

Вакуленко Надежда Викторовна

На правах рукописи
УДК 551.501.724

**АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ РЯДОВ С
ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТОВ**

25.00.28 – океанология

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

МОСКВА - 2004

Работа выполнена в институте океанологии им. П.П.Ширшова
Российской академии наук

Научный руководитель

академик А.С.Монин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Бышев В.И.

кандидат физико-математических наук
Даценко Н.М.

Ведущее предприятие:

кафедра метеорологии, климатологии и экологии атмосферы
факультета географии и геоэкологии
Казанского государственного университета

Автореферат разослан 28 апреля 2004 г.

Защита состоится 1 июня 2004 г. в 14.00 часов
на заседании Диссертационного совета К002.239.01 по
присуждению ученой степени кандидата наук в Институте
океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117851, г.Москва,
Нахимовский проспект, 36).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Диссертационного совета

кандидат географических наук
С.Г.Панфилова

2006-4
2632

2120440

-1-

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Проблема климата, его изменений является одной из крупных проблем наук о Земле. Предсказание изменений климата в ближайшем будущем является не только фундаментальной научной, но и чрезвычайно важной практической проблемой. Сейчас делаются первые шаги и открываются перспективы для того, чтобы подойти к научной формулировке такого прогноза климата.

Несмотря на огромное число уже выполненных исследований, природа современного потепления климата, сравнительная важность в нем естественного и антропогенного факторов остаются далекими от полной ясности. Дальнейшие работы в этом направлении связываются, в основном, с двумя взаимодополняющими подходами: численным моделированием климата и его изменений и оценкой естественных колебаний климата в прошлом по данным палеоклиматических реконструкций. В рамках второго подхода и выполнена данная работа.

Цель работы

Целью работы является исследование циклических колебаний и выявление их свойств, которые обусловлены нелинейностью климатической системы океан – суша – атмосфера (ОСА). Знание этих свойств позволит более обоснованно формулировать задачи о прогнозе климата. Циклическости, т.е. более и менее регулярные повторения сходных климатических условий, известные по многочисленным исследованиям циклические колебания климата в голоцене и плейстоцене можно разделить на 4 группы:

- внутривековые колебания;
- тысячелетние циклы в голоцене и позднем плейстоцене;

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.-Петербург
2006 РК

- четыре последних ледниковых / межледниковых цикла длительностью порядка $1 \cdot 10^5$ лет каждый в позднем плейстоцене;
- циклы с периодами $4 \cdot 10^4$ - $1 \cdot 10^5$, охватывающие весь период плейстоцена / плиоцена. Внутривековые колебания с периодами от нескольких лет до нескольких десятков лет. По ним имеется много разнообразных фактических данных, среди которых большую ценность представляют данные о циклических и нерегулярных изменениях «центров действия атмосферы» (ЦДА), а также в районах, так называемых, «дальних связей», среди которых: Северо-Атлантическое, Северо-Тихоокеанское, Атлантико-Европейское колебание, Южное колебание и др. Их положение и интенсивность определяют главный фон для формирования погоды, в том числе, во внетропических широтах северного полушария. В частности, Северо-Атлантические и Северо-Тихоокеанские центры действия, Северо-Атлантические и Атлантико-Европейские дальние связи определяют длительные изменения погоды на территории нашей страны.

Помимо дельта-пика годового периода и его супергармоник в половину и треть года в атмосферных и энергетических спектрах очень часто видны квазидвухлетние колебания (26-28 месяцев). Особенно четкими они являются в спектре колебаний зональных ветров в экваториальной нижней стратосфере. Довольно хорошо они заметны, но не как дельта-пики, а, скорее, как группы пиков и полос увеличенной энергии в спектрах процессов Эль-Ниньо – Южного колебания, локализованных в приэкваториальных районах Тихого океана и прилегающих к ним. Квазидвухлетние, квазитрехлетние и квазичетырехлетние колебания проявляются и на других широтах в Южном полушарии (Южное колебание) и северном полушарии (Северо-Атлантическое и Северо-Тихоокеанское колебания). Немало атмосферных спектров обнаруживают увеличение энергии на периодах около 23 лет. Этот период

связывают с воздействием на атмосферные процессы двойного солнечного цикла с периодом в 23,7 года. Сам двойной солнечный период возникает в результате параметрически-резонансного усиления внешних воздействий на солнечную активность, из-за цикла обращения Юпитера в 11,86 года.

В последнем десятилетии большое внимание климатологов привлекли междекадные циклы. Наиболее известен из них цикл длиной 65-70 лет в ходе средней глобальной температуры воздуха и средней температуры воздуха северного полушария. Два максимума этого цикла (в начале 1940-х гг. и в конце 1990-х гг.) являются важными вехами в развитии современного потепления климата. Накапливается все больше свидетельств, что этот цикл проявляется в ходе большинства вышеупомянутых циклических крупномасштабных процессов, включая процессы Эль-Ниньо – Южное колебание, Северо-Атлантическое и Северо-Тихоокеанское колебания.

До недавнего времени считалось, что в период голоцена (последние 10-15 тысяч лет) климат был очень устойчивым и без явно выраженных колебаний. Однако, недавно было выявлено, что в течение голоцена имели место, конечно, гораздо более слабые, чем в ещё более раннем периоде плейстоцена (от 15 тысяч лет до 1 миллиона лет до нашей эры), но всё же более существенные, чем наблюдались в историческую эпоху, климатические колебания. Особое внимание привлёк цикл длиной около полутора тысяч лет, который прослеживается не только в самом голоцене, а и в позднем плейстоцене (примерно до 60 тысяч лет до нашей эры). Выявлены также существенные колебания с периодами в сотни и многие десятки лет.

Основными фактическими данными о колебаниях климата в голоцене являются так называемые дендрохронологические ряды (ДХР). Они состоят из «индексов» - аномалий ширины годичных колец деревьев относительно возрастных биологических норм, свойственных

данному виду дерева. В интернете опубликован Международный банк данных о кольцах деревьев (МБДКД), содержащий более 6000 рядов измерений ширин годичных колец деревьев, в том числе больше половины из них являются ДХР. ДХР «Тропа Мафусаила», составленный Д.Грейбиллом по остистым соснам в Калифорнии, имеет длину 7980 лет и является длиннейшим из построенных и потому особенно ценен как источник знаний об очень теплом климате голоцена, предшествовавшем нашему времени. Выявленный при анализе этого ряда климатический цикл длительностью около 1600 лет был проверен также на рядах других дендрохронологий.

В позднем плейстоцене выявлены четыре ледниковых цикла со средней длительностью около сотни тысяч лет. Наиболее впечатляющее свидетельство этих циклов содержится в ледяных ядрах, пробуренных советскими учеными на станции Восток в Антарктиде. Но сейчас имеются также другие циклы, которые весьма разнообразны и многочисленны. Наиболее важные из них – данные международных экспедиций по бурению дна Атлантического, Тихого и Индийского океанов. Первое объяснение механизмов формирования ледниковых циклов, как реакции климата на колебания проходящей солнечной радиации, происходящих из-за сложного движения Земли по её орбите вокруг Солнца, было дано еще в 1920-30 годах югославским климатологом М.Миланковичем. Тогда о существовавших в прошлом оледенениях было известно только по данным геоморфологов, обнаруживших многочисленные следы наступлений и отступлений ледников в Европе и Северной Америке. Датировка оледенений по этим данным была очень ненадежна. По этой причине астрономическая теория ледниковых периодов М.Миланковича длительное время отвергалась, пока не были обнаружены в колонках океанических осадков предсказанные астрономической теорией периоды колебаний в 19, 23, 41 и 100 тысяч лет

Задачи исследования

Рассмотрение климатических рядов в различных масштабах времени от внутривековых метеорологических колебаний до изменений ландшафтов в голоцене, ледниковых периодов плейстоцена и, существующих до него, изменений климата в плиоцене. Причем, новым методом для такого рассмотрения служит метод вейвлетного преобразования климатических рядов.

1. Анализ климатических рядов длительностью порядка сотни лет на примере 105-летнего банка данных значений давления и координат восьми ЦДА северного полушария:
 - статистический анализ данных банка;
 - построение временных графиков разности давления и координат ЦДА в Евразийском и Тихоокеанском квадрантах.
2. Анализ климатических рядов длительностью порядка тысячи лет на примере 27 рядов ежегодных значений климатических индикаторов, собранных в Европе, Северной Америке, Восточной и Центральной Азии и южном полушарии:
 - построение «полосовых» фильтров, равных разности результатов скользящего сглаживания по периодам в 7 лет и 31 год.
3. Анализ климатических рядов длительностью порядка десяти тысяч лет на примере ДХР из Международного банка данных о кольцах деревьев:
 - построение спектров ДХР, предварительно сглаженных по «временным окнам» различной ширины;
 - расчет степенного спектрального закона;
 - вейвлетный анализ самой длительной дендрохронологии из МБДКД с применением вейвлетных функций «Мексиканская шляпа» и Морле, построение спектров вейвлетного преобразования, использование двугорбой вейвлетной функции при различных отношениях

частотных характеристик для выявления когерентных климатических колебаний.

4. Анализ климатических рядов длительностью порядка сотен тысяч лет на примере ледяных кернов из скважин на ледниковых куполах Гренландии, Антарктиды и арктических островов:
 - исследование зависимости возраста слоев льда от глубины в основной толще льда;
 - вейвлетный анализ данных дейтерия ледяного керна, имеющего возраст около четырехсот двадцати тысячи лет, с помощью прямого и обратного вейвлетного преобразования с целью выявления роли орбитальных циклов прецессии и эксцентриситета на формирование примерно 100-тысячелетнего ледникового цикла в позднем плейстоцене.
5. Анализ климатических рядов длительностью порядка нескольких миллионов лет на примере колонки океанических осадков, имеющей возраст около двух с половиной миллионов лет:
 - вейвлетный анализ данных изотопов кислорода в колонке осадков с использованием функции «Мексиканская шляпа» и с помощью двугорбой вейвлетной функции с целью выявления долгопериодных климатических колебаний;
 - обратное вейвлетное преобразование исходных данных и построение реконструированного и остаточного рядов для оценки вкладов цикла наклонения на смену длины ледникового цикла в позднем плейстоцене от 40 до 100 тысяч лет.

Научная новизна

1. При исследовании 27 рядов ежегодных значений климатических индикаторов, собранных в Европе, Азии, Северной Америке и южном полушарии была подтверждена цикличность

колебаний климата со средней длительностью 22-24 года, равная двойному солнечному циклу.

2. Проведенный вейвлетный анализ дендрохронологии из Калифорнии по остистым соснам длиной около 8000 лет позволил обнаружить колебания климата в голоцене с периодом около 1600 лет, так как район Калифорнии далек от Северной Атлантики, можно усомниться, что основным механизмом возбуждения полуторатысячелетнего цикла являются изменения в характере термохалинной циркуляции в Северной Атлантике. Последний по времени цикл 1600 летнего колебания начался со Средневекового теплого периода (7-13-ый века), включил Малый ледниковый период (14-19-ый века) и завершается современным глобальным потеплением. Это обстоятельство важно для атрибуции современного потепления к естественным или антропогенным причинам.
3. По данным ряда дейтерия ледяного керна станции «Восток» в Антарктиде, возраст которого определяется более 420 тысяч лет, в результате вейвлетного анализа была выявлена амплитудная модуляция в диапазоне масштабов прецессионных циклов 19 – 23 тысячи лет за счет 100-тысячелетнего цикла эксцентриситета, дополненная вкладом от модуляции цикла наклона. Именно амплитудная модуляция циклов прецессии, как оказалось, в основном определяет 100 тысячелетнее чередование ледниковых и межледниковых эпох в позднем плейстоцене.
4. В результате вейвлетного преобразования ряда значений $\delta^{18}\text{O}$ колонки океанических осадков станции ODP 677 в Тихом океане, имеющей

возраст 2,6 млн. лет, были впервые обнаружены климатические колебания с периодами 800 и 1600 тысяч лет как следствие частотной модуляции 100-тысячелетних ледниковых циклов.

Структура диссертации

Работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и приложения. В первой главе делается обзор математических методов обработки временных рядов и кратко излагается теория вейвлетного преобразования. Во второй, третьей, четвертой, пятой и шестой главах рассматривается применение описанных математических методов к климатическим рядам различной длительности. Полный объем диссертации составляет 110 страниц. Список литературы содержит 58 ссылок и занимает 4 страницы. В диссертацию включены 26 графиков и 5 таблиц. Приложение содержит таблицы и 20 графиков.

Основное содержание

Во введении к диссертационной работе определены понятие климата, указаны некоторые особенности природных климатических рядов, существенные для их статистического анализа, а также перечислены математические методы обработки временных рядов; перечислены все климатические ряды, использованные в данной работе.

Первый раздел первой главы посвящен обзору математических методов обработки климатических рядов, среди которых спектральный Фурье-анализ, используемый для изучения скрытых периодичностей во временных рядах, корреляционный анализ, позволяющий определить взаимозависимости между временными рядами. Для описания случайных процессов, таких как природные климатические ряды, используются моментные функции первого порядка: средние значения, дисперсия, а также вторые статистические моменты – корреляционные и ковариационные функции. Часто применяется также скользящее сглаживание, как простейшее средство выявления периодичностей в рядах. Одним из часто

используемых методов выявления периодичностей во временных рядах является также вариант метода эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), называемый в зарубежных работах сингулярным спектральным анализом. В основном, этот метод применим к рядам, которые можно отнести к стационарным случайным последовательностям. Для изучения нестационарных случайных последовательностей в последнее время с большим успехом используется новый математический аппарат, так называемое, вейвлетное преобразование (ВП) временного ряда. ВП состоит в линейном преобразовании исходного ряда путем его свертки с семейством вейвлетных функций, чаще всего имеющих форму уединенной волны. Результатом такого преобразования является график изолиний на плоскости частота-время.

Теории ВП посвящен **второй раздел первой главы**. Непрерывное ВП временного ряда $T(t)$, предполагаемого заданным на бесконечном временном интервале $-\infty \leq t \leq \infty$, есть свертка

$$W(b,a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} T(t) \overline{G\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt, \quad b \in R, a > 0 \quad (1)$$

этого ряда с семейством специальных вейвлетных функций, получаемых всевозможными сдвигами (b) и перемасштабированиями (a) из единственной "материнской" функции $G(t)$. Из (1) видно, что ВП есть отображение одномерной линии на двумерную плоскость (b,a) , координаты на которой заданы в виде: абсцисса - время и ордината - масштаб ВП (чаще используется логарифм масштаба). $G(t)$ - комплексная функция. Помимо вещественной и мнимой компонент по отдельности, результат ВП часто бывает полезно представить на (b,a) -плоскости в виде картин масштабнo-временных распределений амплитуд $|W(b,a)|$ и фаз

$tg^{-1}\left(\frac{\text{Im}W(b,a)}{\text{Re}W(b,a)}\right)$ ВП. "Материнская" функция обязана

удовлетворять условию $\int_{-\infty}^{\infty} G(t)dt = 0$, называемому условием

допустимости. Некоторые “материнские” функции могут удовлетворять даже более “жесткому” условию:

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^r G(t)dt = 0, \quad r \leq R.$$

Фундаментальным свойством ВП является его ковариантность к временному сдвигу и перемасштабированию преобразуемого ряда. Поэтому ВП гармонического ряда $T(t) = \exp\{i\omega_0 t\}$ имеет форму $W(b, a) = \exp\{i\omega_0 b\} f(a)$, где, в общем случае, $f(a)$ – амплитуда ВП, постоянная вдоль любой горизонтальной линии ($a = const$) и меняющаяся как $a^{1/2} g(a\omega_0)$ вдоль любой вертикальной линии ($b = const$) на (b, a) -плоскости.

Амплитуду ВП гармонического ряда можно оценить по величине $|f(a)|$ на линии постоянного масштаба, соответствующей частоте преобразуемой гармоник, где она максимальна по сравнению с соседними горизонтальными линиями. Частота гармонического ряда может быть оценена по скорости роста фазы ВП на горизонтальной линии, соответствующей любому масштабу ($a = const$). Если преобразуемый ряд есть сумма гармоник, то амплитуды и фазы ВП для каждого вейвлетного масштаба равны взвешенным суммам амплитуд и фаз ВП всех гармоник, периоды которых близки к этому масштабу. Осреднение по времени квадратов амплитуд ВП дает сглаженную оценку энергетического спектра ряда. Если одна из гармоник имеет наибольшую амплитуду (ей соответствует пик в энергетическом спектре), то ее период может быть оценен по двум признакам. Во-первых, по масштабу полосы повышенной амплитуды в картине амплитуд ВП. Во-вторых, по скорости роста фазы ВП внутри этой полосы. Скорость роста фазы будет заниженной для немного меньших масштабов и завышенной для больших масштабов.

Удобно заранее вычитать из значений всех фаз ВП величины, соответствующие специфическому для каждого масштаба росту фазы. Тогда положение пика в спектре будет видно в картине фаз ВП по смене полосы отрицательного прироста фазы на полосу положительного ее прироста при рассмотрении картины фаз ВП от малых масштабов к большим. Поэтому ВП - более надежное средство выявления спектральных пиков, чем преобразование Фурье, хотя оно и уступает последнему по спектральной разрешающей способности. Если у гармоник преобразуемого ряда амплитуда модулирована, то амплитуда ВП в соответствующей полосе осциллирует с периодом модуляции. Аналогичное имеет место с полосами изменения фаз ВП. Частотная модуляция обнаруживается по двум признакам. Во-первых, в картине фаз ВП появляется полоса чередующихся положительных и отрицательных приращений фазы. Во-вторых, в картине амплитуд ВП полоса повышенной амплитуды тоже осциллирует, но уже за счет поочередных смещений этой полосы в большие и меньшие масштабы. В возможности обнаруживать амплитудную и частотную модуляции состоит второе положительное отличие ВП от преобразования Фурье.

Из условия допустимости следует, что, в отличие от Фурье преобразования ВП нечувствительно к постоянной составляющей, а, в случае “жесткого” условия с $R > 1$, оно нечувствительно также к линейным (квадратичным и т. д.) трендам. Это позволяет изучать внутреннее самоподобие колебаний в преобразуемом ряду.

Строго говоря, перечисленные достоинства имеют место только для ВП рядов бесконечной длительности, т.к. условия допустимости нарушаются при ВП конечных рядов, и значения ВП для начала и конца любого реального ряда искажаются. Поэтому на практике, для уменьшения краевых искажений, преобразуемый ряд дополняют искусственными “буферами”, например, средними значениями некоторого начального и конечного участков ряда, или продолжают тренды этих

участков вперед и назад. Применяются и более сложные приемы генерации “буферов”.

Многие полезные свойства ВП присущи ему независимо от конкретной используемой “материнской” функции, но есть и такие свойства, которыми обладают только некоторые из этих функций. Вейвлетная функция с минимальными краевыми искажениями из числа, например, производных гауссиана

$$G(t) = He_m(t) \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\}, \quad m = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где $He_m(t)$ - полиномы Эрмита. ВП с первой производной гауссиана ($m=1$) нечувствительно к постоянной составляющей ряда. Эта функция обеспечивает наилучшую локализацию выделяемых особенностей преобразуемого ряда во времени. Популярно ВП со второй производной гауссиана ($m=2$)

$$G(t) = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} (1-t^2) \exp\left\{-t^2/2\right\}, \quad (3)$$

называемой “Мексиканская шляпа”. Оно нечувствительно к линейному тренду. Вейвлетный масштаб “Мексиканской шляпы” составляет примерно 1/4 от масштаба наиболее четко описываемой этой функцией гармоники преобразуемого ряда. Большим достоинством всех функций (2) является устойчивость вычислений с их помощью прямого (1) и обратного

$$T(t)_{a_{\min}}^{a_{\max}} = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \int_{-\infty}^{\infty} W(b, a) G\left(\frac{t-b}{a}\right) a^{-2} db da \quad (4)$$

ВП по реальным рядам, которые всегда не только конечны, но и дискретны, так что свертки (1) и (4) приходится вычислять с помощью квадратур. Такая численная реализация непрерывного ВП называется “фреймом”. В частности, фреймы с (2) позволяют очень точно выделять трендовые и осцилляторные компоненты преобразуемого ряда. При этих вычислениях интегралы заменяются суммами, шаги по b и сдвиги по a делаются дискретно, а бесконечные пределы интегрирования заменяются конечными по величинам

минимального и максимального масштабов, которые определяют частотную полосу колебаний в ряду, представляющую интерес для исследователя. Чтобы оценить общий тренд ряда, за минимальный масштаб берется тот, который задается дискретностью ряда, а за максимальный – тот, для которого еще можно пренебречь краевыми искажениями. Затем реконструированный при этих условиях ряд вычитается из исходного.

Недостатком функций (2) является плохая локализация результатов ВП с их помощью в частотной области. Если изучается спектральный состав преобразуемого ряда и то, как он меняется со временем, то проще всего использовать функцию Морле, обеспечивающую хорошую частотную локализацию, ибо Фурье-образом этой функции является гауссиан

$$g(\omega) = (2\pi)^{-1/2} \exp\left\{-\frac{(\omega - C)^2}{2}\right\}, \quad \omega > 0, \quad g(\omega) = 0, \quad \omega \leq 0 \quad (5)$$

Во временной области это дает функцию

$$G(t) = \pi^{-1/4} (\exp\{-iCt\} - \exp\{-C^2/2\}) \exp\{-t^2/2\} \quad (6)$$

При $C > 5$ можно ограничиться первым слагаемым в правой части (6), что приводит функцию Морле к обычно используемому виду

$$G(t) = \pi^{-1/4} \exp\{-iCt\} \exp\{-t^2/2\} \quad (7)$$

Выбор $C = 2\pi$ удобен тем, что вейвлетный масштаб почти равен масштабу преобразуемого ряда. График функции Морле внешне сходен с графиком "Мексиканской шляпы", но это - ложное сходство. ВП с этими двумя функциями имеют весьма разные свойства. В частности, функция Морле чувствительна к линейному тренду, поэтому при анализе нестационарных рядов ее использование требует осторожности.

“Многогорбые” функции

$$G(t) = \exp\left\{-t^2/2\right\} \sum_n \exp\{iC_n t\}, \quad C_n > 5, \quad n = 1, 2, \dots \quad (8)$$

предназначены выявлять когерентные структуры (волновые пакеты). Когда (8) используется, чтобы выделить музыкальные аккорды, берется отношение частотных характеристик $C_{n+1}/C_n=2.00$ (октава западной музыки). Картина амплитуд ВП простого гармонического колебания при использовании этих функций такая же, как получающаяся при ВП с функцией Морле ряда, состоящего из суммы гармоник, отношения периодов которых такие же, как отношения C_{n+1}/C_n . Амплитуда ВП резко возрастает, когда соответствующие гармоники колеблются в фазе. Характер изменения во времени фаз ВП с многогорбой функцией не зависит от масштаба, и потому неинформативен, причем распознавание "аккордов" скорее качественное, чем количественное. Никаких тестов для оценки статистической значимости такого распознавания еще нет, поэтому для оценки устойчивости нахождения "аккордов" приходится прибегать к методу Монте-Карло (генерации случайных рядов и сравнению результатов их ВП с найденными в анализируемом ряду). Заметим, что двугорбая вейвлетная функция как средство выявления когерентных структур в колебаниях климата ранее в климатологии не использовалась.

Вторая глава посвящена обработке климатических рядов длительностью порядка сотни лет. Здесь рассматривается 105-летний банк восьми ЦДА северного полушария за 1891-1995 годы, составленным и опубликованным Арктическим и Антарктическим НИИ и Гидрометцентром СССР.

Одним из важнейших процессов в земной климатической системе является общая циркуляция атмосферы (ОЦА). ОЦА делится на зональную и незональные компоненты. Зональная компонента содержит субротацию в нижней части пассатной зоны и суперротацию с осями на субтропических струйных течениях. Между ними зональная циркуляция имеет антициклонический сдвиг. Незональная компонента содержит, во-первых, так называемые ЦДА – квазистационарные по своему положению крупномасштабные антициклонические и

циклонические вихри; во-вторых, в зональную циркуляцию входят вихри синоптических масштабов.

Шестнадцать ЦДА северного и южного полушарий можно разделить на 4 группы:

1. Пять перманентных (круглогодичных) океанских антициклонов – Азорский, Гавайский, о. Св. Елены, о. Св. Маврикия и о. Пасхи.
2. Два перманентных океанских циклона – Исландский и Алеутский. В южном полушарии им соответствует пояс пониженного давления Циркумполярного Антарктического течения.
3. Четыре сезонных (летних) континентальных антициклона – Сибирский, Канадский, Южноафриканский и Австралийский.
4. Пять сезонных (летних) континентальных циклонов – Южноазиатский, Калифорнийский, Южноафриканский, Австралийский и Южноамериканский.

Банк восьми ЦДА северного полушария содержит 24 ряда среднемесячных значений координат – широт, долгот и приведенного к уровню моря атмосферного давления и включает в себя перманентные океанские антициклоны Азорский и Гавайский и циклоны Исландский и Алеутский, а также сезонные континентальные ЦДА – зимние антициклоны Сибирский и Канадский и летние циклоны Калифорнийский и Южноазиатский. Проведенный статистический анализ банка данных ЦДА показал, что изменчивость значений в этих рядах чрезвычайно велика и дисперсии таких рядов довольно велики. При такой большой дисперсии проявление наиболее выразительных когерентных структур во временном ряде требует скользящего сглаживания по интервалу оптимальной длины. Согласно экспериментам, оптимальным оказалось 15-летнее сглаживание, которое было применено ко всем рядам. В Евразийском квадранте наиболее выразительной когерентной структурой оказалось изменение давления у Сибирского ЦДА,

в то же время траектория этого ЦДА очень сложно менялась со временем, так что соответствующий ей временной ряд выглядит как фрактал (недифференцируемая функция времени). Изменение во времени разности давлений и координат ЦДА в Евразийском квадранте описывается сравнительно гладкими кривыми, так что фрактальность проявляется лишь в динамике индивидуальных ЦДА. Эта гладкость указывает на синхронизацию изменений общей циркуляции атмосферы в целом. Практически на всех кривых главный экстремум, узкий и резкий, приходится на 1950 год. Эволюция сети ЦДА в Тихоокеанском квадранте оказалась качественно подобной, но все же количественно менее выразительной, чем эволюция в Евразийском квадранте.

В третьей главе рассматриваются климатические ряды длительностью порядка тысячи лет. Это двадцать три ряда ежегодных значений климатических индикаторов (летних приземных температур воздуха), собранных Брэдли и Джонсом для регионов Европы, Северной Америки, Восточной Азии и южного полушария. К этим рядам были прибавлены три ДХР по Центральной Азии: Туркестану, Тянь-Шаню и Полярному Уралу (длительностью в среднем около 700 лет) и ДХР, полученный по Internet, значений ширин годовых колец по деревьям фицройя из Южной Аргентины (длительностью около 1500 лет).

Все вышеуказанные ряды были пропущены через «полосовой фильтр» с полосой пропускания колебаний в интервале 7-31 год, равный разности результатов среднего арифметического скользящего сглаживания ряда по периодам 7 лет и 31 год. Такая фильтрация оказалась достаточной для выявления цикличности со средней длительностью цикла около 23.5 лет, т.е. вдвое больше длительности известного солнечного цикла около 11.5 лет. Для каждого ряда были вычислены средние длительности циклов, обозначенные буквой τ . В полученных значениях τ для рассмотренных здесь 26 климатических рядов обнаруживаются следующие

закономерности. Во-первых, в 16 из них, в том числе во всех 11 имеющихся здесь ДХР, значения τ оказались в интервале от 20.5 до 24.62 со средним арифметическим значением 22.98. Этот результат можно считать подтверждением о проявлении двойного солнечного цикла в климатических рядах. Во-вторых, в остальных 10 рядах, включающих 7 рядов, составленных по летописным данным, значения τ оказались заметно больше, чем у двойного солнечного цикла. Такие большие значения τ можно рассматривать не столько как характеристики климатических циклов, а лишь как указание на низкую разрешающую способность использованных исходных данных, недостаточную для оценки длин коротких климатических циклов. ДХР по деревьям фицройя в Южной Аргентине, был поделен на три равные части, для которых были вычислены значения τ , причем для всего ряда в целом значение оказалось равным 23.97.

Четвертая глава состоит из 2-х разделов и в ней рассматриваются климатические ряды длительностью порядка десяти тысяч лет.

В **первом разделе** рассматривается проблема оценки спектров временных рядов на примере ДХР, являющихся одним из наиболее информативных видов климатических рядов. Наиболее длинные ДХР из международного банка данных о кольцах деревьев (Internet) - имеют длины от 8 000 до 1400 лет. Для построения спектров были использованы 19 наиболее длинных ДХР. К ним были добавлены четыре длительные хронологии из Евразии.

Значения ДХР обычно представляются в индексах, которые вычисляют вычитая из толщин годового прироста величину, характеризующую средний прирост деревьев данного вида в зависимости от их возраста. Эта обязательная в дендрохронологии процедура называется стандартизацией и обычно приводит к сильному сглаживанию столетних и еще более долгопериодных климатических колебаний. Надо также учитывать, что рост деревьев сложно зависит от климатических

условий, не только температуры воздуха, но и осадков, особенно в период вегетации, их локальных особенностей. На него влияют многие неклиматические факторы. Поэтому ряды дендрохронологий нельзя рассматривать как ряды абсолютно калиброванных температур или осадков. Фактически они дают только некоторое представление об относительных изменениях климата (например, тёплый/влажный или холодный/сухой) в районе произрастания деревьев.

Спектры ДХР охватывают по частоте 3-4 декады, так что для графического изображения целесообразно выбрать по оси абсцисс логарифмический масштаб $x = \lg f$. При этом в качестве ординат можно выбрать значения $f S(f)$ – тогда площади под такой спектральной кривой будут изображать вклады каждого интервала частот в полную дисперсию случайной последовательности.

На графиках спектров ДХР «белый шум» выглаживается не полностью, но все они неплохо аппроксимируются прямыми линиями с одинаковым наклоном $2/3$, т.е. $y = 2/3 x + const$. Отсюда получается следующий степенной спектральный закон:

$$S(f) = 3/2 \sigma^2 f^{-1/3}, \quad (9)$$

где σ^2 – полная дисперсия рассматриваемого здесь участка спектра. При этом $f^{1/3} S(f)$ – постоянная величина. Такие спектры, построенные для 13 ДХР, показали, что остаточный белый шум усиливается в сторону высоких частот, причем, согласно численным экспериментам, с увеличением ширины окна белый шум ослабевает, а занимаемая им высокочастотная область сужается. Кроме того, видно, что белый шум неравномерен: на него налагается целый ряд интервалов его усиления – частных максимумов спектра. Скользящее сглаживание по моментам времени из некоторого временного окна исходных ДХР позволяют более четко представить особенность спектра. Два максимума, проявляющиеся на спектрах всех ДХР после их семилетнего сглаживания, оказались соответствующими одним и тем же периодам – около 2,7 и 4,7 лет. Первый из них соответствует

квазидвухлетнему циклу колебаний общей циркуляции атмосферы, второй же максимум относится к, так называемой, цикличности Эль-Ниньо – Южного колебания. 15-летнее сглаживание практически не добавляет новых периодов к двум предыдущим, так что солнечный цикл в анализируемых колебаниях климата почти не заметен; 31-летнее сглаживание добавляет очень хорошо выраженный «пик», соответствующий 23,5 летнему «двойному солнечному циклу». Далее 71-летнее сглаживание добавляет пик около периода в 59 лет – Главного периода Солнечной системы. 151-летнее и 251-летнее сглаживания «проявляют» спектральные максимумы около более длинных периодов, свойственных движению трех тел – Солнца, Юпитера и Сатурна, в том числе 120 и 180-летнего периодов. 501-летнее сглаживание проявляет максимум около периода в 750 лет.

Таким образом, в области периодов от 5 до 250 лет обнаруживаются только вынужденные колебания климатической системы – её реакции на внешние воздействия.

Во втором разделе четвертой главы рассматривается 8000-летняя дендрохронология по остистым соснам климата Калифорнии "Тропа Мафусаила".

Для анализа динамики климата голоцена был использован метод ВП исходного ряда с помощью вейвлетных функций «Мексиканская шляпа», Морле, двугорбой функции и были построены спектры ВП и Фурье. Расчет спектра ВП выявил наибольшую энергию тысячелетних колебаний и слабый пик в вейвлетных масштабах 28-56 лет. Картина амплитуд ВП с функцией Морле показала также наличие амплитудной модуляции между масштабами 112 и 224 года. Период модулирующего сигнала оказался равен примерно 1600 годам. Спектр ВП показал главный пик в масштабе 170 лет, мощный пик вблизи масштаба 896 лет и еще два более слабых пика – в масштабах около 448 лет и между 56 и 112 годами.

Для оценки статистической значимости полученных пиков было вычислено аналогичное ВП для ряда "Тропа

Мафусаила" после случайного перемешивания его членов. Случайный ряд имеет, по построению, свойства белого шума, так что вид областей повышенных амплитуд в картине амплитуд ВП, а также мощность пиков в спектре ВП и Фурье спектре могут служить для оценки случайности наблюдения соответствующих особенностей у реального ряда. В результате были выявлены значимые пики спектральной плотности в полосах масштабов 56-112 и 112-224 лет. Выявленные пики спектра ВП соответствуют гармоникам преобразованного ряда из диапазона масштабов от половины до двух с половиной столетий.

Анализ картины фаз ВП и вида спектра средних значений приращений фазы для каждого масштаба подтверждают наличие амплитудной модуляции климатических колебаний в масштабах многих десятилетий-столетий. Есть также некоторые признаки частотной модуляции климатических колебаний. Гораздо больше информации дают в этом последнем отношении результаты ВП с двугорбой вейвлетной функцией, при отношении частотных характеристик $C_{n+1}/C_n = 2.19$, когда последовательности областей больших амплитуд ВП раздробляются на множество мелких областей, гармонически осциллирующих по масштабам ВП. Эти осцилляции указывают на частотную модуляцию климатических колебаний. Частотная модуляция имеет один и тот же период (около 1600 лет) для всех пар колебаний, кроме ненадежных 448 и 896 лет. Центральные периоды пиков спектра ВП приходятся на масштабы около 70, 170 и 370 лет.

Все известные в нелинейной механике и радиотехнике модели частотной модуляции требуют наличия некоторого периодического или квазипериодического источника внешнего возбуждения. В связи с этим можно указать, что наиболее высокочастотный из выявленных пиков в спектре ВП довольно хорошо соответствует известному пику Глейссберга (примерно 80 летнего периода) в колебаниях солнечной активности. Недавние работы указали также на наличие пиков солнечной

активности на периодах нескольких столетий. Среди них - 180-летняя осцилляция Маундеровского типа, 220-летняя осцилляция типа Сперера и 420-летняя осцилляция.

Пятая глава состоит из 2-х разделов, в которых рассматриваются климатические ряды длительностью порядка сотен тысяч лет – ледяные керны из ледниковых куполов Гренландии, Антарктиды и арктических островов.

В первом разделе для исследования были взяты данные девяти ледниковых куполов Гренландии, Антарктиды и арктических островов. В датировании ледяных кернов можно выделить два главных подхода: гляциологический и референтный. Гляциологический подход комбинирует модель течения льда и модель аккумуляции, он обеспечивает, хотя и ухудшающееся с глубиной, но все же независимое датирование. Второй подход, который принято называть референтной хронологией, обеспечивает относительную хронологию. Референтная хронология состоит в корреляции общих климатических и стратиграфических индикаторов ледяной летописи с другими палеолетописями, имеющими более уверенную временную привязку, например, датированные океанические фораминиферовые колонки.

Была проанализирована зависимость возраста льда ледниковых покровов от глубины. Перейдя к логарифмическим масштабам по обеим осям, были получены практически прямые линии зависимости возраста льда от глубины, что указывает на степенной характер этой зависимости.

Выявленный при анализе ледяных кернов степенной закон означает автомодельность. Это показывает, что если менять масштабы на обеих осях, то кривая от этого не меняется. А если при изменении масштабов конфигурация кривой не меняется, в математике это носит название закона подобия, эта кривая обладает свойством самоподобия. Автомодельность или самоподобие – это когда одна кривая подобна сама себе.

Для вязкой жидкости, к которой можно условно отнести лед ледниковых покровов, основным параметром подобия является число Рейнольдса. Если от числа Рейнольдса решение не зависит, то такое течение жидкости называется автомодельным или самоподобным по числу Рейнольдса. Есть и другие параметры подобия, например форма поверхности ледниковых куполов. Как известно, поверхность, например, ледниковых куполов Гренландии и Антарктиды геометрически подобна.

При анализе девяти кернов ледниковых куполов были получены кривые одинаковой формы – прямые линии и с одинаковым наклоном $4/3$, следовательно, можно говорить о динамическом подобии. Из динамических условий особенно важна вязкость. Лед является псевдопластиком, следовательно он обладает вязкостью, которая проявляется на краях, например у дна ледникового купола, где трение определяется вязкостью, и на поверхности, где на это влияет форма купола. А на некотором интервале глубин, достаточно далеко то дна и от поверхности, течение льда не зависит ни от каких параметров, т.е. оказывается автомодельным, поэтому и получен такой степенной закон. Для установления показателя степени этого степенного закона были проанализированы девять кернов и, таким образом, эмпирически установлен показатель степени, близкий к $4/3$:

$$\text{Age} \sim \text{Depth}^{4/3} \quad (9)$$

Закономерность (9) имеет место в основной толще льда за исключением поверхностного слоя, в котором снег превращается в фирн, а затем в лед, и придонного слоя, в котором заметно сказывается трение о дно. Использование этого степенного закона существенно облегчает создание хронологии ледниковых куполов.

Во втором разделе пятой главы рассматриваются данные ряда дейтерия ледяного керна станции «Восток» в Антарктиде, возраст которого определяется 425 тысячами лет. Для анализа изменений климата в позднем плейстоцене был

использован метод ВП исходного ряда с помощью вейвлетной функции Морле, был построен Фурье-спектр, а также применена аппроксимация ряда с помощью обратного ВП.

Энергетический спектр ряда дейтерия хорошо описывает четырехкратную смену (со средним периодом около 100 тыс. лет) ледниковых и межледниковых эпох в позднем плейстоцене. Этот спектр имеет почти белозумовое основание и большое число возвышающихся над ним статистически значимых пиков. Среди них пики на периоде 103 (вклад более 10% в общую изменчивость ряда) и 41 тыс. лет (7%), которые соответствует орбитальным циклам эксцентриситета и наклона, 29 тыс. лет (около 3%) соответствует боковой гармонике цикла наклона. В более высокочастотной части спектра можно усмотреть пики на периодах гармоник прецессионного цикла – от 18 до 24 тыс. лет (общий вклад около 17%).

ВП ряда дейтерия с помощью функции Морле показало в полосе масштабов от 16 до 32 тыс. лет области повышенных и пониженных значений амплитуд, чередующихся во времени. Это указывает на наличие амплитудной модуляции гармоник соответствующих масштабов. Средний период модуляции составляет около 100 тыс. лет. Ниже в картине амплитуд ВП есть полоса масштабов (от 32 тыс. лет и несколько более), внутри которой амплитуда ВП почти постоянна. Отсюда следует, что амплитудная модуляция цикла наклона на его основном периоде в 41 тыс. лет малосущественна для динамики климата. Впрочем, боковая гармоника этого цикла (период около 29 тыс. лет) находится внутри упомянутой выше полосы масштабов, охваченной амплитудной модуляцией. Амплитудная модуляция видна также у второй боковой гармонике цикла наклона (период около 54 тыс. лет). Наличие амплитудной модуляции на обеих боковых гармониках есть признак частотной модуляции цикла наклона.

Аппроксимация ряда дейтерия по гармоникам прецессионного цикла через посредство обратного ВП в диапазоне от 2 до 32 тыс. лет, где обнаруживается модуляция, показала, что реконструированный по указанному диапазону масштабов временной ряд воспроизводит в сглаженном виде все основные черты оригинального ряда дейтерия. Остаточный ряд, полученный путем вычитания реконструированного ряда из оригинального, содержит только наиболее высокочастотные детали оригинального ряда, не ухватываемые вейвлетной функцией Морле, даже в самом мелком масштабе в 2 тысячи лет. Реконструированный ряд воспроизводит, хотя и с уменьшенной амплитудой, цикл 100 тысячелетнего чередования ледниковых и межледниковых эпох.

В шестой главе рассматриваются климатические ряды длительностью порядка нескольких миллионов лет на примере колонки океанических осадков, имеющей возраст около 2,5 миллионов лет. Данные ряда изотопов кислорода в колонке осадков на станции ODP 677 были сглажены 41 тыс. летним скользящим сглаживанием и линейно аппроксимированы. Примененный метод приближенной фильтрации выявил резкие колебания климата, начавшиеся около 900 тыс. лет назад. Для более детального рассмотрения колебаний климата в плейстоцене к исходному ряду был применен метод ВП с использованием вейвлетной функции «Мексиканская шляпа». Вейвлетный анализ длинного климатического ряда колонки океанических осадков обнаружил в климате плейстоцена наличие 400 тыс. летних колебаний, близких к колебаниям эксцентриситета земной орбиты, которые возникают в результате суперпозиции прецессионных циклов и цикла наклона. В среднем и позднем плейстоцене эти колебания сменяются основным колебанием с периодом около 100 тыс. лет. Можно выделить два этапа установления 100 тыс. летнего цикла: - первый (от 1300 до 1000 тыс. лет назад), когда 100 тыс. летний цикл повторяется три раза и затем исчезает, чтобы возникнуть снова – на втором этапе – после 900 тыс. лет назад.

Обратное ВП с использованием функции Морле по диапазону масштабов прецессионных циклов (19-23 тысячи лет) показало наличие не только 100-, но и 40-тысячелетних циклов.

Совершенно новый результат был получен при использовании ВП ряда ODP 677 с помощью двугорбой вейвлетной функции с отношением частот 2.19. Он состоит в обнаружении частотной модуляции климатических колебаний в полосе частот циклов эксцентриситета, т.е. на периодах 100-400 тысяч лет. Период частотной модуляции оказался равен 1600 тыс. лет, и эта модуляция состоит из двух таких гармоник. Поэтому эта модуляция определяет известное разбиение периода плейстоцена на три «хрона» длительностью около 800 тыс. лет каждый: хроны Миланковича, Кролля и Лапласа.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Анализ 27 рядов климатических индикаторов, собранных в Европе, Азии, Северной Америке и южном полушарии показал, что гипотеза о проявлении двойного солнечного цикла подтверждается в большинстве рядов и лишь в меньшей доле рядов, при формировании которых происходило сглаживание, таких как летописные данные, средняя длительность цикла оказалась заметно большей, чем у двойного солнечного цикла.
2. Показано, что построенные спектры ДХР можно представить в виде сумм сглаженной компоненты, у которой спектральная плотность пропорциональна частоте в степени $-1/3$, и налагающихся на нее слабо выраженных частных максимумов. Лучшей выраженности этих максимумов можно добиться, рассматривая результаты скользящего сглаживания и строя спектры сглаженного ряда. При этом выявляются 7 максимумов с периодами около 2.7, 4.7, 23.7, 60, 120, 180 и 745 лет.

3. Вейвлетный анализ 8000-летней дендрохронологии из Калифорнии выявил почти регулярные и взаимосвязанные колебания климата в голоцене с преобладающими периодами около 70, 170 и 370 лет. Все они модулированы колебанием с периодом около 1600 лет; последний по времени цикл модулирующего колебания начался со Средневекового теплого периода (7-13-ый века), включил Малый ледниковый период (14-19-ый века) и завершается современным глобальным потеплением. Выявлено сходство этого цикла с циклом, так называемого, Климатического оптимума, продолжавшемся примерно с 4000-х по 2400-е годы д. н. э. в Среднем голоцене.
4. Проведенный нами вейвлетный анализ данных дейтерия ледяного ядра станции Восток показал, что чередование ледниковых и межледниковых эпох в позднем плейстоцене определяется в основном амплитудной модуляцией прецессионного цикла, его супергармоник и комбинационных гармоник этого цикла с боковой гармоникой цикла наклона.
5. В результате вейвлетного анализа ряда значений $\delta^{18}\text{O}$ колонки океанических осадков станции ODP 677, имеющей возраст 2,6 млн. лет, впервые были обнаружены 800 -1600 тысячилетние колебания климата, как следствие частотной модуляции циклов эксцентриситета длиной 100 – 400 тысяч лет.
6. Построение графиков зависимости возраста слоев льда от глубины в логарифмическом масштабе по данным девяти ледниковых куполов Гренландии, Антарктиды и арктических островов позволило установить простой степенной закон – возраст пропорционален глубине в степени $4/3$. Такая закономерность имеет место в основной толще льда за исключением поверхностного слоя, в котором снег

превращается в фирн, а затем в лед, и придонного слоя, в котором заметно сказывается трение о дно. Использование этого степенного закона существенно облегчает создание хронологии ледниковых куполов.

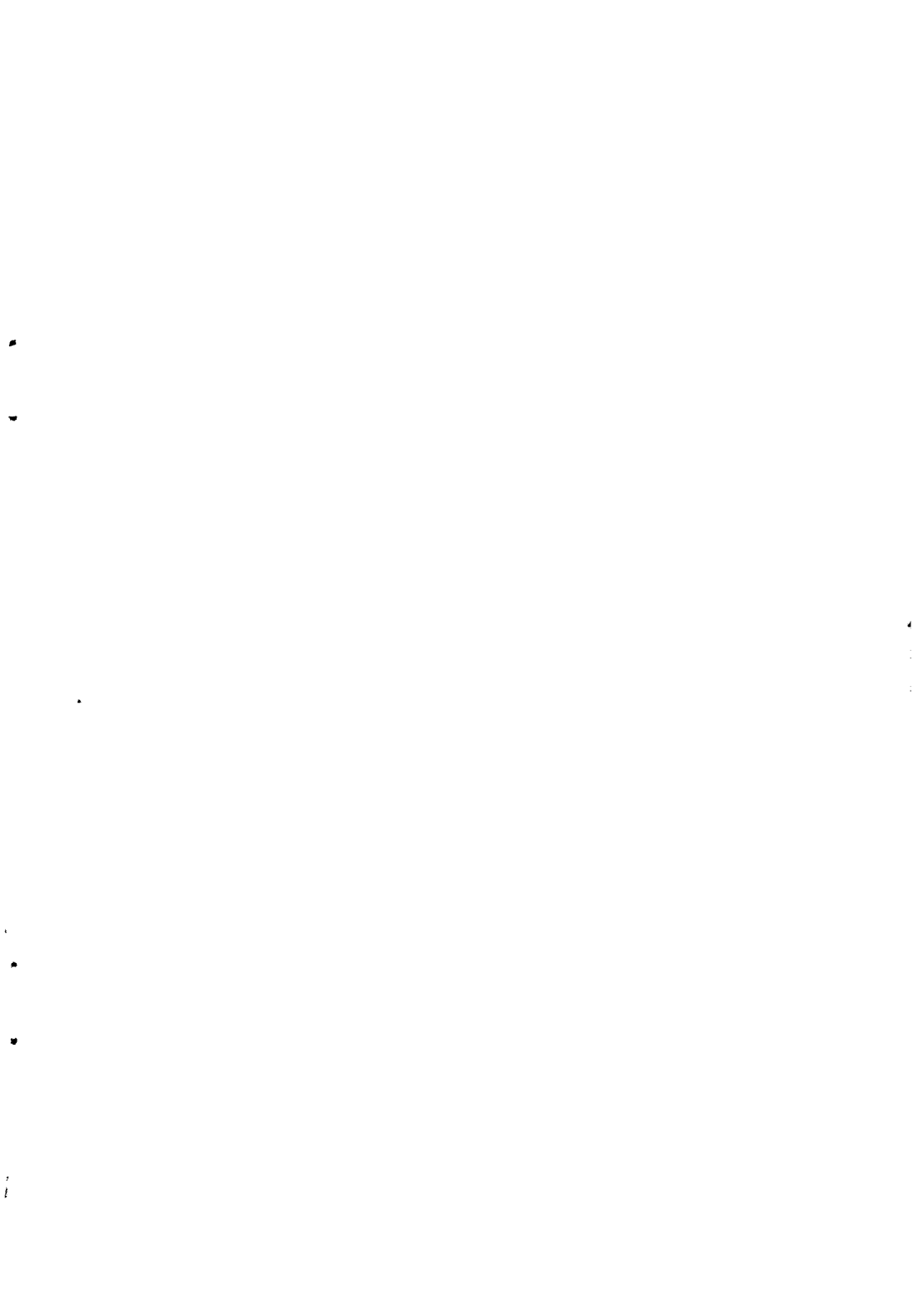
7. Проведенный анализ банка данных восьми ЦДА северного полушария показал, что 1950-е годы являются переломными в эволюции общей циркуляции атмосферы в XX веке, а также, что во второй половине XX века уровень атмосферного давления в зимнем Сибирском антициклоне повысился на 10 мбар.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. А.С.Монин, Ю.А.Шишков, Н.В.Вакуленко
«Об изменениях общей циркуляции атмосферы в XX веке»
Доклады Академии наук, 2000, т.371, №6, с.802-805
2. А.С.Монин, Н.В.Вакуленко
«О двойном солнечном цикле в колебаниях климата»
Доклады Академии наук, 2000, т.374, №3, с.385-388
3. А.С.Монин, Н.В.Вакуленко
«О спектрах колебаний климата»
Доклады Академии наук, 2001, т.378, №6, с.806-808
4. А.С.Монин, Н.В.Вакуленко
«Об оценке мультимодальных спектров временных рядов»
Наука, Теория вероятностей и ее применения, 2001, т.46, выпуск 3, с.417-426.
5. А.С.Монин, Ю.К.Васильчук, Н.В.Вакуленко
«О гипотезе автомодельности для хронологии растекания ледниковых куполов»
Доклады Академии наук, 2002, т.386, №3, с.395-399.
6. А.С.Монин, Д.М.Сонечкин, Н.В.Вакуленко
«Свидетельство внутренней упорядоченности колебаний климата в голоцене»

Доклады Академии наук, 2003, , т.389, №5, с.681-687.

7. А.С.Монин, Д.М.Сонечкин, Н.В.Вакуленко
«Об определяющей роли амплитудной модуляции
прецессионных циклов в чередовании ледниковых эпох
позднего плейстоцена»
Доклады Академии наук, 2003, , т.391, №6, с.817-820.



25.00

РНБ Русский фонд

2006-4

2632

13 11 2004

НАЦИОНАЛЬНЫЙ
СИСТЕМА
ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ