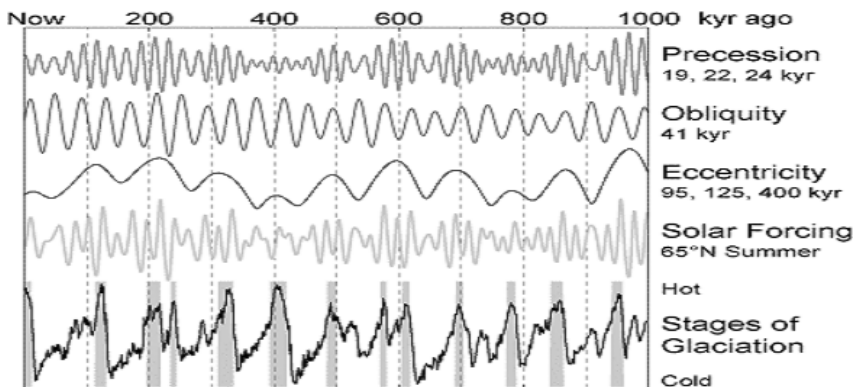
**Рис. 1.14.** Действие силы притяжения Солнца на Землю (слева) и схема движения оси вращения Земли в пространстве для внеземного наблюдателя (справа)

Долгота Солнца в моменты летнего или зимнего солнцестояния составляет 90 или 270°. В этом случае ось вращения Земли и прямая, соединяющая Землю и Солнце, лежат в плоскости, перпендикулярной плоскости эклиптики. Так как сила притяжения Солнца, действующая на более близкую к нему часть экваториального утолщения Земли, больше силы, действующей на более далекую часть, их равнодействующая не проходит через центр Земли. Здесь сила притяжения эквивалентна силе, приложенной к центру масс Земли, и паре сил, стремящейся выпрямить земную ось и сделать ее перпендикулярной к плоскости эклиптики. Однако, поскольку вращающаяся Земля имеет возможность поворачиваться вокруг своего центра масс, эта пара может вызвать лишь прецессию и нутацию оси вращения Земли вокруг перпендикуляра к эклиптике. Аналогично и с Луной. Из-за более близкого расположения к Земле её влияние сильнее, чем влияние Солнца. В любом случае под действием суммарных сил Земля прецессирует и её ось прецессии описывает коническую поверхность. На рис. 1.14 (справа) показана схема движения оси вращения Земли в пространстве для внеземного наблюдателя. Вековое смещение земной оси называется лунно-солнечной прецессией. Помимо этого существует и нутационная земная ось, перпендикулярная оси прецессии, вследствие чего у нашей планеты оказывается достаточно сложное результирующее движение.

Изменения наклона оси вращения Земли и ее положения на орбите обуславливают разную инсоляцию на разных широтах, смену времен года и продолжительность светового дня. В результате изменений перечисленных параметров формируются долговременные изменения, известные как циклы Миланковича, которые можно видеть не только в измененных наблюдателя. Вековое смещение земной оси называется лунно-солнечной прецессией. Помимо этого существует и нутационная земная ось, перпендикулярная оси прецессии, вследствие чего у нашей планеты оказывается достаточно сложное результирующее движение.

Изменения наклона оси вращения Земли и ее положения на орбите обуславливают разную инсоляцию на разных широтах, смену времен года и продолжительность светового дня. В результате изменений перечисленных параметров формируются долговременные изменения, известные как циклы Миланковича, которые можно видеть не только в измененных наблюдателя. Вековое смещение земной оси называется лунно-солнечной прецессией. Помимо этого существует и нутационная земная ось, перпендикулярная оси прецессии, вследствие чего у нашей планеты оказывается достаточно сложное результирующее движение.

Большинство описанных параметров движения Земли меняется со временем. В настоящее время Земля обращается вокруг Солнца примерно за 365,242 средне-



**Рис. 1.15.** Циклы Миланковича, связанные с изменениями прецессии, наклона к эклиптике и эксцентриситета орбиты (сверху вниз), ниже — изменение инсоляции летом северного полушария (на 65° с.ш.) и цикличность ледниковых периодов

солнечных суток. Ось вращения Земли наклонена к эклиптике на  $23,26^\circ$ , и этот угол меняется в пределах  $21,5\text{--}24,5^\circ$  с периодом  $\sim 41$  тыс. лет. Эклиптика наклонена к плоскости Лапласа на  $1,6^\circ$ , этот угол меняется от 0 до  $2,9^\circ$ . Эксцентриситет орбиты также меняется в пределах  $0\text{--}0,067$  (с периодом  $\sim 22$  тыс. лет), сейчас он равен  $0,0167$  и убывает. Прецессии и нутации также присущи периодические изменения со временем: прецессия происходит с периодом  $\sim 25,7$  тыс. лет, для нутации характерен набор периодов от основного  $\sim 18,6$  лет и до нескольких суток.

Такое движение Земли и все описанные выше процессы обуславливают изменчивость инсоляции или, другими словами, неравномерное освещение Солнцем поверхности нашей планеты, и оказывают непосредственное влияние на изменчивость климата.

#### 1.4. Некоторые физические факторы и механизмы изменения климата

Причиной изменений климата являются, в основном, термодинамические процессы на Земле и внешние воздействия, такие как колебания интенсивности солнечного излучения, и, возможно, деятельность человека [Сидоренков, 2002а; Монин, Шишков, 1979]. Изменения климата обусловлены переменами в земной атмосфере, процессами, происходящими в других составляющих климатической системы, таких как океаны, ледники, а также эффектами, сопутствующими деятельности человека:

- изменение размеров и взаимного расположения материков и океанов;
- изменение прозрачности атмосферы и ее состава в результате изменений вулканической активности Земли;
- изменение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере при взаимодействии с биосферой;
- изменение отражательной способности поверхности Земли (альбедо);
- изменение количества тепла в глубинах океана.

Внешние процессы, формирующие климат, обусловлены изменениями солнечной радиации и орбиты Земли:

- светимости Солнца;
- параметров орбиты Земли;
- центра инерции Солнечной системы (соотношений между взаиморасположением главных тел системы — Солнца, Юпитера и Сатурна).

**Оледенения.** Ледники признаны одними из самых чувствительных показателей изменения климата. Они существенно увеличиваются в размерах во время охлаждения климата («малые ледниковые периоды») и уменьшаются во время потепления климата. Ледники растут и тают из-за природных изменений и под влиянием внешних воздействий. В прошлом веке ледники не были способны регенерировать достаточно льда в течение зим, чтобы восстановить потери льда во время летних месяцев. Самые значительные климатические процессы за последние несколько миллионов лет — это циклы текущего ледникового периода, обусловленные изменениями орбиты Земли. Изменение состояния континентальных льдов и колебания уровня моря в пределах  $130$  м являются в большинстве регионов ключевыми следствиями изменения климата.

**Изменчивость Мирового океана.** В масштабе десятилетий климатические изменения могут быть результатом взаимодействия атмосферы и Мирового



океана. Многие флуктуации климата, включая наиболее известную — Южное колебание — Эль-Ниньо, а также Северо-Атлантическую и Арктическую осцилляции, происходят отчасти благодаря возможности Мирового океана аккумулировать тепловую энергию и перемещать эту энергию в различные части океана. В более длительном масштабе в океанах происходит термохалинная циркуляция, которая играет ключевую роль в перераспределении тепла и может значительно влиять на климат (циркуляция, создаваемая за счет перепада плотности, образовавшегося вследствие неоднородности распределения температуры и солёности в океане).

**Климатическая память.** Настоящее состояние климата является не только следствием влияния определенных факторов, но и всей истории его состояния. Например, за десять лет засухи озера частично высыхают, растения погибают, и площадь пустынь увеличивается. Эти условия вызывают, в свою очередь, менее обильные дожди в последующие за засухой годы. Таким образом, изменение климата является саморегулирующимся процессом, поскольку окружающая среда реагирует определенным образом на внешние воздействия, и, изменяясь, сама способна воздействовать на климат.

**Парниковые газы.** Согласно исследованиям, парниковый эффект, возникающий в результате нагревания атмосферы тепловой энергией, удерживаемой парниковыми газами, является ключевым процессом, регулирующим температуру Земли. Однако в 1999 г. Вейзер и др. показали, что на протяжении последних десятков миллионов лет нет строгой корреляции между концентрацией парниковых газов и изменением климата и что более важная роль принадлежит тектоническому движению литосферных плит. В то же время есть несколько примеров быстрых изменений концентрации парниковых газов в атмосфере, имеющих строгую корреляцию с сильным потеплением, среди которых термальный максимум палеоцена — эоцена и вымирание видов перми — триаса. Растущий уровень диоксида углерода считается главной причиной современного потепления, начиная с 1950 г.

**Тектоника литосферных плит.** На протяжении длительных отрезков времени тектонические движения плит перемещают континенты, формируют океаны, создают и разрушают горные хребты, т. е. создают поверхность, на которой существует климат. Недавние исследования показали, что тектонические движения усугубили условия последнего ледникового периода: около 3 млн лет назад Северо- и Южно-Американская плиты столкнулись, образовав Панамский перешеек и закрыв путь для прямого смешивания вод Атлантического и Тихого океанов.

**Солнечное излучение.** Солнце является основным источником тепла в климатической системе. Солнечная энергия, превращенная на поверхности Земли в тепло, является неотъемлемой составляющей, формирующей земной климат. В процессе своего развития (на длительных временах) Солнце становится ярче и выделяет больше энергии, так как развивается согласно главной последовательности. Это медленное развитие влияет и на земную атмосферу. Считается, что на ранних этапах истории Земли Солнце было слишком холодным для того, чтобы вода на поверхности Земли могла быть жидкой, что привело к так называемому «парадоксу слабого молодого Солнца». На более коротких временных отрезках также наблюдаются изменения солнечной активности: 11-летний солнечный цикл и более длительные модуляции. Однако 11-летний цикл не отслеживается явно в климатических данных, особенно глобальных. Изменение солнечной активности считается важным фактором

наступления малого ледникового периода, а также некоторых потеплений, наблюдаемых между 1900 и 1950 г. Циклическая природа солнечной активности ещё не до конца изучена; она отличается от медленных изменений, сопутствующих развитию и старению Солнца.

**Изменения орбиты Земли.** По своему влиянию на климат изменения земной орбиты сходны с колебаниями солнечной активности, поскольку небольшие отклонения в положении орбиты приводят к перераспределению солнечного излучения на поверхности Земли. Такие изменения положения орбиты (циклы Миланковича) предсказуемы с высокой точностью, поскольку являются результатом физического взаимодействия Земли, ее спутника Луны и других планет Солнечной системы. Изменения орбиты считаются главными причинами чередования гляциальных и интергляциальных циклов последнего ледникового периода. Результатом прецессии земной орбиты являются менее масштабные изменения, такие, например, как периодическое увеличение и уменьшение площади пустыни Сахара.

**Вулканизм.** Одно сильное извержение вулкана способно повлиять на климат, вызвав похолодание длительностью в несколько лет. Например, извержение вулкана Пинатубо на Филиппинах в 1991 г. существенно повлияло на климат. Гигантские извержения случаются несколько раз в сто миллионов лет, влияют на климат в течение миллионов лет и являются причиной вымирания видов. Некоторые ученые полагают, что причина похолодания климата — эмитированная в атмосферу вулканическая пыль, поскольку она препятствует солнечному излучению достигнуть поверхности Земли. Однако, по мнению других ученых, большая часть пыли оседает на поверхности Земли в течение ближайших шести месяцев.

**Антропогенное воздействие на изменение климата.** Антропогенные факторы включают деятельность человека, которая изменяет окружающую среду и влияет на климат. В некоторых случаях причинно-следственная связь прямая, как, например, при влиянии орошения на температуру и влажность, в других случаях эта связь менее очевидна. Различные гипотезы влияния человека на климат обсуждались на протяжении многих лет. Главными составляющими антропогенного воздействия сегодня считаются растущая из-за сжигания топлива концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере; аэрозоли в атмосфере (считается, что антропогенные аэрозоли, особенно сульфаты, выбрасываемые при сжигании топлива, влияют на охлаждение атмосферы) и цементная промышленность. Другие факторы, такие как землепользование, животноводство (65 % оксида азота и 37 % метана, имеющих антропогенное происхождение) и вырубка лесов, также влияют на климат (меняются альbedo и водный баланс).

**Взаимодействие факторов, влияющих на изменения климата.** Влияние на климат всех факторов, как естественных, так и антропогенных, выражается радиационным прогревом атмосферы (в  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ). Извержения вулканов, оледенения, дрейф континентов и смещение полюсов Земли — мощные природные процессы, влияющие на климат Земли.

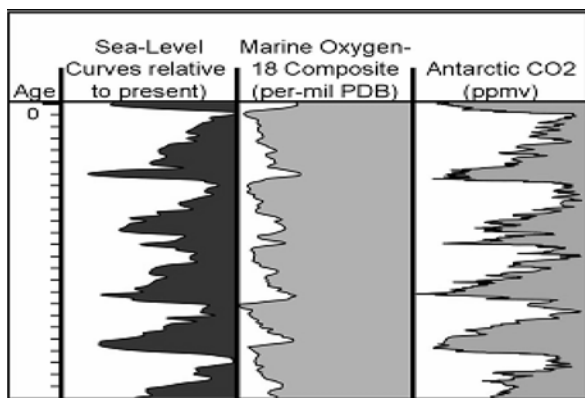
В масштабе нескольких лет вулканы могут играть главную роль. В результате извержения вулкана Пинатубо в 1991 г. на высоту 35 км было заброшено столько пепла, что средний уровень солнечной радиации снизился на  $2,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Однако эти изменения не являются долгосрочными, частицы относительно быстро оседают вниз.

В масштабе нескольких столетий (на 2005 г. по сравнению с 1750 г.) имеется комбинация разнонаправленных факторов, каждый из которых значительно слабее, чем результат роста концентрации в атмосфере парниковых газов, оцениваемый как прогрев на 2,4–3,0 Вт/м<sup>2</sup>. Влияние человека составляет менее 1% от общего радиационного баланса, а антропогенное усиление естественного парникового эффекта составляет примерно 2 %, с 33 до 33,7 °С. Таким образом, средняя температура воздуха у поверхности Земли увеличилась с доиндустриальной эпохи (примерно с 1750 г.) на 0,7 °С.

В масштабе тысячелетий определяющим климат процессом будет, вероятно, медленное движение от одного ледникового периода к следующему. Климатические индикаторы за последние 0,5 млн лет (рис. 1.16): изменение уровня океана, концентрация <sup>18</sup>O в морской воде, концентрация CO<sub>2</sub> в антарктическом льду (деление временной шкалы, слева, — 20 тыс. лет). Максимумы уровня моря и концентрации CO<sub>2</sub> и минимумы <sup>18</sup>O совпадают с межледниковыми температурными максимумами. Настоящее время приходится на межледниковье.

Причины таких изменений климата остаются недоказанными окончательно, однако, среди основных внешних воздействий: изменения орбиты Земли (циклы Миланковича), солнечной активности (в том числе и изменения солнечной постоянной), вулканические выбросы и парниковый эффект.

Климат на Земле меняется периодически в зависимости от повторяющихся процессов, происходящих в системе Земля – Солнце – окружающий космос. По современной классификации условно выделяют четыре группы циклов. *Сверхдлинные*, по 150–300 млн лет, отмечают самые значительные изменения экологической обстановки на Земле. Их связывают с ритмами тектоники и вулканизма. *Длинные* циклы, также связанные с ритмами вулканической деятельности, тянутся десятки миллионов лет. *Короткие* — сотни и тысячи лет — обусловлены изменениями параметров земной орбиты. Последняя категория — условно, *ультракороткие* — связаны с ритмами Солнца. Среди них есть цикл 2400 лет, около 200, 90, 11 лет. Не исключено, что именно эти ритмы являются определяющими в наблюдаемом потеплении на планете.



**Рис. 1.16.** Климатические индикаторы за последние 0,5 млн лет: изменение уровня океана, концентрация <sup>18</sup>O в морской воде, концентрация CO<sub>2</sub> в антарктических льдах

Ряд работ предполагает, что существуют механизмы, усиливающие эффект солнечной активности, которые не учитываются в современных моделях, или что важность солнечной активности в сравнении с другими факторами недооценивается (см., например, [Marsh, Svensmark, 2000]).

Существует множество гипотез современного потепления климата, в том числе:

- наблюдаемое потепление находится в пределах естественной изменчивости климата и не нуждается в отдельном объяснении;
- потепление явилось результатом выхода из малого ледникового периода;
- потепление наблюдается слишком непродолжительное время, поэтому нельзя достаточно уверенно сказать, происходит ли оно вообще.

**Некоторые механизмы влияния изменений солнечной активности на климат.** Утверждения многих метеорологов о том, что изменение солнечной активности не влияет на климат Земли, основывается на утверждении, что солнечная постоянная постоянна и, следовательно, Земля получает постоянное количество радиации. Спутниковые измерения солнечной постоянной показали: она равна 1365,8 Вт/м<sup>2</sup>. По среднегодовым значениям был обнаружен ее спад на 0,08 % в год. В 80-х гг. прошлого века тренд изменил знак на положительный. На фоне этого тренда появляются колебания солнечной постоянной с периодами от нескольких дней и недель до нескольких лет (увеличение солнечной постоянной при появлении солнечных пятен и уменьшение при появлении факелов).

Спутниковые измерения и восстановленные по ним значения величины солнечной постоянной колеблются в диапазоне 0,2–0,4 %. Такие значения солнечной постоянной могут объяснить изменение средней глобальной температуры воздуха примерно на 0,2–0,4 %. Но они не объясняют климатических трендов в несколько градусов, которые были в истории Земли в прошлом.

**Протонные вспышки.** Со временем осмысливаются некоторые непрямые механизмы влияния солнечной активности на климат. Так, например, протонные вспышки порождают корпускулярные потоки, проникающие в верхнюю атмосферу Земли, в зону геомагнитных полюсов. Эти частицы ионизируют верхние слои атмосферы и поглощаются ею. В результате происходит дополнительное нагревание верхней атмосферы. Она «выпучивается» в зоне полярных шапок, что сопровождается оттоком массы.

Это, по мнению некоторых ученых, может приводить к влиянию на общую циркуляцию атмосферы тем, что углубляется Исландский минимум (один из крупномасштабных квазистационарных центров действия атмосферы) и усиливается западно-восточный перенос (т. е. тип атмосферной циркуляции становится более зональным).

Кроме того, показано, что высокоэнергичные солнечные корпускулярные потоки могут проникать до уровня 300 мбар, образуя при этом ионы. Эти ионы становятся ядрами кристаллизации. На этих ядрах из окружающего воздуха сублимируется водяной пар и появляются так называемые перистые облака.

Высотная перистая облачность приводит к увеличению отражательной способности системы Земля – атмосфера. Вследствие этого понижается температура слоев атмосферы, расположенных выше уровня облаков. Перистые облака задерживают уходящее длинноволновое излучение. В результате повышается температура практически всей тропосферы.

Наблюдения показали, что всплеск рентгеновского излучения Солнца вызывает увеличение облачности в обоих полушариях на 0,25–0,5 балла. Это может привести к уменьшению радиационного баланса на 1–2 %. После сильных вспышек интенсивность рентгеновского излучения больше и облачность заметно возрастает — на 2–3 балла. Значит и радиационный баланс меняется заметнее.

**Гравитационные воздействия планет солнечной системы.** Существуют и другие механизмы влияния изменений солнечной активности на погоду и климат. Кроме того, солнечная активность, определяемая по числу солнечных пятен, — далеко не полная характеристика активности Солнца.

Солнечно-обусловленные механизмы могут объяснить климатические колебания с изменениями температуры не более чем в 1–2 °С, но не чередования ледниковых эпох, которые объясняются другой солнечно-обусловленной теорией палеоклимата, связанной с учетом изменений параметров земной орбиты под влиянием гравитационного взаимодействия планет Солнечной системы.

Изменение солнечной активности — одна из особенностей климата Солнца — обусловлено, по-видимому, гравитационными воздействиями планет Солнечной системы. Как известно, при ньютоновском тяготении два тела движутся друг относительно друга по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится центр инерции этих тел, а не Солнце (последнее связано со слишком упрощенной формулировкой первого закона Кеплера).

Таким образом, гравитационные воздействия планет Солнечной системы приводят к колебаниям орбитального момента Солнца и к приливам в нем. Как известно, масса Солнца составляет основную часть массы Солнечной системы, 99,8 %, а масса планет — всего 0,2 %, однако на них приходится около 98% момента количества движения всей Солнечной системы. Главную роль, безусловно, играют планеты-гиганты.

Центр инерции системы Солнце – Юпитер находится вне Солнца, на расстоянии от центра Солнца около 1,1 его радиуса. По-видимому, именно этим объясняются те факты, что 11-летние периоды цикла солнечных пятен близки к периоду обращения Юпитера (11,86 лет) и к такому же периоду орбитального движения Солнца вокруг центра инерции. Изменения орбитального движения создают в недрах Солнца гравитационные ускорения и порождают, в конечном счете, солнечные пятна.

Центр инерции системы Солнце – Сатурн находится на расстоянии около 0,6 радиуса от центра Солнца. Отметим, что этой системе свойствен период в 61 год, который проявляется как крупномасштабная модуляция 11-летнего солнечного цикла.

Отмеченные выше квазипериодические колебания активности Солнца отчетливо проявляются в излучении корпускулярного солнечного ветра и вмороженных в него магнитных полей. Они создают магнитные бури, полярные сияния и другие возмущения магнитосферы Земли. Однако они вносят незначительный вклад в падающий на Землю поток солнечного излучения (например, его изменения, связанные с 11-летним циклом, не превышают 0,1 % амплитуды). Именно поэтому 11-летние колебания не проявляются в спектрах глобальных и полушарных климатических рядов.

В то же время необходимо учитывать, что, хотя изменения солнечной активности не оказывают прямого воздействия на климатическую систему Земли

(в силу своей малости), те внешние гравитационные воздействия, которые стали причиной изменений солнечной активности, влияют напрямую и на Землю тоже. Гравитационные воздействия других небесных тел Солнечной системы создают вариации орбитального движения и собственного вращения Земли, причем не только такие долговременные как циклы Миланковича.

Известно, что 11-летние колебания, не проявляясь в глобальных климатических характеристиках, обнаруживаются в измеренных локально — особенно в средних и высоких широтах. Вполне возможно, что вариации орбитального движения и собственного вращения Земли, вслед за которыми варьируется инсоляция, недостаточно велики для того, чтобы повлиять на активную энергетически насыщенную тропическую зону (и которая дает основной вклад в глобальные характеристики), но достаточны, чтобы проявиться в средних и высоких широтах.

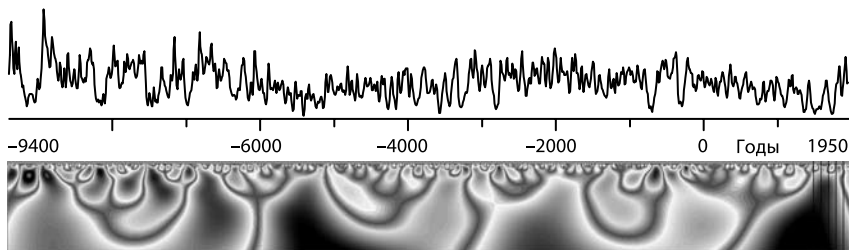
## 2. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ОСНОВЕ ПАЛЕОДАННЫХ И ДАННЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ЭПОХИ

В главе представлены данные о временных изменениях гео- и гелиофизических процессов разной физической природы, полученные в результате инструментальных наблюдений, а также о более длительных изменениях — палеоданные. Это временные последовательности различной протяженности, характеризующие изменение солнечной активности, поверхностной температуры океана и приземной температуры воздуха, параметров вращения Земли и циркуляции атмосферы, длительности суток и других физических процессов. Часть из выбранных физических процессов или природных явлений влияет на климатическую систему Земли и ее изменения, вариации других свидетельствуют об этих изменениях. Также приведены некоторые результаты их анализа при помощи фурье-анализа и локализованного спектрального анализа, основанного на математическом аппарате вейвлет-преобразования (далее WT — wavelet transform) [Daudechies, 1991; Астафьева, 1996].

Начало эпохи инструментально полученных данных относится к XVII в. Для изучения изменчивости климатической системы Земли зачастую такой длительности данных оказывается недостаточно. Палеоклиматология — наука об истории изменений климата — расширяет представления о протекавших в прошлом процессах и дает информацию, которая позволяет делать некоторые заключения о климатических изменениях климата в будущем. В палеоклиматологии используются различные косвенные опосредованные методы восстановления геофизических параметров. В качестве источников данных используются такие ресурсы как кольца деревьев (дендрохронология), ледяные керны, кораллы, напыления и другие. Оценка температуры воды, например, может осуществляться с помощью количественных соотношений изотопов кислорода  $^{18}\text{O}$  и  $^{16}\text{O}$ , углерода, метана и т. д.

### 2.1. WLF 11000 (десятилетние)

**Палеоданные солнечной активности (11-тысячелетняя реконструкция).** Прямые наблюдения солнечных пятен доступны лишь за последние три столетия (ряды Вольфа с 1500 г. представлены ниже, в п. 2.7), но при исследовании влияния активности Солнца на климат необходимы более длительные ряды.



**Рис. 2.1.** Восстановленный ряд солнечной активности WLF 11000 (вверху) и картина коэффициентов WT

Представленный на рис. 2.1 (вверху) ряд WLF 11000 реконструирован на основе концентрации радиоактивного изотопа углерода, полученного при изучении годовых колец деревьев, и характеризует изменение годового количества солнечных пятен за последние 11,4 тыс. лет [Solanki et al., 2004]. В нижней части рис. 2.1 представлена соответствующая картина коэффициентов WT. По оси абсцисс отложены годы с 9400 до н. э. по 1950 г.

Картина коэффициентов WT показывает, что долговременная динамика ряда хорошо описывается квазигармонической функцией. На масштабах около 3000 лет явно выделяются четыре области чередующихся коэффициентов WT с экстремумами на масштабах чуть менее 3000 лет. Обнаруженные масштабы и структура коэффициентов WT свидетельствует о наличии близкого к 6000-летнему цикла в долговременном изменении солнечной активности.

Более мелкомасштабная эволюция процесса (~1000–1100 лет) также выявляет достаточно регулярные чередующиеся структуры картины коэффициентов. Интересным представляется тот факт, что каждое событие масштаба ~3000 лет имеет форму «трезубца» — своеобразное утроение периода, где два крайних события формируют более крупные масштабы, образуя при этом очень сильные экстремумы противоположного знака.

На масштабах меньших, чем 1100-летние, структура картины коэффициентов WT нерегулярная и сложная. Первое отрицательное и третье положительное событие от начала ряда на данных масштабах имеют характерную структуру в виде вилок вплоть до 250-летних масштабов, указывая на нелинейность процесса на этих масштабах.

Картина коэффициентов WT опять становится достаточно регулярной по всей длине на масштабах порядка 400 лет, образуя квази800-летний цикл. Выявить какие-либо значимые тренды (увеличение или уменьшение амплитуд коэффициентов WT на протяжении некоторого значительного времени), на этих масштабах не удастся.

При рассмотрении еще более мелких масштабов ~100 лет можно также на протяжении всего ряда выделить квази200–300-летнюю цикличность, на которую накладывается более крупномасштабная модуляция.

Подробнее стоит коснуться последних 150 лет ряда, которые наиболее близки к нашему времени (между черными линиями на картине вейвлет-коэффициентов справа — 400 лет, с 1400 по 1800 г.). По структуре картины коэффициентов

WT видно, что минимум максимальных масштабов около 3000 лет был пройден в 1300–1350 гг. Начиная с 1800 г. заметен положительный тренд на малых масштабах, что позволяет говорить об усилении активности Солнца. Однако приведенный выше анализ позволяет предположить, что этот положительный тренд локален и не выйдет за пределы 1000-летних масштабов (для сравнения было рассмотрено аналогичное положительное событие в V тысячелетии до н. э.). В любом случае стоит отметить, что максимума, пусть и локального, мы еще не достигли, и в ближайшие 300 лет, судя по динамике ряда, следует ожидать продолжения положительного тренда в изменении солнечной активности.

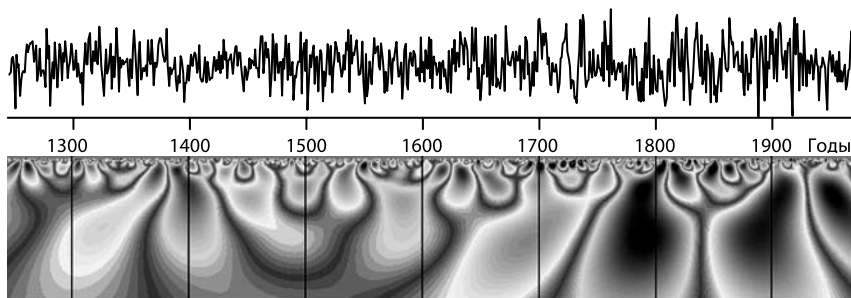
## 2.2. NAO 1245–1970 (годовые)

Индекс Северо-Атлантического колебания, NAO 1245–1970, представляет собой разность давлений, измеренных в зимне-весенний период года в двух пунктах наблюдения: в Исландии (64° с.ш., 24° з.д.) и вблизи Азорских островов (39° с.ш., 24° з.д.). Временной ряд индекса NAO 1245–1970 получен на основе климатического моделирования и инструментальных источников данных с высоким разрешением [Jones, Mann, 2004] (отметим, что методы получения данного ряда ставятся под сомнение одним из авторов этой работы).

На картине коэффициентов WT, рис. 2.2 (внизу), вертикальные линии отмечают каждое столетие.

Долговременная эволюция процесса NAO 1245–1970, на масштабах от 60 до 120 лет, интересна тем, что она делит анализируемый ряд на две эпохи, в которых доминируют разные характерные временные масштабы изменения процесса. Для первой эпохи во временном диапазоне от начала ряда (слева) и примерно до 1630 г. характерны колебания с периодом 80–85 лет. На картине вейвлет-коэффициентов можно видеть четыре характерные детали, соответствующие этим колебаниям процесса. Для второй эпохи, от 1630 г. и до конца ряда (справа), характерны более крупномасштабные колебания — с масштабом около 100 лет.

Динамика индекса NAO 1245–1970 на масштабах около 30 лет от начала ряда и до середины XV в. явно не прослеживается, однако с 50-х гг. XV в. можно выделить характерные периодические структуры положительных и отрицательных значений



**Рис. 2.2.** Изменение индекса Северо-Атлантического колебания NAO 1245–1970 (вверху) и картина коэффициентов WT



коэффициентов WT, достаточно регулярные до конца ряда. Стоит отметить, что амплитуды коэффициентов преобразования, свидетельствующие об интенсивности процесса, заметно усиливаются после 60-х гг. XVIII в.

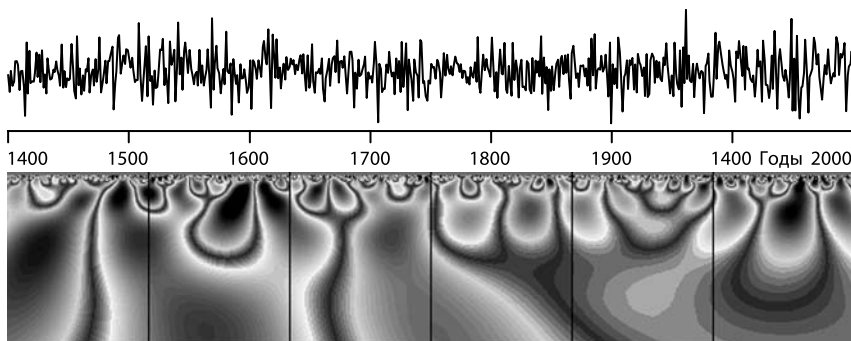
Структура коэффициентов на декадных масштабах может трактоваться неоднозначно (например, вследствие нелинейности или полиномиальности процесса). Динамика индекса NAO, основанная на значениях данного ряда, позволяет говорить о цикле, близком к 20-летнему, который заметен практически по всей длине ряда. Любопытен тот факт, что при смене «эпох», выделенных ранее на крупномасштабной динамике, происходит резкий скачок амплитуд коэффициентов WT на масштабах немногим менее 10 лет. В XIX в. на масштабах около 10–15 лет процесс NAO становится существенно нерегулярным.

### 2.3. NAO 1400–2001 (годовые)

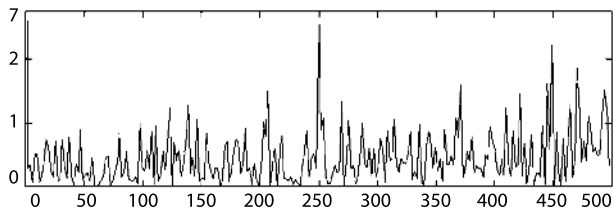
Индекс Северо-Атлантического колебания NAO 1400–2001, как и предыдущий, представляет собой разность давлений, измеренных в зимне-весенний период года в двух пунктах наблюдения: в Исландии (64° с.ш., 24° з.д.) и вблизи Азорских островов (39° с.ш., 24° з.д.). Ряд NAO 1400–2001 за период времени 1400–1979 гг. получен на основе хорошо зарекомендовавшего себя метода восстановления из различных источников по определенному алгоритму. Остальная часть данных получена в результате прямых наблюдений [Cook et al., 2002] (рис. 2.3).

Отметим, что минимальные корреляции между структурой коэффициентов WT рядов для NAO 1400–2001 и NAO 1245–1970 свидетельствуют о не очень большой надежности методов получения палеоданных и интерпретации результатов, основанных на их использовании.

Эволюция процесса на масштабах от 60 до 120 лет, наблюдаемая по значениям коэффициентов WT, выявляет две принципиально различные временные эпохи. Для первой эпохи, с начала ряда до конца XVIII в, характерны структуры масштабами порядка 140–150 лет. Для второй эпохи, выделяемой в течение двух последних столетий, говорить о каких-либо характерных масштабах не представляется возможным.



**Рис. 2.3.** Изменение индекса Северо-Атлантического колебания NAO 1400–2001 (вверху) и картина коэффициентов WT



**Рис. 2.4.** Фурье-спектр процесса NAO 1400–2001

Масштабы около 30 лет более представительны и характерны для данного процесса; их также можно разбить на две эпохи. Коэффициенты WT до 1700 г. показывают наличие периодичности на масштабах ~45–50 лет. На рубеже XVII и XVIII вв. происходит «слом» периодичности, вызванный наличием двух описанных выше эпох индекса NAO. С начала XVII в. и до конца ряда структура коэффициентов преобразования практически периодическая на масштабах ~30 лет, что позволяет уверенно говорить о наличии 60-летнего цикла.

На более мелких масштабах в первой эпохе, выделяемой до 30-х гг. XVIII в., «господствует» 15-летняя периодичность с очень сильными и яркими событиями в течение первых двух столетий. Вторая половина ряда с XVII в. и далее до конца XIX в. имеет периодическую структуру на масштабах около 10 лет, с заметно усилившейся интенсивностью в XX в.

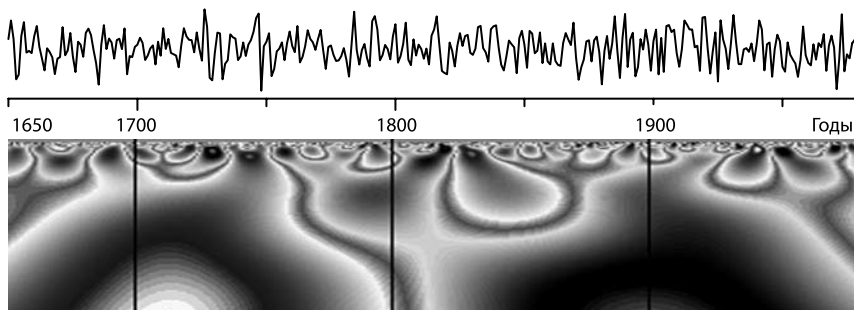
На рис. 2.4 представлен фурье-спектр процесса NAO 1400–2001 (по оси абсцисс отложены частоты).

Для наглядного сравнения возможностей и интерпретации результатов (спектральных характеристик процесса), получаемых на основе WT и преобразования Фурье, в работе приведены три спектра Фурье для разных рядов. Как видно на рис. 2.4, фурье-спектр ряда зимних индексов процесса NAO 1400–2001 не выявляет сколько-нибудь значимых частот. Можно выделить несколько более значимый пик в середине представленного спектра, который соответствует масштабу около двух лет, но и этот масштаб, ввиду дискретизации ряда (годовые данные), ставится под сомнение.

#### 2.4. Nino3 1408–1978 (годовые)

Временной ряд Nino3 1408–1978 представляет собой реконструкцию одной из характеристик явления Эль-Ниньо — индекса Nino3, определяемого как усредненное отклонение температуры поверхности океана от нормальной температуры в области Тихого океана с координатами (150° с.д. – 90° з.д., 5° ю.ш. – 5° с.ш.). Индекс характеризует проявления процесса Эль-Ниньо в период с декабря по февраль каждого года в приэкваториальной части Тихого океана. Ряд реконструирован на основе нарастания кораллов с исключенным биологическим трендом.

Ряд Nino3 1408–1978 очень нерегулярен на всех масштабах. Представляется любопытной структура картины коэффициентов WT, выделяемая с середины XVII в. до конца XIX в. (рис. 2.5). Характерная «вилочковая» структура свидетельствует о сильной нелинейности процесса. В динамике процесса можно выделить масштаб



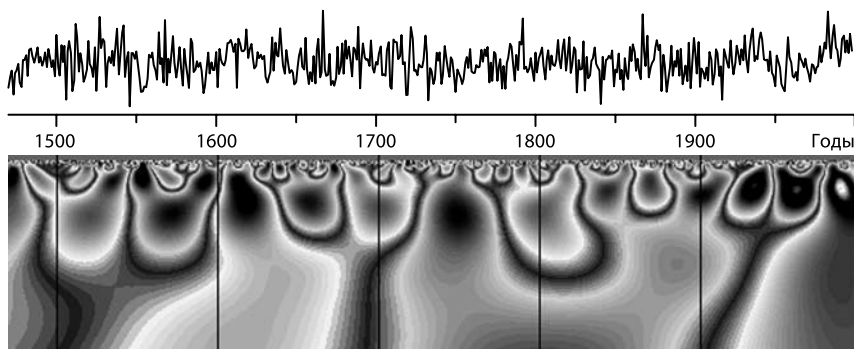
**Рис. 2.5.** Изменение индекса Nino3 1408–1978 (вверху) и картина коэффициентов WT

порядка 35–40 лет в первой половине ряда и 30-летний масштаб, характерный для временного диапазона с середины XIX в. и до конца ряда.

На более мелких масштабах ряд достаточно регулярен по всей длине. Однако выделить четкий период не представляется возможным, можно лишь отметить близкую к 12–20-летней цикличность. Интересно, что на смене XV в. появляются детали типа «вилок» на малых масштабах, сходные по структуре с более крупномасштабной частью картины коэффициентов WT.

### 2.5. PDO 1470–1998 (годовые)

Тихоокеанское декадное колебание PDO 1470–1998 — колебание температуры поверхности океана в северной части Тихого океана. При построении ряда PDO 1470–1998 используются данные о засухливости и наводнениях на побережьях северной части Тихого океана [Shen et al., 2006] (рис. 2.6). Индекс определяется по температуре поверхности океана (ТПО) и рассчитывается как первая мода разложения аномалий ТПО на эмпирические ортогональные функции в северной



**Рис. 2.6.** Изменение индекса PDO 1470–1998 (вверху) и картина коэффициентов WT

внетропической части Тихого океана. Когда ТПО в зимнее время аномально низкая в центральных районах северной части Тихого океана, а давление над уровнем моря ниже среднего значения для Тихого океана, то индекс PDO 1470–1998 положителен — это теплая фаза осцилляции. Если наоборот — значения индекса PDO 1470–1998 отрицательные — это холодная фаза осцилляции. Изучение индекса PDO 1470–1998 показало высокую корреляцию с временными вариациями летних ливней в восточном Китае.

Структура коэффициентов WT достаточно четко выявляет на максимальных масштабах две области приблизительно по 180–200 лет (с положительными и отрицательными коэффициентами WT). Выводы о 400-летнем цикле для ряда протяженностью 600 лет несколько сомнительны ввиду недостаточной длины ряда.

Динамика индекса PDO 1470–1998 на масштабах от 30 до 60 лет гораздо более представительна и интересна. Для ряда, очень гладкого на данных масштабах, можно выделить две временные эпохи: с начала ряда до начала XIX в. и с начала XIX в. и до конца ряда. В первой эпохе выделяется явная 80-летняя периодичность, а во второй — близкий к 30-летнему цикл, с заметно нарастающей амплитудой коэффициентов WT в XX в.

Масштабы до 10 лет в структуре ряда достаточно регулярны. Период квазидесятилетних колебаний составляет около 8–15 лет. Отметим резкое увеличение амплитуд WT в XX в., что позволяет говорить о нарастающем тренде для данных масштабов.

## 2.6. ELN 1473–1993 (годовые)

Анализируемый ряд ELN 1473–1993 — одна из характеристик явления Эль-Ниньо — основан на свидетельствах о количестве тайфунов в Южном Китае, холодных зимах в Восточной Азии, засухах в Австралии, наводнениях на Ниле и в Чили, т. е. о природных явлениях, причиной которых могли быть события Эль-Ниньо [Shaowu, 1992]. Ряд состоит из нулей (в годы, когда, по мнению автора, весь ком-

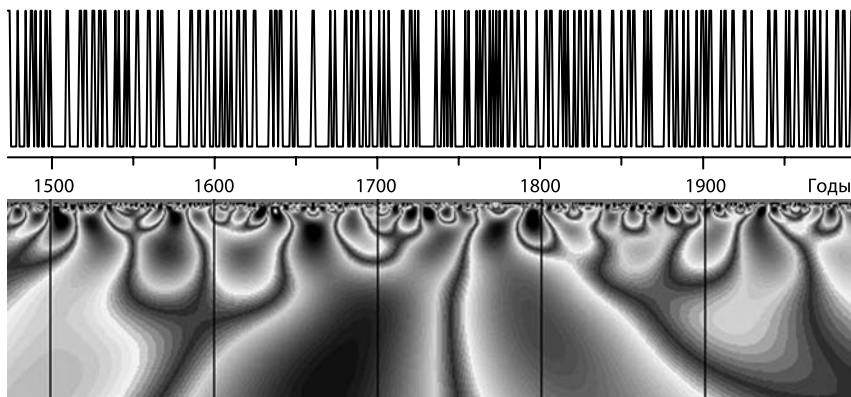


Рис. 2.7. Картина коэффициентов WT событий Эль-Ниньо (ELN 1473–1993)

плекс явлений свидетельствует об отсутствии событий Эль-Ниньо) и единиц (в годы с Эль-Ниньо) (рис. 2.7).

На максимальных масштабах стоит выделить две области с положительными и отрицательными коэффициентами WT, продолжительностью около 150 лет, следующие друг за другом. Однако, ввиду недостаточной длины ряда, невозможно с уверенностью говорить о цикле длиной ~300 лет.

Картина коэффициентов WT выявляет квазипериодическую структуру на масштабах 35–37 лет по всей длине ряда. На основе этого можно считать, что сам ряд на этих масштабах достаточно гладкий и регулярный. Масштаб около 35–40 лет может быть связан с известным 70–80-летним циклом событий Эль-Ниньо [Астафьева, 1997].

Мелкомасштабная эволюция явлений Эль-Ниньо наиболее четко прослеживается с самого начала ряда на масштабах порядка 12–15 лет. Ввиду неоднородности продолжительности событий и их амплитуд стоит говорить о квази25–30-летнем цикле. При детальном рассмотрении стоит выделить и события 4-летнего масштаба, которые, «пересоединяясь» на разных участках ряда, образуют квази-9–10-летнюю компоненту. Масштаб 9–10 лет обычно связывают с 18,6-летним лунным циклом, который присутствует в динамике засух, наводнений и, например, в ходе температуры приповерхностного воздуха в Северной Америке.

### 2.7. Wolf 1500–1993 (годовые)

Временной ряд чисел Вольфа является одной из характеристик солнечной активности. Ряд Wolf 1500–1993 содержит данные за период с 1500 по 1993 г. и основан на изменении числа солнечных пятен (числа Вольфа) [Bryant, 1997] (рис. 2.8).

Как указывалось выше, **минимумом Маундера** называют период долговременного уменьшения количества солнечных пятен примерно с 1620 по 1710 г. По подсчетам Маундера, за этот период наблюдалось всего около 50 солнечных пятен вместо обычных 40–50 тыс. При этом подавляющее большинство пятен возникало в южном полушарии Солнца. Минимум Маундера совпадает по времени с наиболее

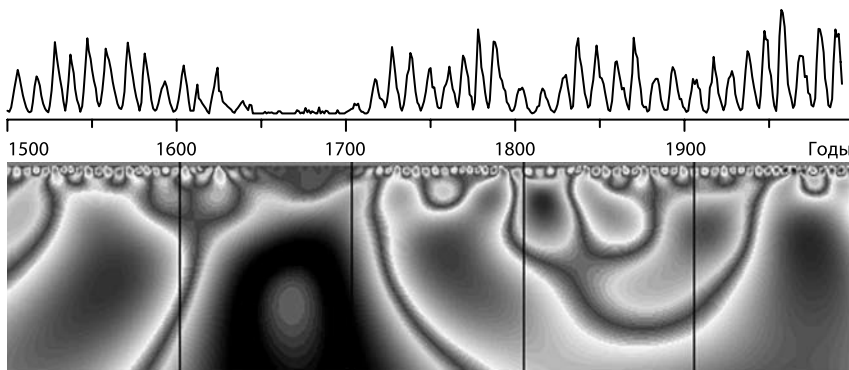


Рис. 2.8. Изменение чисел Вольфа Wolf 1500–1993 (вверху) и картина коэффициентов WT

холодной фазой глобального похолодания климата, отмечавшегося в течение XIV–XIX вв. (так называемый малый ледниковый период).

Минимум Маундера и его последствия являются самым значительным событием XVII в. В более близкой к нам по времени части ряда можно выделить еще два периода снижения солнечной активности. Это так называемый период Далтона, длившийся с 1787 по 1843 г., и более слабый, но более продолжительный период уменьшения количества пятен в конце позапрошлого — начале прошлого веков. Несмотря на влияние на картину коэффициентов минимума Маундера и других, масштаб около 90–110 лет проявляется по всей длине ряда, правда, с заметно меняющейся амплитудой экстремумов.

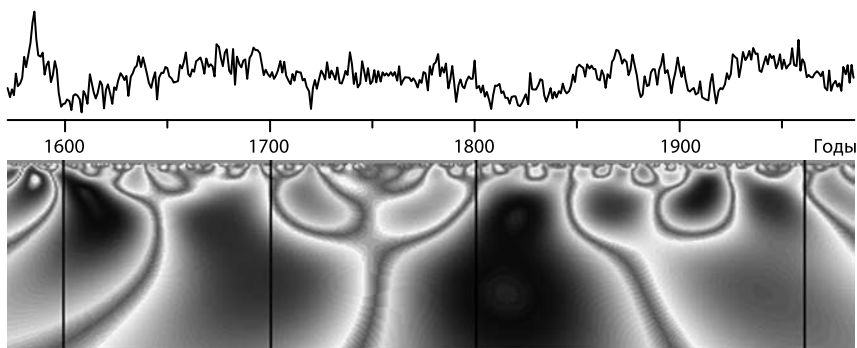
Структура коэффициентов WT на масштабе ~30 лет очень нерегулярна и аperiодична. Наблюдаются два противоположных события на смене XVI в.; события близких масштабов встречаются (без учета минимума Маундера) до XVIII в., после чего масштаб периодичности возрастает до ~40 лет.

Коэффициенты WT на масштабе около 6 лет образуют очень гладкую и периодическую на всей длине (за исключением минимума Маундера) структуру. Близкая к 11-летней цикличность, наблюдаемая в количестве солнечных пятен, хорошо известна. Более длинный ряд Wolf 1500–1993 лишь подтверждает этот известный цикл.

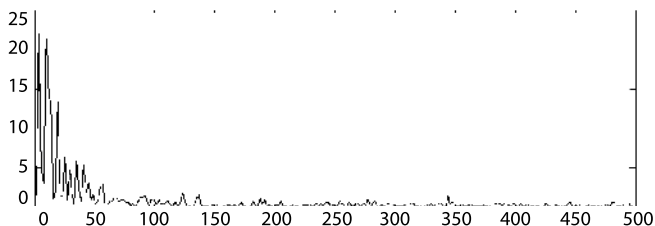
### 2.8. АМО 1572–1985 (годовые)

АМО 1572–1985 (Atlantic Multidecadal Oscillation) — Атлантическое мульти-декадное колебание — представляет собой долгопериодное изменение температуры поверхности в Северной части Атлантического океана, с холодными и теплыми фазами. Ряд построен по реконструированным ежегодным температурным аномалиям северной части Атлантического океана (0–70° ш.) [Gray et al., 2004] (рис. 2.9).

Гармонический характер крупномасштабной динамики процесса ярко и наглядно проявляется в структуре картины коэффициентов WT — масштаб около 120 лет выделяется по всей длине ряда. Стоит отметить, что амплитуда этой гармонике к концу ряда уменьшается.



**Рис. 2.9.** Изменение индекса АМО 1572–1985 (вверху) и картина коэффициентов WT



**Рис. 2.10.** Фурье-спектр АМО 1572–1985

На протяжении всей длины ряда присутствуют чередующиеся положительные и отрицательные детали картины  $WT$ , образующие 80-летнюю периодичность, очень регулярную и чуть ослабевающую (по амплитуде) в XVIII в.

Более мелкомасштабная динамика процесса не столь наглядна. Яркие события XIX в. на близких к 10-летнему масштабам сменяются почти полным исчезновением периода, например, в XX в. В первой половине ряда на этих масштабах происходят аналогичные «провалы», например, в XVII в. данные масштабы практически отсутствуют. Интересен факт смены двух самых ярких событий (максимума и минимума коэффициентов  $WT$ ) между XV и XVI вв. Структура этих событий выбивается из общей картины событий и может быть связана со способом построения данных.

На рис. 2.10 представлен фурье-спектр процесса АМО 1572–1985 (по оси абсцисс отложены частоты).

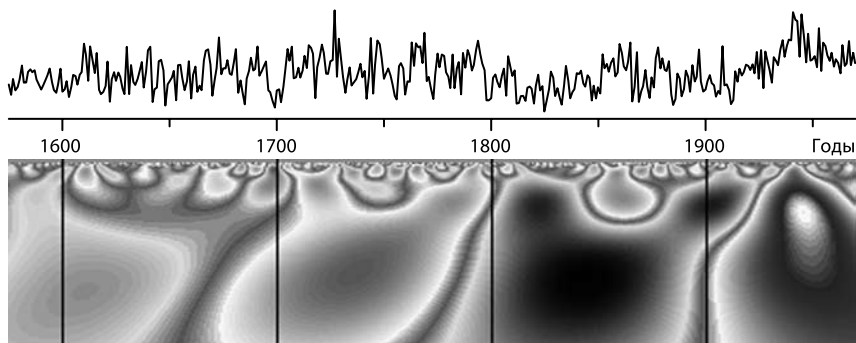
На фурье-спектре ряда АМО 1572–1985 хорошо видны крупные масштабы, однако, вероятнее всего, часть выявленных максимумов амплитуд является гармониками одного или двух масштабов. В любом случае спектр четко «улавливает» масштабы около 120 и 30 лет. О мелких масштабах по полученному фурье-спектру судить не представляется возможным.

### 2.9. TMR 1575–1970 (годовые)

Ряд TMR 1575–1970 представляет собой реконструированную среднюю температуру воздуха за период май–сентябрь, которая коррелирует с годовыми температурами поверхностного воздуха в районе полуострова Таймыр [Jacoby et al., 1978]. Самые северные хвойные деревья сосредоточены внутри Арктического кольца в зоне острова Таймыр в северной Сибири. Они служат естественными «рекордерами» температурных воздействий на протяжении столетий, реагируя на эти воздействия различной интенсивностью деления клеток.

Структура температуры, восстанавливаемая по картине коэффициентов  $WT$  на масштабах около 110 лет, имеет явно выраженный период. На протяжении всего ряда указанные масштабы разбивают картину на практически четыре одинаковые части. Вне зависимости от абсолютной величины значений коэффициентов, следует отметить итеративно нарастающую амплитуду событий данного масштаба от начала ряда к его концу (рис. 2.11).

По всей длине ряда также можно выделить 35–40-летние масштабы. Значения экстремумов коэффициентов  $WT$  увеличиваются к концу ряда, что позволяет говорить о положительном тренде самой температуры.



**Рис. 2.11.** График ряда TMR 1575–1970 (вверху) и картина коэффициентов WT

Интересна также структура событий XVIII и XIX вв. — подобная уже встречалась при анализе 11000-летнего ряда солнечной активности, WLF 11000. Структуры масштаба около 35–40 лет через одно событие противоположного знака «пересоединяются» в 110-летние масштабы, являющиеся, по всей вероятности, гармоникой более мелких масштабов.

На масштабах чуть менее 10 лет ряд коэффициентов WT достаточно гладок и цикличен и лишь начало XIX в. (первые 30–35 лет) выпадает из общей картины. Следует отметить, что на данном масштабе положительного тренда в увеличении значений коэффициентов, а, следовательно, и исследуемых температур, в отличие от больших масштабов, не наблюдается.

### 2.10. NT 1579–1983 (годовые)

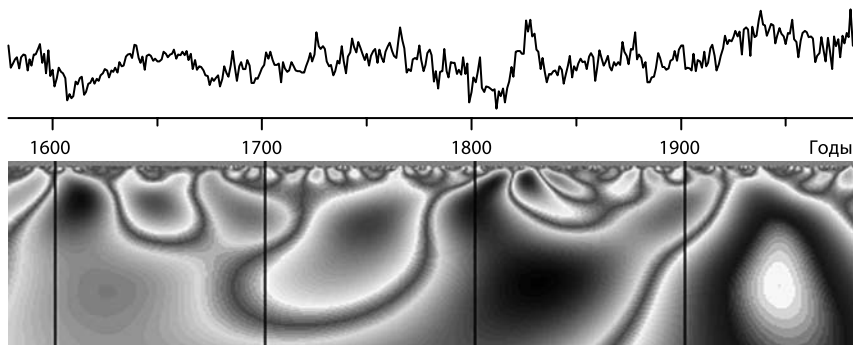
Временной ряд поверхностной температуры воздуха северного полушария NT 1579–1983 создан на основе двух временных рядов для значений температуры [Groverman, Landsberg, 1979; Борзенкова и др., 1976].

Крупномасштабная динамика процесса сходна с динамикой температуры Таймыра, TMR 1575–1970, — ряды вообще очень хорошо коррелированы. По всей длине ряда прослеживается масштаб от 90 до 110 лет, который разбивает картину на практически четыре одинаковые части (рис. 2.12). Следует обратить внимание на итеративно нарастающую амплитуду событий данного масштаба. Картина коэффициентов WT в целом очень похожа на полученную для ряда TMR 1575–1970.

По всей длине ряда отчетливо выделяются 35–40-летний масштаб, на котором амплитуды WT так же, как в ряде температур Таймыра, заметно нарастают с течением времени. В конце ряда выделяется сильнейшее положительное событие. Отметим также, что на этих масштабах увеличение амплитуд WT не столь велико, как на предыдущих (больших) масштабах и для сходных масштабов ряда TMR 1575–1970.

На масштабах около 10 лет ряд периодичен практически на всей длине, однако коэффициенты WT образуют наиболее гладкую составляющую ряда на данных масштабах с конца XVII по середину XVIII в. Отметим также, что на данном масштабе по-





**Рис. 2.12.** График ряда NT 1579–1983 (вверху) и картина коэффициентов WT

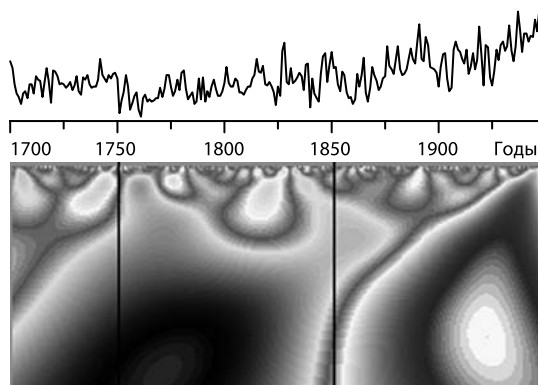
ложительного тренда в увеличении значений коэффициентов WT, а, следовательно, и исследуемых температур не наблюдается. Напомним, что положительный тренд появился на масштабах  $\sim 30$  лет и рос до максимальных масштабов  $\sim 100$  лет.

Обратим внимание на очень сильное событие в 40-х гг. XX в., сравнимого с которым в ряде просто нет. Это же событие на том же временном отрезке стало следствием сильного максимума в рядах температур Таймыра, TMR 1575–1970.

### 2.11. TO 1750–1997 (годовые)

Ряд TO 1750–1997 представляет реконструкцию температуры поверхности океана для всей тропической области от  $-30$  до  $+30^\circ$  широты (по кораллам, расположенным в различных частях Индийского и Тихого океанов [Wilson, Mordvinov, 1999]).

В силу ограниченной длины ряда не представляется возможным адекватно проанализировать масштабы от 60 лет и выше (рис. 2.13). Противоположные по



**Рис. 2.13.** Ряд температуры поверхности тропического океана TO 1750–1997 (вверху) и картина коэффициентов WT

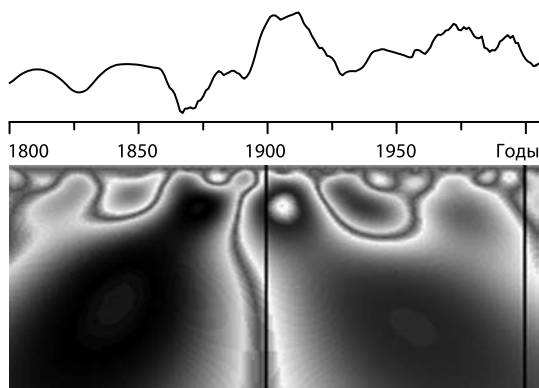
знаку события, разбивающие на две части картину коэффициентов WT, могут свидетельствовать о наличии как 150-летнего масштаба, так и положительного крупномасштабного тренда.

До 1900 г. на масштабах ~30 лет ряд достаточно регулярен, однако крупномасштабная компонента XX в. подавила эти масштабы до конца ряда. На масштабах порядка 15 лет ряд более регулярен по всей длине и именно на этих масштабах виден значительный рост амплитуды значений коэффициентов WT после 50-х гг. XX в. Событие XX в., очевидно, не является следствием серии каких-либо значительных мелкомасштабных событий — характер изменения коэффициентов WT позволяет предположить, что данное событие было инициировано каким-то внешним воздействием.

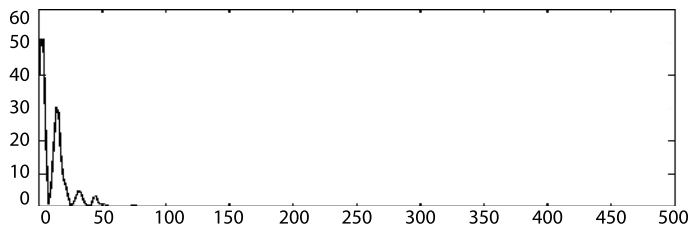
### 2.12. LDT 1800–2005 (годовые)

Ряд LDT 1800–2005 представляет собой ежегодные данные изменения длительности суток. Часть ряда реконструирована: до 1860 г. данные получены как производные кубического сплайна, соответствующего отдельным значениям разницы между солнечным и динамическим временем; с 1860 по 1955 г. длительность дня была получена с помощью квадратичной свертки по пяти точкам; начиная с 1956 г., ряд состоит из данных инструментальных наблюдений. Длительность суток обратно пропорциональна частоте обращения Земли вокруг своей оси (рис. 2.14). Так как с вращением Земли связаны количество получаемого различными областями планеты солнечного тепла, а также изменения в движениях атмосферы, эта характеристика представляет интерес наряду с другими рядами.

Ряд очень симметричен относительно смены XVIII–XIX вв. практически на всех масштабах. Касаясь крупномасштабной динамики, стоит назвать XVIII в. «холодным» веком, а XIX в., наоборот, «теплым». Максимумы обоих событий находятся на уровне 120–130-летнего масштаба, однако длина ряда не позволяет с уверенностью говорить о периодичности на этих масштабах.



**Рис. 2.14.** Изменение длительности суток LDT 1800–2005 (вверху) и картина коэффициентов WT



**Рис. 2.15.** Фурье-спектр ряда LDT 1800–2005

На масштабах около 30 лет временная эволюция ряда циклична. Максимумы событий приходятся на смену XVIII–XIX вв. и по своей амплитуде намного превышают все остальные положительные и отрицательные события данного ряда. Любопытной кажется уже описанная выше структура триплетов, характерная также для рядов солнечной активности и температуры Таймыра.

Мелкомасштабная динамика процесса изменения индекса длительности суток интересна вблизи 12 лет, где структура некоторых событий аналогична структуре на 30-летних масштабах.

На рис. 2.15 представлен фурье-спектр ряда LDT 1800–2005 (по оси абсцисс отложены частоты).

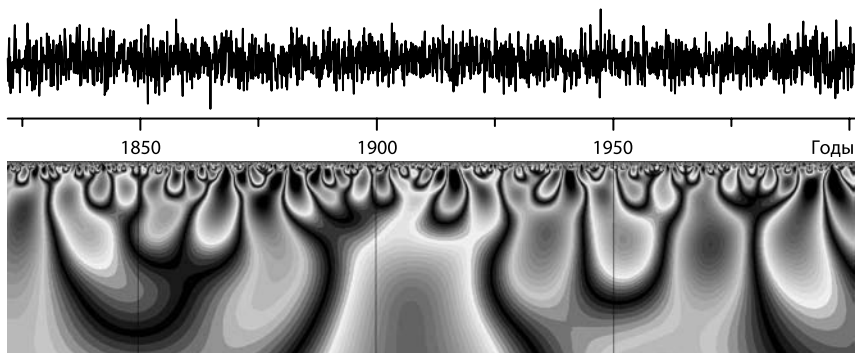
Фурье спектр отчетливо выявляет гармонику на частоте, соответствующей 130-летним масштабам (она самая значимая по амплитуде на графике). Помимо этого выявляются частоты, которым соответствуют 30-летний, 15-летний (который, скорее всего, являются гармоникой 30-летнего) и 11-летние масштабы. Таким образом, все характерные масштабы WT для данного ряда хорошо выявляются и фурье-анализом.

### 2.13. NAO 1822–2000 (ежемесячные)

Индекс Северо-Атлантического колебания определяется как нормализованная разность атмосферного давления между двумя станциями: на Азорских островах и в Исландии. Ряд индексов NAO 1822–2001 (рис. 2.16) составлен на основе данных наблюдений в юго-западной Исландии (Рейкьявик), на Гибралтаре и Азорских островах (Понта Дельгада) [Jones et al., 2001].

Масштабы около 20 лет для данного процесса не примечательны и дают достаточно скудную информацию для анализа. Однако следует отметить, что именно отрицательные события XIX в. и середины XX в. «пересоединяются» в схожие структуры — триплеты, образуя, по-видимому, 35-летние события. На рубеже XVIII–XIX вв. происходит разделение картины коэффициентов вейвлет-преобразования на две эпохи, а именно: до этого рубежа на графике преобладают масштабы порядка 12 лет, после него очень ярко проявляют себя масштабы около 17 лет (отметим четыре сменяющихся положительных и отрицательных события). То есть существует большая вероятность существования 35–40-летнего цикла, уже обнаруженного ранее на более длинных климатических рядах.

На меньших масштабах структура ряда нерегулярная и квазипериодичная по всей длине ряда с циклом от одного до 3 лет. То есть в рядах с месячной



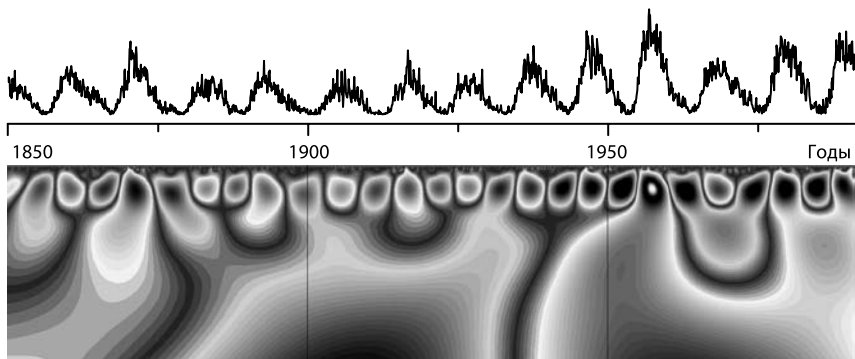
**Рис. 2.16.** Изменение индекса Северо-Атлантического колебания NAO 1822–2001 (вверху) и картина коэффициентов WT

дискретизацией уже проявляются известные квазигодовая (широкий максимум около 1,19 года) и квазидвухлетняя (около 2,38 года, связанная с чандлеровским колебанием полюсов) цикличности. Отметим, что на масштабах около трех лет видна более крупномасштабная модуляция — максимумы и минимумы амплитуд коэффициентов на масштабе около трех лет практически повторяются через каждые 30 лет.

#### 2.14. WLF 1850-1991 (ежемесячные)

Ряд WLF 1850-1991 получен в результате прямых ежедневных наблюдений солнечной активности с последующим усреднением за месяц (рис. 2.14).

Ряд четко выявляет известный 11-летний цикл солнечной активности. На больших масштабах прослеживается и 22-летний цикл, связанный с магнитной переполусовкой Солнца. Как известно, каждые два последовательных 11-летних цикла солнечных пятен сопровождаются одним изменением магнитных полей всех



**Рис. 2.17.** Изменение солнечной активности WLF 1850-1991 (вверху) и картина коэффициентов WT

солнечных пятен и других магнитных образований на Солнце, т.е. являются лишь половинами солнечного цикла общей длительностью в 23,7 года. Видна также близкая к 60-летней модуляция.

### 2.15. GT 1856–2005, NGT 1856–2005 и SGT 1856–2005 (ежемесячные)

Ряды GT 1856–2005, NGT 1856–2005 и SGT 1856–2005 представляют собой результаты прямых наблюдений температурных отклонений и включают наземные данные и данные водной поверхности (рис. 2.18, 2.19). Данные водной поверхности основаны на температурах поверхности океана, собранных с буев и полученных благодаря различным измерениям на морских судах. Ряды построены отдельно для температуры Северного и Южного полушарий и для всего земного шара — глобальная температура.

В диапазоне 10–30 лет примечательным можно считать масштаб порядка 22 лет. Он прослеживается на всех трех графиках и именно на нем ряды периодичны и достаточно регулярны. По нему также очень четко прослеживается крупномасштабный тренд, неуклонно растущий от начала к концу ряда и заметно усиливающийся к 2005 г. К сожалению, говорить о том, что тренд пойдет на убыль, не приходится, так как к данному моменту наблюдается небольшой спад после локального пика температур данного масштаба, однако сам тренд позволяет говорить о своем нарастании на более крупных масштабах. Следует также отметить, что предпосылки глобального потепления, о котором достаточно много говорится, имели место еще в 30-е гг. прошедшего XX в.

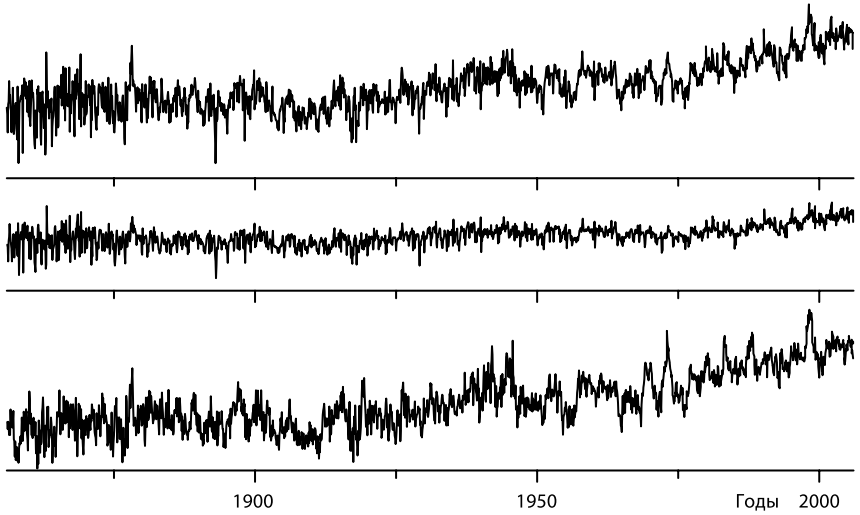
Все три ряда достаточно регулярны на масштабах около 3–4 лет и образуют квази8–12-летнюю цикличность. Ряды глобальных температур и температур Северного полушария более гладки на этих масштабах, чем ряд температур Южного полушария.

Наиболее заметное различие между полушариями состоит в запаздывании тренда в Южном полушарии: периоды потепления в Северном полушарии начинаются раньше и являются несколько более значительными, чем в Южном. Основной причиной такого различия может быть неравномерное распределение суши, большая часть которой приходится на Северное полушарие. Необходимо принимать во внимание также тот факт, что метеостанций в Южном полушарии всегда было меньше и, возможно, данные по Южному полушарию менее представительны.

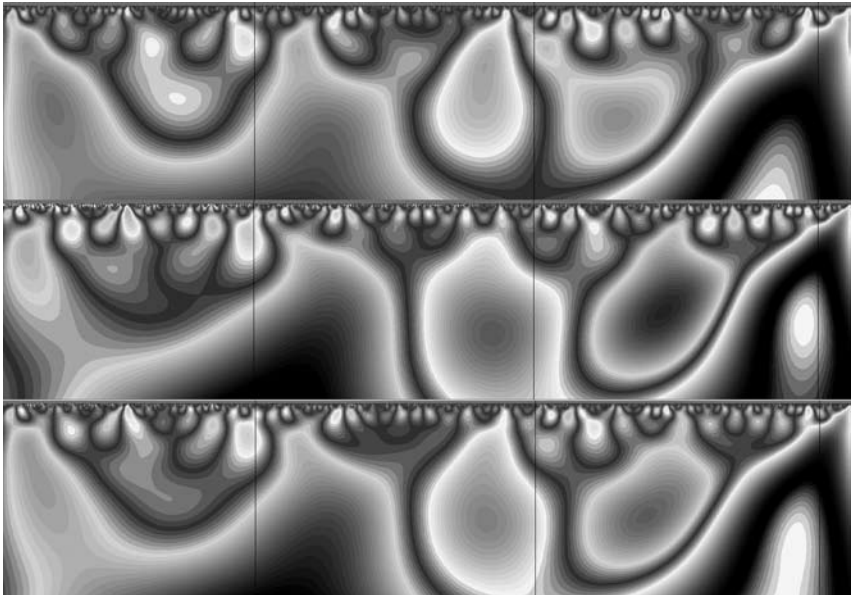
Хорошо заметная цикличность периодов потепления и похолодания на масштабах около 10–11 лет (т.е. с цикличностью около 22 лет) формирует более длительные эпохи потепления и похолодания климата, сменяющие друг друга без выраженной регулярности. Более или менее длительные эпохи продолжительностью около 20 лет (от > 10 до < 30 лет) с повышением и понижением среднегодовой температуры сменяли друг друга в течение всего анализируемого периода времени без ярко выраженной регулярности. Так, эпохи потепления можно наблюдать примерно в 60-е и 80-е гг. XIV в. и на рубеже XIV и XX вв., в середине XX в. и в конце ряда.

### 2.16. OMG 1955–1990 (ежемесячные)

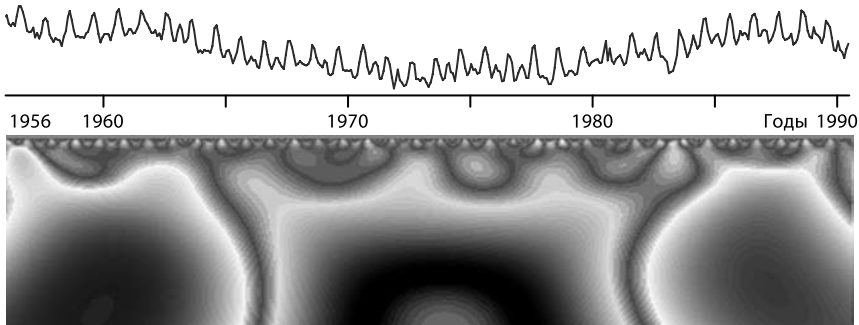
Проведен анализ временно́го ряда изменений угловой скорости вращения Земли с 1955 по 1990 г. [Сидоренков, 2000а]. Ряд составлен с месячной дискретизацией, полученной усреднением ежедневных данных (рис. 2.20).



**Рис. 2.18.** Отклонения температуры: глобальной GT 1856–2005, для Северного NGT 1856–2005 и Южного SGT 1856–2005 полушарий (сверху вниз)



**Рис. 2.19.** Картины коэффициентов WT для рядов, показанных на рис. 3.18



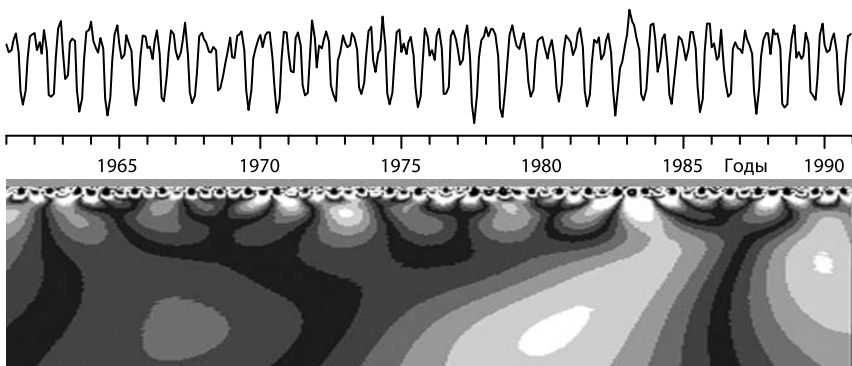
**Рис. 2.20.** Изменение угловой скорости вращения Земли OMG 1955–1990 (вверху) и картины коэффициентов WT

Анализ показывает годовой ход с квазидвухлетней и 4–5-летней циклическостью и более крупномасштабной компонентой около 13 лет, соответствующей примерно 23–25-летней циклическости изменений угловой скорости вращения Земли. Также четко видны полугодовые масштабы, образующие годовой цикл. Стоит отметить, что годовая компонента достаточно регулярная и гладкая, по амплитудам коэффициентов не удалось выявить сколько-нибудь значимых трендов.

### 2.17. ZON 1961–1990 (ежемесячные)

Рассмотрен временной ряд изменений скорости зональной циркуляции атмосферы Земли с 1961 по 1990 г. [Сидоренков, 2000а]. Ряд составлен с месячной дискретизацией, полученной усреднением ежедневных данных (рис. 2.21).

Анализ показывает присутствие тех же временных масштабов, что и в изменениях угловой скорости вращения Земли: годовой ход с квазидвухлетней, 4–5-летней



**Рис. 2.21.** Изменение скорости зональной циркуляции атмосферы Земли ZON 1961–1990 (вверху) и картины коэффициентов WT

циклическими и более крупномасштабной компонентой около 13 лет, соответствующей примерно 26-летней цикличности изменений скорости зонального ветра в атмосфере. Стоит отметить, что масштабы, соответствующие примерно 25–26-летней цикличности для циркуляции, имеют временной лаг порядка 6 лет по сравнению с угловой скоростью вращения Земли.

Интерес представляет и внутригодовая изменчивость, а именно масштабы до четверти года, соответствующие сезонным изменениям. Внутри года присутствует четко выраженный минимум значений и его масштаб — до полугода. Максимум значений коэффициентов имеет более сложную структуру: он состоит из двух положительных событий и одного отрицательного между ними. Два положительных сезона «замазывают» отрицательную компоненту, образуя годовую цикличность.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И НЕКОТОРЫЕ ВЫВОДЫ

Проведен анализ временных рядов различной природы, так или иначе характеризующих состояние климатической системы Земли. Для детального анализа процессов, влияющих на климатические изменения, необходимо изучение данных различной временной протяженности. Это позволит понять взаимовлияния как внутри одного процесса и между процессами на различных временных масштабах, так и, возможно, обнаружить влияние внешних воздействий. Помимо этого, для выявления локализованных особенностей рядов и специфики поведения процессов на междугодных и внутригодных масштабах необходима различная дискретизация в данных ряда.

Для удовлетворения вышеперечисленных условий были выбраны данные (временные ряды данных), описывающие физические процессы — разные, но влияющие на климат или изменяющиеся под влиянием климатических изменений: солнечная активность, индексы основных атмосферных колебаний, скорость зональной циркуляции атмосферы, температура воздуха и поверхности океана и другие. Для указанных процессов был проведен анализ соответствующих временных рядов (часть результатов представлена выше).

Основное внимание было сконцентрировано на долговременных характеристиках климатической системы — многовековых, внутривековых и междугодных. Потому были выбраны палеоданные протяженностью от нескольких тысяч до нескольких сотен лет и данные инструментальной эпохи, полученные прямыми инструментальными наблюдениями и измерениями (с дискретизацией в год и месяц). Такие данные позволили проанализировать крупномасштабные изменения процессов.

#### 3.1. Основные характерные масштабы

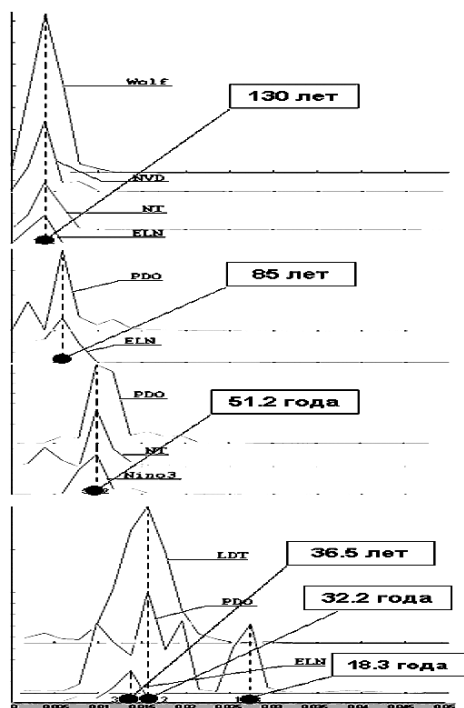
В результате анализа было выявлено, что даже если климат и является квазигармоническим процессом, то под влиянием множества разномасштабных внешних воздействий и внутренних взаимодействий его спектральный состав становится очень сложным и климатическая система не имеет чистых периодичностей. При этом масштабы изменений рядов все-таки можно разбить на группы (хотя, может быть, и несколько условно).



Детальное рассмотрение описанных временных рядов позволило выявить и проанализировать их на отдельных временных масштабах. С помощью вейвлет-преобразования, которое раскладывает ряд на составляющие волны разного масштаба, были выделены наиболее значимые масштабы изменения климатических характеристик. Оказалось также, что наиболее значимых масштабов не так много и что отдельные из них (или близкие к ним) характерны для многих из рассмотренных процессов, несмотря на их разную физическую природу.

Выявленные наиболее значимые характерные масштабы можно разбить на группы, соответствующие одному из следующих масштабов (или близкие к одному из них): 130 лет; 85; 50; 32–36 лет. Часть полученных результатов сгруппирована на рис. 3.1.

Отметим, что обнаруженные, близкие 130-летнему, масштабы, свидетельствующие о 260–270-летнем цикле, подвергались сомнению для рядов длительностью до 400 лет ввиду ограниченности длины ряда. Для верификации данного масштаба был проведен анализ ряда палеоданных количества осадков в области третьего климатического региона штата Невада (с 6000 г. до н.э. по 1996 г.), который также выявил указанный характерный масштаб (аббревиатура NVD на рис. 3.1).



**Рис. 3.1.** Фурье-спектры выделенных масштабов; для каждой выделенной пунктиром частоты указан масштаб в годах; по оси абсцисс отложена частота

Полученные таким образом общие характерные масштабы изменений процессов разной физической природы позволяют исследовать наличие различных взаимных влияний и откликов событий одного процесса на события другого процесса, а также определить временной лаг между этими событиями, если он существует.

#### **Корреляция между изменением процессов на выделенных масштабах.**

В рамках данной работы проведен кросс-корреляционный анализ полученных на основе вейвлет-преобразования матриц амплитуд коэффициентов для рядов с выявленными одинаковыми или близкими характерными масштабами. Полученные на основе анализа результаты достаточно сложны для демонстрации, поэтому здесь приведем несколько упрощенные и более наглядные результаты. С помощью вейвлет-преобразования можно представить временной ряд в виде композиции «вейвлетных волн» с коэффициентами, зависящими от номера волны (частоты или временного масштаба) и от времени. Выбрав такие «вейвлетные волны» на выявленных ранее характерных наиболее значимых временных масштабах, можно сравнить их структуру для разных процессов.

*На масштабах около 130–140 лет* ряды можно разделить на две группы. В первой группе для рядов NAO 1400–2001 и ELN 1473–1993 прослеживается отклик на отрицательное событие в рядах солнечной активности, соответствующее минимуму Маундера (около 1660 г.). Для ряда ELN 1473–1993 временной лаг отклика составляет около 15 лет, а для ряда NAO 1400–2001 — около 30 лет. Отметим, что в температурных рядах отклик на минимум Маундера не обнаруживается.

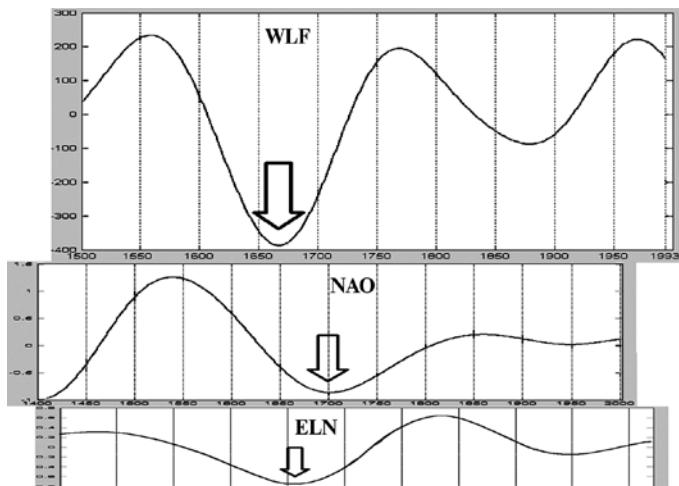
На рис. 3.2 представлено изменение коэффициентов WT на масштабе 132 года для процессов Wolf 1500–1993, NAO 1400–2001 и ELN 1473–1993 (сверху вниз). Стрелками показано положение минимума Маундера, а также соответствующих минимумов процессов Эль-Ниньо и NAO.

На рис. 3.3 показано изменение коэффициентов WT на том же масштабе 132 года для процессов AMO 1572–1985, TMR 1575–1970 и NT 1579–1983 (сверху вниз). Любопытно отметить «отставание» ряда TMR 1575–1970 от ряда NT 1579–1983, несмотря на то, что оба ряда характеризуют состояние климата Северного полушария. Лаг между экстремумами составляет около 13 лет. При этом события ряда для температуры Северного полушария отстают от событий ряда AMO 1572–1985 на 7–8 лет.

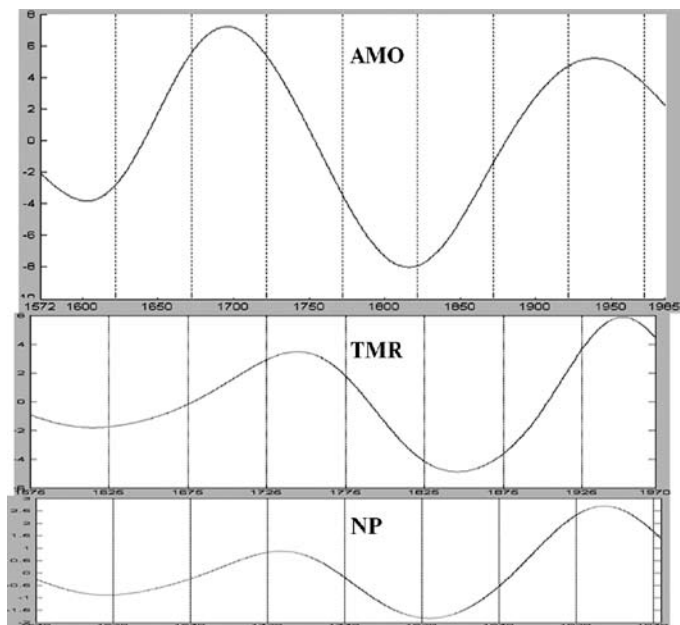
Стоит отметить хорошую положительную корреляцию между рядами TMR 1575–1970 и LDT 1800–2005.

*На масштабах около 85 лет* между представленными на рис. 3.4 слева коэффициентами WT для рядов ELN 1473–1993 и PDO 1470–1998 прямой корреляции не обнаружено. Отметим лишь, что оба процесса «чувствуют» влияние минимума Маундера (его положение отмечено стрелкой): в PDO это прослеживается в событии 1670 г., когда цикл, соответствующий данному масштабу, претерпевает изменения; ряд El-Nino «реагирует» нерегулярностями событий на данном масштабе. Период «реакции» составляет более ста лет: на протяжении этого отрезка процесс как бы возвращается в нормальный — «домаундеровский» режим.

На масштабах около 50 лет, представленных на рис. 3.4 справа, отклик на минимум солнечной активности Маундера в рядах, PDO 1470–1998 и NT 1579–1983 отсутствует. В ряде Nino3 1408–1978 после 1660 г. характерные события на данных масштабах заметно «теряют» в амплитуде значений, изменяется при этом несколько и цикл — он уменьшается до 80 лет.



**Рис. 3.2.** Коэффициенты WT на масштабе 132 года для рядов Wolf 1500–1993, NAO 1400–2001 и ELN 1473–1993 (сверху вниз)



**Рис. 3.3.** Коэффициенты WT на масштабе 132 года для рядов AMO 1572–1985, TMR 1575–1970 и NT 1579–1983 (сверху вниз)

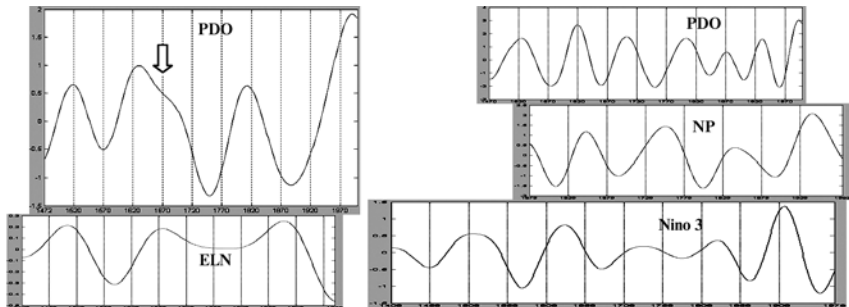


Рис. 3.4. Коэффициенты WT на масштабах ~85 лет (слева) и ~50 лет (справа)

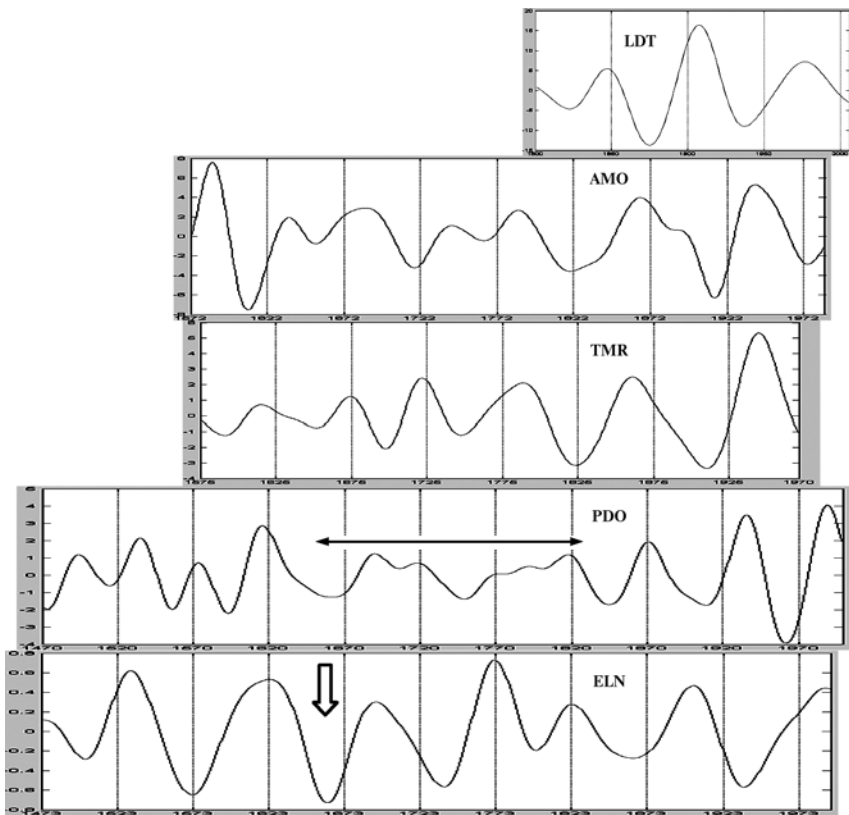


Рис. 3.5. Коэффициенты WT около 35 лет (стрелкой отмечен минимум Маундера)

*Масштабы около 35 лет* (рис. 3.5). Самым заметным наблюдением на данных масштабах можно считать отклик ряда PDO 1470–1998 на минимум Маундера. Событие, отмеченное контурной стрелкой на кривой для ELN 1473–1993 (хорошо уложившееся в цикл процесса Эль-Ниньо на данных масштабах), оказало существенное влияние на PDO. График показывает, что PDO «пытается вернуться» на прежние масштабы, однако это не удается, и цикл событий увеличивается с 45 до 65–70 лет (отмечено горизонтальной стрелкой). Можно предположить, что появление в этот же период двугорбых максимумов у АМО также связано с изменением солнечной активности.

Интересно изменение цикла в ряде TMR 1575–1970 с 50 до 70–75 лет, произошедшее во второй половине XVIII в. После чего наблюдается заметная корреляция между указанным рядом и АМО 1572–1985. Отметим также заметную отрицательную корреляцию между указанными процессами и изменением длительности суток LDT 1800–2005 на данных масштабах.

### 3.2. Глобальная температура воздуха и солнечная активность

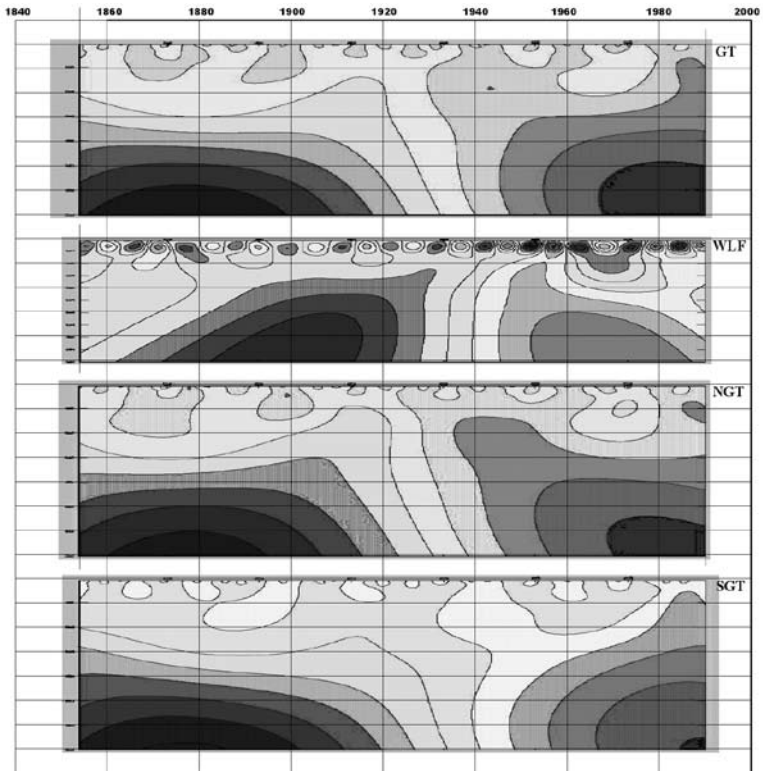
Анализ долговременных рядов среднегодовой поверхностной температуры воздуха на основании рядов Джонса (1850–1990) для глобальной и полушарной температур (GT 1856–2005, NGT 1856–2005 и SGT 1856–2005, соответственно) не выявляет наличие 11-летнего цикла в изменении температуры, который ярко выражен в изменчивости солнечной активности, где данный цикл прослеживается очень четко в числах Вольфа, WLF 1850–1991.

Кроме того, как видно из рис. 3.6, и в температурных рядах и в рядах солнечной активности присутствует вековая изменчивость, которая в изменении глобальных и полушарных температур возникает раньше, чем в солнечной активности. Можно предположить, что вековая изменчивость в температурах не связана напрямую с влиянием изменений активности на Солнце, а обе эти характерные особенности имеют общую (внешнюю) причину. Объяснение этого факта еще предстоит в дальнейшем. Ясно, что в исследуемых рядах ярко выражены околорекордные изменения.

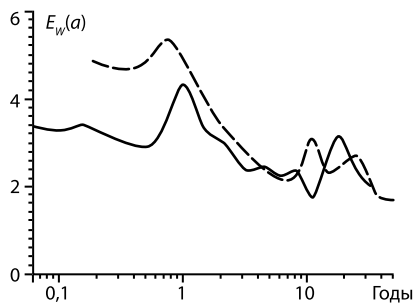
Отметим, что, несмотря на отсутствие 11-летней цикличности в изменении глобальных температур, заметная (положительная или отрицательная) корреляция с 11- и 22-летним циклом наблюдается в изменениях локальной температуры. На рис. 3.7 представлены глобальные спектры мощности, полученные по коэффициентам вейвлет-преобразования для чисел Вольфа и температуры воздуха в г. Оренбурге.

**Угловая скорость вращения Земли и импульс зональных ветров.** Анализ изменений угловой скорости Земли и импульса зональных ветров показал близкую к 20-летней цикличность в обеих характеристиках. Кроме того, выявлено, что изменения крупномасштабной компоненты отклонения момента импульса зональных ветров в 1955–1990 гг. в атмосфере запаздывают приблизительно на 5,5–6 лет относительно отклонений угловой скорости вращения Земли (рис. 3.8).

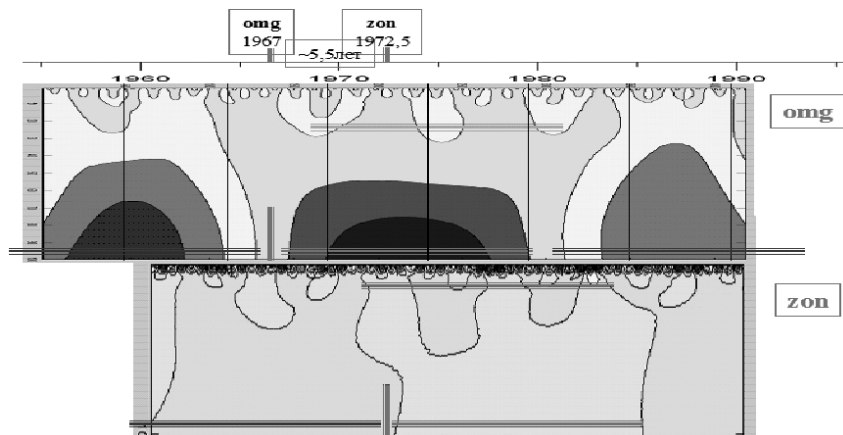
Сравнение с результатами анализа изменений глобальной температуры и солнечной активности показало, что в 1960–1985 гг. наблюдались очень похожие структуры в изменении температуры Северного полушария, чисел Вольфа, угловой скорости вращения Земли и скорости зональных ветров в атмосфере. Структура, появившаяся в характеристике солнечной активности (максимум в 1969 г.), проявляется



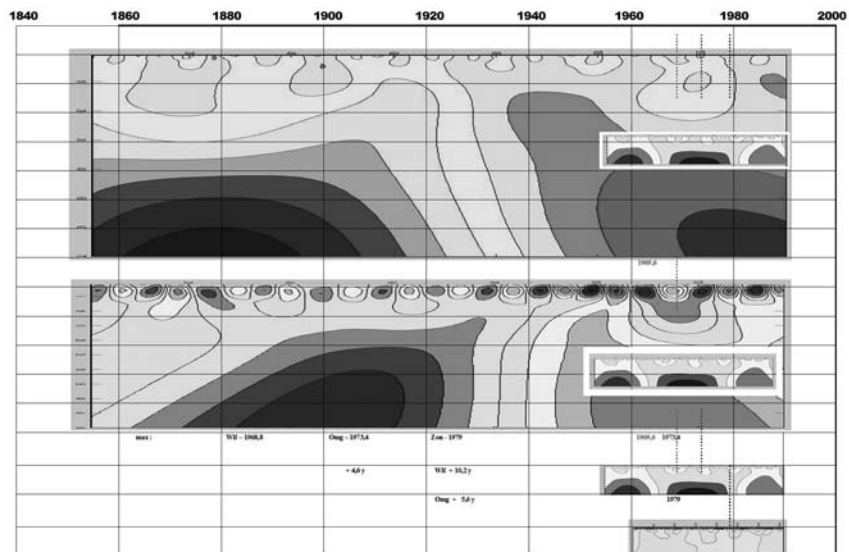
**Рис. 3.6.** Картины коэффициентов вейвлет-преобразования для глобальной температуры воздуха, чисел Вольфа, температуры воздуха Северного и Южного полушарий (деление по горизонтали соответствует 10 годам)



**Рис. 3.7.** Глобальные спектры мощности чисел Вольфа (пунктир) и поверхностной температуры воздуха в г. Оренбурге



**Рис. 3.8.** Картины WT для угловой скорости вращения Земли (вверху) и скорости зональных ветров в атмосфере



**Рис. 3.9.** Картины WT (сверху вниз) для температуры Северного полушария, чисел Вольфа, угловой скорости вращения Земли и скорости зональных ветров в атмосфере

похожими изменениями в угловой скорости вращения Земли и в изменениях температуры Северного полушария (максимум 1973 г.) через ~4,5 года, а затем в скорости зонального ветра в атмосфере (максимум в 1979 г.) — через ~10 лет. Это легко видеть на рис. 3.9 (на картинах вейвлет-преобразования температуры и чисел Вольфа вставлены фрагменты картины для угловой скорости вращения Земли).

### 3.3. Эль-Ниньо и изменения орбитального и углового момента Солнца

Считается, что процесс Южное колебание – Эль-Ниньо (ЮКЭН) наиболее ярко демонстрирует внутренние колебания климатической системы и не подвержен внешним влияниям. Однако можно утверждать, что ЮКЭН, явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья находятся под сильным воздействием Солнца — внешнего фактора.

События Эль-Ниньо происходят крайне нерегулярно — с диапазоном от 2 до 7 лет. Аномалии температуры хорошо согласуются с индексом ЮК, за исключением случаев вулканической активности. Эль-Ниньо считается хорошим показателем климатической изменчивости и вызывает большой интерес. Пока нет статистических или физических моделей, могущих предсказать наступление Эль-Ниньо более чем за 12 месяцев. Существует мнение, что погодный шум и детерминистический хаос внутренней изменчивости климатической системы являются основными препятствиями для таких предсказаний.

Внешний периодический и квазипериодический приток энергии вызывает колебания системы океан – атмосфера. Процесс изучения влияния на ЮКЭН притока солнечной радиации обычно состоит в поисках связей с периодами максимумов и минимумов количества солнечных пятен (с 11-летними колебаниями), являющихся показателем солнечной активности. Легко показать отсутствие такой прямой зависимости.

Тем не менее, связь есть. Так, например, самые сильные события Эль-Ниньо происходят не на экстремумах чисел Вольфа, а вблизи резких градиентов. То есть на события Эль-Ниньо оказывает влияние не сам 11-летний цикл солнечной активности, а нахождение на его восходящей или нисходящей ветвях.

На рис. 3.10 показана скорость изменения орбитального углового момента Солнца в его нерегулярном движении вокруг центра масс Солнечной системы.

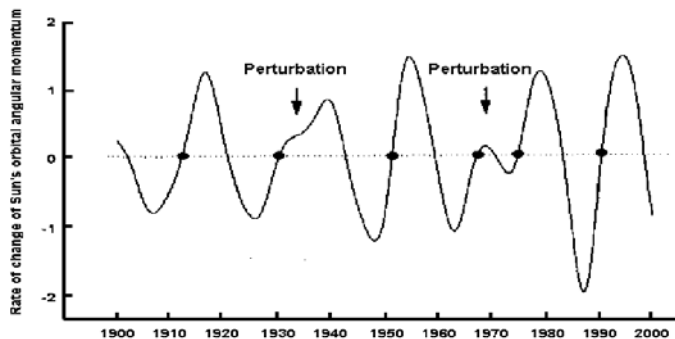
Возмущения почти синусоидального цикла видны вблизи 1933 и 1968 гг. Возмущения накладываются на квазициклическое движение со средним периодом около 35,8 лет. Начала циклов показаны точками. Стрелки отмечают возмущения в квазисинусоидальном цикле.

На рис. 3.11 приведено изменение орбитального углового момента Солнца в течение десяти 11-летних циклов солнечной активности (пять циклов Хейла) и соответствующие изменения индекса Южного колебания (SOI).

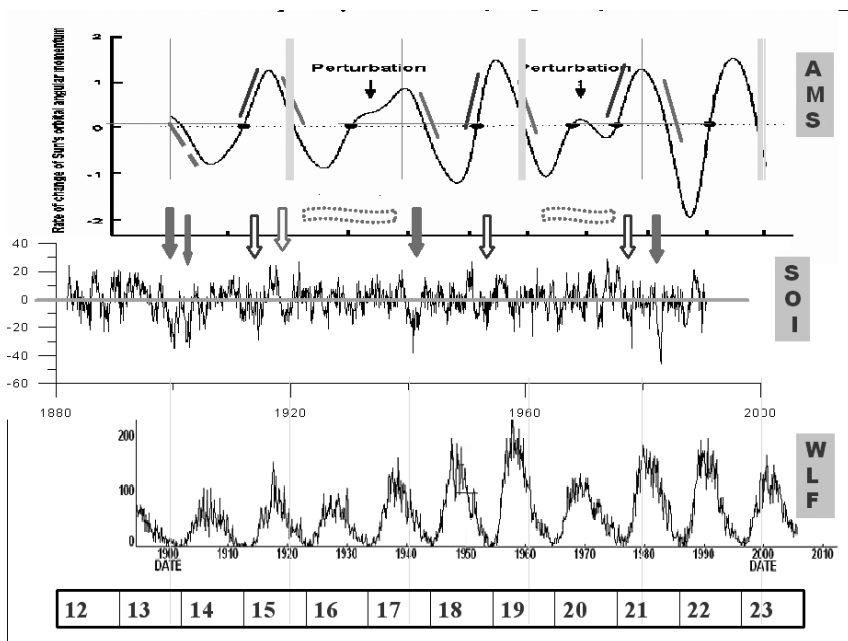
Тонкими вертикальными линиями отмечены ~20-летние промежутки времени (циклы Хейла), более толстыми — ~40-летние промежутки. Сплошными и контурными стрелками отмечены наиболее интенсивные явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Длина ряда недостаточна для окончательных выводов, однако близкая к 40-летней повторяемость видна и в изменении орбитального углового момента Солнца и в изменениях индекса Южного колебания.

Солнце вращается вокруг своей оси дифференциально. Изменения углового момента влияют на изменения активности Солнца (Babcock's solar dynamo model).





**Рис. 3.10.** Скорость изменения орбитального углового момента Солнца в его нерегулярном движении вокруг центра масс Солнечной системы в течение прошлого столетия



**Рис. 3.11.** Скорость изменения орбитального углового момента Солнца (AMS), индекс Южного колебания (SOI) и числа Вольфа (WLF)

Кроме изменений углового момента при вращении Солнца вокруг оси, орбитальный угловой момент Солнца испытывает нерегулярные колебания вокруг центра масс Солнечной системы. В результате возмущения углового момента могут достигать четверти своего значения, что также влияет на вариации солнечной активности (а также и на Землю).

Известно, что на восходящей или нисходящей частях цикла солнечной активности наблюдается разная интенсивность X-лучей. Высокоэнергетичные космические лучи, модулированные солнечной радиацией, влияют на высокие облака над Мировым океаном, а, следовательно, на альбедо и температуру, а она или является спусковым механизмом или тесно связана с началом явления Эль-Ниньо. Вторично ионизованные частицы могут изменять облачный покров примерно на 3 % за 3 года, что соответствует изменению радиации от 0,8 до 1,7 Вт/м<sup>2</sup> (напомним, что влияние индустриального CO<sub>2</sub> оценивается в 1,5 Вт/м<sup>2</sup>).

Таким образом, проведен комплексный анализ большого числа данных наблюдений за изменениями гелио- и геофизических параметров, полученных в результате наблюдений в инструментальную эпоху (за последние 130–170 лет) и палеоданных. Рассмотренные данные характеризуют изменения климатической системы Земли на разных временных масштабах. Полученные результаты свидетельствуют, в частности о следующем:

- **Для между- и внутривековой изменчивости климатических процессов характерно небольшое число выделенных масштабов.** Несмотря на сложность и мультимасштабность процессов климатической системы, анализ междувековой и внутривековой изменчивости геофизических параметров показал наличие небольшого числа выделенных масштабов, характерных для разных процессов климатической системы (см. рис. 3.1); это масштабы близкие к 130–140; 70–90; 50; 30–40 и 18–20 гг.
- **Существует отклик климатической системы на изменения солнечной активности в период минимума Маундера (1620–1710).** Интересно, что его влияние практически не сказалось на *структуре изменения температуры воздуха* (или рядов, целиком построенных по свидетельствам проявления Эль-Ниньо на суше), но привело к заметным изменениям *в структуре и амплитуде индексов, связанных с процессами в океане (Nino3, NAO)*. Похоже, что океан в течение нескольких десятилетий недополучал солнечного тепла, отдавая при этом положенную долю тепла атмосфере. Влияние минимума Маундера сказалось довольно быстро, но максимальным стало с временной задержкой, разной для разных процессов (временной лаг отклика для Эль-Ниньо ~30 лет и Северо-Атлантического колебания ~15 лет). В структуре температурных рядов отклик на минимум Маундера не обнаруживается. Анализ долговременных изменений на основе длинного палеоряда (NVD, длиной 8 тыс. лет) показал, что похожие минимумы были в истории Земли неоднократно — примерно три раза в тысячелетие (с масштабом в ~140 лет, периодом ~280 лет). Близкий к этому значению масштаб (~130–140 лет) был обнаружен практически во всех анализируемых данных (за исключением Nino3).
- **11-летняя цикличность отсутствует в изменениях сильно усредненных по пространству глобальных характеристик.** Обычно при изуче-

нии влияния изменений солнечной активности на климатические процессы занимаются поиском самого явного 11-летнего цикла в анализируемых данных. Анализ показал, что такая цикличность отсутствует в изменениях глобальных характеристик (сильно усредненных по пространству — таких, например, как глобальные или полушарные ряды поверхностной температуры воздуха Джонса). В то же время во многих данных локальных измерений такая цикличность изменений (или 22-летняя цикличность Хейла с учетом магнитной переполковки) обнаруживается.

### Литература

- Акасофу С.И., Чепмен С.* (1974) Солнечно-земная физика. Ч. 1. М.: Мир, 1974. 384 с.
- Астафьева Н.М.* (1996) Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
- Астафьева Н.М.* (1997) Анализ долговременной структуры индекса Южного колебания и событий Эль-Ниньо // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1997. Т. 33. № 6. С. 850–859.
- Бакулин П.И.* и др. (1977) Курс общей астрономии. М.: Наука, 1977. 543 с.
- Борзенкова, И.И., Винников К.Я., Спирина Л.П., Стехновский Д.И.* (1976) Вариации температуры воздуха Северного полушария за период с 1881 по 1975 г. // Метеорология и гидрология. 1976. № 7. С. 27–35.
- Кондратьев К.Я.* (2004) Глобальные изменения климата: данные наблюдений и результаты численного моделирования // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 2. С. 61–96.
- Кондратьев К.Я.* (1983) Спутниковая климатология. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 262 с.
- Космическая физика.* (1966) М.: Мир, 1966. 740 с.
- Миланкович М.* (1939) Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л.: ГОНТИ; Ред. техн.-теорет. лит., 1939.
- Монин А.С.* (2000) Влияние планет на климат Земли // Глобальные изменения природной среды. М.: Науч. мир. 2000. С. 122–128.
- Монин А.С., Сонечкин Д.М.* (2005) Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы. М.: Наука, 2005. 191 с.
- Монин А.С., Шишков Ю.А.* (1979) История климата. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 407 с.
- Монин А.С., Шишков Ю.А.* (2000) Климат как проблема физики // Успехи физ. наук, 2000. Т. 170. № 4. С. 419–445.
- Паркинсон У.* (1986) Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986. 527 с.
- Семенченко Б.А.* (2002) Физическая метеорология. М.: Аспект Пресс, 2002. 415 с.
- Сидоренков Н.С.* (2002a) Атмосферные процессы и вращение Земли. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. 200 с.
- Сидоренков Н.С.* (2002b) Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Физматгиз, 2002. 383 с.
- Сорохтин О.Г.* (2006) Эволюция и прогноз изменений глобального климата Земли. М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исслед.; НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. 88 с.
- Хромов С.П., Петросянц М.А.* (2006) Метеорология и климатология. М.: Изд-во МГУ, 2006. 582 с.
- Чемберлен Дж.* (1981) Теория планетных атмосфер. М.: Мир, 1981. 352 с.
- Шкловский И.С.* (1978) Вселенная, жизнь, разум. М.: Наука, 1987. 352 с.

- Эдди Дж. (1978) История об исчезнувших пятнах // Успехи физ. наук РАН. 1978. Т. 125. № 2. С. 315–329. (*John A. Eddy. The Case of the Missing Sunspots // Scientific American. 1977. V. 236. N. 5. P. 80–88 / Пер. Н.И. Гинзбург.*)
- Bryant E. (1997) *Climate Process and Change*. Cambridge University Press, 1997. 209 p.
- Cook E.R., D'Arrigo R.D., Mann M.E. (2002) A Well-Verified, Multiproxy Reconstruction of the Winter North Atlantic Oscillation Index Since A.D. 1400 // *J. Climate*. 2002. V. 15. P. 1754–1764.
- Daudechies I. (1991) Ten lectures on wavelets // CBMS Lecture Notes Series. SIAM. Philadelphia. 1991. 136 p. (*Добешу И. Десять лекций по вейвлетам. М.; Ижевск, 2001.*)
- Frohlich C., Lean J. (1998) The Sun's total irradiance: Cycles and trends in the past two decades and associated climate change uncertainties // *Geophysical Research Letters*. 1998. V. 25. P. 4377–4380.
- Gray S.T., Graumlich L.J., Betancourt J.L., Pederson G.T. (2004) A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 A.D. 2004.
- Groveman B.S., Landsberg H.E. (1979) Simulated Northern Hemisphere temperature departures 1579–1880 // *Geophysical Research Letters*. 1979. V. 6. P. 767–769.
- Jacoby G.C., Lovelius N.V., Shumilov O.I., Raspopov O.M., Karbainov J.M., Frank D.C. (1978) Long-term temperature trends and tree growth in the Taymir region of northern Siberia // *Quaternary Research*. 1978. V. 53(3). P. 312–318.
- Jones P.D., Mann M.E. (2004) *Climate Over Past Millennia*. Reviews of Geophysics 42. RG2002. 6 May 2004.
- Jones P.D., Osborn T.J., Briffa K.R. (2001) The Evolution of Climate Over the Last Millennium // *Science*. 2001. V. 292(5517). P. 662 (April 27, 2001).
- Landscheidt T. (2003) New Little Ice Age Instead of Global Warming? // *Energy and Environment*. 2003. V. 14. P. 327–350.
- Marsh N., Svensmark H. (2000) *Cosmic rays, clouds and climate* // Space Science Reviews: Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. 2000. P. 1–16.
- Newitt L.R., Manda M., Meke L.A., Orgeval J.J. (2002) Recent Acceleration of the North Magnetic Pole Linked to magnetic jerks // EOS, Transaction American Geophysical Union. 2002. V. 83. N. 35. P. 387–389.
- Shaowu W. (1992) Reconstruction of the El-Nino event chronology for the last 600 year period // *Acta Meteorologica Sinica*. 1992. V. 6. N. 1. P. 47–57.
- Shen C., Wang W.-C., Gong W., Hao Z. (2006) A Pacific Decadal Oscillation Record Since 1470 A.D. Reconstructed from Proxy Data of Summer Rainfall Over Eastern China // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. L03702. Febr.
- Solanki S.K., Usoskin I.G., Kromer B., Schessler M., Beer J. (2004) An unusually active Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years // *Nature*. 28 Oct., 2004. V. 431. N. 7012. P. 1084–1087.
- Willson R.C., Mordvinov A.V. (1999) Tim-Frequency Analysis of Total Solar Irradiance Variations // *Geophysical Research Letters*. 1999. V. 26. P. 3613–3616.

## Содержание

Введение .....	1
1. Некоторые составляющие климатической системы Земли факторы изменчивости климата .....	4
1.1. Солнце — единственный источник приходящей на Землю радиации .....	4
1.2. Долго- и коротковременные изменения солнечной активности .....	9
1.3. Земля — движение по орбите .....	14
1.4. Некоторые физические факторы и механизмы изменения климата .....	22
2. Долговременные изменения климата на основе палеоданных и данных инструментальной эпохи .....	28
2.1. WLF 11000 (десятилетние) .....	28
2.2. NAO 1245–1970 (годовые) .....	30
2.3. NAO 1400–2001 (годовые) .....	31
2.4. Nino3 1408–1978 (годовые) .....	32
2.5. PDO 1470–1998 (годовые) .....	33
2.6. ELN 1473–1993 (годовые) .....	34
2.7. Wolf 1500–1993 (годовые) .....	35
2.8. AMO 1572–1985 (годовые) .....	36
2.9. TMR 1575–1970 (годовые) .....	37
2.10. NT 1579–1983 (годовые) .....	38
2.11. TO 1750–1997 (годовые) .....	39
2.12. LDT 1800–2005 (годовые) .....	40
2.13. NAO 1822–2000 (ежемесячные) .....	41
2.14. WLF 1850–1991 (ежемесячные) .....	42
2.15. GT 1856–2005, NGT 1856–2005 и SGT 1856–2005 (ежемесячные) .....	43
2.16. OMG 1955–1990 (ежемесячные) .....	43
2.17. ZON 1961–1990 (ежемесячные) .....	45
3. Обсуждение результатов и некоторые выводы .....	46
3.1. Основные характерные масштабы .....	46
3.2. Глобальная температура воздуха и солнечная активность .....	51
3.3. Эль-Ниньо и изменения орбитального и углового момента Солнца .....	54
Литература .....	57

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН  
Москва, 117997, Профсоюзная ул., 84/32

Подписано к печати 2.10.2008 г.

Заказ 2154

Формат 70×108/32

Тираж 75 экз.

2,9 уч.-изд. л.