

Государственное учреждение  
«Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова»

на правах рукописи

УДК 551.583.001

Школьник Игорь Маркович

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА  
ДЛЯ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**

Специальность 25.00.30 - метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук

С.-Петербург - 2004

Диссертация выполнена в Государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук В.П.Мелешко.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Е.Л. Генихович  
кандидат физико-математических наук А.В. Елисеев

Ведущая организация: Российский Государственный Гидрометеорологический Университет.

Защита состоится 16 июня 2004 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного Совета Д327.005.01 при Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова по адресу:  
194021 С.-Петербург ул. Карбышева, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова.

Автореферат разослан 11 мая 2004 года.

Ученый секретарь диссертационного Совета,  
доктор географических наук

*А. Мещер*

А.В.Мещерская

## Общая характеристика работы

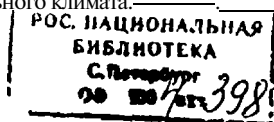
### Актуальность работы

Как известно, горизонтальное разрешение большинства глобальных климатических моделей не превышает в настоящее время 200 км. Такое разрешение оказывается недостаточным для правильного описания регионального климатического режима, важную роль в формировании которого играют сложная - орография и конфигурация прибрежных зон, внутренние водоемы и большая неоднородность свойств подстилающей поверхности с различными типами растительного покрова. Эксперименты с глобальными моделями относительно высокого разрешения показывают, что они также недостаточно точно воспроизводят такие региональные характеристики, как компоненты водного баланса и термический режим. При этом увеличение разрешения глобальных моделей требует затрат больших вычислительных ресурсов, особенно если интегрирование проводится на несколько десятков лет. На рубеже 90-х гг. были созданы глобальные модели климата, которые включали в качестве отдельного блока модели общей циркуляции океана. Особенности численной реализации таких моделей накладывают еще более жесткие ограничения на пространственное разрешение модели атмосферы. Поэтому в ближайшем будущем широкое использование глобальных моделей климата (в первую очередь ансамблей совместных моделей атмосферы и океана) с разрешением менее 100 км представляется затруднительным.

В настоящее время для исследования климата на масштабах 10 - 100 км ведущими исследовательскими центрами США; Германии, Японии и целого ряда других стран применяются физически полные гидродинамические модели высокого пространственного разрешения, построенные для отдельных регионов и включающие атмосферу, деятельный слой почвы и внутриматериковые водоемы. При расчете климата с помощью региональных моделей учитываются большая неоднородность свойств - подстилающей поверхности, малые внутренние водоемы, реалистичная орография и другие региональные особенности, не представленные в глобальных моделях.

В рамках настоящей работы построена и испытана модель регионального климата, встроенная в глобальную модель ГГО и предназначенная для расчета характеристик атмосферной циркуляции с высоким пространственным разрешением по горизонтали (50 км и менее). В качестве объекта исследования был выбран регион, включающий Европейскую территорию России. Географическими особенностями этого региона являются наличие больших внутренних водоемов, играющих важную роль в формировании локального влагооборота: Черное, Азовское и Каспийское моря на юге России; Балтийское и Белое моря на севере, а также такие крупные озера, как Ладожское, Онежское и Чудское. За последние - 40 лет в результате активной хозяйственной деятельности было построено около десяти крупных водохранилищ на территории России и сопредельных государств. Такие искусственные водоемы также играют определенную роль в формировании локального климата, ослабляют его континентальность как зимой, так и летом и влияют на распределение осадков. Наконец, горные системы Карпат, Скандинавии, Кавказа и Урала существенно влияют на перемещение воздушных масс над Восточно-Европейской равниной. Перечисленные особенности выбранного региона представлены в глобальных моделях весьма грубо или вообще отсутствуют.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью сокращения возникшего за последние 10 лет отставания России от развитых стран в области гидродинамического моделирования регионального климата.



### Цели и задачи работы

Целью представленной работы являлось построение гидродинамической модели регионального климата, предназначенной для расчета характеристик атмосферной циркуляции с высоким пространственным разрешением. В задачи работы входили

- формулировка физико-математической модели общей циркуляции атмосферы для ограниченной территории;
- построение численной схемы интегрирования полных уравнений гидротермодинамики при наличии боковых граничных условий;
- разработка алгоритма сопряжения глобальной и региональной сеточных областей;
- подключение и настройка блока параметризаций физических процессов;
- создание системы анализа модельных расчетов;
- моделирование циркуляции, термического режима и влагооборота атмосферы на европейской части России и сопредельных стран;

### Научная новизна работы

Впервые в России разработана и испытана гидродинамическая региональная модель для исследования климата.

### Научная и практическая ценность

Можно указать некоторые области применения построенной региональной модели:

- моделирование с высоким пространственным (50 км и менее) разрешением региональных климатических изменений в результате регионального и глобального антропогенного воздействия;
- моделирование региональных климатических изменений вследствие изменений физико-географических факторов (например, землепользования);
- прогноз погоды в регионе с высокой пространственной детализацией;
- распространение примесей при расчете регионального загрязнения атмосферы.

Развитие модели и проведение с ней исследований поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 94-05-17416, 01-05-64902 и 02-05-64929).

### Апробация работы

Основные положения и результаты представляемой работы докладывались на

- конференции, посвященной 150-летию ГТО им. А.И.Воейкова (С.Петербург, 1999);
- конференции молодых ученых "Гидродинамические методы прогноза погоды и исследования климата" в ГТО им. А.И. Воейкова (С.Петербург, 2001);
- Первой и Второй Корейско-Российских конференциях по изменению климата (Чеджу-до, Республика Корея, 2001; СПб, 2003);
- Всероссийской конференции "Фундаментальные исследования взаимодействия суши, атмосферы и океана" (Москва, 2002);
- рабочем совещании по проблемам моделирования атмосферной циркуляции на ограниченной территории с высоким пространственным разрешением "HIRLAM workshop" (С.Петербург, 2003);
- организованном в рамках Всемирной программы исследования климата международной рабочей конференции по моделированию регионального

климата "High-resolution climate modelling: assessment, added value and applications" (Лунд, Швеция, 2004);

- научных семинарах ГТО (С.Петербург, 2004).

#### Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них 2 статьи в российских рецензируемых журналах и 5 в зарубежных изданиях.

#### Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 107 страниц, из которых 17 страниц заняты рисунками. В тексте диссертации приводится 8 таблиц, список литературы включает 91 ссылку.

### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обсуждаются современные методы исследования регионального климата, отмечаются их преимущества и недостатки. Обосновывается актуальность проблемы исследования регионального климата с помощью физически полной гидродинамической модели. Формулируются основные цели и задачи работы, показывается ее новизна и практическая ценность.

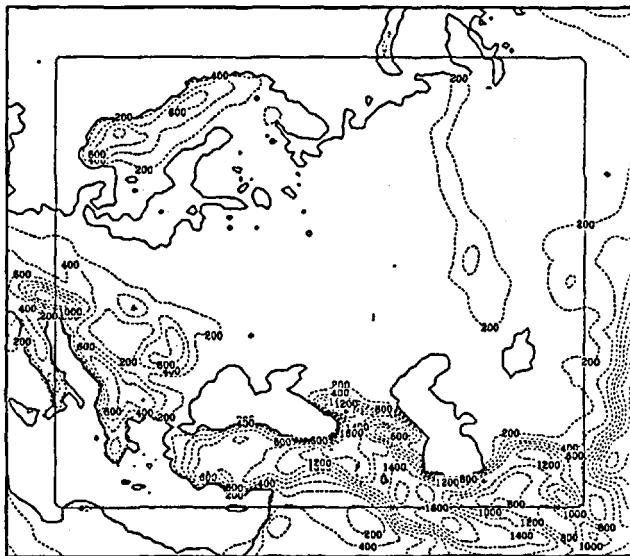
Глава 1 содержит обзор литературы, посвященной разработке региональных моделей и их применению в исследованиях климата. Особое внимание уделяется используемым методам пространственно-временной аппроксимации полных уравнений в ограниченной области, применяемым сеточным шаблонам, способам постановки боковых граничных условий и влиянию размера ограниченной области на качество расчетной атмосферной циркуляции.

Глава 2 содержит описание разработанной автором модели регионального климата. Обсуждаются методы пространственной и временной аппроксимации полных уравнений с учетом особенностей решения задачи в ограниченной области. Приведены описания схем параметризации физических процессов и метода ассимиляции боковых граничных условий.

*Раздел 1.* Рассматривается исходная система уравнений модели и граничные условия. При построении модели регионального климата (МРК) использована дивергентная форма полных уравнений гидротермодинамики в гидростатическом приближении, сохраняющая полную энергию и массу в адиабатическом приближении для замкнутой области. По вертикали использована **σ-система** координат. Основными прогностическими переменными являются атмосферное давление на подстилающей поверхности, компоненты вектора скорости ветра, температура и удельная влажность воздуха. Дифференциальные уравнения записаны с учетом отображения на плоскость картографической проекции, неадиабатических притоков субстанций, а также членов, ответственных за ассимиляцию глобальных данных в буферной зоне (см. *Раздел VI*).

*Раздел II.* Рассматривается область интегрирования модельных уравнений. Область имеет площадь  $\sim 3 \times 10^7$  км<sup>2</sup> и включает 105x121 узлов горизонтальной сетки со средним шагом около 50 км. Отображение участка поверхности Земли на плоскость выполняется с использованием либо полярной стереографической проекции, имеющей истинный масштаб на широте 60° с.ш., либо проекции Ламберта с истинным масштабом на широтах 45° и 64° с.ш. Отображения реализованы с помощью специально построенных для этой цели численных алгоритмов. В разделе показаны

конфигурации материков и океанов, а также поле рельефа, принятые в модели (см. рис.1).



**Рис.1** Конфигурации материков и океанов, а также поле орографии (м), принятые в региональной модели. Внутренняя граница буферной зоны (см. Раздел VI) обозначена прямоугольником.

*Раздел III.* Приводится пространственная аппроксимация уравнений модели. Для записи модельных уравнений в конечно-разностной форме использована схема, сохраняющая массу, момент количества движения и полную энергию для замкнутой области при отсутствии источников и стоков энергии. Основные переменные рассматриваются как средние по  $\sigma$ -слою. Оригинальная схема аппроксимации уравнений включала формулировку вертикальных разностей для равномерной сетки. Выполнена модификация этой аппроксимации для случая неравномерного распределения  $\sigma$ -поверхностей, принятого в модели. Эти поверхности распределены в толще атмосферы таким образом, что 5 модельных слоев расположены ниже уровня 850 гПа.

*Раздел IV.* Приводится аппроксимация членов уравнений, содержащих производные по времени. Для расчета адиабатических тенденций используется явная двухшаговая схема. Для получения двух временных уровней первый шаг интегрирования выполняется по абсолютно устойчивой неявной схеме Эйлера. После однократного применения схемы Эйлера интегрирование продолжается по явной двухшаговой схеме, которая является комбинацией нейтральной и неустойчивой схем. Нечетные шаги выполняются по схеме Адамса-Бешфорта, четные - по схеме центральных разностей. В исследованиях, посвященных анализу устойчивости конечно-разностных схем, показано, что комбинация схем Адамса-Бешфорта и центральных разностей в результате дает устойчивую схему, обеспечивая

интегрирование системы уравнений на длительные сроки. Расчет неадиабатических притоков тепла, влаги и момента количества движения производится по явной схеме Эйлера в центральный момент времени. Расчет членов уравнений, ответственных за ассимиляцию глобальных данных на боковых границах области, представлен неявно на каждом шаге интегрирования по времени.

*Раздел V.* Приводится описание схем параметризации физических процессов, которые учитываются в региональной модели. Эти процессы аналогичны тем, которые используются в глобальной модели, разработанной в Главной геофизической обсерватории им.А.И.Воейкова:

- радиационный перенос тепла в атмосфере с учетом облачности;
- вертикальный турбулентный обмен теплом, влагой и количеством движения;
- конвективный перенос тепла и водяного пара (по методу Тидтке);
- процессы тепло- и влагообмена на подстилающей поверхности;
- орографическое гравитационно-волновое сопротивление;
- горизонтальная диффузия.

Расчет температуры поверхности внутренних водоемов в региональной модели проводится с помощью однослойной модели перемешанного слоя, толщина которого принимается равной 30 м для всех водоемов. В разделе также рассматриваются особенности численной реализации горизонтальной диффузии в условиях сложной орографии. В модели численно реализована схема расчета диффузии в  $\sigma$ -системе координат, аналогичная используемой в моделях MM4 Национального Центра Атмосферных Исследований США, HIRHAM3(4) Датского Метеорологического Института и некоторых других. Горизонтальный обмен количеством движения, теплом и влагой описывается линейным оператором четвертого порядка в  $\sigma$ -системе координат с коэффициентом, зависящим от величины топографического градиента таким образом, что в рассматриваемой области этот коэффициент может уменьшаться на порядок вблизи крутых горных склонов Кавказа и Памира. Как выяснилось из проведенных с помощью модели тестовых расчетов, такое локальное уменьшение коэффициента оказывается достаточным, чтобы эффекты ложной диффузии не приводили к заметным искажениям полей температуры и осадков.

*Раздел VI.* Рассматривается метод аппроксимации членов уравнений, ответственных за ассимиляцию данных глобальной модели на боковых границах области. Аппроксимация этих членов сводится к локальной коррекции численного решения в буферной зоне (см. рис.1) для зависимой переменной  $\xi$  следующего вида

$$\xi_j^{\tau+1} = (1 - \alpha_j) \tilde{\xi}_j^{\tau+1} + \alpha_j \bar{\xi}_j^{\tau+1}, \quad j \leq M. \quad (1)$$

Здесь  $\tilde{\xi}_j$  - значение переменной в точке  $j$ , полученное при решении системы уравнений региональной модели,  $\bar{\xi}_j$  - значение крупномасштабной переменной в этой же точке, полученное при решении системы уравнений глобальной модели,  $\alpha$  - коэффициент релаксации,  $M$  - максимальное число строк (столбцов) в буферной зоне,  $\tau$  - дискретный момент времени. Вклад прогностического значения, полученного по глобальной модели, на внешней границе буферной зоны ( $j=1$ ) составляет 100% и примерно 0.5% на ее внутренней границе ( $j=9$ ). При  $j>9$   $\alpha=0$ . Соотношение (1) также используется при переходе от глобальной к региональной орографии.

Для расчета  $\alpha_j$  была использована экспоненциальная функция, предложенная в некоторых работах по исследованию регионального климата. Тестовые эксперименты показали, что реализация буферной зоны определенной ширины с использованием

указанной функции гарантирует абсорбцию быстрых гравитационных волн при численном интегрировании системы уравнений региональной модели. Проведенные численные эксперименты показывают, что примененная схема ассимиляции позволяет проводить интегрирование уравнений региональной модели на длительные сроки, эффективно подавляя вычислительные шумы, генерируемые на сетке региональной модели из-за некорректной постановки боковых граничных условий.

Особенностью современной версии модели является отказ от применения описанного алгоритма постановки граничных условий для удельной влажности. Практика регионального моделирования показывает, что использование буферной релаксации для переменной, характеризующей влагосодержание модельной атмосферы, может приводить к возникновению значительных градиентов влажности в окрестности боковой границы. Наличие этих градиентов является причиной фиктивной конвергенции влаги и искажения крупномасштабной картины осадков. Для уменьшения этих нежелательных эффектов при расчете горизонтальных производных поля удельной влажности использован алгоритм «свободного втока-вытока», позволяющий обеспечить лучшую согласованность глобального и регионального полей влажности. Условия «свободного втока-вытока» численно реализованы с помощью линейной экстраполяции значения влажности из приграничных узлов сетки в узлы на боковой границе в том случае, когда нормальная составляющая вектора горизонтального ветра в приграничном узле указывает на выток из области. Наоборот, когда нормальная составляющая вектора ветра указывает на вток, пространственные производные вычисляются с учетом глобального значения на границе. При этом граничные условия для остальных зависимых переменных учитываются согласно (1). Проведенные эксперименты показали, что при использовании принятого алгоритма фиктивное увеличение осадков вдоль боковых границ области является незначительным по сравнению с ранее принятым алгоритмом расчета горизонтальных производных поля удельного влагосодержания.

*Раздел VII.* Кратко рассмотрены применяемые подходы к подготовке глобальных полей для их использования в региональной модели. Процедуры подготовки включают пространственно-временную интерполяцию полей глобальных переменных в сетку региональной модели, трансформацию компонент вектора скорости ветра при переходе от сферической к декартовой системе координат, особенности задания орографии и свойств подстилающей поверхности.

*Глава 3* посвящена оценке качества воспроизведения современного климата с помощью разработанной модели. При исследовании климата с помощью региональной модели точность расчетов зависит как от качества воспроизведения глобальной моделью наблюдаемой атмосферной циркуляции, так и от способности самой региональной модели воспроизводить эту циркуляцию в регионе. Поскольку расчеты с помощью глобальной и региональной моделей содержат систематические ошибки, то взаимодействие последних может приводить к росту суммарной ошибки в рассматриваемой области. Поэтому сделать вывод о качестве региональной модели с использованием данных одной глобальной модели климата представляется затруднительным. Чтобы понять природу и оценить вклад каждого типа ошибок, необходимо последовательно выполнить их анализ с привлечением боковых граничных условий, рассчитанных, в одном случае, по данным реанализа Национального Центра Предсказаний Состояния Окружающей Среды и Национального Центра Атмосферных Исследований США (реанализ **NCEP/NCAR**), в другом - по данным глобальной модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) ГТО. Сравнение двух вариантов расчета с данными наблюдений позволяет сделать выводы о вкладе каждой из ошибок в суммарную ошибку расчета регионального климата. Реализация описанного подхода

дает возможность правильно оценить качество построенной модели и ее пригодность для исследования регионального климата.

Рассматриваются результаты 5-летних расчетов сезонного хода климатических характеристик с привлечением как данных реанализа на боковых границах, так и данных глобальной МОЦА. Интегрирование уравнений МРК на такие сроки и соответствующие статистики достаточны для валидации моделей регионального климата с использованием наблюдаемых и расчетных характеристик атмосферной циркуляции на боковых границах области.

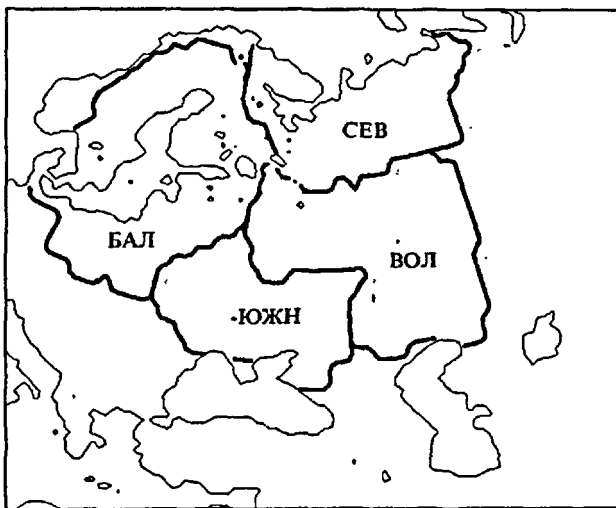


Рис.2 Основные водосборы региона: Балтийский (БАЛ), северных рек (СЕВ), включающий водосборы Северной Двины, Мезени и Печоры, южных рек (ЮЖН), включающий реки Днестр, Днепр и Дон, и водосбор рек Волга и Урал (ВОЛ). Подобласть, включающая буферную зону, на рисунке не показана.

Анализ результатов расчетов выполнен как для указанного региона в целом, так и для территорий водосборов рек на европейской территории России и сопредельных стран. В работе выделены четыре системы водосборов: Балтийского моря, включающего реки Скандинавии, Польши, прибалтийских стран и северо-запада России, северных рек европейской территории России (Северной Двины, Мезени, Печоры и некоторых других), южных рек (Днестр, Днепр и Дон), а также рек Волга и Урал. Для удобства эти системы водосборов сокращенно названы как БАЛ, СЕВ, ЮЖН и ВОЛ (см. рис.2). Каждый из указанных водосборов имеет свои особенности теплового и гидрологического режимов, расчетные характеристики которых сравниваются с данными наблюдений.

*Раздел 1* посвящен описанию численных экспериментов. При интегрировании уравнений региональной модели использованы два набора начальных и боковых граничных условий, рассчитанных как по данным реанализа, так и по глобальной модели. Данные глобального реанализа **NCEP/NCAR** получены по каналу Интернет. Они имеют горизонтальное разрешение  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  и включают давление на уровне моря,

температуру воздуха, зональную и меридиональную составляющие скорости ветра и удельную влажность на 17 изобарических уровнях с 1 января 1982 года по 31 декабря 1987 года с 6-ти часовым интервалом. Кроме того, были получены среднемесячные поля температуры поверхности океанов, концентрации морского льда и некоторых других характеристик подстилающей поверхности за указанный период времени.

В расчетах также использовались граничные условия, полученные из глобальной модели атмосферы ГГО **T42L14** (разрешение 250 км). Эти данные были получены из ранее выполненного эксперимента по протоколу **АМIP-II** (проект сравнения глобальных моделей атмосферы, вторая фаза) сроком на 17 лет при заданной среднемесячной ТПО с января 1979 года по октябрь 1996 года. Из этого архива данных были получены поля требуемых переменных с временным интервалом 6 часов за период с 1982 по 1987 годы для последующего использования в региональной модели.

С помощью специальных процедур интерполяции данные реанализа, результаты расчетов по глобальной модели, поля наблюдаемых ТПО и концентрации морского льда, имеющие различные пространственные разрешения, трансформировались в единую сетку региональной модели. Данные реанализа были предварительно представлены в сетке, соответствующей спектральному разрешению глобальной МОЦА. Для задания свойств подстилающей поверхности как в региональной, так и в глобальной моделях использовался единый архив данных высокого разрешения  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Вместе с тем, свойства подстилающей поверхности в глобальной и региональной моделях существенно различаются степенью пространственной детализации. Начальные распределения массы снега, а также температуры и влажности деятельного слоя почвы соответствовали рассчитанным либо в модели реанализа, либо в глобальной модели на 1 января 1982 года.

Проведены два эксперимента с построенной региональной моделью сроком на 6 лет каждый, при заданной ТПО и концентрации морского льда за период с 1 января 1982 года по 31 декабря 1987 года. Период с 1982 по 1987 годы выбран из следующих соображений. В ряде исследований показано, что наблюдения за температурой и осадками на сетке высокого разрешения за этот период являются более надежными по сравнению с данными наблюдений за другие годы.

Принимая во внимание время адаптации влажностного режима в деятельном слое почвы, результаты первого года расчетов исключены из анализа, который проводился для 5-ти летнего периода с 1983 по 1987 годы.

Эксперимент с данными реанализа на боковых границах назван РЕАН, а эксперимент с граничными условиями, полученными из глобальной климатической модели - МОД.

Из обширной базы модельных характеристик для анализа были выбраны атмосферное давление на уровне моря и характеристики радиационного и водного балансов, включая баланс солнечной радиации и температуру воздуха у поверхности Земли, осадки, испарение и сток.

*Раздел II.* Рассматриваются результаты расчетов современного климата для территории России. Сначала на примере среднегодовых пространственных распределений приземной температуры воздуха и осадков показывается степень пространственной детализации глобальных полей, которая достигается с помощью региональной модели.

Затем в работе оценивается точность расчета региональной моделью современного климата. При анализе результатов экспериментов РЕАН и МОД в качестве наблюдений за давлением на уровне моря использованы данные реанализа, а наблюдений за приземной температурой и осадками - широко используемый при валидации региональных моделей глобальный архив наблюдений с пространственным

разрешением  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , сформированный Группой исследования климата из Университета Восточной Англии. Поля с таким разрешением лучше описывают мезомасштабную структуру температуры и осадков по сравнению с данными реанализа.

В таблице 1 представлены среднеквадратические и средние ошибки (соответственно СКО и СО) расчетных полей давления на уровне моря, приземной температуры воздуха и осадков, полученные в экспериментах РЕАН и МОД. Из таблицы видно, что успешность расчета давления на уровне моря, как правило, в эксперименте РЕАН выше по сравнению с МОД. Вместе с тем, в обоих случаях давление несколько занижено во всей области как в отдельные сезоны, так и в целом за год. Наибольшие систематические ошибки обнаруживаются в центральных и восточных частях региона (до -4 гПа зимой и до -5 гПа летом). Летом систематические ошибки в экспериментах РЕАН и МОД получились достаточно близкими. Однако, зимой и весной в эксперименте РЕАН занижение давления оказалось примерно в 2 раза меньшим по сравнению с МОД. Важно отметить, что глобальная и региональная модели занижают межгодовую изменчивость давления на уровне моря в рассматриваемой области на 20-30% по сравнению с данными реанализа. Кроме того, необходимо принимать во внимание различия алгоритмов расчета давления на уровне моря в МРК и модели реанализа.

**Таблица 1. Среднеквадратические (СКО) и средние (СО) за год ошибки расчета давления на уровне моря, приземной температуры и осадков, полученные для всей области расчетов в экспериментах РЕАН и МОД**

|  | РЕАН |      | МОД |      |
|--|------|------|-----|------|
|  | СКО  | СО   | СКО | СО   |
| <b>Давление на уровне моря, гПа</b>      |      |      |     |      |
| <b>Зима</b>                              | 2.2  | -1.6 | 4.1 | -3.0 |
| <b>Весна</b>                             | 2.3  | -1.7 | 4.2 | -3.5 |
| <b>Лето</b>                              | 2.9  | -2.3 | 3.4 | -2.6 |
| <b>Осень</b>                             | 2.4  | -1.6 | 2.1 | -0.6 |
| <b>Год</b>                               | 2.4  | -1.8 | 3.0 | -2.5 |
| <b>Приземная температура воздуха, °С</b> |      |      |     |      |
| <b>Зима</b>                              | 2.2  | -0.2 | 2.8 | -1.3 |
| <b>Весна</b>                             | 2.3  | -1.1 | 3.0 | -1.8 |
| <b>Лето</b>                              | 2.5  | -0.7 | 3.2 | -0.4 |
| <b>Осень</b>                             | 2.0  | -0.9 | 2.5 | -0.7 |
| <b>Год</b>                               | 1.9  | -0.7 | 2.5 | -1.0 |
| <b>Осадки, мм/сут</b>                    |      |      |     |      |
| <b>Зима</b>                              | 0.6  | 0.0  | 0.5 | 0.1  |
| <b>Весна</b>                             | 1.1  | 0.6  | 0.9 | 0.6  |
| <b>Лето</b>                              | 1.2  | 0.7  | 0.9 | 0.5  |
| <b>Осень</b>                             | 0.8  | 0.3  | 0.6 | 0.1  |
| <b>Год</b>                               | 0.8  | 0.4  | 0.6 | 0.3  |

Среднеквадратические и средние за год ошибки приземной температуры в эксперименте РЕАН оказались меньшими на 20-25% по сравнению с МОД. При этом вклад систематических ошибок температуры (заниженные значения по сравнению с наблюдениями) в суммарную среднеквадратическую ошибку получился заметно меньшим, чем в аналогичном случае с давлением. Более того, если рассматривать

систематические ошибки температуры в отдельные сезоны, то преимущества эксперимента РЕАН перед экспериментом МОД не столь очевидны. Это говорит о том, что граничные условия оказывают слабое влияние на формирование термического режима у подстилающей поверхности в отдельные сезоны и важную роль здесь играют процессы, описываемые региональной моделью.

Что касается успешности расчета осадков, то преимущества эксперимента РЕАН по отношению к эксперименту МОД не прослеживаются как в отдельные сезоны, так и в среднем за год (см. табл. 1). В обоих экспериментах обнаруживается завышение средних за год осадков по региону на 15-30% по сравнению с данными наблюдений. Причин здесь может быть несколько: большие ошибки расчета осадков в областях со сложным рельефом в обоих экспериментах; большая пространственно-временная изменчивость расчетных и наблюдаемых осадков, не позволяющая получить статистически значимые результаты на временном интервале с периодом 5 лет; недостаточно высокое качество наблюдений за осадками в областях со сложным рельефом. В различных работах, посвященных анализу данных наблюдений, указывается на то, что количество наблюдений за осадками (температурой) на равнинных территориях существенно превышает количество наблюдений за этими характеристиками в горной местности. В этой связи проводится аналогичный анализ на отдельных крупных водосборах рек, которые имеют удовлетворительную сеть наблюдений и на которых отсутствует сложная орография.

Далее рассматривается точность расчета моделью сезонного хода поглощенной радиации на подстилающей поверхности и приземной температуры воздуха на водосборах. Архив среднемесячных данных наблюдений радиационных потоков на подстилающей поверхности подготовлен исследовательским центром Лэнгли Национального Аэрокосмического Агентства США на основе спутниковых измерений. Сезонный ход поглощенной радиации на водосборах в обоих экспериментах удовлетворительно воспроизводится региональной моделью. В обоих экспериментах (в первую очередь в эксперименте РЕАН) заметна тенденция к некоторому завышению поглощенной радиации летом (примерно на 10-15 Вт/м<sup>2</sup>) на отдельных водосборах. Сравнение использованных данных наблюдений с данными наблюдений из других источников показало, что различия между ними также находятся в диапазоне 10-15 Вт/м<sup>2</sup>.

Средний за 5 лет сезонный ход температуры в целом хорошо воспроизводится региональной моделью с обоими вариантами граничных условий. Вместе с тем, в эксперименте РЕАН обнаруживается несколько лучшая согласованность с данными наблюдений по сравнению с расчетом, включающим граничные условия из глобальной модели. Хотя выхолаживание заметно на всех четырех водосборах, его величина оказывается неодинаковой. Так, например, в эксперименте РЕАН на водосборах СЕВ и ЮЖН среднее за год выхолаживание получилось меньшим по сравнению с выхолаживанием во всей региональной области. С другой стороны, на водосборе БАЛ, расположенном ближе других к западной границе, в эксперименте РЕАН выхолаживание оказывается в 1.5 раза большим, чем среднее по всей области, приведенное в таб. 1.

Согласованность между расчетными и наблюдаемыми кривыми сезонного хода осадков на всех водосборах несколько меньшая, чем в случае с температурой. В расчетах с обоими вариантами граничных условий несколько завышаются осадки, преимущественно в теплое время года (это особенно проявляется на водосборах СЕВ, ЮЖН и ВОЛ). Более того, максимум сезонного хода имеет тенденцию к смещению на 1-2 месяца к началу года на водосборах БАЛ и СЕВ. Это смещение фазы сезонного хода осадков слабее выражено в расчетах с данными реанализа на боковых границах.

**Таблица 2. Среднеквадратические (СКО) и средние (СО) за 5 лет ошибки расчета осадков (мм/сут) на водосборах в экспериментах РЕАН и МОД.**

|            | БАЛ         |             | СЕВ         |             | ЮЖН         |             | ВОЛ         |             |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|            | РЕАН        | МОД         | РЕАН        | МОД         | РЕАН        | МОД         | РЕАН        | МОД         |
| <b>СКО</b> | <b>0.26</b> | <b>0.41</b> | <b>0.45</b> | <b>0.49</b> | <b>0.37</b> | <b>0.59</b> | <b>0.47</b> | <b>0.49</b> |
| <b>СО</b>  | <b>0.02</b> | <b>0.04</b> | <b>0.03</b> | <b>0.11</b> | <b>0.25</b> | <b>0.32</b> | <b>0.26</b> | <b>0.28</b> |

В таб. 2 показаны среднеквадратические и средние за год ошибки расчета осадков на водосборах. Из сравнения полученных в целом для всей региональной области оценок (таб. 1) с оценками для отдельных водосборов в таб. 2 видно следующее.

Во-первых, успешность расчета осадков на всех водосборах получилась несколько выше по сравнению с расчетами для всей региональной области при использовании обоих вариантов боковых граничных условий.

Во-вторых, на всех водосборах ошибки расчета осадков в эксперименте РЕАН оказались несколько меньше тех, которые получились в эксперименте МОД. Это обстоятельство подтверждает ранее высказанное предположение, что регионы со сложной орографией (Кавказ, Памир, Альпы и др.), находящиеся за пределами рассматриваемых водосборов, оказывают заметное влияние на успешность расчета осадков.

Важной характеристикой водного баланса на водосборах крупных рек является средний за год сток, который либо непосредственно рассчитывается в каждом узле сетки модели путем решения уравнения водного баланса деятельного слоя почвы, либо определяется как разность между осадками и испарением на всей площади водосбора. В этой связи представляет интерес сравнить рассчитанные по региональной модели стоки с данными наблюдений. Имеющиеся наблюдения за стоками на водосборах рек получены по данным гидрологической сети станций и опубликованы в ряде работ.

Модель несколько занижает стоки на всех водосборах (на 10-50%) по сравнению с наблюдениями в расчетах с обоими типами граничных условий, причем это занижение сильнее выражено при использовании данных реанализа на боковых границах. Сравнения с данными наблюдений расчетных стоков на водосборах БАЛ и реки Дунай, выполненные по результатам экспериментов с несколькими европейскими региональными моделями, показали, что в этих моделях отклонения расчетных значений стоков от наблюдаемых также находятся в диапазоне 50%. При этом в качестве боковых граничных условий в этих моделях также были использованы данные реанализа. Причины занижения стока в региональной модели пока недостаточно ясны. Оно может быть вызвано влиянием большого числа факторов с обратными связями, среди которых определяющими могут быть занижение количества осадков и избыточное испарение. Однако, как показано, региональная модель несколько завышает среднегодовые осадки в расчетах с обоими типами граничных условий. Испарение в значительной степени определяется радиационным балансом на подстилающей поверхности, который, в свою очередь, зависит от облачности. Как установлено, летом на водосборах имеет место несколько завышенный поток солнечной радиации, по-видимому, связанный с соответствующим распределением облачности. Этот дополнительный поток, мог послужить причиной завышенного испарения с подстилающей поверхности.

В работе приводятся оценки успешности воспроизведения региональной моделью межгодовой и внутригодовой изменчивости среднемесячных значений температуры и осадков на рассматриваемых водосборах. Эта изменчивость

определяется изменчивостью крупномасштабных воздействий, рассчитанной глобальной моделью на боковых границах региональной области, а также взаимодействиями физических и динамических процессов в атмосфере с подстилающей поверхностью, которые протекают внутри самой региональной области. Таким образом, модель описывает межгодовые и внутригодовые колебания, которые определяются комбинацией факторов изменчивости регионального и глобального масштабов. Важно отметить, что внутренняя изменчивость атмосферы в области, рассчитанная с помощью региональной модели, по-видимому, не должна быть меньше изменчивости, рассчитанной глобальной моделью, поскольку модель явно описывает взаимодействия более широкого пространственного и временного диапазонов.

В качестве характеристики изменчивости рассматривались стандартные отклонения рассчитанных (наблюдаемых) значений среднемесячных приземной температуры и осадков от соответствующих средних за период с 1983 по 1987 годы на каждом водосборе.

В таб. 3 представлены стандартные отклонения среднемесячных температуры воздуха и осадков от их средних значений, полученные по данным наблюдений, реанализа, в экспериментах РЕАН и МОД, а также в результате расчетов по глобальной модели. Из таблицы видно, что наибольшую изменчивость приземной температуры воздуха показывают данные наблюдений, а наименьшую - расчеты по глобальной модели. Изменчивость температуры в глобальной модели составляет 60-65% от наблюдаемой на водосборах БАЛ и СЕВ и 83% на водосборах ЮЖН и ВОЛ.

**Таблица 3. Стандартные отклонения среднемесячных температуры и осадков от их средних значений за период с 1983 по 1987 годы, рассчитанные по данным наблюдений (НАБ), реанализа (NCEP/NCAR), региональной модели в экспериментах РЕАН (РЕАН) и МОД (МОД) и глобальной модели (ГМ).**

|                        | БАЛ  | СЕВ  | ЮЖН  | ВОЛ  |
|------------------------|------|------|------|------|
| <b>температура, °С</b> |      |      |      |      |
| НАБ                    | 2.17 | 2.83 | 2.18 | 2.23 |
| NCEP/NCAR              | 1.90 | 2.37 | 1.91 | 2.02 |
| РЕАН                   | 1.66 | 2.08 | 2.00 | 2.08 |
| МОД                    | 1.64 | 1.77 | 1.66 | 1.66 |
| ГМ                     | 1.43 | 1.70 | 1.81 | 1.88 |
| <b>осадки, мм/сут</b>  |      |      |      |      |
| НАБ                    | 0.39 | 0.33 | 0.37 | 0.35 |
| NCEP/NCAR              | 0.59 | 0.45 | 0.65 | 0.56 |
| РЕАН                   | 0.39 | 0.38 | 0.38 | 0.39 |
| МОД                    | 0.35 | 0.36 | 0.36 | 0.34 |
| ГМ                     | 0.29 | 0.32 | 0.35 | 0.31 |

Данные реанализа также описывают меньшую изменчивость температуры, которая в зависимости от водосбора варьируется в диапазоне 75-90% от наблюдаемой. В эксперименте МОД изменчивость приземной температуры на всех водосборах получается всегда больше, чем в глобальной модели, но меньше, чем показывают данные наблюдений и реанализа.

При расчетах с данными реанализа на боковых границах изменчивость температуры возрастает, чего и следовало ожидать, принимая во внимание большую изменчивость температуры в данных реанализа по сравнению с изменчивостью этой

характеристики в глобальной модели. Однако, на двух водосборах изменчивость оказалась больше, а на двух других - меньше изменчивости температуры в данных реанализа.

Что касается изменчивости осадков по данным глобальной модели, то она получилась достаточно близкой к наблюдаемой на всех водосборах, в то время как изменчивость осадков в реанализе оказалась в 1,4 - 1,8 раза больше наблюдаемой. Близкой к наблюдаемой также оказалась изменчивость в расчетах по региональной модели в экспериментах РЕАН и МОД.

Как отмечено, в качестве наблюдений за рассматриваемый период с 1983 по 1987 гг. используются два набора полей приземной температуры и осадков различного горизонтального разрешения, которые характеризуют распределения указанных переменных с разной степенью пространственной детализации. Поля реанализа, имеющие более грубое горизонтальное разрешение, описывают крупномасштабные распределения рассматриваемых переменных. Поэтому поля данных наблюдений, имеющие более высокое разрешение по сравнению с полями реанализа, в принципе, лучше подходят для оценок качества расчетов по региональной модели.

Далее в работе оценивается, насколько успешно региональная модель воспроизводит временной ход аномалий приземной температуры и осадков за период 1983-1987 гг. (60 значений для каждой переменной) на четырех водосборах. Расчетные и наблюдаемые аномалии на каждом водосборе определены как отклонения соответствующих среднемесячных переменных для каждого месяца пятилетнего периода от среднемесячных значений за весь период. Таким образом, из временного хода среднемесячных значений температуры и осадков исключен средний за 5 лет сезонный ход. Показано, что модель воспроизводит аномалии, рассчитанные по данным наблюдений как в случае температуры, так и в случае осадков. Однако степень согласованности между модельными расчетами и данными наблюдений оказывается различной для различных водосборов, причем на водосборах ЮЖН и ВОЛ эта согласованность заметно ниже для осадков по сравнению с температурой.

Были рассчитаны коэффициенты временной корреляции среднемесячных аномалий в эксперименте РЕАН с аномалиями по данным наблюдений и реанализа за период с 1983 по 1987 годы. Эти коэффициенты приведены в таб. 4.

**Таблица 4. Коэффициенты корреляции между рассчитанными в эксперименте РЕАН и наблюдаемыми среднемесячными аномалиями приземной температуры (Т) и осадков (Р) на водосборах за период 1983-1987 гг. Коэффициенты корреляции с данными наблюдений и реанализа обозначены, соответственно, как R(НАБ) и R(реанализ).**

|             | БАЛ  |      | СЕВ  |      | ЮЖН  |      | ВОЛ  |      |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|             | Т    | Р    | Т    | Р    | Т    | Р    | Т    | Р    |
| R(НАБ)      | 0.90 | 0.89 | 0.80 | 0.65 | 0.66 | 0.34 | 0.66 | 0.31 |
| R(реанализ) | 0.89 | 0.79 | 0.79 | 0.50 | 0.64 | 0.24 | 0.63 | 0.21 |

Из таблицы видно, что более высокая корреляция для температуры и, особенно, для осадков получается в случае, когда модельные аномалии сравниваются с данными наблюдений более высокого пространственного разрешения, а не с данными реанализа. Это говорит о том, что региональная модель правильно воспроизводит некоторые мезомасштабные особенности распределения температуры и осадков, что способствует повышению качества расчета этих переменных по сравнению с глобальной моделью. Более заметно это проявляется для осадков, что представляется естественным, учитывая их сложную мезомасштабную структуру. По-видимому, более низкая

корреляция с обоими типами данных наблюдений на водосборах ЮЖН и ВОЛ обусловлена тем обстоятельством, что эти водосборы располагаются несколько дальше от боковых границ, чем водосборы БАЛ и СЕВ, и поэтому на них меньше сказывается влияние боковых граничных условий и, соответственно, в большей степени проявляются систематические ошибки расчетов.

#### Заключение и выводы

В работе получены следующие основные результаты:

1. Сформулирована физико-математическая модель атмосферной циркуляции на ограниченной территории. Модель базируется на системе полных уравнений гидротермодинамики в гидростатическом приближении;
2. Решена задача построения согласованной конечно-разностной аппроксимации на основе описанных в литературе подходов к численному решению полных уравнений гидротермодинамики; аппроксимация выполнена с учетом неравномерности вертикальной сетки;
3. Численно реализован один из методов ассимиляции боковых граничных условий. Проведены тестовые эксперименты, которые показали, что принятая комбинация процедуры ассимиляции и пространственно-временной аппроксимации гарантирует гладкость решения внутри области расчетов при интегрировании уравнений региональной модели с учетом эволюции боковых граничных условий;
4. Разработан алгоритм сопряжения глобальной и региональной сеточных областей, алгоритм универсален - он позволяет проводить исследования климата любого региона Земли при наличии полей крупномасштабных переменных, однажды рассчитанных с помощью глобальной МОЦА;
5. Численно реализованы процедуры, позволяющие применять в региональной модели как полярную стереографическую проекцию, так и проекцию Ламберта для отображения участка сферической поверхности на плоскость. Использование различных проекций позволяет эффективно проводить вычисления для регионов, включающих как умеренные широты, так и полюса Земли;
6. Осуществлены подключение и настройка блока параметризаций физических процессов, используемого в глобальной климатической модели ГТО. Схема параметризации горизонтальной диффузии численно реализована для случая со сложной орографией;
7. Создан комплекс процедур для всестороннего анализа результатов расчетов;
8. Проведены расчеты современного климата с помощью разработанной модели. Интегрирование уравнений модели выполнялось дважды на срок с 1982 по 1987 годы. В первом случае для задания боковых граничных условий привлекались данные реанализа NCEP/NCAR, во втором - результаты расчетов глобальной модели климата. Использование данных реанализа позволило оценить потенциальную успешность модели при расчете климата;
9. В результате проведенных экспериментов установлено следующее:
  - модель успешно воспроизводит наблюдаемые мезомасштабные распределения приземной температуры воздуха и осадков; отдельные различия между расчетными и наблюдаемыми пространственными распределениями могут быть обусловлены как модельными погрешностями, так и ненадежностью данных наблюдений;
  - использование данных реанализа на боковых границах вместо данных глобальной модели климата приводит к заметному уменьшению ошибок расчета давления на уровне моря, приземной температуры воздуха и осадков на водосборах;

- вклад ошибок воспроизведения глобальной моделью климата атмосферной циркуляции в ошибку региональной модели при расчете приземной температуры воздуха и осадков составляет, соответственно, 1-2 °С и 10-50 % для областей с удовлетворительной сетью метеорологических наблюдений;
  - независимо от типа боковых граничных условий ошибки расчета осадков на водосборах, имеющих удовлетворительную сеть метеорологических станций, оказываются меньшими по сравнению с ошибками в горных районах;
  - с данными реанализа на границах региональная модель незначительно занижает давление на уровне моря (до -2 гПа) и приземную температуру воздуха (до -1°С). Осадки на водосборах получаются завышенными примерно на 5-15%. Эти погрешности оказываются близкими к тем, которые получаются в экспериментах с другими региональными моделями, построенными для других регионов Земли;
  - модель, по-видимому, несколько завышает испарение с подстилающей поверхности, что является причиной занижения годового стока;
  - межгодовые колебания среднемесячных значений температуры и осадков на водосборах лучше согласуются с данными наблюдений высокого пространственного разрешения, а не с данными реанализа, имеющими более грубое пространственное разрешение. Это свидетельствует о том, что повышение пространственно-временного разрешения при моделировании регионального климата способствует лучшему описанию изменчивости указанных характеристик.
10. Модель соответствует современному уровню развития региональных моделей и пригодна для исследования климата России совместно с глобальной моделью.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Школьник И.М., В.П. Мелешко, Т.В. Павлова. Региональная гидродинамическая модель атмосферы для исследования климата на территории России. Метеорология и гидрология, 2000,4, стр. 32-49.
2. Школьник И.М., В.П. Мелешко, В.М. Гаврилина. Воспроизведение сезонной циркуляции атмосферы моделью регионального климата ГТО. В сборнике Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы: Материалы Юбилейной Всероссийской конференции: Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 30 октября -1 ноября 2002, ред. С.А. Добролюбов. М.: МАКС Пресс, 2002, -288 стр.
3. Школьник И.М., В.П. Мелешко, В.М. Гаврилина. Валидация региональной климатической модели ГТО. Метеорология и гидрология, 2004 (в печати).
4. Школьник И.М. О моделировании климата на ограниченной территории. Труды ГТО, 2001,550, стр.110-126.
5. **Shkolnik, I.M., V.P.Meleshko, V.M.Gavrilina, V.A. Govorkova. MGO Regional Climate Model: present-day climate simulations. HIRLAM workshop, 17-23 November, 2003, St.Petersburg, Russia, pp. 104-107.**
6. **Shkolnik, I.M. Simulation of atmospheric circulation patterns using the MGO RCM. In: Proc. of the 1<sup>st</sup> Korea-Russia Joint Workshop on Climate Change and Variability, Seogwipo KAL Hotel, Jeju, Korea, Dec. 18-20, 2001, pp. 33-38.**
7. **Shkolnik, I.M. and V.P.Meleshko. The MGO Regional Climate Model. In Research Activities In Atmospheric And Oceanic Modelling. Edited by A.Staniforth, report No.27, January 1998, pp. 7.34-7.35.**
8. **Shkolnik I.M., V.P.Meleshko, V.M.Gavrilina. MGO RCM: simulation of present-day climate over the Western Russia. A WCRP-sponsored Regional-Scale Climate Modelling**

Workshop "High-resolution climate modelling: assessment, added value and applications", Lund University, 29 March-2 April, 2004, Lund, Sweden, p. 46.

9. Meleshko V.P., G.S. Golytsin, I.M. Shkolnik, L.K. Efimova, V.A. Govorkova. Simulation of the heat and water cycles over lake Ladoga using a regional climate model. H.Simola, A.Y.Terzhevik, M.Viljanen, and J.I.Holopainen (eds). Proc. of the Fourth Int. Lake Ladoga Symp., 2002, Univ. of Joensuu, Publ. of Karelian Institute, 138: 470-475, 2003.

A handwritten signature in black ink, consisting of a series of fluid, connected strokes that form a stylized name, likely 'Golytsin'.

Заказ № 256

Отпечатано в ООО"КОПИ-Р", ул., Колокольная, 12

Подписано к печати 06.05.2004 г. Тираж 100 экз.

**№-9940**