

*На правах рукописи*

**Рубинштейн Константин Григорьевич**



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ**

**Специальность 25.00.30**

**Метеорология, климатология, агрометеорология**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук**

**Москва – 2006**

Работа выполнена в Государственном Учреждении  
«Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации»  
Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу  
окружающей среды

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор	Васильев Петр Петрович
Доктор физико-математических наук	Володин Евгений Михайлович
Доктор физико-математических наук	Гальперин Михаил Владимирович

Ведущая организация:

**Институт Физики Атмосферы имени А.Н. Обухова РАН**

Защита состоится «22» Февраля 2006 г. в 14 часов на заседании  
диссертационного совета Д 327.003.01 по присуждению ученой  
степени доктора наук при ГУ «Гидрометеорологический научно-  
исследовательский центре Российской Федерации»,  
123242, Москва, Б. Предтеченский пер., 9-13

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
ГУ «Гидрометцентр России».

Автореферат разослан «10» декабря 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,

доктор географических наук



Нестеров Е.С.

2006-4  
28511

2255075  
3

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

## Актуальность проблемы

Диссертация посвящена численному моделированию общей циркуляции атмосферы с помощью спектральной гидродинамической модели для исследований изменений климата и переноса примесей в атмосфере.

Исследования изменения климата – одна из важных задач современной науки, прежде всего в связи с растущим антропогенным воздействием на окружающую среду. Происходящие в климатической системе процессы существенно влияют на различные отрасли экономики, многие сферы социальной жизни, и понимание возможных тенденций в этой области необходимо для принятия правильных и своевременных решений при планировании развития различных сторон общества. Озабоченность общества растущим антропогенным влиянием и состоянием природной среды доказывает подписание главами правительств большого количества государств Киотского протокола, регламентирующего квоты на эмиссию парниковых газов в атмосферу, конвенции о трансграничном переносе загрязненного воздуха на большие расстояния и ряд других международных соглашений.

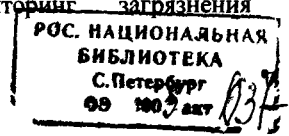
Основным инструментом исследования изменения климата и решения экологических задач, связанных с переносами в атмосфере, в настоящее время являются гидродинамические модели Общей Циркуляции Атмосферы (ОЦА). Физико-математическое моделирование климатической системы позволяет совершенствовать численное прогнозирование погоды, так как гидродинамическая модель является основным блоком в технологической линии краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного (например, сезонного) прогноза погоды. Многолетние численные эксперименты, результаты которых обобщаются в данной работе, позволяют определять оптимальные внутренние и внешние параметры моделей, а также комбинации схем параметризации физических процессов, обеспечивающие получение близких к современным наблюдениям, тепловых, водных, энергетических балансов в атмосфере.

В связи с ограничениями вычислительных возможностей и необходимостью проведения экспериментов на сроки несколько десятилетий, пространственное разрешение версий модели составляло сотни километров, что затрудняло локальную интерпретацию результатов. Поэтому в работе уделено значительное внимание разработке и испытанию различных методов интерпретации результатов моделирования.

Решение этой задачи позволило получить ряд результатов, например, в такой актуальной области климатологии, как изучение влияние городского острова тепла на локальный климат (*Рубинштейн, Гинзбург, 2003*).

Успешное решение основной задачи позволило создать системы обеспечения метеорологической информацией экологических задач.

Одной из наиболее актуальных для современного общества экологических задач является мониторинг загрязнения воздуха,



распространения различных загрязняющих веществ, в том числе и радиоактивных, по самому быстрому атмосферному каналу и определение ареалов осадение их на поверхность земли. Уже более 15 лет в Европе действует программа слежения за трансграничным переносом примеси, называемая ЕМЕП (Совместная программа наблюдения и оценки распространения загрязнителей воздуха на большие расстояния в Европе). Мониторинг степени загрязнения воздуха и подстилающей поверхности для территорий большого масштаба осуществляется в настоящее время, с помощью численных моделей. Основная доля изменчивости концентраций примесей в атмосфере и выпадений на подстилающую поверхность определяется изменчивостью метеорологических условий. Поэтому качество мониторинга загрязнения воздуха и поверхности в большой мере зависит от качества метеорологических данных, используемых при расчетах. В работе приведено описание созданных систем обеспечения метеорологическими данными моделей переноса долгоживущих и быстро выводимых примесей в атмосфере и анализ их работы (Рубинштейн, 2002). Реализация в результате выполнения работы систем обеспечения метеорологическими данными моделей переноса примесей для решения экологических задач демонстрирует острую актуальность выполненной работы.

### **Цель диссертационной работы и основные задачи исследования**

Целью работы являлось создание оптимальной, с точки зрения качества воспроизведения наблюдаемого климата и затрат вычислительных ресурсов, версии модели общей циркуляции атмосферы, с помощью которой возможно проводить длительные численные эксперименты и готовить метеорологические данные для различных экологических задач.

Для достижения этой цели было необходимо решение следующих задач:

1. Провести анализ и подготовить эталонные наборы данных, необходимые для оценки адекватности воспроизведения современного климата моделями ОЦА.
2. Создать систему анализа результатов моделирования ОЦА.
3. Оценить воспроизведение современного климата с помощью двух версий спектральной модели ОЦА.
4. Усовершенствовать версии модели для проведения экспериментов по изучению изменения климата.
5. Получить оценки чувствительности модели ОЦА к изменению внутренних и внешних параметров.
6. Исследовать влияние различных свойств подстилающей поверхности (температуры поверхности океана и свойств суши) на характеристики ОЦА.
7. Создать и испытать методы интерпретации результатов крупномасштабного моделирования и исследовать возможности различных методов.
8. Испытать метод динамической детализации численных прогнозов с помощью региональной модели.

9. Разработать принципы построения системы подготовки метеорологических данных для задач дальнего переноса долгоживущих примесей в атмосфере полусферного и регионального масштабов с использованием модели ОЦА и специальных процедур детализации метеорологических элементов.

10. Создать систему подготовки метеорологических данных для задачи расчета краткосрочного источника загрязнения в верхних слоях атмосферы.

11. Создать и внедрить процедуру трехмерной коррекции модельных осадков по данным наблюдений.

Основным методом исследования является математическое моделирование.

Использование в исследовании изменения климата и во всех системах подготовки метеорологических данных для задач переноса примеси в атмосфере единой спектральной гидродинамической модели, проверенной и настроенной в результате многочисленных длительных экспериментов, определяет общую целостность диссертации.

### Достоверность и обоснованность

Все результаты диссертационной работы обоснованы путем сравнения с эталонными данными и с аналогичными исследованиями отечественных и зарубежных авторов. В частности, все эксперименты с моделью ОЦА, проведенные по протоколу AMIP-1 и AMIP-2 (Atmospheric Models Intercomparison Project – проект сравнения моделей атмосферы 1 и 2 стадии) сравниваются с результатами участвовавших в нем моделей, и, кроме того, с данными климатических архивов и реанализов за тот же временной интервал.

В результатах систем подготовки метеорологических данных для задач переноса примесей оценивалось качество подготовленных параметров атмосферы путем сравнения с эталонами, а результаты расчетов по моделям переноса примесей путем сравнения с данными измерений на реперных пунктах.

### Основные научные результаты и их новизна

Научная новизна работы определяется тем, что в ней впервые:

- Реализована процедура вариационного согласования температуры, геопотенциала и влажности в климатических архивах;
- Проведено сравнение температуры и трендов температуры, а также влажности в свободной атмосфере по данным реанализа с аэрологическими данными для получения оценок пространственной и временной однородности результатов реанализов;
- Проведено сравнение результатов многолетнего моделирования по двум версиям спектральной модели ОЦА;
- Проведен анализ характеристик снежного покрова в Российских

моделях ОЦА;

- Оценена чувствительность спектральной модели ОЦА к изменению ряда внутренних (например, концентрация углекислого газа), и внешних (например, температура поверхности океана и свойства поверхности суши) параметров модели;

- Внедрена параметризация гидрологических процессов на суше, описывающая в явном виде сток рек;

- Предложен, разработан и испытан гибридный метод детализации температуры и влажности воздуха, использующий данные измерений в точке и расчеты по модели теплового и водного балансов;

- Внедрен для оперативных испытаний в Гидрометцентре России динамический метод детализации численных прогнозов с помощью региональной модели;

- Внедрена процедура трехмерной коррекции модельных осадков по данным наблюдений, позволяющая радикально улучшить учет осадков для задачи вымывания примеси в воздухе.

- Созданы системы подготовки метеорологической информации для моделей переноса примесей в атмосфере различного временного и пространственного масштабов.

### **Практическая значимость исследования**

а) Использование процедуры вариационного согласования полей геопотенциала, температуры и влажности позволило исправить ряд недостатков климатических архивов.

б) Анализ степени временной и пространственной однородности результатов реанализов позволил определить области и интервалы их надежного использования в качестве эталонов при проверке крупномасштабных гидродинамических моделей на историческом ряде метеорологических данных.

в) Внедрение параметризации с явным описанием стока рек позволило анализировать воспроизведение гидрологических характеристик для регионов водосборов, проводить исследование влияния изменения климата на сток основных рек и в будущем, при совместном моделировании атмосферы и океана учитывать сток рек как дополнительный источник пресной воды в океанах.

г) Разработка и реализация методов интерпретации результатов крупномасштабных моделей позволила детализировать численные прогнозы различного масштаба. В рамках этой части диссертации в Гидрометцентре России проходят оперативные испытания метод динамической детализации численных прогнозов погоды с помощью региональной модели MM5. Результаты этой части работы нашли целый ряд практических применений. В частности, по ее результатам в течении 2005 года в г.Пятигорске проводится составление медицинских прогнозов для пяти городов – курортов

Минеральных вод. С помощью прогностических полей ветра в свободной атмосфере осуществляется прогноз переноса примеси из Европы в Сибирь. Кроме того, совместно с Петербургским филиалом института океанологии РАН, ведутся экспериментальные прогнозы ветровых нагонов в Финском Заливе, Невской Губе и на Ладожском озере.

е) Разработана и внедрена система подготовки метеорологических данных для Метеорологического Синтезирующего Центра Восток (ЕМЕП). Разработка этой системы позволила вести оценки загрязнения воздуха Европейского региона на регулярной основе в течение 10 лет с целью обеспечения информацией правительств Европейских стран.

ж) Другая система подготовки метеорологических данных с использованием спектральной модели ОЦА для быстро выводимых из атмосферы примесей позволила рассчитать метеорологические данные для определения зон выпадения остатков топлива при 82 запусках ракет на Семипалатинском полигоне.

з) Процедура трехмерной коррекции модельных осадков по данным наблюдений внедрена в систему подготовки метеорологических данных для задач переноса примеси в атмосфере и позволила радикально улучшить расчеты вымывания долгоживущих примесей в атмосфере.

### **Реализация результатов**

Полученные в работе результаты используются для решения большого числа исследовательских и прикладных работ. В настоящее время проводится цикл исследований влияния новых параметризаций снежного покрова на климат (*Рубинштейн и др., ФАО 2006 (принята к публикации)*); *Хан, и др., ФАО, сдана в печать, 2006*), влияние неоднородности силы тяжести на свойства общей циркуляции атмосферы (*Макоско и др. МИГ, 2006, № 2 – принята к публикации*) и в других. Их проведение стало возможным только после реализации проверенной и подготовленной версии спектральной модели ОЦА.

Внедрение результатов динамической детализации прогноза погоды для экспериментальных расчетов нагонов в Финском заливе, расчетов медицинских прогнозов на курортах Минеральных вод, исследовании переноса примеси из Европы в Сибирь подтверждается соответствующими документами, приведенными в приложении.

Реализация прикладных задач описана в последней главе работы. Одной из них является система обеспечения метеорологическими данными моделей трансграничного переноса примеси для полусферы и Европейского региона и второй – расчет переноса и осаждения остатков топлива из ракет над Семипалатинским полигоном. Их реализация также подтверждается соответствующими документами, приведенными в приложении.

### **Апробация работы**

Диссертантом всего опубликовано 74 научные работы.

Результаты диссертационной работы изложены в 38 публикациях, список которых приведен в заключение автореферата.

Из них в журналах Известия АН РАН, серия Физика атмосферы и океана – 3, Метеорология и Гидрология – 14, Оптика атмосферы и океана – 1, Вычислительные Технологии – 3, международных изданиях – 6, тематических сборниках – 4, в трудах Гидрометцентра СССР, Гидрометцентра России и ВНИИГМИ-МЦД – 6.

Результаты диссертации неоднократно докладывались на Российских и зарубежных конференциях и семинарах:

XI Всесоюзном совещании по актинометрии (Таллин, 1980), Всесоюзной конференции "Моделирование климата, его изменений и колебаний" (Ленинград, 1980);

XX Генеральной Ассамблее Европейского Геофизического Союза (1995, Гамбург, Германия);

Геофизическом Союзе Мексики (1997, Пуэрто – Ваярта, Мексика);

Второй международной конференции по климату и воде, (1998, Эспоо, Финляндия);

Международной конференции по моделированию загрязнения в атмосфере, (1998, Париж, Франция);

Международной конференции «Проблемы гидрометеорологии и окружающей среды на пороге XXI века» (1999, Санкт-Петербург, Россия);

Четвертой международной конференции по моделированию изменений глобального климата и изменчивости, (1999, Гамбург, Германия);

Второй международной конференции по реанализам, (1999, Реддинг, Англия);

Шестой международной конференции по атмосферным наукам и приложениям к качеству воздуха (2000, Тайпей, Тайвань);

Конференции молодых ученых, посвященной 80-летию отдела динамической метеорологии Главной геофизической обсерватории, (2001, Санкт-Петербург);

Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам как средствам снижения загрязнений на городском и региональном уровне, ENVIROMIS-2002, 2004 (2002, 2004 Томск);

Втором международном симпозиуме по физико-математическим проблемам, связанным с климатическим моделированием и прогнозом, (2002, Китай, Шанхай);

Международной конференции по моделированию Систем Земли, (2003, г. Гамбург, Германия);

Пятой международной конференции по городской климатологии, (2003, Польша, г. Лодзь);

Третьей Международной Конференции "Состояние и охрана воздушного бассейна и водно-минеральных ресурсов курортно-рекреационных регионов", (2003, Кисловодск);

Всемирной конференции по изменению климата, (2003, Москва);

Восьмой международной конференции по атмосферным наукам (2003 г. Цукуба, Япония);

Совещании – семинаре «Специализированное гидрометеорологическое обеспечение туризма и отдыха: состояние и перспективы», (2005, Кисловодск);

Первой международной научной конференции по климату и криосфере, (2005, Пекин, Китай).

Результаты работы регулярно докладывались на заседаниях секций Ученого совета Гидрометцентра России и его научных семинарах.

Работа прошла апробацию на совместном заседании семинара по долгосрочным прогнозам погоды и семинара по среднесрочным и краткосрочным прогнозам погоды (секции численных прогнозов) ГУ «Гидрометцентра России»

### **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы 394 страниц текста, из них 112 иллюстраций, 27 таблиц. Библиография насчитывает 275 источников. В приложении приведены копии справок о внедрениях результатов, полученных в диссертации.

## **2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, приводится краткая история моделирования ОЦА в России и за рубежом, сформулированы цели и задачи диссертации и кратко излагается содержание отдельных глав диссертации.

### **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ И ПОДГОТОВКА ЭТАЛОННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ НАСТРОЙКИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ**

Одной из важнейших задач при моделировании циркуляции атмосферы является подбор оптимальных параметров модели и анализ результатов экспериментов, позволяющий убедиться, что модель воспроизводит современное состояние атмосферы адекватно наблюдениям. Процесс проведения длительных экспериментов, их анализа, подбор оптимальных параметров и конфигурации модели в соответствии с выводами анализа в дальнейшем называем терминном «валидация модели».

При валидации модели отдельной, в большой мере определяющей результат, задачей является выбор эталонных данных. Развитие моделирования циркуляции атмосферы дало заметный импульс в создании глобальных однородных наборов данных. Пионерские работы по моделированию общей циркуляции атмосферы в США Дж. Смагоринского [*Smagorinsky, 1964*]

сопровождались весьма сложной и также пионерской работой по созданию первого однородного климатического аэрологического архива [Oort, Rasmussen, 1971]. Значительным мировым достижением в современной метеорологии можно рассматривать создание рядов реанализов.

В данной главе описывается решение задач, связанных с анализом и подготовкой эталонных эмпирических данных о климате свободной атмосферы. Принципиально важно осознавать, что эмпирические эталоны, особенно в регулярной сетке, с которыми сравниваются результаты крупномасштабного моделирования, не являются данными непосредственных наблюдений, а являются результатом обработки наблюдений по некоторой технологии. При их получении могут нарушаться связи между метеорологическими величинами, такие, например, как закон квазистатического равновесия и другие.

Далее показано, что в ряде климатических архивов температуры, геопотенциала и влажности в свободной атмосфере, используемых в качестве эталонных для анализа результатов моделирования ОЦА, не выполнялось уравнение статики.

В четырех первых параграфах описана предложенная и реализованная процедура вариационного согласования температуры, геопотенциала и влажности, обеспечивавшая выполнение уравнения статики и перерасчета распределения вертикальной статической энергии.

Изложим предлагаемый алгоритм согласования геопотенциала, температуры и влажности. В нем использованы идеи влажного конвективного приспособления, развитого в работах [Manabe et al., 1965].

Кратко суть метода состоит в следующем:

Пусть в столбе атмосферы на  $N$  изобарических поверхностях заданы  $\tilde{H}_i$  и  $\tilde{T}_i$ ,  $i=1, \dots, N$ , а на  $N_1$  изобарических поверхностях – значения  $\tilde{q}_j$ ,  $j=1, \dots, N_1$ . Тогда согласованные значения минимизируют функционал

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[ \alpha_i (H_i - \tilde{H}_i)^2 + \gamma_i (T_i - \tilde{T}_i)^2 \right] + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_1} \beta_j (q_j - \tilde{q}_j)^2 \quad (1)$$

при условии (2), где  $i=1, \dots, N-1$ ,  $q_i=0$  при  $i>N$  и

$$\sum_{i=1}^N \left[ c_p (T_i - \tilde{T}_i) + g (H_i - \tilde{H}_i) \right] + \sum_{j=1}^{N_1} L(q_j - \tilde{q}_j) = 0 \quad (2)$$

Условие (2) обеспечивает сохранение влажной статической энергии в столбе атмосферы.

Для отыскания минимума функционала (1) можно было бы использовать стандартную технику вариационного исчисления, однако это привело бы к необходимости решать систему нелинейных алгебраических уравнений (в силу нелинейности (1)), что сопряжено с определенными трудностями. В связи с тем, что поправки невелики, оказалось возможно линеаризовать соотношение (1), относительно самих величин, пренебрегая произведениями поправок.

Пусть  $\Delta H_i = H_i - \tilde{H}_i$ ,  $\Delta T_i = T_i - \tilde{T}_i$ ,  $\Delta \tilde{q}_j = q_j - \tilde{q}_j$ ,

$$\begin{aligned} \text{Тогда } \Delta H_{i+1} - \Delta H_i + \Delta \tilde{H}_{i+1} - \tilde{H}_i = \\ = S_{i,i+1} \left[ (\tilde{T}_i + \Delta T_i) (1 + 0,605 \tilde{q}_i) + \tilde{T}_i 0,605 \Delta q_i + \right. \\ \left. + (\tilde{T}_{i+1} + \Delta T_{i+1}) (1 + 0,605 q_{i+1}) + \tilde{T}_{i+1} 0,605 \Delta q_{i+1} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Вариационная задача (1), (2) в новых терминах может быть сформулирована в виде:

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [\alpha_i (\Delta H_i)^2 + \gamma_i (\Delta T_i)^2] + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_1} (\Delta q_j)^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

при условиях (5), где  $i=1, \dots, N$ , а  $\tilde{q}_j = \Delta q_j = 0$ , для  $j > N_1$  и

$$\sum_{i=1}^N (c_p \Delta T_i + g \Delta H_i) + \sum_{j=1}^{N_1} (L \Delta q_j) = 0 \quad (5)$$

Вместо условного экстремума функционала ищется безусловный экстремум функционала (4) Здесь  $T$  – температура,  $H$  – геопотенциальная высота и  $q$  – удельная влажность на изобарических поверхностях,  $\lambda_j, j=1, \dots, N-1$  и  $\phi$  – множители Лагранжа.

Температуры, величины геопотенциальных высот и влажность на изобарических поверхностях климатических архивов, использованные далее в работе, были согласованы с помощью разработанной процедуры.

Было показано, что средняя по всему полю поправка составляла 1,022°C, и в отдельных точках не превышала 2-3 градусов. Средняя для всего поля геопотенциала на уровне 500 гПа поправка составляла 0,097 дам и в отдельных точках не превышала 3,5 дам.

Распределение по вертикали среднего модуля невязки в климатических архивах приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Средний по слоям атмосферы модуль невязки в климатических  
аэрологических архивах ( $10^{-1}$  дам)**

Границы слоя, гПа	Архив А1		Архив АП	
	Июль	Январь	Июль	Январь
100/200	31,6	18,1	32,3	29,0
200/300	18,13	14,1	18,4	12,9
300/500	10,6	12,4	12,1	12,01
500/700	8,1	6,3	8,09	11,1
700/850	5,6	6,7	5,6	8,9

Во второй части той же главы приводятся результаты сравнения температуры и влажности в свободной атмосфере с данными аэрологического зондирования.

Известно, что основным свойством реанализа является единая технология обработки данных для всего срока. Тем не менее, в результатах реанализов всегда наблюдается значительная временная и пространственная неоднородность, связанная с географией использовавшихся измерений и изменчивостью их поступления в схему усвоения. Значительную изменчивость поступления данных, использованных в реанализах, иллюстрирует рис. 1. Видно, что количество использованных зондов изменялась от 700 до 1700.

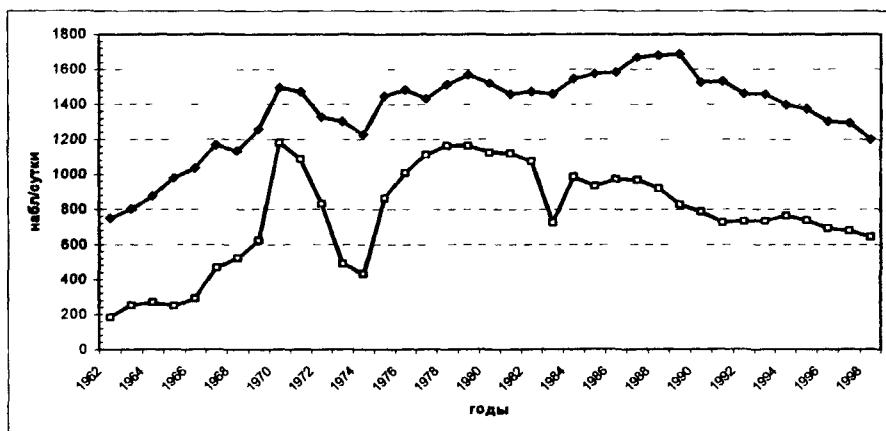


Рис 1 Среднее по годам число наблюдений за сутки, использованных в проекте реанализа NCAR/NCEP, за период 1962-1998 гг

Нижняя кривая (прозрачные квадраты) – шаропилотные сообщения

Верхняя кривая (зачерненные ромбы) – радиоозондовые сообщения

Во второй части первой главы диссертации приведены результаты исследования степени пространственной и временной неоднородности двух элементов реанализа – температуры и влажности в свободной атмосфере.

Для анализа степени пространственной и временной неоднородности результатов реанализов проведено сравнение их результатов с данными наблюдений. В качестве стационарных статистик для сравнения с результатами реанализа NCAR/NCEP использовались статистики, полученные по данным Аэрологического Массива Данных (CARDS). Для анализа были выбраны четыре континентальные области земного шара: Северная Америка, Европа, Северная Азия и Австралия.

Методика сопоставления месячных значений в узлах сетки с пространственным разрешением 2,5 градуса по данным реанализа NCAR/NCEP и месячных значений величин в точках станций состояла в следующем. Для

конкретного месяца  $M$  (январь или июль) и года  $Y$  вычислялись невязки между месячными значениями метеовеличин  $X_{S,Y,M}^{MON}$  на станции  $S$  и интерполированными с помощью билинейной интерполяции из окружающих узлов массива реанализа в точку станции  $S$  месячными значениями  $X_{S,Y,M}^{REAN}$ :

$$\delta X_{S,Y,M} = X_{S,Y,M}^{MON} - X_{S,Y,M}^{REAN}$$

При вычислении невязки проверялось условие наличия на станции двух третей от возможного числа наблюдений. Для выбранной географической области по невязкам каждой из рассматриваемых величин рассчитывались следующие статистики:  $MEAN_{Y,M}$  – среднее для года  $Y$  значение  $\delta X_{S,Y,M}$ ,  $MEAN_M$  – среднее для всех лет значение  $\delta X_{S,Y,M}$ ,  $N_M$  – среднее по годам число случаев при вычислении невязки  $\delta X_{S,Y,M}$  по множеству лет и станций,  $\beta_M$  – угловой коэффициент линейного тренда ряда значений  $MEAN_{Y,M}$ .

Пространственная неоднородность температуры и влажности представлены в табл. 2 и 3, соответственно. Из них видно, что невязки температуры в Австралии выше, чем в остальных регионах в 2-3 раза. Наибольшие невязки влажности наблюдались летом в Северной Азии.

Таблица 2

Статистики разностей между значениями температуры  $T$ , со станций и интерполированными в точки станций данных реанализа NCAR/NCEP

Область	Уровень, гПа	Т, январь		Т, июль	
		$MEAN_M$	$\beta_M$	$MEAN_M$	$\beta_M$
Европа	850	0.193	-0.92	0.223	-2.30
	500	0.208	-0.60	0.130	-0.60
	100	0.152	0.87	0.061	1.95
Северная Америка	850	0.317	-0.07	0.031	-0.02
	500	0.189	-1.12	0.085	0.04
	100	-0.312	-0.95	0.213	-0.55
Северная Азия	850	0.162	-0.60	0.055	-0.09
	500	0.114	-0.15	0.117	0.69
	100	-0.244	0.04	0.521	-0.33
Австралия	850	0.317	-0.07	0.031	-0.02
	500	-0.035	0.33	-0.088	0.98
	100	0.152	0.87	0.061	1.95

Примечание.  $MEAN_M$  – среднее разности (град С),  $\beta_M$  – угловой коэффициент линейного тренда разностей (град. С\*/10 л).

Таблица 3

Статистики разностей между значениями удельной влажности  $Q$ , со станций и интерполированными в точки станций по данным реанализа NCAR/NCEP

Область	Уровень, мПа	Q, январь		Q, июль	
		MEAN <sub>M</sub>	$\beta_M$	MEAN <sub>M</sub>	$\beta_M$
Европа	850	0.096	-0.20	0.020	-0.80
	300	0.014	-0.13	-0.003	-0.02
Северная Америка.	850	0.021	-0.02	-0.062	0.02
	300	0.021	0.01	-0.062	0.02
Северная Азия	850	0.032	-0.18	-0.001	-0.20
	300	0.022	-0.04	-0.001	-0.05
Австралия	850	0.011	-0.02	0.005	0.18
	300	-0.078	-0.22	0.005	-0.09

MEAN<sub>M</sub> – средние разности (г/кг),  $\beta_M$  – угловой коэффициент линейного тренда разностей (г/кг/10л).

Из таблиц видно, что средние невязки для температуры в нижней тропосфере всюду положительные, что означает, что температура в реанализе в среднем ниже, чем по данным станционных статистик.

В работе анализируется временная неоднородность невязок для каждой из четырех областей и для всех уровней. Кроме того, на ряде примеров сравнения временного хода приземной температуры показано, что температура на высоте 2 м реанализа отражает основные тенденции наблюдаемых изменений (рис. 2), в то же время анализ временного хода и трендов осадков, полученных в реанализе, не подтверждается наблюдениями (рис. 3). Таким образом, показано, что необходимо проявлять определенную осторожность при анализе локального временного хода осадков в реанализах.

В последних разделах главы приведено сравнение вертикального распределения трендов температуры в свободной атмосфере по данным реанализов и радиозондовым измерениям. На рис. 4 приведены вертикальные сечения зональных значений линейных трендов за 1979-1998 гг. для полосы от 70 ю.ш. до 80 с.ш. по данным реанализа и радиозондирования.

Выполненное в главе 1 сопоставление вертикальных профилей линейных трендов температуры по данным реанализа NCAR/NCEP и радиозондирования позволяет сделать вывод о совпадении их знаков и, качественно, их вертикального распределения, то есть о возможности с определенной осторожностью использовать тренды температуры в свободной атмосфере как одного из критериев адекватности модели наблюдениям.

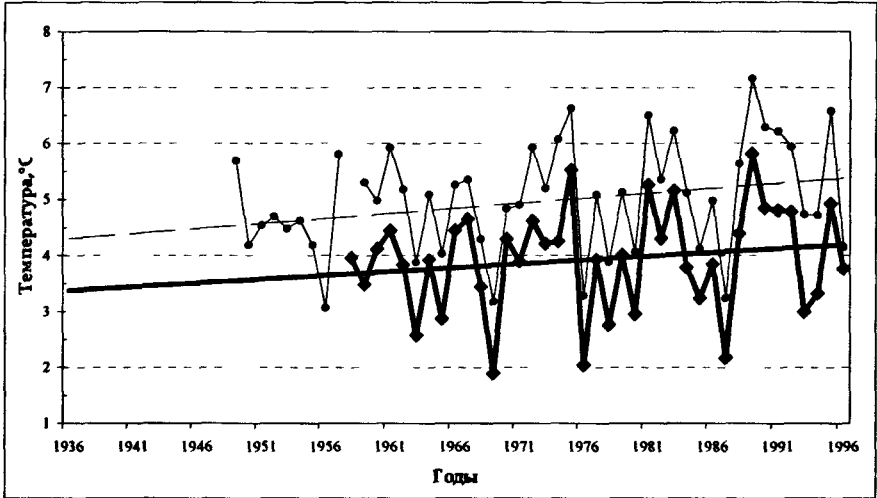


Рис. 2. Ряды средней годовой температуры и тренды, наблюдаемой на станции Москва – ВДНХ (тонкая линия) и температуры интерполированной в точку станции Москва – ВДНХ по данным реанализа NCAR/NCEP (толстая линия).

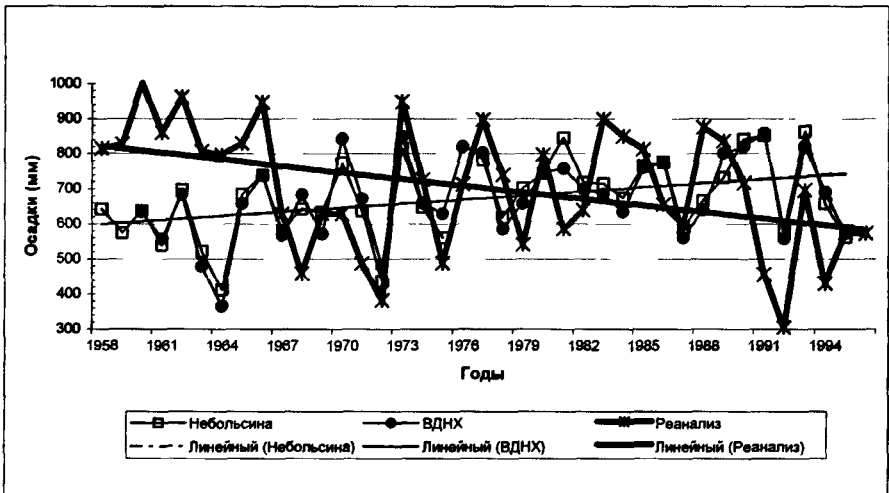


Рис. 3. Ряды годовых сумм осадков (мм) и их тренды, наблюдавшихся на станциях Москва – ВДНХ и Москва – Небольсина (тонкие линии) и осадков интерполированных в точку станции Москва ВДНХ по данным реанализа NCAR/NCEP (толстая линия)

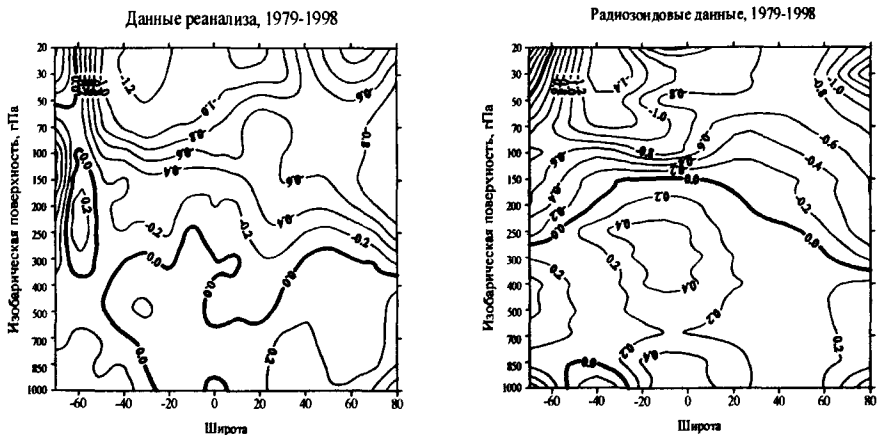


Рис 4 Вертикальные сечения зональных значений линейных трендов по данным реанализа NCAR/NCEP (слева) и радиозондирования (справа).

## **Глава 2. Модель общей циркуляции атмосферы и методы параметризации физических процессов**

Во второй главе диссертации приводится описание спектральной модели общей циркуляции атмосферы, даны параметры конкретной реализации версии модели, использованной для проведения базовых экспериментов, и определяются методы параметризации физических процессов, в ней использованных.

Спектральная модель ОЦА основана на интегрировании системы уравнений гидротермодинамики бароклинной атмосферы. Слагаемые в правых частях уравнений характеризуют воздействие на исследуемые движения физических процессов, не учитываемых в приведенных уравнениях – таких как процессы в облаках, конвекция, и так далее. Эти процессы учитываются в модели с помощью процедур параметризации. Библиотека модулей с параметризациями, используемыми в базовой версии модели, содержит описание следующих процессов: линейной горизонтальной диффузии 4-го порядка, вертикальной диффузии в приземном и пограничном слоях, крупномасштабную конденсацию, влажную глубокую конвекцию, процессов на поверхности суши и в почве, радиацию и облачность.

Следует отметить, что практически все существующие схемы параметризации физических процессов недостаточно точно отражают явления, которые они предназначены моделировать. К числу наиболее неопределенных проблем можно отнести параметризацию влажной конвекции. В связи с этим в работе анализу методов параметризации конвекции уделяется больше внимания, чем остальным методам. В ней приведен обзор основных методов

параметризации конвекции. Показано, что методики параметризации можно сравнивать, по крайней мере, по трем различным критериям. Во-первых, важно пытаться оценивать реалистичность гипотез, лежащих в основе параметризации, что и было проделано в представленном обзоре. Отмечается, что не менее важно сочетание точности или детальности определенного вида параметризации с описанием остальных физических процессов в модели. Но к настоящему моменту нет отчетливого формализованного представления о физике взаимодействия процессов различных масштабах. Нет также и общих требований к алгоритму включения физического процесса в модель, и часто при создании модели решает вкус исследователей. Во-вторых, возможным способом сравнения параметризации является анализ результатов численных экспериментов, полученных с использованием той или иной методики. Сопоставление результатов, полученных с помощью различных моделей, является делом весьма спорным, так как на результаты может повлиять множество характеристик модели, никак не связанных, например, с конвекцией. Представляет интерес изучение различных методик, примененных в одной модели с одними начальными данными. Ряд примеров такого сравнения приведен в работе в главе 4. И, наконец, третьим возможным направлением сравнения методик параметризации является применение различных методик в диагностических исследованиях и сравнение данных зондирования атмосферы. Таких работ, к сожалению крайне мало. В приведенном во второй главе обзоре, показано, что существует ряд методов параметризации конвективных процессов, отличающихся различной степенью детализации в описании групп кучевых облаков. Уже первые результаты моделирования, использовавшие конвекцию по гипотезе CISK (конвективная неустойчивость второго рода), дали достаточно реалистичную и разумную картину общей циркуляции атмосферы. Применение более сложных и детальных методов параметризации не обязательно приводит к лучшим результатам, что естественно. С ростом детальности, а следовательно, и сложности метода параметризации увеличивается число параметров, определяющих характеристики групп облаков и их влияние на крупномасштабные процессы. Если при применении более простых методов для получения более реалистичных характеристик модели достаточно несколько изменить критерии начала конвекции или профиль нагревания, особенно не задумываясь над физическим обоснованием такого изменения, то попытки подобной коррекции в более сложных методах потребуют изменения целого ряда параметров, влияние каждого из которых не слишком хорошо известно. В связи с этими аргументами в базовом эксперименте использовалась модифицированная параметризация по гипотезе CISK.

Сказанное, однако, не означает, что при моделировании атмосферных процессов не следует стремиться применять новые методы параметризации, ибо они дают возможность изучить физические процессы при взаимодействии разномасштабных явлений.

Кроме конвекции во второй главе приводится описание остальных процедур параметризации физических процессов в базовой версии модели.

Во второй главе работы приведены также параметры базовых экспериментов. Базовые эксперименты проводились с помощью двух версий спектральной модели – T21L15 и T42L15. Обозначение означает T – треугольное усечение 21 и 42 гармоник и L – количество уровней (в обоих случаях 15) по вертикали. Уравнения модели записаны в  $\sigma$ -системе координат. Вертикальная структура базовой версии дана в табл. 4.

Таблица 4

Номера уровней и значения  $\sigma$  в середине слоев для версии L15

N	15	14	13	12	11	10	8	8
$\sigma$	0,99	0,96	0,91	0,85	0,77	0,68	0,59	0,5
N	7	6	5	4	3	2	1	-
$\sigma$	0,45	0,34	0,26	0,19	0,15	0,07	0,05	-

В заключении главы приведены карты начальных значений и краевых условий, использовавшихся в базовых экспериментах.

### **Глава 3. Валидация спектральной модели общей циркуляции атмосферы**

В третьей главе диссертации изложена методика и результаты разностороннего контроля и настройки двух версий спектральной модели ОЦА. В соответствии с развитием понимания свойств климатической системы атмосфера-океан-суша-криосфера и ростом вычислительных возможностей, растут требования к результатам моделирования ОЦА. Если первые результаты моделирования оценивали, в основном, сравнением средних характеристик в экспериментах со средними климатическими величинами, то от современных моделей требуется воспроизведение адекватной наблюдениям изменчивости многих переменных. Кроме того, проводится анализ не только основных переменных модели, таких как скорости ветра, температура и влажность в свободной атмосфере, но и свойств подстилающей поверхности и таких характеристик, как, например, снежный покров. В работе приведены оценки сравнения средних величин в базовых экспериментах, их изменчивость и ряд дополнительных более тонких характеристик, как, например, амплитудно-фазовые свойства годового хода приземной температуры воздуха или интегральные характеристики снежного покрова.

Процесс валидации модели требует проведения десятков, если не сотен, экспериментов. В третьей главе приводятся некоторые результаты этой многолетней работы.

Одним из главных свойств системы атмосфера – океан - суша является периодичность граничных условий. В первых разделах третьей главы показано, что в базовых экспериментах удается удовлетворительно воспроизвести годовой ход температуры и термическую структуру тропосферы. Тем не менее,

из анализа средней термической структуры следует, что в результатах экспериментов наблюдается систематическое выхолаживание в верхней тропосфере – нижней стратосфере, что связано с недостатками использовавшейся радиационной схемы. В работе показано, что подобный характер расхождения с наблюдениями проявлялся в большинстве зарубежных моделей сравнимого класса. Из анализа структуры полей влажности в тропосфере можно видеть, что в зимнем полушарии влажность в экспериментах переносилась к полюсам в меньшем количестве, чем по климатическим данным. Летом в северном полушарии распределение влажности получилось удачнее, чем зимой. Анализировались вертикальные профили средних по полушариям значений аналога кинетической энергии  $(u^*u+v^*v)/2$  для лета с.п./зимы ю.п. по климатическим данным и результатам экспериментов. Показано, что для всей атмосферы в обоих сезонах и в обоих полушариях, значения энергии, полученные в эксперименте, выше эмпирических. Высоты расположения струйных течений обоих полушарий близки к климатическим.

Несмотря на равномерное вращение Земли, годовой ход приземной температуры воздуха в природе не является синусоидальным. На отклонения его от синусоидальности влияет множество факторов – от неравномерности распределения суши, океанов и льдов по поверхности до переменности полей облачности. Все это приводит к целесообразности анализа адекватности воспроизведенного не только годового хода (ГХ) приземной температуры, а также его амплитудных и фазовых характеристик. Для этого рассчитывались и анализировались следующие характеристики:

- амплитуда годового хода  $T_{s,1}$  годовой гармоник,
- амплитуда годового хода  $T_{s,2}$  полугодовой гармоник,
- момент 0-фазы ГХ  $t_s^{(1)}$  (момент, когда текущая температура равна среднегодовому значению в процессе ее роста),
- момент  $\pi$ -фазы ГХ  $t_s^{(4)}$  (момент, когда текущая температура равна среднегодовому значению в процессе ее уменьшения),
- интервал превышения  $t_s^{(+)}$  (интервал внутри года, когда температура выше среднегодового значения).

Сравнение перечисленных характеристик, полученных по результатам моделирования с данными реанализов приведены на рис. 5. По ним видно, что модели, воспроизводящие более высокую среднегодовую температуру над сушей воспроизводят также меньшие, чем по наблюдениям, среднеполушарные значения  $\bar{T}_{s,1}$ ,  $\bar{T}_{s,2}$  и недооценивают межгодовое значение среднеквадратических отклонений амплитуд годовой и полугодовой гармоник. Над сушей внутропических широт, кроме того, они характеризуются запаздыванием  $t_s^{(1)}$  и  $t_s^{(4)}$  относительно данных наблюдений и недооценивают межгодовое среднеквадратических отклонений моментов 0- и  $\pi$ -фазы годового хода приповерхностной температуры. Для экспериментов с моделью ГМЦ

увеличение пространственного разрешения модели и более адекватный учет вариаций морского льда улучшает точность расчета АФХ ГХ  $T_s$ ; пространственное СКО для версии ГМЦ-T42 относительно обоих реанализов систематически меньше, чем для версии ГМЦ-T21.

Модели, лучше воспроизводящие среднюю по интервалу эксперимента среднегодовую температуру воздуха над сушей, в целом лучше воспроизводят и характеристики пространственных вариаций средних значений и межгодового СКО амплитуд годовой и полугодовой гармоник  $T_s$  (рис. 5). Подобного соответствия для моментов 0- и  $\pi$ -фаз и интервала превышения установить не удастся.

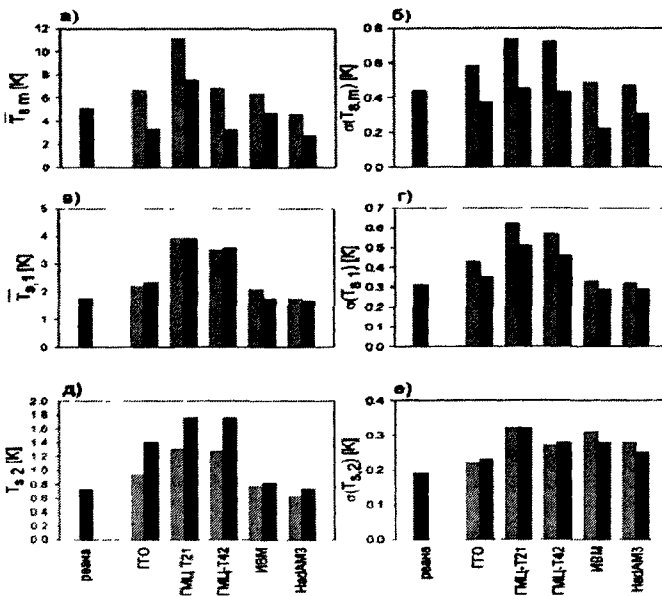


Рис. 5 Пространственные средние (слева) и среднеквадратическое отклонение от средних (справа) АФХ ГХ  $T_s$  над сушей, рассчитанных по результатам моделей, относительно реанализов ERA (светло-серые колонки) и NCEP/NCAR (темно-серые колонки) для 1979-1993 гг *a* - среднегодовой температуры, *b* - ее временного среднеквадратического отклонения, *c* - средние значения амплитуды годовой и *d* - полугодовой гармоник и *e* и *f* их межгодовых среднеквадратических отклонений.

Далее в третьей главе анализируется воспроизведение в экспериментах муссонной циркуляции. Показано, что в экспериментах удовлетворительно воспроизводятся основные элементы азиатской и африканской муссонной циркуляции и осадков над Индостаном и Африкой. Приведено сравнение, с

результатами экспериментов по АМIP-1 протоколу большого количества моделей. Пример сравнения результатов приведен на рис. 6. Видно, что временной ход нормированного индекса осадков в экспериментах со спектральной моделью ОЦА по амплитуде и фазе ближе к эмпирическому индексу, чем у многих зарубежных моделей.

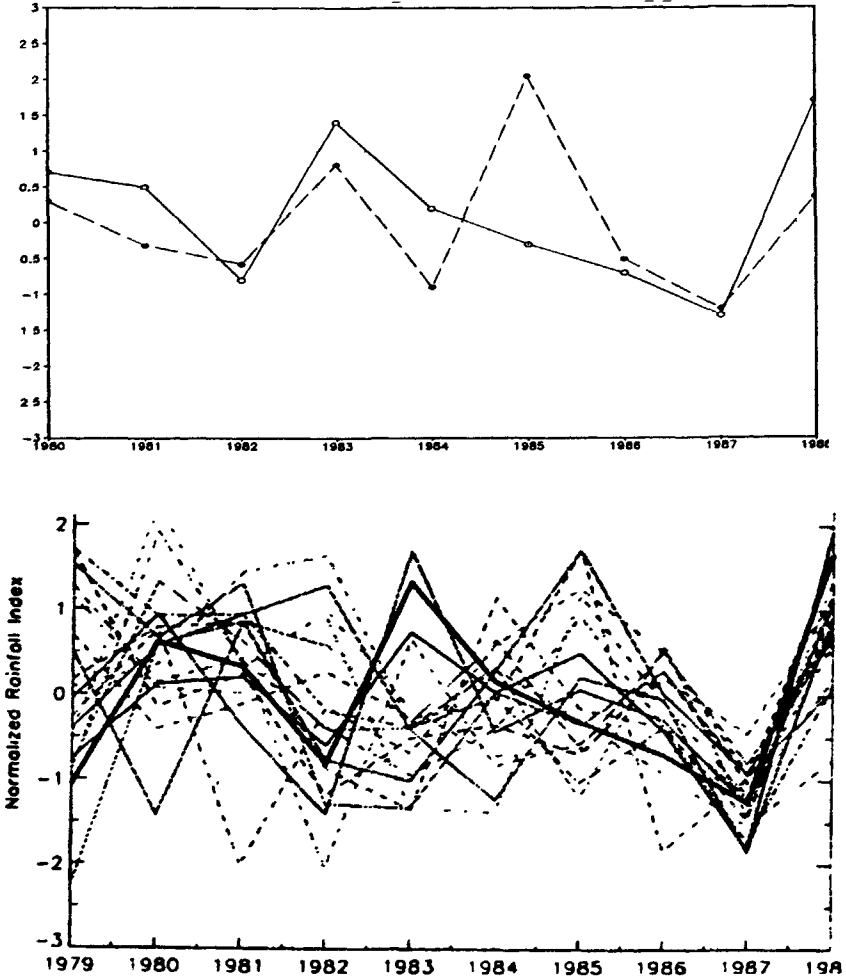


Рис. 6. Изменение со временем нормированных индексов осадков, над Индостаном, осредненных за июнь, июль, август, сентябрь. Верхний график – для базового эксперимента с версией T21L15 (пунктир) и наблюдений (сплошная). Нижний график – для моделей, участвовавших в АМIP-1 (с маркерами) и наблюдений (жирная линия)

Аномалии осадков, нормированные на дисперсию осадков над Индостаном, осредненные для 4 месяцев (июнь, июль, август, сентябрь) из экспериментов с 13 моделями, участниками АМIP-1 (рис. 6 – нижний) взяты из работы [Sperber and Palmer, 1995].

В этой же главе приведен анализ характеристик изменчивости приземной температуры воздуха, полученных в численных экспериментах. Сравнение зональной структуры приземной температуры воздуха в базовых экспериментах модели ОЦА с эмпирическими данными и с результатами зарубежных моделей приведено на рис. 7.

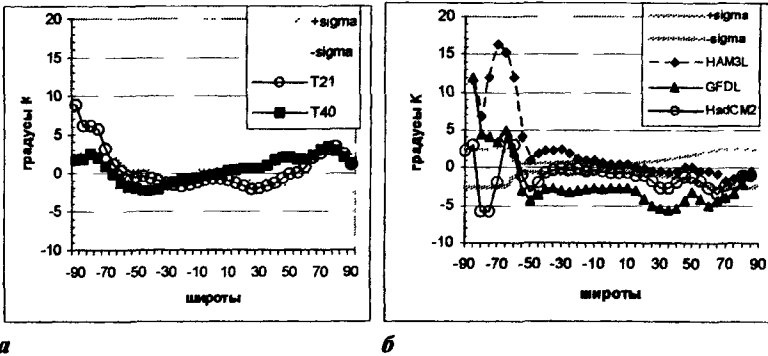


Рис. 7. Широтное изменение разности зональных среднегодовых температур приземного воздуха ( $T_m - T_n$ ) по данным модельных экспериментов ( $T_m$ ) и по данным наблюдений ( $T_n$ ). а)  $T_m$  – по данным экспериментов T216, и T426,  $T_n$  – данные реанализа NCAR/NCEP за 1979-1998 гг б)  $T_m$  – по данным экспериментов HadCM2, GFDL, HAM3L.  $T_n$  – данные [Legates, 2001]. Линии с точками – границы интервала  $\pm\sigma$ .

Судя по рис. 7а, температура приземного воздуха в обоих экспериментах (T21 и T42) отличается от климатической в большинстве широтных зон не более чем на  $\sigma$ . Максимальные отличия наблюдаются в эксперименте T21 над Антарктикой (2,3 величины  $\sigma$ ). Можно отметить, что приземная температура воздуха в эксперименте T42 ближе к средней климатической температуре, чем в T21. По рис. 7б видно, что различия в воспроизведении приземной температуры в экспериментах HAM3L и HadCM2 не превосходят  $\sigma$ , а с моделью GFDL различия в пределах 2-3  $\sigma$ . Во всех экспериментах в районе Антарктики отличия от наблюдений максимальны и достигают 15°C (до пяти значений  $\sigma$ ).

Из многих публикаций известно, что модели, ОЦА как и реанализ, как правило, занижают величину изменчивости, по сравнению с наблюдаемыми величинами. На рис. 8 приведены результаты расчета изменчивости температуры приземного воздуха над сушей в экспериментах с версиями T21 и T42, изменчивость температуры в реанализе. На рис. 8а представлен годовой ход среднеквадратического отклонения (СКО), осредненного по континентам Северного полушария. Видно, что СКО температуры над сушей в эксперименте T426 достаточно близка к СКО в реанализе во всех месяцах, кроме зимних. В

эксперименте T21 изменчивость приземной температуры завышена в течение всего года. Аналогичная картина наблюдается и для Южного полушария (рис. 8б). Наибольшие расхождения между T42 и реанализом также наблюдаются в зимние (Южного полушария) месяцы года, а в летние месяцы значения изменчивости близки между собой. Сравнение результатов T21, T42 для Южного полушария позволяют сделать выводы, аналогичные выводам по Северному полушарию.

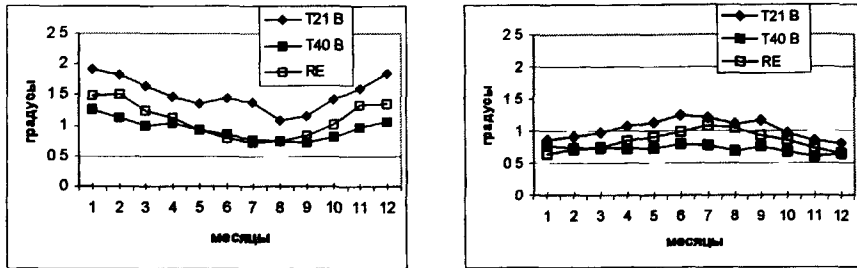


Рис 8 Годовой ход средней для континентальной части Северного (а) и Южного (б) полушарий СКО средней месячной температуры приземного воздуха по данным экспериментов T21, T42 и реанализа NCAR/NCEP

Далее анализируются интегральные характеристики снежного покрова в базовых экспериментах с моделью.

Зимний снежный покров играет заметную роль в глобальном гидрологическом балансе и является важным элементом динамики криосферы. Практически во всех гидродинамических моделях так или иначе учитываются процессы, связанные с образованием и таянием снега. В каждой модели имеются, по крайней мере, две процедуры, описывающие осадки. Одна из них – это параметризация крупномасштабных осадков, и вторая – мелкомасштабной конвекции с осадками. Каждый вид осадков при определенных термических условиях может превращаться в снег. В различных моделях этот процесс описывается по-разному. В наших экспериментах критерием наличия снега (при крупномасштабных и конвективных осадках) является нулевая или отрицательная температура подстилающей поверхности. Одним из важнейших процессов, связанных со снегом, является тепловая изоляция почвы от процессов в атмосфере. Известно, что в высоких широтах в отсутствии снега возникает угроза вымерзания растительности. Теплоизоляционные свойства в большой мере зависят от толщины и вертикальной структуры снега. В базовой версии модели ОЦА не решается уравнение теплопроводности при наличии слоя снега, а принимается более упрощенное представление о теплофизических свойствах слоя. При описании таяния снега в большинстве параметризаций исходят из соображения, что температура снега не может превышать  $0^{\circ}\text{C}$ , и процесс снеготаяния начинается при достижении слоя снега и верхнего слоя почвы температуры  $0^{\circ}\text{C}$ . Изменения водного эквивалента ( $Q_{sn}$ ) снежного покрова описывается в моделях следующим уравнением:

$\partial Q_{sn}/\partial t = P_{sn} - E_{sn} - M$ , где величины  $P_{sn}$ ,  $E_{sn}$  и  $M$  характеризуют скорость выпадения, испарения и таяния снега соответственно.

Одно из важнейших свойств подстилающей поверхности, на которое снег оказывает радикальное влияние, является изменение альбедо. Это влияние учитывается, естественно, во всех моделях. Практически во всех рассматриваемых моделях влияние снега на альбедо заснеженной поверхности рассчитывается на основе уравнения  $A = A_0 + (A_{sn} - A_0) * Q_{sn} / (Q_{sn} + Q_{sn_{cr}})$  где  $Q_{sn}$  – водный эквивалент снежного слоя,  $A_0$  – альбедо бесснежной поверхности, а параметр  $Q_{sn_{cr}}$  и альбедо снега  $A_{sn}$  выбраны для каждой модели свои. Был проведен ряд предварительных экспериментов по определению чувствительности приземной температуры и осадков к изменению параметров этой формулы и выбраны величины для базовых экспериментов. В них альбедо заснеженной поверхности суши  $A_{sn} = 0,75$ .

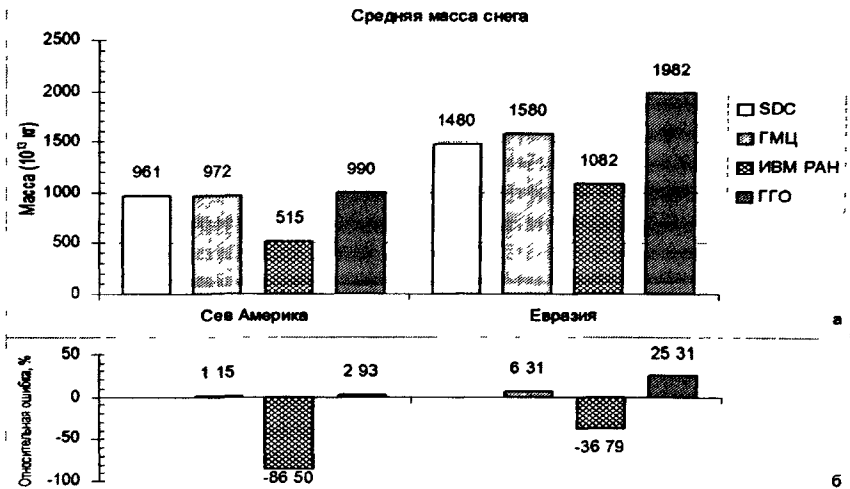


Рис. 9 Средняя за (1980-1988 гг.) масса снежного покрова (а) и относительные ошибки ее расчетов (б), в Евразии и Северной Америке, полученные в экспериментах типа АМІР-2 с 3 российскими моделями общей циркуляции атмосферы и данные климатологии (SDC).

Исследованию результатов воспроизведения свойств снежного покрова в гидродинамических моделях в России практически не уделялось внимания. Это исследование проведено автором впервые. В работе анализируются средние за 20 лет расчетов характеристики снежного покрова в Евразии и Северной Америке (эксперименты по протоколу АМІР-2). Показано, что в базовых экспериментах со спектральной моделью ОЦА лучше воспроизводятся характеристики снежного покрова Евразии, чем Северной Америки, и с меньшими ошибками воспроизводится площадь снежного покрова, чем масса.

Результаты анализа интегральных характеристик снежного покрова приведены на рис. 9. В качестве эталона используется климатология снега (SDC – Snow Data Climate – из работы *Foster et al., 1996*).

Из сравнения результатов АМР – экспериментов трех российских моделей ОЦА (Гидрометцентра России, ИВМ РАН и ГГО им. Воейкова ) ближе всего к данным эталона масса снега воспроизведена в экспериментах со спектральной моделью ГМЦ.

Показано, что в модели ГМЦ осенне-зимний процесс установления снежного покрова описывается ближе к эталонам, чем весенний процесс снеготаяния. Географическое расположение максимумов снежного покрова для февраля в Северной Америке и Евразии наиболее близко к наблюдениям воспроизведена в экспериментах с моделью ГМЦ, хотя величины максимумов несколько преувеличены.

#### **Глава 4. Численные эксперименты по определению чувствительности модели ОЦА к изменению параметров подстилающей поверхности и концентрации углекислого газа**

Первые параграфы четвертой главы диссертации посвящены анализу чувствительности модели ОЦА к изменению температура поверхности океана. Предварительно в ней приводятся сравнения средних за 20 лет расчетов приземной температуры и осадков в численных экспериментах с климатологическими данными. Результаты сравнения приведены на рис. 10.

Из анализа рис. 10 видно, что результаты экспериментов со спектральной моделью ОЦА по этим осредненным показателям вполне близки к результатам большинства моделей подобного класса и к данным наблюдений.

В работе показано, что учет межгодовых изменений температуры поверхности океана заметно улучшает результаты моделирования в тропиках и незначительно отражается на воспроизведении аномалий температуры и осадков в средних широтах.

Далее приводится описание метода параметризации гидрологических процессов на суше, основанного на квази-эмпирических зависимостях. Алгоритмически предлагаемая схема построена на расчете локальных и региональных балансовых соотношений. При расчете локального баланса влаги учитываются следующие процессы: перехват осадков растительностью; формирование поверхностного стока; формирование подпочвенного стока; Впитывание воды в почву испарение влаги с почвы и транспирация растительностью; диффузионный обмен воды между слоями почвы; пополнение запасов влаги в почве из рек в низовьях и районах активного искусственного орошения. Метод позволяет учитывать в явном виде стоки рек. Сравнение результатов моделирования с различными методами параметризации гидрологических процессов на суше показывает, что внедренные схемы параметризации гидрологических процессов не значительно изменяет глобальный водный баланс, но позволяет реалистично описать

сезонный ход стока рек и региональный водный баланс различных климатических зон мира.

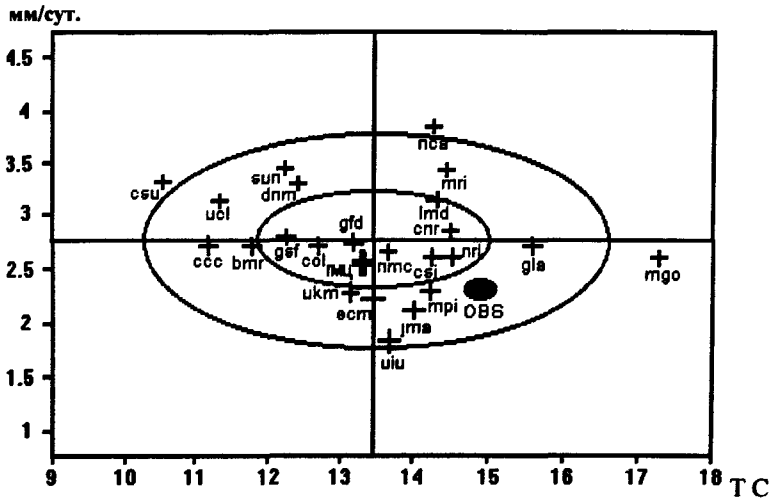


Рис. 10. Средняя за период 1980-1989 глобальная температура приземного воздуха и интенсивность осадков по результатам моделирования и данным наблюдений для версии T21L15 спектральной модели Гидрометцентра России.

Сравнение годового хода стока сибирских рек с наблюдениями, а также составляющие водного баланса бассейнов сибирских рек приведены на рис. 11. В том же разделе показано, что результаты моделирования чувствительны к методам описания гидрологических процессов на суше. В России явное описание стока рек в моделях ОЦА реализовано автором впервые.

Благодаря внедрению в расчеты параметризации гидрологии на суше с детальным описанием свойств подстилающей поверхности (типов почвы и видов растительности) возникла возможность проведения численных экспериментов по оценке влияния изменения землепользования на характеристики ОЦА. Сравнение результатов численных экспериментов с измененными свойствами подстилающей поверхности (заменой зон лесов в Сибири на травяное покрытие и, соответственно, изменения типов почв) показало, что водный баланс в модели весьма чувствителен к этим характеристикам, и возможно проводить исследование влияния изменения экологических систем на локальный и глобальный климат. Показано, также, что в результате эксперимента заметно изменился водный баланс в водосборах сибирских рек и бассейнов рек, впадающих в Каспийское море – Волги, Урала и Терека.

Приводится сравнение характеристик снежного покрова в бассейнах крупных сибирских рек, полученных в реанализах NCAR/NCEP и ERA, а также в численных экспериментах с Российскими моделями ОЦА.

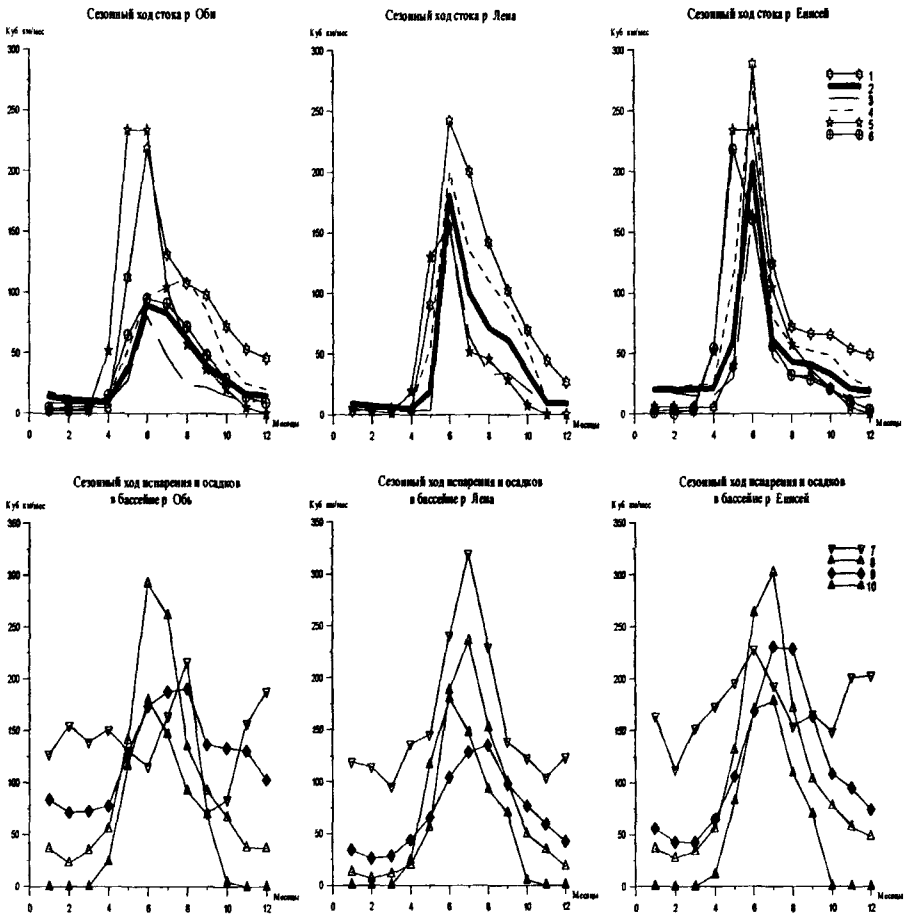


Рис.11. Сезонный ход стока воды в океан Сибирских рек (1) – полученные в численном эксперименте с моделью ОЦА, (2) – средние многолетние данные наблюдений, (3) – максимальные данные наблюдений, (4) – минимальные данные наблюдений, а также стоки полученные в численных экспериментах (5) – по модели [Sausen et al., 1994] и (6) – по модели [Miller et al., 1997].

В следующих параграфах четвертой главе анализируются характеристики снежного покрова в бассейнах крупных сибирских рек, полученные в реанализах NCAR/NCEP и ERA, а также в численных экспериментах с моделями ОЦА типа AMIP-2 ГМЦ и ИВМ РАН и ГТО им. А.И.Воейкова. Показано, что средние за 20 лет эксперимента изменения площади снежного покрова в регионах сибирских рек Оби, Енисея и Лены воспроизводятся всеми моделями вполне реалистично. В осеннее-зимний период формирования

снежного покрова результаты всех моделей близки друг к другу, а в весенний период активного таяния снега – в эксперименте с моделью ГМЦ ближе к результатам реанализов чем в экспериментах ИВМ и ГГО. Эти результаты приведены на рис. 12.

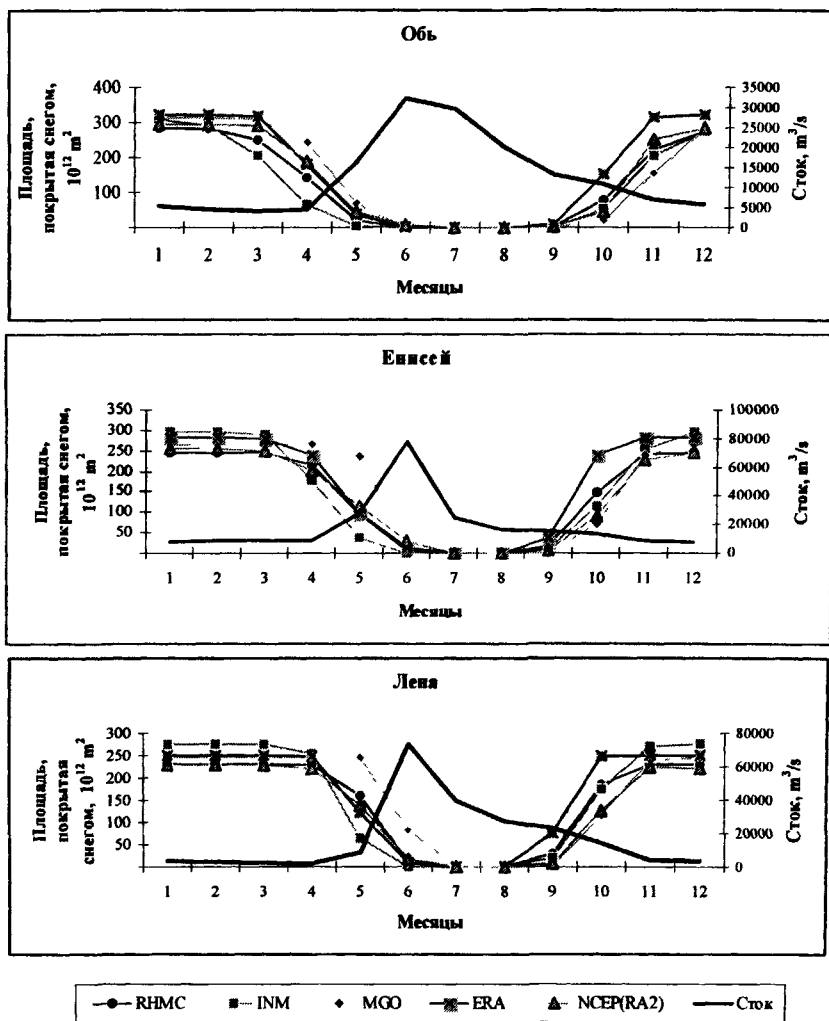


Рис. 12 Средние за 20 лет годовые изменения площади снежного покрова (левая шкала) по реанализам ERA, NCAR/NCEP и по моделям ГМЦ, ИВМ и ГГО, а также сток рек (правая шкала) для бассейнов рек Оби, Енисея и Лены.

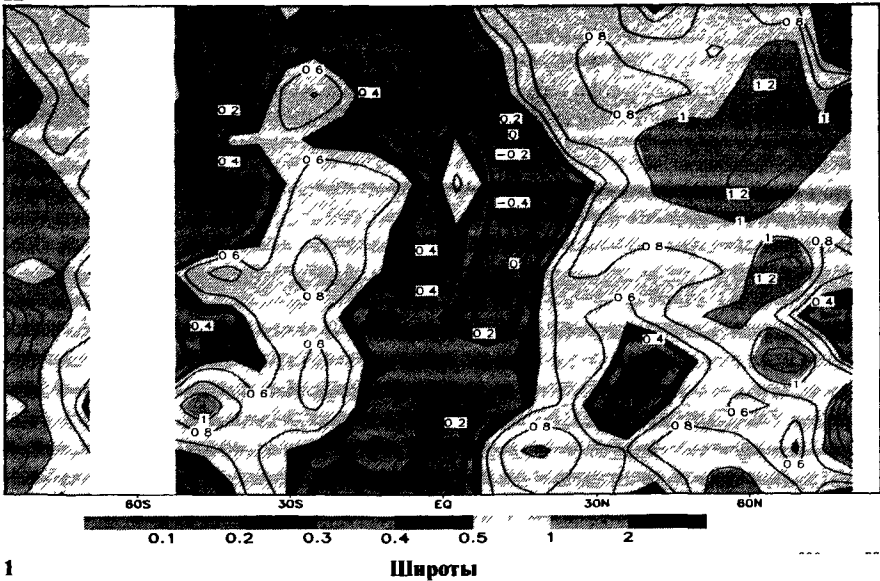
В работе приводится сравнение скорости таяния снега с интенсивностью весеннего роста стока сибирских рек. Это сравнение, совместно с интервалом снеготаяния, являются критериями реалистичности воспроизведения снежного покрова и его таяния в моделях.

В заключительных разделах четвертой главы работы анализируются результаты экспериментов по определению влияния на приземную температуру и осадки изменений концентрации углекислого газа.

Первоначально были проведены так называемые равновесные численные эксперименты с удвоенной и учетверенной концентрацией углекислого газа. Расчеты равновесного климата дают возможность определить реакцию атмосферы на заданное внешнее воздействие, а также упрощают сравнительный анализ результатов различных моделей. Результаты исследования влияния изменений концентрации углекислого газа на характеристики атмосферной циркуляции показали, что под влиянием удвоения концентрации в так называемом равновесном численном эксперименте средняя приземная температура атмосферы увеличилась на 0,6-1,7°C. На рис. 13 приведена диаграмма Ховмеллера разностей между среднезональной температурой в базовом и равновесном эксперименте с удвоенной концентрацией углекислого газа.

Месяцы

12



1

Широты

Рис. 13. Годовой ход средних за 20 лет расчетов среднезональных величин разности приземной температуры воздуха в экспериментах с удвоенной концентрацией  $\text{CO}_2$  и приземной температурой из базового эксперимента для точек, принадлежащих суше

Видно, что максимальные отличия наблюдались летом в средних широтах и достигали в среднем  $1,2^{\circ}\text{C}$ , а в тропиках наблюдалось выхолаживание порядка  $-0,4-0,6^{\circ}\text{C}$ .

Кроме равновесных экспериментов были проведены эксперименты и проанализирован отклик характеристик циркуляции атмосферы на транзитивное ( $1\%$  в год) увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  (сценарий IPCC IS92a). Для этой цели было проведено два эксперимента.

Первый эксперимент проведен с базовой версией T42 спектральной модели ОЦА, в котором температура поверхности океана задавалась равной температуре, полученной в эксперименте совместной (атмосфера-океан) модели ИВМ с современной концентрацией  $\text{CO}_2$ . Во втором эксперименте использовалась температура поверхности океана, из эксперимента модели ИВМ с изменением концентрации  $\text{CO}_2$ . При этом изменения концентрации  $\text{CO}_2$  в спектральной модели точно соответствовало концентрации в совместной модели. Анализировалась разница в характеристиках этих экспериментов. Максимальное потепление по расчетам со спектральной моделью ОЦА ГМЦ происходит на северо-западе Северной Америки и составляет  $2^{\circ}\text{C}$ , что меньше максимального отклика в эксперименте ИВМ, который составлял  $3,5^{\circ}\text{C}$  и характерен для центра Евразии. В ноябре-апреле по расчетам с моделью ГМЦ теплеет сильнее (на  $2,5^{\circ}\text{C}$ ), чем в других месяцах. Такая же тенденция прослеживается и по данным расчетов эксперимента ИВМ, но там отклик выше по своему абсолютному значению.

Таблица 5

Отклик различных моделей NCAR и модели ГМЦ  
на увеличение концентрации  $\text{CO}_2$

Модель	Величина отклика, К
PCTM	1.29
CCSM	1.05
CSM	1.47
PCM	1.32
ГМЦ (глобус)	0.90
ГМЦ (суша)	1.70
ECHAM4/OPYC3 (суша)	1.90

Сокращения. CSM Climate System Model, PCM – Parallel Climate Model, PCTM – PCM/CSM Transition Model, CCSM – Community Climate System Model.

Из анализа карт изменения температуры можно сделать вывод, что в целом регионы максимумов/минимумов схожи, а также, что температурный отклик спектральной модели ОЦА на увеличение концентрации углекислого газа несколько меньше, чем отклик модели ИВМ. Из анализа временного хода температурного отклика спектральной модели ОЦА на увеличение концентрации углекислого газа в эксперименте и сравнения его с совместными моделями, участвующими в CMIP (Climate Model Intercomparison Project),

следует, что чувствительность спектральной модели ОЦА ниже. Результаты анализа приведены в табл. 5.

### **Глава 5. Интерпретация результатов крупномасштабного моделирования**

Пятая глава диссертации посвящена разработке, внедрению и методов интерпретации результатов крупномасштабного моделирования.

Известно, что, несмотря на стремительный рост мощностей вычислительной техники, крупномасштабные модели не воспроизводят локальные особенности метеорологических параметров. Для получения локальных характеристик по результатам крупномасштабных гидродинамических моделей разрабатывают и используют специальные процедуры, основанные на статистических, гидродинамических, вариационных и гибридных методах.

В работе приводятся результаты различных подходов к интерпретации результатов крупномасштабного моделирования. В частности, был разработан и реализован алгоритм детализации температуры приземного воздуха, основанный на методе множественной регрессии. Реализованный алгоритм испытан для точки с координатами г.Москвы. Испытание детализации ансамблей сезонных прогнозов приземной температуры по двум гидродинамическим моделям Канадского Климатического центра показало, что с помощью этого алгоритма для ряда сезонов удаётся заметно уменьшить систематические ошибки гидродинамического прогноза приземной температуры в точке Москвы. Для той же точки была использована статистическая модель, которая позволила восстановить среднюю температуру со среднеквадратичной ошибкой  $2.0^{\circ}\text{C}$ , на отдельных метеостанциях г.Москвы.

Автором был предложен, реализован и испытан новый гибридный метод детализации температуры и влажности, основанный на расчетах по модели теплового и водного баланса и статистических данных. Суть метода заключается в следующем. На первом этапе по рядам синоптических данных измерений настраивается локальная модель теплового и водного баланса. Нами в расчетах использована модель, разработанная в ИГ РАН А.Б. Шмакиным. Вторым этапом является подготовка детальных характеристик почв и растительности в окружении интересующей точки. Третьим этапом работы является использование результатов расчетов по гидродинамической модели для расчетов с помощью балансной модели для каждого участка с определенным типом почвы и растительности в окрестности пункта, для которого определены параметры модели. Испытания метода для региона северной тайги показали, что при одних и тех же метеорологических условиях с помощью предложенного метода удается получить реалистическую картину разнообразия температуры подстилающей поверхности и влажности почвы для различных ландшафтов (комбинаций типов почвы и растительности) региона. Статистические характеристики модельной температуры в верхнем слое почвы

на различных ландшафтах северной тайги в районе г.Печора приведены в табл. 6.

Таблица 6

**Характеристики модельной температуры (°С) в верхнем слое почвы на различных ландшафтах в районе г.Печора**

Ландшафт	Сред.	Min	Max	Дисперсия
Пойменный луг на суглинистой аллювиальной дерновой и дерново-глеевой почве	9,14	-1,7	24,7	4,42
Редколесье на песчаной подзолистой почве	16,26	9,5	22,6	3,78
Березовый лес на песчаной подзолистой почве	16,97	10,2	22,8	3,78
Березовый лес на суглинистой глееподзолистой почве	17,06	10,3	22,8	3,76

Далее излагаются результаты детализации численных прогнозов погоды с помощью внедренной региональной гидродинамической модели MM5 (Пенсильванский Университет). Модель проходит оперативные испытания в Гидрометцентре России с начала 2005 г. В настоящее время детализация численных прогнозов проводятся для пяти областей России: Европейского региона (54 км), вложенных в него центрального административного региона России (18 км), региона Северного Кавказа (18 км), и Северо-запада России (18 км). Все регионы рассчитываются с шагом в 18 км. Кроме того, ведутся расчеты для Сибири (54 км). Расчеты ведутся 2 раза в сутки на срок до 120 часов. По вертикали используется 41 уровень. В работе, в качестве примера, приведены прогнозы приземной температуры, скорости ветра и приземного давления для г.Кисловодска и г.Минеральные Воды. В связи с тем, что регион Северного Кавказа является сложной гористой местностью, были введены орографические поправки в прогноз температуры и приземного давления. Суть поправок заключалась в следующем. Для каждого пункта прогноза рассчитывалась разность реальных и модельных высот местности, и температура в пункте прогноза правилась в соответствии с влажно - адиабатическим градиентом. Давление правилось с помощью барической ступени. Показано, что введенные процедуры орографической коррекции приземной температуры и давления позволяют заметно уменьшить систематические ошибки прогноза, связанные с разностью высот в узлах сетки и реальным расположением пунктов прогнозов. Этот эффект для температуры демонстрируется на рис. 14.

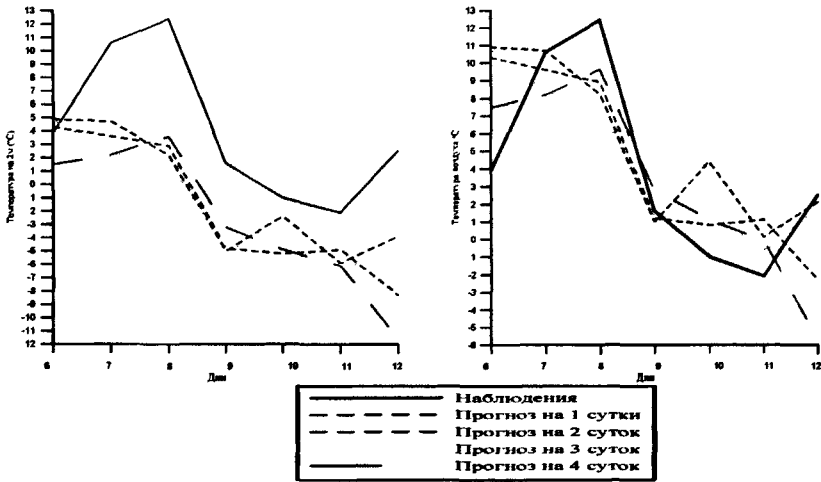


Рис. 14. Временной ход наблюдавшейся и прогнозируемой температуры приземного воздуха различной заблаговременности за 6-12 марта 2005 в Кисловодске до орографической коррекции (слева) и после коррекции (справа).

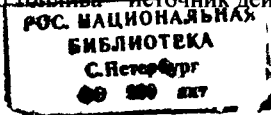
## Глава 6. Разработка методики и реализация систем обеспечения метеорологической информацией моделей переноса примеси в атмосфере на основе модели общей циркуляции атмосферы

В шестой главе приведены методические основы и результаты использования спектральной модели общей циркуляции атмосферы для двух прикладных экологических задач. масса снега

Первая задача – это обеспечение метеорологическими данными моделей трансграничного переноса долгоживущих примесей. На основе разработанных автором подходов была реализована система обеспечения метеорологическими данными моделей трансграничного переноса примеси. Система функционировала более десяти лет для масштаба Северного полушария и Европейского региона.

Вторая задача – расчет загрязнения почвы и пограничного слоя атмосферы остатками топлива при запусках ракет на Семипалатинском полигоне. Были проведены расчеты для 82 случаев запусков ракет, что позволило определить возможные ареалы распространения вредных выпадений топлива веществ на Алтае.

В реализации обоих систем использовались единые подходы, но метеорологические данные обеспечивали расчеты принципиально разных пространственных и временных масштабов. Основные отличия систем заключалось в необходимости обеспечения выбросов от различных источников. Если для ЕМЕП важно было рассчитать переносы и осаднения от постоянно действующих источников на земле распределенных в пространстве, то для задачи выброса ракетного топлива источник действовал очень короткое время



и располагался в верхних слоях атмосферы. Из этого вытекали заметные отличия в создаваемых системах обеспечения метеорологическими данными. Так, для первой задачи были необходимы годовые наборы данных с временным разрешением не более 6 часов, в то время как для второй задачи требовались интервалы в 3 суток около срока запуска, и с 10 минутным шагом по времени. Первая задача использовала в качестве вертикальной координаты « сигма» систему, а вторая Z. В первой системе выброс и, соответственно перенос осуществлялся, в основном, в пограничном слое атмосферы, а во втором выброс происходил в стратосфере. Поэтому, можно считать, что было создано две различные системы. Единственное, что их объединяло априори, это требование создания наборов данных за определенные, но произвольные, интервалы и технологически их объединяло то, что ядром обеих систем являлась спектральная гидродинамическая модель ОЦА.

В диссертации сформулированы основные принципы создания системы обеспечения метеорологической информацией моделей переноса примесей в атмосфере. Описаны основные технологические этапы подготовки информации для северного полушария (шаг приблизительно 250 км) и Европейского региона (шаг 50 км). В реализованной системе подготовка данных проводится по следующим основным этапам: 1. Контроль исходной информации и подготовка исходной информации; 2. Разгон модели для согласования приземных полей; 3. Расчеты краткосрочных прогнозов с помощью спектральной модели ОЦА; 4. Подготовка метеорологической информации для региона Северного полушария в географической сетке с шагом 2,5 градуса; 5. Подготовка метеорологической информации для Европейского региона на стереографической поверхности с шагом 50 км с помощью специальных процедур интерпретации прогнозов (вариационного для согласования ветра с рельефом, статистического для согласования приземной температуры и влажности, процедуры локального пограничного слоя для замыкания величин у поверхности и в свободной атмосфере); 6. Коррекция трехмерных полей осждаемой влаги по данным измерений осадков. Температура поверхности океана и распределение морского льда в рамках нынешней конфигурации модели не рассчитываются, а задаются извне в соответствии с данными наблюдений. Для анализа качества подготовленных системой данных проведено сравнение характеристик ветра для Европы, полученного с помощью разработанной системы с ветром из данных NCAR/NCEP реанализа. Сравнение показало, что в течение 1996 года перенос на уровне 850 гПа описан близко к данным реанализа.

Сравнение структуры осадков и их годового хода для той же области продемонстрировало вполне удовлетворительное совпадение с эталонными данными.

На основе приведенных в работе результатов сделан вывод, что подготовленные данные близки к эталонным. Иллюстрацией их пригодности для использования в задаче моделирования переноса примеси в атмосфере в масштабе северного полушария может служить сравнение с данными наблюдений расчеты по переносу свинца и серы, приведенные в

многочисленных отчетах МСЦ – “В” (сайт: <http://www.msceast.org/Russian/publications.html>), отразившие близость результатов расчета с измерениями.

Далее приведено описание разработанного и внедренного в систему подготовки данных чрезвычайно эффективного алгоритма коррекции модельных осадков по данным наблюдений. Разработанный алгоритм состоял из трех этапов. На первом этапе данные о наблюдениях за осадками разбивались на равные интервалы. Необходимость этой задачи связана с тем, что в практике измерения осадков, они часто относятся к совершенно различным интервалам времени. Этот этап был реализован Ю. В. Алферовым. Вторым шагом была разработана схема объективного анализа осадков. Схема объективного анализа осадков создана и реализована М. Д. Цырульниковым и А. Н. Багровым. Последний этап непосредственной коррекции осадков заключался в сравнении модельных осадков с результатами объективного анализа и исправлением вертикального профиля конденсации влаги. Этот оригинальный алгоритм предложен и реализован автором диссертации. Один из результатов разработанной схема продемонстрирован для коррекции данных за 1996 г. Сравнение полученных полей выпавших осадков с наблюдениями на реперных станциях (рис. 15), не использовавшихся при анализе осадков, показывает радикальное улучшение модельных осадков с помощью разработанной процедуры. Для ряда станций можно видеть изменение знака корреляции с отрицательной до высоких положительных величин (станции 3 и 6).

В последних параграфах шестой главы приведены принципы создания и анализ результатов системы расчетов метеорологических данных с помощью модели ОЦА для задачи переноса топлива при запусках ракет для региона Семипалатинского полигона. Система была реализована. В ней также были использованы разработанные специально для ее реализации процедуры детализации прогностических полей. С ее помощью были рассчитаны ареалы возможного распространения горючего на поверхности (пример на рис. 16) для 82 запусков ракет.



Рис. 15. Коэффициенты корреляции месячных сумм модельных и скорректированных осадков с наблюдениями для 14 реперных станций Европы

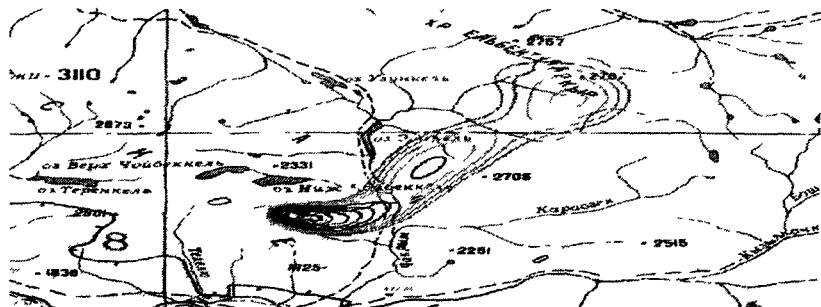


Рис 16 Изолинии плотности осажденного топлива для осеннего пуска ракеты 26.09.96.

**В заключении работы** перечислены основные результаты диссертации, подводятся итоги исследований, излагается видение автором продолжения исследований, а также того, насколько результаты работы соответствуют первоначально поставленным целям, и намечаются задачи, требующие своего решения в развитие работ.

**В результате выполнения работы** получены следующие результаты:

1. Впервые предложена и реализована процедура вариационного согласования температуры, геопотенциала и влажности в климатических архивах, обеспечивавшая выполнение уравнения статики и перераспределения вертикальной статической энергии.
2. Разработан метод анализа однородности результатов реанализа, для определения степени доверия к нему при использовании в сравнении результатов численных экспериментов по протоколу программы AMIP.
3. Разработана методика и проведен анализ многолетних численных экспериментов с двумя версиями спектральной модели общей циркуляции атмосферы. Проведено сравнение результатов моделирования ОЦА с лучшими зарубежными моделями того же класса. Показано, что спектральная модель удовлетворительно воспроизводит характеристики годового хода и муссонной циркуляции. Показано также, что версия модели с более высоким разрешением реалистичнее воспроизводит изменчивость приземной температуры.
4. Впервые в России проведен анализ интегральных характеристик снежного покрова, Российскими моделями общей циркуляции атмосферы. Он показал, что спектральная модель ГМЦ воспроизводит интегральные характеристики снежного покрова в Евразии лучше, чем многие российские и зарубежные модели и процессы становления снега воспроизводятся реалистичнее, чем процессы снеготаяния.
5. Впервые проведены численные эксперименты с моделированием стока рек в явном виде и с определением чувствительности характеристик циркуляции к изменению свойств подстилающей поверхности в Сибири.
8. Предложен и испытан новый оригинальный гибридный метод детализации численных прогнозов, основанный на использовании рядов данных синоптических наблюдений и расчетах с помощью балансной модели.

9. Разработана и реализована методика метеорологического обеспечения задач переноса долгоживущих примесей в атмосфере для полусферы и Европейского региона.

10. Впервые предложена и реализована процедура трехмерной коррекции модельных осадков по данным наблюдений. Показано, что использование предложенной процедуры заметно улучшают величины осадков, используемые в моделях переноса примеси.

11. Реализована процедура подготовки метеорологических данных для переноса выбросов ракетного топлива над Алтаем для 82 запусков, позволившая рассчитать ареалы возможного оседания загрязнений на почве.

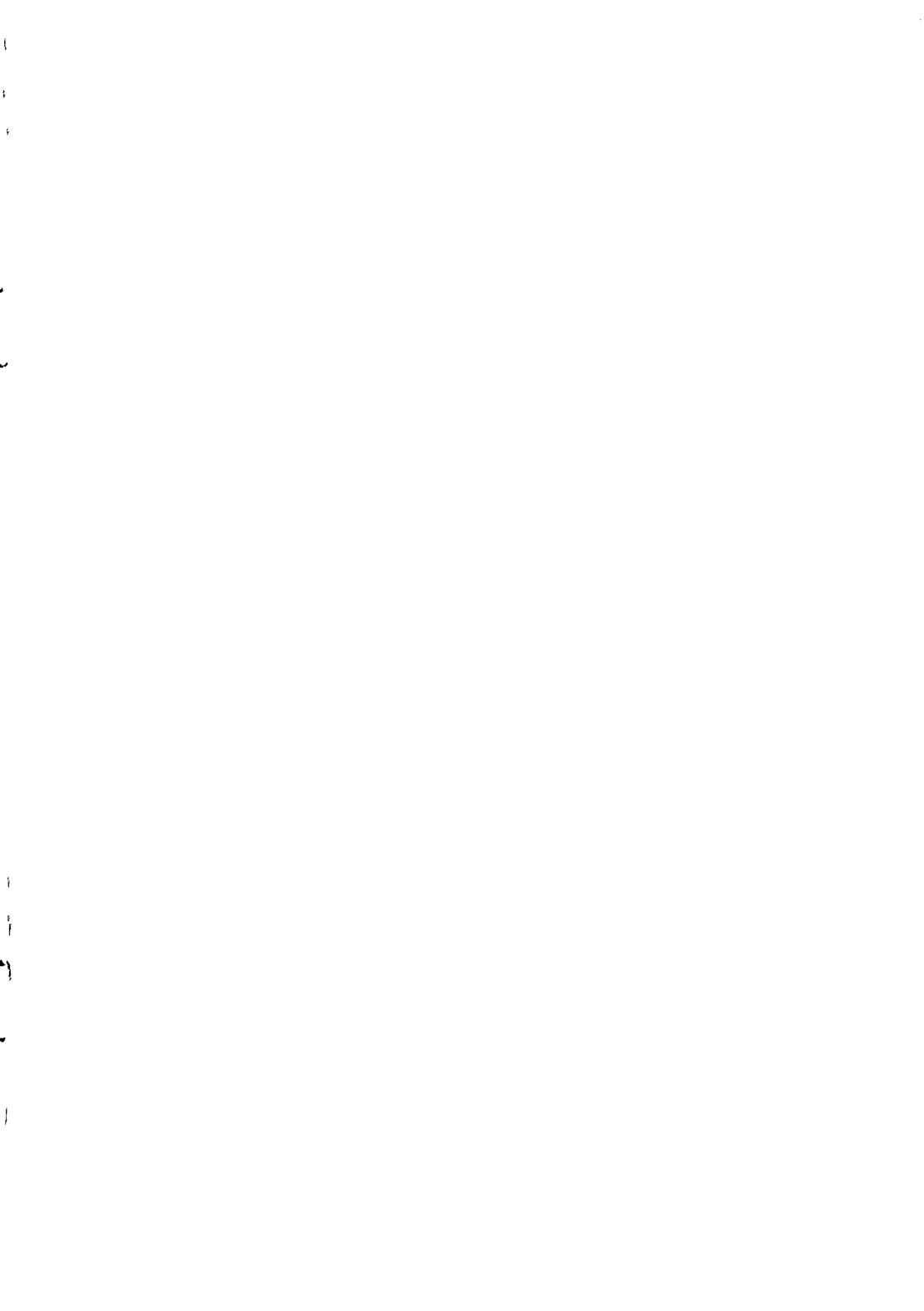
**Поставленные в работе задачи, перечисленные во введении, выполнены.**

Все изложенные в работе подходы и методы, могут, по мнению автора, получить дальнейшее научное развитие и прикладное применение.

#### **Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:**

- 1 Тепловой баланс тропосферы низких широт в модели зональной циркуляции атмосферы, *Метеорология и Гидрология*, 1977, № 7, 20 – 29
- 2 Опыт вертикального согласования климатических полей температуры и геопотенциала с помощью уравнения статики. – Труды Гидрометцентра СССР, 1981, вып 259, с 60-71 (Соавтор Шилев В Б)
- 3 Методика вариационного согласования климатических полей температуры и геопотенциала по вертикали. – Метеорология и гидрология, 1981, № 10, с 26-33 (Соавтор Шилев В Б)
- 4 Вертикальное вариационное согласование температуры, геопотенциала и водяного пара. – Труды ВНИИГМИ МЦД, 1983, Доклады 10 конференции молодых ученых с 9-21 (Соавтор Шилев В)
- 5 Ошибки оптимальной интерполяции метеорологических элементов различных наблюдательных сетей, Метеорология и Гидрология, 1987, № 9, 26-33, (соавтор В Б Шилев)
- 6 Система Диагностики нижних слоев Атмосферы для моделей переноса примесей в Атмосфере. Метеорология и Гидрология, 1997, № 4, 5-15 (Соавторы Фролов А, Важник А, Астахова Е, Розинкина И, Киктев Д., Алферов Ю)
- 7 Система Диагностики нижних слоев Атмосферы для моделей переноса примесей в Атмосфере. Метеорология и Гидрология, Основные алгоритмы Метеорология и Гидрология, 1997, № 5, с 5-13 (Соавторы Фролов А., Важник А., Астахова Е., Розинкина И., Киктев Д., Алферов Ю.)
- 8 Система Диагностики нижних слоев Атмосферы для моделей переноса примесей в Атмосфере., Осадки и облачность Метеорология и Гидрология, 1997, №6, 5-15 (Соавторы Фролов А, Важник А, Астахова Е, Розинкина И, Киктев Д, Алферов Ю)
- 9 Diagnostic System of Atmosphere Lower – Layer for Pollution Transfer Modeling, Rev Int Contam Ambient 1997, 13(1), p 23-34 (Соавторы Фролов А В, Важник А И, Астахова Е Н, Розинкина И А, Киктев Д Б, Алферов Ю)
- 10 Оценки сезонного хода крупномасштабного речного стока в глобальной модели общей циркуляции Гидрометцентра России – Метеорология и гидрология 1999 № 5 с 31-48 (Соавтор Шмакин А Б)
- 11 Оценка воспроизведения годового хода характеристик атмосферы и суши моделью общей циркуляции атмосферы Труды ГМЦ 2000 вып 333 с 41-98 (Соавтор Егорова Е Н)
- 12 Региональные изменения гидрологического баланса на суше и в атмосфере при уничтожении Сибирских лесов (результаты численных экспериментов с моделью ОЦА Гидрометцентра России). Проблемы гидрометеорологии и окружающей среды на пороге XXI века Труды международной теоретической конференции Санкт-Петербург, Гидрометиздат, 2000, стр 200-215 (Соавтор Егорова Е Н, Шмакин А Б)
- 13 Comparison of Free Atmosphere Temperature and Humidity Data of CARDS with the NCAR/NCEP Reanalysis Monthly Data for 1958-1998. Proc 25 Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop, 2000, NOAA, p 86-89 (соавтор Стерин А М)
- 14 Влияние межгодовой аномалии температуры поверхности океана на изменчивость атмосферы (Результаты численных экспериментов с моделью Общей Циркуляции Атмосферы Гидрометцентра России). – Метеорология и Гидрология 2001 № 2 с 5-16 (Соавтор Егорова Е Н)
- 15 Влияние температуры поверхности океана на свойства азиатского муссона (анализ результатов экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России) Метеорология и гидрология 2001 № 8 с 18-27 (Соавторы Игнатов Р Ю, Егорова Е Н)
- 16 Two Approaches to Meteorological data supplying for pollution transfer modeling, Rev Int Contam Ambient, 17 (1), 2001, 37-45

- 17 The new principles of system of Meteorological Data Supplying for Regional Pollution Transfer Modeling, Proceedings of Second International Symposium on Air Quality Management at Urban, Regional and Global Scales, 2001, Turkey, pp 380-387, (Соавтор – Д Б Киктев)
- 18 Influence of Anthropogenic Factors on Climatic Trends of Temperature and precipitations within the Moscow Agglomeration, Proceedings of Second International Symposium on Air Quality Management at Urban, Regional and Global Scales, 2001, Turkey, pp 54-61, (Соавтор – А С Гинзбург)
- 19 Сравнение оценок загрязнения Северного полушария тяжелыми металлами (свинцом), полученных с помощью двух версий моделей дальнего переноса и разных версий Системы Диагностики Атмосферы. Труды всесоюзной конференции молодых ученых Гидрометслужбы Санкт-Петербург, июль 2001г., С-П, 2002, Гидрометеоиздат, с 301-306 (Соавторы Гусев А В, Травников О Ю)
- 20 Сравнительный анализ месячных данных реанализа NCAR/NCEP и месячных аэрологических наблюдений по Южному полушарию. Труды всесоюзной конференции молодых ученых Гидрометслужбы Санкт-Петербург, июль 2001г., С-П, 2002, Гидрометеоиздат, с 173-182 (Соавторы Хан В М, Стерин А М)
- 21 Свойства африканского и азиатского муссонов в численных экспериментах с моделью общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России. Труды всесоюзной конференции молодых ученых Гидрометслужбы Санкт-Петербург, июль 2001г., С-П, 2002, Гидрометеоиздат, с 285-291 (Соавторы Игнатов Р Ю, Егорова Е.Н.)
- 22 Comparison Systems of the Atmospheric Lower-Layer Diagnostic System (SDA) for Pollution Transfer Modeling Of MSC-E (Moscow) and MSC – West (Oslo), Global Change Biology, November, 2001, p 17-33. (Соавтор Киктев Д Б)
- 23 Сравнение результатов реанализа с аэрологическими данными. Известия АН Физика атмосферы и океана, 2002, том 38 № 3, с 301-315 (соавтор Стерин А М)
- 24 Принципы создания системы обеспечения метеорологической информацией моделей дальнего переноса примеси в атмосфере и анализ некоторых результатов, Метеорология и Гидрология, 2002, № 9, стр 34-50
- 25 Коррекция трёхмерных полей прогностических осадков по данным наблюдений для обеспечения информацией моделей переноса примеси в атмосфере, Метеорология и Гидрология, 2002, № 10, стр. 44-56 (Соавторы Цырульников М Д, Багров А Н., Алферов Ю. В),
- 26 Оценки изменений температуры воздуха и количества осадков в крупных городах (на примере Москвы и Нью-Йорка), Метеорология и Гидрология, 2003, № 2, 29-38 (Соавтор А С Гинзбург);
- 27 Детализация крупномасштабного поля приземной температуры для Московского региона. Метеорология и гидрология, 2003, № 7, с 19-29 (Соавторы Дмитриев Е В, Чавро А И)
- 28 Оценки трендов температуры в свободной атмосфере по данным NCAR/NCEP реанализа и по радиозондовым наблюдениям Метеорология и гидрология, 2003, № 12 с (соавторы Хан В М, Стерин А)
- 29 Амплитудно – Фазовые характеристики годового хода приповерхностной температуры: Сравнение расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы с данными реанализов, Известия РАН, Физика Атмосферы и Океана, 2004, т 40, № 4, 435-449 (соавторы А.В. Елисеев, М.С. Гусева, И.И. Мохов)
- 30 Atmospheric and Coupled Model Intercomparison in Terms of Amplitude – Phase Characteristics of Surface Air Temperature Annual Cycle, Advances in Atmospheric Sciences, v 21, N 6, 2004, 837-847 (Соавторы А Елисеев, И И Мохов, М С Гусева)
- 31 Динамическая детализация краткосрочных численных прогнозов с помощью региональной численной модели на примере курортного региона Минеральные Воды, МЕТЕОСПЕКТР, № 3, 2005 с 8-17 (Соавторы Игнатов Р Ю, Гранберг И Г, Гусева М С, Новикова И В)
- 32 Математическая оценка зон загрязнения поверхности земли ракетным топливом при падении отделяющихся частей ракет носителей, Оптика Атмосферы и Океана, 2005, № 5, с 22-34 (Соавторы Климова Е Г, Морозков Ю Н, Ривин Г С, Бородулин А И, Десятков Б М, Котлярова С С, Зыков С В, Игнатов)
- 33 Воспроизведение характеристик снежного покрова в моделях общей циркуляции атмосферы – Изв АН Физика Атмосферы и Океана, 2005, т № принята к публикации, (Соавтор Громов С С)
- 34 Валидация динамико-статистического метода детализации метеорологических параметров. Труды Гидрометцентра России, № 341, 2005, Труды Гидрометцентра России, вып 341, 2005, стр 8-34 (Соавтор Шмакин А Б)
- 35 Испытание метода статистической детализации сезонного прогноза погоды для региона Москвы, Труды Гидрометцентра России, вып 341, 2005, с 22-34 (Соавтор Новикова И Н)
- 36 Формирование и Тяжкие Снежного покрова в бассейнах великих сибирских рек по результатам численных экспериментов, данным наблюдений и реанализов Труды Гидрометцентра России, вып 341, 2005, с 22-34 (Соавторы Громов С С, Хан В М, Игнатов Р Ю)
- 37 Adaptation of the PSU/NCAR MMS for high-resolution weather prediction over Russia Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, report N 35, APRIL 2005, WMO, p 202-205 (Соавторы Беркович Л В, Игнатов Р Ю, Калугина Г М, Кричак С О, Цедулко М В, Захаров И Е)
- 38 Comparison of Free Atmosphere Temperature and Humidity Data of CARDS with the NCAR/NCEP Reanalysis Monthly Data and with Numerical Experiment Results (1979-1988). Second WCRP Conference on Reanalyses 2002, WCRP-109, WMO/TD-NO 985, p 38-42 (соавторы Стерин А М, Эскридж Р)



3

№ 25925

РНБ Русский фонд

2006-4  
28511

1037